



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

GUILHERME CREPALDI CAMARINI

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DA
ESTRUTURA NA PREVISÃO DE DESEMPENHO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Londrina
2021

GUILHERME CREPALDI CAMARINI

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DA
ESTRUTURA NA PREVISÃO DE DESEMPENHO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Heliana Barbosa Fontenele

Londrina
2021

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

C172 Camarini, Guilherme Crepaldi.
Análise de sensibilidade dos parâmetros da estrutura na previsão de desempenho de pavimentos flexíveis / Guilherme Crepaldi Camarini. - Londrina, 2021.
118 f. : il.

Orientador: Heliana Barbosa Fontenele.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.
Inclui bibliografia.

1. PerRoad - Tese. 2. Dimensionamento empírico-mecânico - Tese. 3. Delineamento fatorial fracionário - Tese. 4. Análise de sensibilidade global - Tese. I. Barbosa Fontenele, Heliana. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

GUILHERME CREPALDI CAMARINI

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DA
ESTRUTURA NA PREVISÃO DE DESEMPENHO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof^a. Dr^a. Heliana Barbosa
Fontenele
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof^a. Dr^a. Adriana Goulart dos Santos
Universidade do Estado de Santa Catarina -
UDESC

Prof. Dr. Rodrigo Rossetto Pescim
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 21 de outubro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar força, equilíbrio e sabedoria para vencer as adversidades que se colocaram em meu caminho ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Maria Mônica Crepaldi Camarini e Silvio Roberto Camarini, e aos meus avós, Áurea Rodrigues da Costa Camarini, João Camarini, Beatriz Terezinha Côrtes Crepaldi e Ulysses Crepaldi. Pessoas, educadores, que me incentivaram e depositaram suas energias para que eu seguisse o caminho da docência e pesquisa.

À minha esposa, Claudia Junqueira Crepaldi Camarini, e ao meu filho Luca Junqueira Crepaldi Camarini, pelo apoio emocional e paciência. E pela compreensão em meus momentos de ausência.

À minha orientadora, professora Doutora Heliana Barbosa Fontenele, pelos ensinamentos, paciência e confiança que depositou em mim. Passei por grandes evoluções nos âmbitos pessoal e profissional, graças às suas orientações.

À Universidade Estadual de Londrina, ao Centro de Tecnologia e Urbanismo, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e ao Laboratório de Engenharia de Transportes (LET-CTU), pela infraestrutura e apoio institucional e a todos os professores, colegas e amigos que fiz durante o mestrado, pelas contribuições para o meu crescimento pessoal e profissional.

À Universidade do Oeste Paulista, em especial ao pró-reitor acadêmico professor Doutor José Eduardo Creste, pela paciência e compreensão, que foram essenciais durante este percurso.

Ao professor Doutor Carlos Alberto Prado da Silva Junior, pelos ensinamentos e sugestões que me engrandeceram.

Ao Departamento de Estatística da Universidade Estadual de Londrina, em especial ao professor Doutor Guilherme Biz, pelas contribuições que foram essenciais desenvolvimento deste trabalho.

*“Seja sempre o melhor em tudo o que fizeres.
Nunca por vaidade, mas para servir melhor ao
seu irmão.”*

Áurea Rodrigues da Costa Camarini

CAMARINI, Guilherme Crepaldi. **Análise de sensibilidade dos parâmetros da estrutura na previsão de desempenho de pavimentos flexíveis**. 2021. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

RESUMO

O conhecimento da sensibilidade dos parâmetros dos materiais auxilia os projetistas de pavimentos a serem mais assertivos na remodelagem de estruturas de pavimentos flexíveis para obtenção de soluções com desempenhos previstos satisfatórios. Além disso, é importante para otimização da aplicação de recursos em ensaios laboratoriais, permitindo a dedicação dos esforços aos parâmetros mais sensíveis. O objetivo deste trabalho foi analisar a sensibilidade dos módulos de resiliência, espessuras, coeficientes de Poisson das camadas e suas interações na previsão do desempenho de pavimentos flexíveis. Para tanto, preliminarmente foi realizado um experimento fatorial fracionário de resolução IV para determinar as sensibilidades dos desempenhos por fadiga do revestimento e afundamento nas trilhas de roda, estimados pelo programa computacional PerRoad 4.4, aos 11 fatores da estrutura considerados. Na fase final desta pesquisa, foi realizado um experimento fatorial completo, contemplando os fatores considerados sensíveis no experimento fatorial fracionário. Por fim, foram desenvolvidos modelos matemáticos que traduzem as relações entre os defeitos e os fatores estudados, bem como análises das interações mais significativas. Os resultados do experimento fatorial apontam que os fatores da estrutura aos quais o defeito trincas por fadiga é mais sensível são: a espessura e o módulo de resiliência da camada asfáltica e o módulo de resiliência da camada de base. Esses 3 fatores apresentaram coeficientes fatoriais negativos, ou seja, a previsão de vida útil do pavimento aumenta quando atribuídos valores superiores a eles. Em relação à previsão do afundamento nas trilhas de roda, a espessura da camada asfáltica e o módulo de resiliência do subleito se destacaram como os mais sensíveis. Conclui-se que a espessura da camada asfáltica, considerando os dois defeitos estudados, é o fator fundamental em análises E-M de pavimentos flexíveis.

Palavras-chave: PerRoad; dimensionamento empírico-mecanístico; delineamento fatorial fracionário; análise de sensibilidade global; defeitos em pavimentos flexíveis.

CAMARINI, Guilherme Crepaldi. **Sensitivity analysis of structure parameters in predicting the performance of flexible pavements**. 2021. 118 p. Dissertation (Master's Degree in Engineering of Constructions and Sanitation) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

ABSTRACT

The knowledge of materials parameters sensitivity helps pavement designers to be more assertive in remodeling flexible pavement structures to obtain solutions with satisfactory expected performances. It is also important to optimize application of resources in laboratory tests, allowing to dedicate efforts to the most sensitive parameters. The objective of this research was to analyze the sensitivity of resilience modulus, thicknesses, Poisson's coefficients of the layers and their interactions in flexible pavements performance prediction. For this purpose, a fractional factorial design of resolution IV was performed to determine the sensitivities of performance due to fatigue cracking and rutting, estimated by PerRoad 4.4 software, to the 11 structural parameters considered. At the final stage of this research, a full factorial design was carried out, considering the parameters that resulted sensitive in the fractional factorial design. Finally, mathematical models were developed in order to represent the relationships between distresses and parameters studied, as well as the ranking of parameters and the most significant interactions. The results of fractional factorial design indicate that structural parameters to which fatigue cracking is most sensitive are: asphalt layer thickness and modulus and base course modulus. These 3 parameters presented negative factor coefficients, thus, predicted pavement design life increases when higher values are assigned to them. Regarding rutting prediction, thickness of asphalt layer and subgrade modulus stood out as the most sensitive. It is concluded that asphalt layer thickness, considering both distresses, is the fundamental parameter in E-M analysis of flexible pavements.

Key-words: PerRoad; mechanistic–empirical design; fractional factorial design; global sensitivity analysis; flexible pavement distresses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Curva de degradação do pavimento	20
Figura 2	– Respostas estruturais do pavimento	27
Figura 3	– Fluxograma do processo de dimensionamento do MEPDG.....	31
Figura 4	– Espectro de carga anual para o ESRD do veículo classe 2S1	33
Figura 5	– Fluxograma do processo de dimensionamento do PerRoad.....	36
Figura 6	– Configuração dos dados climáticos no PerRoad 4.4.....	37
Figura 7	– Configuração dos dados de tráfego no PerRoad 4.4	38
Figura 8	– Configuração dos parâmetros da estrutura no PerRoad 4.4	39
Figura 9	– Configuração das variabilidades dos parâmetros da estrutura no PerRoad 4.4	40
Figura 10	– Definição dos critérios de performance no PerRoad 4.4	41
Figura 11	– Janela de saída de dados do PerRoad 4.4	42
Figura 12	– Fluxograma do método	61
Figura 13	– Estrutura do pavimento flexível hipotético	65
Figura 14	– Sensibilidade dos fatores ao dano acumulado por fadiga do revestimento – ensaio fatorial fracionário.....	77
Figura 15	– Sensibilidade dos fatores ao dano acumulado por afundamento nas trilhas de roda – ensaio fatorial fracionário.....	80
Figura 16	– Sensibilidade dos fatores ao dano acumulado por fadiga do revestimento – ensaio fatorial completo	83
Figura 17	– Gráficos das superfícies de Mr.B <i>versus</i> Mr.R fixado em Esp.R.....	85
Figura 18	– Gráficos das superfícies de Mr.B <i>versus</i> Esp.R fixado em Mr.R.....	86
Figura 19	– Gráficos das superfícies de Mr.R <i>versus</i> Esp.R fixado em Mr.B.....	87
Figura 20	– Sensibilidade dos fatores ao dano acumulado por afundamento nas trilhas de roda – ensaio fatorial completo.....	90
Figura 21	– Esquema dos gráficos de superfície de resposta para análise sensibilidade dos fatores.....	91
Figura 22	– Gráficos das superfícies de Esp.R <i>versus</i> Esp.B	92
Figura 23	– Gráficos das superfícies de Esp.R <i>versus</i> Esp.sbb.....	93
Figura 24	– Gráficos das superfícies de Esp.R <i>versus</i> Mr.B	94
Figura 25	– Gráficos das superfícies de Mr.sbl <i>versus</i> Esp.B	96
Figura 26	– Gráficos das superfícies de Mr.sbl <i>versus</i> Esp.sbb.....	97

Figura 27 – Gráficos das superfícies de Mr.sbl *versus* Mr.B98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Análise de sensibilidade local realizada por Réus (2016)	45
Tabela 2	–	Frequências relativas dos veículos por classe AASHTO - DNIT	63
Tabela 3	–	Frequências relativas dos eixos dos veículos	64
Tabela 4	–	Fatores da estrutura e níveis do delineamento fatorial fracionário.	66
Tabela 5	–	Valores de referência para o coeficiente de Poisson	67
Tabela 6	–	Valores de referência para as espessuras das camadas.....	68
Tabela 7	–	Valores de referência para os módulos de resiliência	69
Tabela 8	–	Valores fixos dos fatores para o dano acumulado por fadiga do revestimento.....	73
Tabela 9	–	Valores fixos dos fatores para o dano acumulado por afundamento	73
Tabela 10	–	Modelo matemático do fatorial fracionário para previsão de dano acumulado por fadiga.....	76
Tabela 11	–	Modelo matemático do fatorial fracionário para previsão de dano acumulado por afundamento.....	79
Tabela 12	–	Modelo matemático do fatorial completo para previsão de dano acumulado por fadiga do revestimento	82
Tabela 13	–	Modelo matemático do fatorial completo para previsão de dano acumulado por afundamento.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ALS	<i>Axle Load Spectra</i>
ASG	Análise de Sensibilidade Global
ASL	Análise de Sensibilidade Local
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CRP	Coeficientes de Regressão Padronizados
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EICM	<i>Enhanced Integrated Climatic Model</i>
ELSYM5	<i>Elastic Layered System Model 5</i>
E-M	Empírico-Mecanístico
ESRD	Eixo Simples de Rodas Duplas
ESRS	Eixo Simples de Rodas Simples
ETD	Eixo Tandem Duplo
ETT	Eixo Tandem Triplo
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
IRI	<i>International Roughness Index</i>
JULEA	<i>Jacob Uzan Layered-Elastic Analysis</i>
LHS	<i>Latin Hypercube Sampling</i>
LTPP	<i>Long Term Pavement Performance</i>
MCF	Monte Carlo Filtering
MEPDG	<i>Mechanistic Empirical Pavement Design Guide</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>

NSI	<i>Normalized Sensitivity Index</i>
OAT	<i>One-At-a-Time</i>
SRS	<i>Simple Random Sampling</i>
WESLEA	<i>Waterways Experiment Station Layered-Elastic Analysis</i>
WIM	<i>Weight-In-Motion</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVOS	18
2	SERVENTIA E DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	19
2.1	MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	21
2.1.1	Trincas por Fadiga do Revestimento - <i>Bottom-up Cracking</i>	21
2.1.2	Trincas por Fadiga do Revestimento - <i>Top-down Cracking</i>	22
2.1.3	Deformações Plásticas.....	22
2.1.4	Irregularidade Longitudinal	23
3	DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO-MECANÍSTICO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	24
3.1	MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE (MEPDG).....	30
3.2	O DIMENSIONAMENTO E-M COM O PROGRAMA COMPUTACIONAL PERROAD	34
3.2.1	Dados Climáticos no PerRoad	35
3.2.2	Dados de Tráfego no PerRoad.....	37
3.2.3	Propriedades dos Materiais no PerRoad.....	38
3.2.4	Variáveis Resposta no PerRoad.....	40
4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM PROJETOS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	43
4.1	MÉTODOS DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	44
4.1.1	Análise de Sensibilidade Local	44
4.1.2	<i>Latin Hypercube Sampling</i>	47
4.1.3	Ensaio Fatoriais	49
4.2	SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS	51
4.3	SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS DE TRÁFEGO	54
4.4	SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS DA ESTRUTURA	57
5	MÉTODO DE PESQUISA	61

5.1	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	62
5.1.1	Dados Climáticos.....	62
5.1.2	Dados de Tráfego.....	63
5.1.3	Fatores da Estrutura.....	65
5.1.4	Variáveis Reposta – Vida Útil da Estrutura.....	70
5.2	EXPERIMENTO FATORIAL FRACIONÁRIO	71
5.2.1	Elaboração da Matriz do Fatorial Fracionário.....	71
5.2.2	Modelo Matemático do Fatorial Fracionário	72
5.3	EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO	73
5.3.1	Elaboração da Matriz do Fatorial Completo	73
5.3.2	Modelo Matemático Linear	74
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
6.1	ENSAIO FATORIAL FRACIONÁRIO: SELEÇÃO DOS EFEITOS DE PRIMEIRA ORDEM	75
6.1.1	Modelo Matemático do Fatorial Fracionário para Previsão de Dano por Fadiga	75
6.1.2	Modelo Matemático do Fatorial Fracionário para Previsão de Dano por Afundamento	78
6.2	ENSAIO FATORIAL COMPLETO: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	81
6.2.1	Modelo Matemático do Fatorial para Previsão de Dano por Fadiga.....	81
6.2.2	Análise das Interações entre Fatores para Previsão de Dano por Fadiga	83
6.2.3	Modelo Matemático do Fatorial para Previsão de Dano por Afundamento	87
6.2.4	Análise das Interações entre Fatores para Previsão de Dano por Afundamento	91
7	CONCLUSÕES	100
7.1	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DELINEAMENTOS FATORIAIS	100
7.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DANO ACUMULADO POR FADIGA.....	101
7.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DANO ACUMULADO POR AFUNDAMENTO.....	102
	REFERÊNCIAS.....	104
	APÊNDICES.....	111

APÊNDICE A - Revisão de análises de sensibilidade dos parâmetros estruturais de pavimentos flexíveis.....	112
APÊNDICE B - Matriz do ensaio fatorial fracionário 2^{11-5}	113
APÊNDICE C - Matriz do ensaio fatorial completo para o dano acumulado por fadiga do revestimento	115
APÊNDICE D - Matriz do experimento fatorial completo para o dano acumulado por afundamento nas trilhas de roda.....	116

1 INTRODUÇÃO

Dentre os modais brasileiros de transporte, o rodoviário é o de maior representatividade no escoamento de cargas (61%) e o principal no transporte de passageiros (CNT, 2017a).

Apesar de ser o meio de transporte predominante, o último relatório gerencial emitido pela Confederação Nacional de Transporte, a CNT (2018b), constatou que 54.635 km (50,9% da extensão total avaliada) apresenta problemas no pavimento. Dessa extensão, 37% encontra-se na condição regular, 9,5% ruim e 4,4% péssimo.

Como consequência dessa condição da malha rodoviária brasileira, há um aumento de 24,9%, em média, do custo operacional do transporte de cargas, em relação às condições consideradas satisfatórias. Esse aumento de custo é explicado pela redução da durabilidade das peças veiculares, aumento do tempo de viagem e consumo desnecessário de combustível (CNT, 2017b).

A má condição dos pavimentos nacionais não impacta apenas o custo operacional do transporte comercial. Na superfície de rolamento, a existência de afundamentos (trilhas de roda), ondulações e buracos afeta a estabilidade dos veículos e, conseqüentemente, contribui com o aumento de acidentes rodoviários (CNT, 2018a).

Este cenário pode ser revertido ou, ao menos, atenuado com aplicação racional de recursos para manutenção, restauração e implantação de novas vias. Uma metodologia poderosa, cujo conceito surgiu no início da década de 80, é o Sistema de Gerência de Pavimentos.

O objetivo desse sistema é de identificar a melhor aplicação possível para os recursos públicos e oferecer um transporte rodoviário seguro, compatível e econômico. O conceito é abrangente, e trata da integração entre planejamento, projeto, construção e manutenção dos pavimentos (DNIT, 2011).

No tocante à fase de projeto, mais especificamente ao dimensionamento e à análise de desempenho de pavimentos, é necessário que se produza, armazene e gerencie um vasto banco de dados, que garanta dimensionamento adequado e previsibilidade do surgimento e evolução dos mecanismos de deterioração.

Com a evolução dos métodos de dimensionamento de empíricos para

empírico-mecanísticos, a análise de desempenho de pavimentos se tornou mais minuciosa e complexa, necessitando de uma gama maior de dados da estrutura, de tráfego e climáticos. Ocorre que algumas variáveis não têm impacto significativo na previsão de desempenho estrutural, e outras são preponderantes neste processo. Em vista disso, para racionalizar a aplicação de recursos financeiros na coleta de dados e melhorar a assertividade dos dimensionamentos, é necessário conhecer as variáveis que têm maior influência na previsão de desempenho.

Nesse contexto, o presente trabalho visa contribuir com a identificação das variáveis da estrutura as quais o desempenho estrutural de pavimentos flexíveis é mais sensível.

1.1 JUSTIFICATIVA

A definição da estrutura do pavimento flexível que apresenta desempenho aceitável frente aos mecanismos de deterioração, é a função do dimensionamento. Para tanto, é necessário que o projetista defina os parâmetros de projeto que, para dada solicitação de tráfego e condições climáticas, levem ao melhor desempenho possível, ao longo da vida útil do pavimento.

Para o dimensionamento do pavimento flexível, por meio de métodos empíricos-mecanicistas, é necessário que se defina uma estrutura preliminar. Os parâmetros dessa estrutura pré-dimensionada são dados de entrada em softwares de análise de desempenho de pavimentos, como o *AASHTOware M-E Pavement Design®*, o ELSYM5, o WESLEA e o PerRoad. Estes programas computacionais analisam o desempenho da estrutura lançada que, estando em desacordo com os limites de deterioração aceitáveis, deverá ter seus parâmetros alterados para ser testada novamente. O processo é iterativo, e finda-se quando uma estrutura adequada é determinada.

Durante este processo de dimensionamento, o projetista, visando definir uma estrutura de pavimento adequada e economicamente viável, deve decidir quais parâmetros serão alterados na estrutura inicial, considerada inadequada no tocante ao desempenho funcional.

Conforme já verificado na literatura atual, alguns parâmetros da estrutura são mais sensíveis que outros ao surgimento de determinadas deteriorações. Vidotto e Fontenele (2013) analisaram a sensibilidade da espessura do

revestimento asfáltico ao surgimento de trincas por fadiga e afundamento nas trilhas de roda. Réus (2016), pesquisou a sensibilidade dos módulos de resiliência e espessuras das camadas ao surgimento de trincas longitudinais, trincas por fadiga, deformação permanente no revestimento, deformação permanente no topo do subleito, deformação total e Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI).

O conhecimento da sensibilidade desses parâmetros de entrada auxilia o projetista a ser mais assertivo na remodelagem de uma estrutura preliminar inadequada e consequente obtenção de uma estrutura com desempenho previsto satisfatório. Também é importante para otimização da aplicação de recursos em ensaios laboratoriais, permitindo a dedicação dos esforços aos parâmetros mais sensíveis.

Diante do exposto, este trabalho visa contribuir com a produção de dados que complementem a literatura específica, por meio de ensaios fatoriais, que determinem a sensibilidade da previsão dos defeitos trincas por fadiga do revestimento e afundamento nas trilhas de roda aos fatores: módulos de resiliência, espessuras e coeficientes de Poisson das camadas.

1.2 OBJETIVOS

Analisar a sensibilidade dos defeitos trincas por fadiga do revestimento e afundamento plástico nas trilhas de roda, a partir das variações nos valores dos módulos de resiliência, espessuras e coeficientes de Poisson das camadas da estrutura de pavimentos flexíveis.

Objetivos específicos:

- Determinar os efeitos individuais dos parâmetros: módulos de resiliência, espessuras e coeficientes de Poisson das camadas, na previsão dos defeitos: trincas por fadiga e afundamento plástico total nas trilhas de roda.
- Determinar os efeitos das interações entre os parâmetros, bem como as combinações mais nocivas para o surgimento dos defeitos estudados.
- Quantificar e qualificar a sensibilidade dos parâmetros da estrutura, considerando coeficientes fatoriais de primeira e segunda ordens, aos defeitos estudados.

2 SERVENTIA E DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Primeiramente, é preciso delinear os conceitos de serventia, desempenho e as deteriorações do pavimento mais relevantes para o entendimento desta pesquisa.

Um pavimento novo é concebido e implantado para desempenhar sua função satisfatoriamente por um período de tempo preestabelecido (ciclo de vida de operação). Este período inicia-se na data imediatamente após a implantação da via, quando o pavimento se encontra na condição ótima, e finda-se no momento em que o pavimento atinge a condição ruim. Ao longo desse intervalo de tempo, ocorre o fenômeno conhecido como deterioração (DNIT, 2006b).

O conceito de serventia está relacionado com a maneira que o pavimento satisfaz os propósitos para os quais foi concebido, atendendo a critérios econômicos e de segurança viária. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006b) define serventia como sendo a capacidade que um pavimento tem de fornecer um determinado nível de desempenho. O mesmo órgão estabeleceu procedimentos para que essa serventia possa ser mensurada subjetiva e objetivamente, gerando índices que expressam a qualidade da superfície de rolamento.

Atualmente, o índice mais utilizado pelo DNIT é o *International Roughness Index* (IRI). Isto justifica-se por ser o parâmetro mais aceito internacionalmente e, segundo o DNIT (2006b), por possuir forte correlação com o custo operacional dos veículos, o conforto, a segurança e com a velocidade de percurso.

O mesmo órgão conceitua o IRI, que é expresso em m/km, como o somatório dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referência, e infere que esses desvios afetam a ação dinâmica das cargas sobre a via, a qualidade do rolamento e, conseqüentemente, o desgaste das suspensões dos veículos. Este índice mantém forte relação com o desempenho satisfatório, que significa ofertar ao usuário condições de tráfego seguras, confortáveis e econômicas.

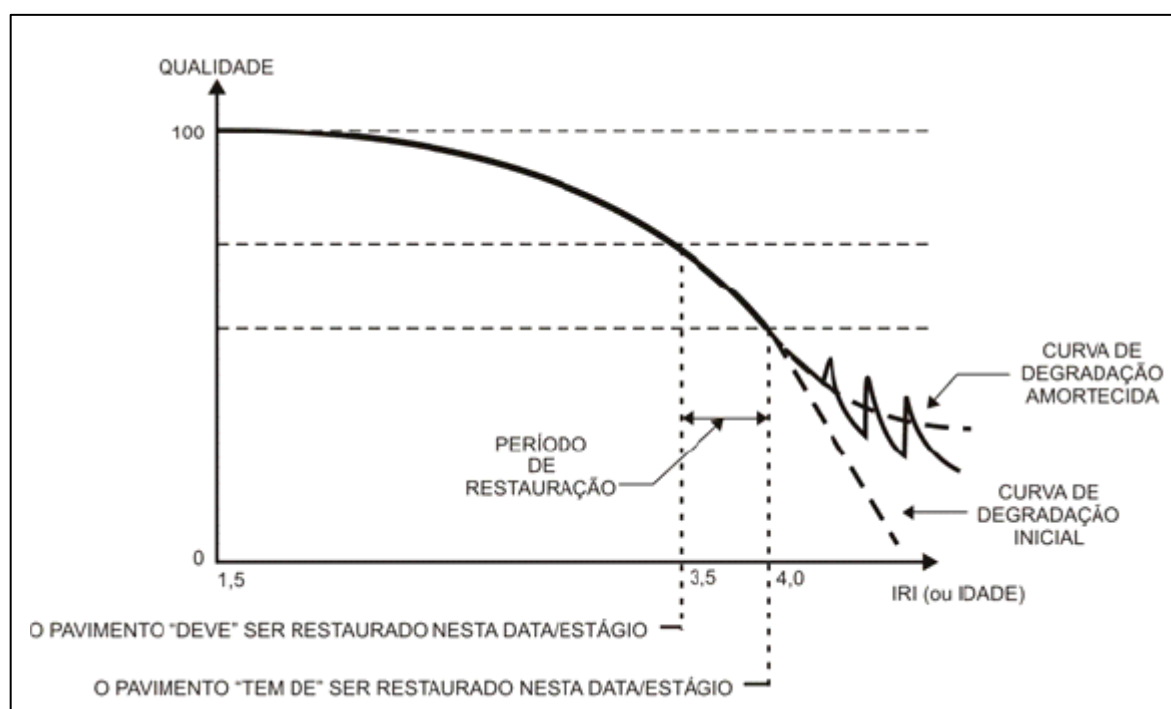
O conceito de desempenho é definido pelo decréscimo de serventia ao longo do período de operação da via e, nos softwares atuais de análise de pavimentos, é expresso pelas curvas de desempenho. O DNIT (2006b) o divide em dois tipos: o desempenho funcional e o desempenho estrutural.

O desempenho estrutural é a capacidade de um pavimento em manter íntegra sua estrutura. A condição estrutural do pavimento pode ser determinada por ensaios deflectométricos (não-destrutivos) e por ensaios destrutivos, que envolvem a remoção de material e análise laboratorial. (DNIT, 2006b).

O desempenho funcional difere-se do estrutural, por não ser traduzido pela análise das respostas estruturais, que medem sua integridade, mas sim, por índices de condição, frutos de aferições de irregularidade, observações de superfície e medições de determinados tipos de defeitos.

O desempenho funcional traduz a capacidade do pavimento em atender sua função principal de ofertar ao usuário uma superfície com serventia satisfatória em termos de qualidade de rolamento. A Figura 1 retrata o gráfico de desempenho ideal de um pavimento ao longo de um ciclo de vida (DNIT, 2006b).

Figura 1 – Curva de degradação do pavimento



Fonte: DNIT (2006b)

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 1 que a qualidade do pavimento, expresso na ordenada numa escala de 0 a 100, declina-se segundo uma faixa normalmente previsível ($1,5 \leq \text{IRI} \leq 3,5/4,0$) dentro do ciclo de vida. Quando o IRI atinge 3,5/4,0 m/km, o pavimento passa a apresentar desempenho próximo da condição limite permissível, e deve ser, necessariamente, restaurado, gerando um

novo ciclo de vida (DNIT, 2006b).

Terzi (2006) explica que a falência de um pavimento é um evento altamente variável, que não depende apenas das condições de tráfego, climáticas e das propriedades dos materiais que o compõe, mas também da própria definição de falência adotada pelo órgão regulador da malha viária em questão. Esta falência pode ser constatada em termos de determinado acúmulo de trincas, profundidade dos afundamentos nas trilhas de roda, irregularidade da superfície, ou a combinação desses e de outros indicadores de desempenho.

Como observado por Terzi (2006), uma ruptura localizada em um plano de cisalhamento qualquer de uma das camadas não significa necessariamente que a vida útil do pavimento se esgotou. Desta forma, no decorrer deste trabalho será utilizado o termo generalista “falência” para indicar que o pavimento em questão atingiu o limite máximo de um indicador de desempenho, determinado por algum órgão regulador.

2.1 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Os defeitos, ou mecanismos de deterioração, são uma importante consideração para o dimensionamento e análise empírica-mecanística. Mas, infelizmente, muitos deles são causados por falhas construtivas, deficiência dos materiais, manutenção inapropriada e não estão relacionados diretamente ao projeto estrutural do pavimento. Entretanto, o conhecimento dos vários tipos de mecanismos de deterioração é importante para os projetistas, pois pode ajudá-los a identificar suas causas (HUANG, 2004).

Os mecanismos de deterioração mais relevantes para esta pesquisa serão abordados na sequência.

2.1.1 Trincas por Fadiga do Revestimento - *Bottom-up Cracking*

É um tipo específico de trinca por fadiga, caracterizada por iniciar-se na parte inferior do revestimento e propagar-se à superfície de rolamento. Sumariamente, a camada de concreto asfáltico, juntamente com todo pavimento, sofre deflexão sob as trilhas de roda, que resulta em tensões e deformações por tração na fibra inferior da camada. Com a carga cíclica provocada pela passagem das rodas dos

veículos, e consequentes repetições de tensões de tração na camada asfáltica, essas deformações causam as trincas (NCHRP, 2004).

As trincas por fadiga do tipo *bottom-up* são, portanto, defeitos relacionados às solicitações de tráfego e que, em estágio mais avançado, apresentam-se como uma rede de pequenas trincas interconectadas, nos sentidos transversal e longitudinal. O nível deste mecanismo de deterioração é medido em termos de percentual de área do pavimento afetada (NCHRP, 2004; AASHTO, 2015).

2.1.2 Trincas por Fadiga do Revestimento - *Top-down Cracking*

Há muitos estudos científicos a respeito das causas desse tipo de trinca, mas nenhuma informação conclusiva. A maioria das trincas relacionadas ao tráfego são do tipo *bottom-up*. Entretanto, há evidências que sugerem que as trincas por fadiga se iniciam na superfície e se propagam para face inferior do revestimento asfáltico (NCHRP, 2004).

As trincas top-down, também conhecidas por trincas longitudinais, como a própria denominação sugere, iniciam-se na superfície do revestimento asfáltico e evoluem em direção aproximadamente paralela ao eixo da via (NCHRP, 2004; AASHTO, 2015).

As respostas estruturais que explicam esse mecanismo de deterioração são as tensões de cisalhamento na superfície do revestimento, causadas por elevadas pressões de contato entre o pneu e o pavimento (NCHRP, 2004).

Em estágio avançado, as trincas se interconectam longitudinalmente e podem apresentar erosões nas bordas. Porém, diferentemente das trincas *bottom-up*, esse tipo de trinca não se interconecta transversal e longitudinalmente, atingindo o estágio conhecido na literatura americana como *alligator cracking pattern*. Em virtude disso, a unidade de medida desse defeito, considerada em análises de desempenho, é o somatório dos seus comprimentos por quilômetro da via (AASHTO, 2015).

2.1.3 Deformações Plásticas

O DNIT (2006b), separa as deformações permanentes em três tipos: afundamentos nas trilhas de roda, as deformações plásticas no revestimento e as

depressões. Nos três casos, essa deterioração guarda relação direta com o aumento da irregularidade longitudinal.

Os tipos de deformações permanentes mais relevantes para esta pesquisa são aqueles relacionados às solicitações do tráfego. O NCHRP (2004) define esse defeito como uma depressão na superfície do pavimento evidenciada nas trilhas de roda, resultante de deformações permanentes ou plásticas em cada camada da estrutura.

Ainda segundo o NCHRP (2004), o afundamento é representado pela diferença vertical máxima entre a superfície do pavimento, no local do afundamento, e o perfil transversal de referência.

O nível desse mecanismo de deterioração é medido em milímetros, e representa a maior deformação entre as duas trilhas de roda, direita e esquerda (AASHTO, 2015).

2.1.4 Irregularidade Longitudinal

O índice de irregularidade representa o conjunto de desvios da superfície de rolamento em relação a um plano de referência.

No Brasil e internacionalmente, expresso pelo *International Roughness Index* (IRI), não é um índice que inicia-se com valor nulo, mas apresenta um valor inicial assim que a implantação do pavimento é finalizada. Com a ação do tráfego, do clima e de outros fatores, os defeitos no pavimento evoluem a estágios mais críticos. Consequentemente, a irregularidade da superfície, expressa pelo IRI, aumenta (NCHRP, 2004; DNIT, 2006b).

Em outras palavras, todos os demais mecanismos de deterioração como as trincas *bottom-up*, as trincas *top-down* e, principalmente, as deformações permanentes, são bem representadas pelo IRI. Além disso, segundo a AASHTO (2015), o DNIT (2006b) e o NCHRP (2004), este índice mantém forte relação estatística com a segurança viária e com o custo operacional dos veículos.

3 DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO-MECANÍSTICO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Antes de abordar os métodos de dimensionamento empírico-mecanísticos de pavimentos, é necessária uma contextualização sobre os métodos empíricos, para entender a importância deles e suas limitações, que motivaram as evoluções até os métodos empírico-mecanísticos atuais.

Os primeiros métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos utilizaram como lastro os dados coletados na *AASHO Road Test*, entre os anos de 1958 e 1960, em Illinois – EUA. A partir dos dados coletados neste trecho experimental, foi possível aplicar análises de regressão para estabelecer relações empíricas entre o número de solicitações de eixos, a configuração e carga desses eixos, as características da estrutura e a condição de falência dessa estrutura (PAPAGIANNAKIS, 2013). Estas relações empíricas permitiram o desenvolvimento dos fatores de equivalência de carga, até hoje presentes no método de dimensionamento vigente no Brasil.

Com o avanço da ciência de previsão de desempenho de pavimentos, dos materiais utilizados nas camadas da estrutura e alterações na configuração do tráfego comercial, as desvantagens dos métodos empíricos ficaram mais acentuadas. Levando em conta que os dados coletados na pista experimental da AASHO representavam apenas uma condição climática, um tipo de subleito, uma gama limitada de materiais das camadas e solicitações de tráfego típico da década de 50, são evidentes as desvantagens da utilização de métodos empíricos na análise de pavimentos atuais.

No *Guide for Mechanistic-Empirical Design* (NCHRP, 2004) são relacionadas as principais limitações dos métodos empíricos gerados a partir de dados da *AASHO Road Test*:

- a) Os volumes de tráfego de veículos comerciais aumentaram consideravelmente em relação ao volume praticado na *AASHO Road Test*.
- b) As configurações dos eixos dos veículos eram muito diferentes nos anos 60 em relação às atuais. A pressão predominante de enchimento dos pneus na época, por exemplo, era de 80 psi, contra os 120 psi dos pneus mais modernos.
- c) O experimento representa apenas uma região climática norte-

americana. Isto torna inadequadas as extrapolações desses resultados para análises de desempenho em outras regiões climáticas.

- d) As diferentes estruturas da pista experimental foram assentadas sobre um mesmo tipo de solo do subleito.
- e) Apenas um tipo de CBUQ e um tipo de concreto de cimento Portland foram considerados. Desta forma, os diferentes tipos de materiais de camadas de revestimento existentes hoje não podem ser representados adequadamente em métodos empíricos.
- f) Apenas dois tipos de camadas estabilizadas granulometricamente foram considerados.
- g) Os efeitos climáticos de longo prazo não foram considerados, uma vez que o experimento durou 2 anos, contra os 10, 20 ou 50 anos para os quais os pavimentos são projetados atualmente.

Diante destas limitações, a comunidade científica passou a investir esforços para desenvolver métodos que representassem mais fielmente o desempenho de pavimentos em serviço. Isto se tornou possível diante dos avanços da tecnologia da informação, que proporcionaram o desenvolvimento de programas computacionais para o cálculo das respostas estruturais, com aplicação da teoria das múltiplas camadas elásticas de Burmister (1945), como o ELSYM5 e o JULEA.

Outros esforços, que possibilitaram o desenvolvimento dos métodos mais modernos, foram os programas extensivos para coleta de dados relacionados ao desempenho de pavimentos, com destaque para o *Long Term Pavement Performance* (LTPP) e o *Minnesota Road Research Project* (MnRoad), nos Estados Unidos, e para o projeto Rede Temática de Asfaltos, no Brasil.

De acordo com Elkins *et al.* (2018), o LTPP foi um experimento realizado em larga escala em segmentos de rodovias distribuídos pelos Estados Unidos e Canadá, com o objetivo principal de coletar e fornecer dados sobre o desempenho de pavimentos, submetidos a várias condições de tráfego e ambientais. A partir de 1986, durante 20 anos o experimento promoveu coleta de dados de, aproximadamente, 2,5 mil seções de teste, submetidas a condições climáticas diversas e cargas de tráfego real, monitoradas por balanças de pesagem dinâmica.

Com propósito similar ao do LTPP, o MnRoad é um experimento que teve início em 1991, com a construção de duas pistas experimentais nas proximidades

de Albertville, Minnesota – EUA. Uma das pistas, com 5,6 quilômetros de extensão, recebe o alto volume de tráfego da Interestadual 94. A segunda pista é um circuito fechado de 4 quilômetros, que recebe um baixo volume de tráfego controlado. As duas pistas são compostas por seções de teste de pavimentos flexíveis e rígidos, com o total de mais de 4,5 mil sensores que monitoram as respostas do pavimento e dados climáticos (Tompkins e Khazanovich, 2007).

No Brasil, a Rede Temática de Asfaltos é um projeto fomentado pela PETROBRAS, com o apoio do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Miguez (CENPES). Este projeto teve início em 2006 com “Projeto Fundação”, fruto de uma parceria entre a COPPE/UFRJ e o CENPES/PETROBRAS.

Após a sua origem, a Rede Temática de Asfaltos garantiu abrangência nacional, com a participação das principais universidades e instituições de pesquisa do Brasil. O objetivo principal deste projeto é de fornecer informações necessárias para a calibração e validação do novo método de dimensionamento empírico-mecanístico nacional, a partir da implantação e monitoramento de trechos experimentais em todo o país (FRITZEN, 2016).

Atualmente, o Brasil encontra-se em processo de transição para o novo método de dimensionamento E-M, o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Recentemente, foi lançada a versão 1.1.5 do programa computacional MeDiNa, além do Guia para Execução de Segmentos Experimentais – Pro-MeDiNa (DNIT, 2020).

Os programas LTPP, MnRoad e o projeto Rede Temática de Asfaltos contribuem com a incorporação de modelos de previsão de desempenho, que compõem a parcela empírica dos métodos de dimensionamento empírico-mecanísticos atuais.

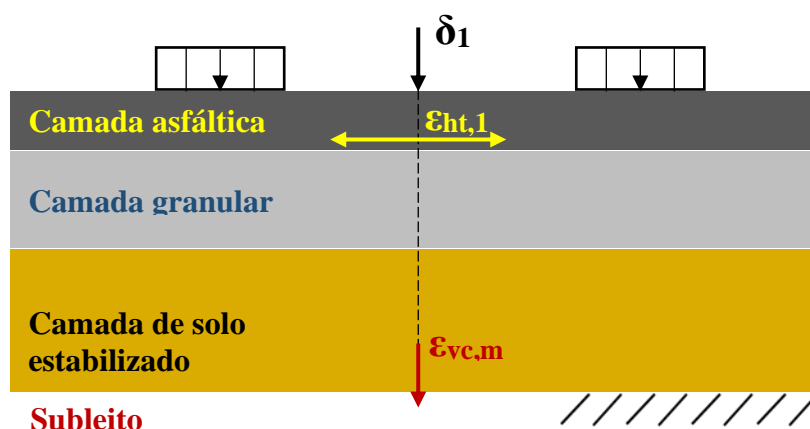
Nos métodos empíricos-mecanísticos, diferentemente dos métodos de base empírica, as respostas estruturais do pavimento (tensões, deformações e deflexões) são calculadas por meio da teoria das múltiplas camadas elásticas, ou pelo método dos elementos finitos, para as características locais de clima, tráfego e materiais. Essas respostas são utilizadas como dados de entrada nos modelos empíricos de previsão de desempenho, em relação aos defeitos: trincas por fadiga, deformações permanentes, trincas transversais térmicas e irregularidade longitudinal (SCHWARTZ e CARVALHO, 2007).

Dos defeitos mencionados, os mais comuns em modelos de previsão são o afundamento plástico total e as trincas por fadiga do revestimento. Na Figura 2,

são apresentadas as respostas estruturais em um pavimento flexível genérico, sob ação do tráfego e dos fatores climáticos. Destacam-se a deformação específica horizontal por tração na fibra inferior da camada asfáltica ($\epsilon_{ht,1}$) e deformação específica vertical por compressão no topo do subleito ($\epsilon_{vc,m}$). A primeira está relacionada com as trincas por fadiga do revestimento, e a segunda está relacionada com o afundamento plástico total. Estas respostas estruturais relacionam-se com os defeitos por meio de funções de transferência.

Na sequência, são apresentadas algumas das funções de transferência desenvolvidas nas últimas décadas, em pistas experimentais. De maneira geral, as funções relacionam a deformação específica horizontal máxima por tração na fibra inferior da camada asfáltica ($\epsilon_{ht,1}$) com o número de repetições de carga de um semi-eixo qualquer até a falência por fadiga (N_f). Da mesma forma, outras funções relacionam a deformação específica vertical máxima por compressão no topo do subleito ($\epsilon_{vc,m}$) com o número de repetições de carga de um semi-eixo qualquer até a falência por afundamento plástico total (N_r).

Figura 2 – Respostas estruturais do pavimento flexível



Fonte: Adaptado de Fernandes Júnior (1994).

As Equações 1 e 2 são funções de transferência que compõem o método do *Asphalt Institute* (2008, apud MONISMITH, 2012). A Equação 1 é utilizada para previsão de falência por fadiga do revestimento, em que E é o módulo elástico da camada asfáltica. A Equação 2 é aplicada na previsão de falência por afundamento plástico total.

$$N_f = 0,0795 \times \varepsilon_{ht,1}^{-3,291} \times E^{-0,854} \quad (1)$$

$$N_r = 1,365 \times 10^{-9} \times \varepsilon_{vc,m}^{-4,477} \quad (2)$$

Timm e Newcomb (2003) geraram as Equações 3 e 4 para previsão de falência por fadiga do revestimento e afundamento plástico total, respectivamente, a partir dos dados da pista experimental do *MnRoad Project*.

$$N_f = 2,83 * 10^{-6} \left(\frac{1}{\varepsilon_{ht,1}} \right)^{3,148} \quad (3)$$

$$N_r = 6,026 * 10^{-8} \left(\frac{1}{\varepsilon_{vc,m}} \right)^{3,87} \quad (4)$$

As Equações 5 e 6 são utilizadas no *Shell Pavement Design Method* (1978, apud HUANG, 2004), para as previsões de falência por fadiga do revestimento e afundamento plástico total. Da mesma forma que no método do *Asphalt Institute*, a função correspondente à falência por fadiga contempla a variável módulo de resiliência da camada asfáltica.

$$N_f = 0,0685 \times \varepsilon_{ht,1}^{-5,671} \times E^{-2,363} \quad (5)$$

$$N_r = 6,15 \times 10^{-7} \times \varepsilon_{vc,m}^{-4,0} \quad (6)$$

No *Guide for Mechanistic-Empirical Design* (NCHRP, 2004), projeto NCHRP 1-37A, que lançou o MEPDG, foram propostas as Equações 7 a 10 para previsões de trincas por fadiga e afundamento plástico. A função para previsão do número de operações até a falência por fadiga (Equação 7), além das variáveis já

consideradas nas funções citadas anteriormente, contempla o coeficiente k'_1 , para consideração da espessura da camada asfáltica, e o coeficiente C , para consideração do teor de ligante na mistura asfáltica.

$$N_f = 0,00432 * k'_1 * C * \left(\frac{1}{\varepsilon_{ht,1}} \right)^{3,9492} * \left(\frac{1}{E} \right)^{1,281} \quad (7)$$

O afundamento plástico total é tratado de forma diferente no MEPDG, em relação aos métodos anteriores. Não se considera apenas a deformação vertical no topo do subleito para cômputo da deformação plástica total. Ao invés disso, por meio da Equação 8, o método considera o somatório das deformações plásticas de todas as camadas. A Equação 9 é aplicada no cálculo das deformações plásticas da camada de revestimento, e a Equação 10 no cálculo das deformações plásticas das camadas granulares e subleito.

$$PD = \sum_{i=1}^n \varepsilon_p^i * h^i \quad (8)$$

Em que, PD é o somatório das deformações plásticas de todo sistema de camadas, ε_p^i é a deformação plástica específica na camada i , h^i é a espessura da camada i e n é o número de camadas diferentes.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_v} = k_1 * 10^{-3,4488} * T^{1,5606} * N^{0,479244} \quad (9)$$

Em que, ε_p é a deformação plástica específica na camada asfáltica, ε_v é a deformação específica vertical causada por um ciclo de determinada solicitação, T é a temperatura da camada asfáltica (°F), N é o número acumulado de ciclos de carga e k_1 é um coeficiente para consideração do aumento do confinamento com o aumento da profundidade.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_v} = \beta_G * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right) * e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \quad (10)$$

Em que, β_G é uma constante que assume o valor 1,673 para camadas granulares e 1,35 para o subleito. β , ρ e ε_0 são constantes dos materiais, que dependem do teor de umidade das camadas. N é o número de ciclos de aplicações de carga e ε_r é a deformação específica resiliente correspondente a essas aplicações de carga.

Em suma, as funções de transferência apresentadas aqui (Equações 1 a 10) são utilizadas para calcular a quantidade de solicitações de uma determinada carga de eixo até a falência. Para consideração das diversas configurações e cargas de eixos que compõe o tráfego de uma via, ao longo das condições climáticas impostas durante o ano, pode-se considerar a *Miner's Hypothesis* para acumular linearmente os danos previstos para cada condição, utilizando a Equação 11 (TIM e NEWCOMB, 2003; NCHRP, 2004; TIM e NEWCOMB, 2006; PAPAGIANNAKIS e MASAD, 2008; MONISMITH, 2012; AASHTO, 2015).

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (11)$$

Em que, D representa o dano acumulado de determinado defeito, que é a razão entre o número de solicitações admissíveis na condição i e o número de solicitações previstas na condição i . Quando D atinge o valor unitário, o valor limite de projeto foi atingido para o defeito em análise.

Nos itens seguintes, serão apresentados os métodos de dimensionamento mais relevantes para este trabalho.

3.1 MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE (MEPDG)

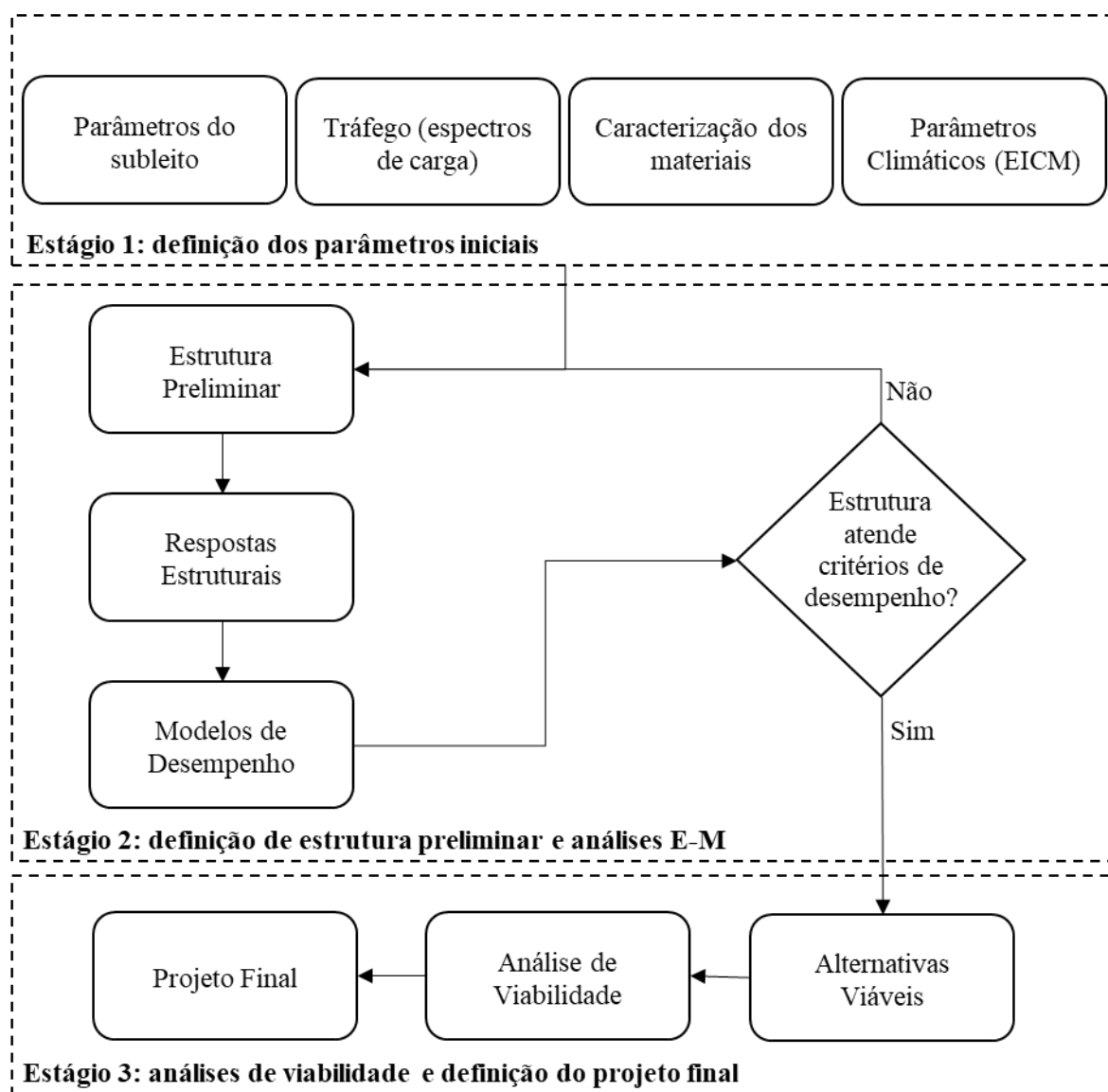
Uma alternativa mais recente aos antigos métodos empíricos, é o método empírico-mecanístico proposto por meio do NCHRP *Project 1-37A*. O método

é contemplado no *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), AASHTO (2015).

Para viabilizar o novo método de análise de pavimentos novos e reabilitados, a AASHTO lançou um software de teste, conhecido por MEPDG. Atualmente o software encontra-se na versão lançada em 2020, com a denominação *AASHTOWare® Pavement ME Design v2.6*.

O *software* da AASHTO analisa estruturas de pavimentos pré-dimensionadas por um processo iterativo, o NCHRP (2004) divide o método em três estágios, como exposto na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processo de dimensionamento do MEPDG.



Fonte: Adaptado de NCHRP (2004).

O primeiro estágio consiste na definição dos parâmetros iniciais, que estão divididos em 4 grupos: dados da fundação (subleito), dados de tráfego (espectros de carga), propriedades dos materiais que compõem a estrutura e parâmetros climáticos. No programa computacional, os dados iniciais são implementados por meio de uma abordagem hierárquica em níveis, permitindo flexibilidade aos projetistas na consideração de dados mais ou menos precisos, a depender da importância do projeto. São 3 níveis hierárquicos.

a) Nível 1: são dados medidos diretamente para um local ou projeto específico. Desta forma, são mais precisos, porém mais onerosos.

b) Nível 2: dados obtidos por correlações com outros projetos, ou quando são dados que representam a região onde o projeto está inserido.

c) Nível 3: parâmetros de entrada default, pertencentes ao banco de dados do programa. É o nível menos oneroso, porém, menos acurado.

O segundo estágio inicia-se com a definição de uma estrutura preliminar, que pode ser obtida por métodos de dimensionamento empíricos, por exemplo. Ainda neste estágio, considerando os dados iniciais definidos no estágio anterior, realiza-se a análise mecânica, para obtenção das respostas estruturais, e a análise empírica, para previsão de desempenho da estrutura. Os modelos de desempenho obtidos são analisados em termos dos critérios de projeto requeridos. Caso a estrutura preliminar não atenda aos critérios de projeto, modifica-se essa estrutura e repete-se a análise até que a alternativa de estrutura seja aceita. Trata-se de um processo iterativo.

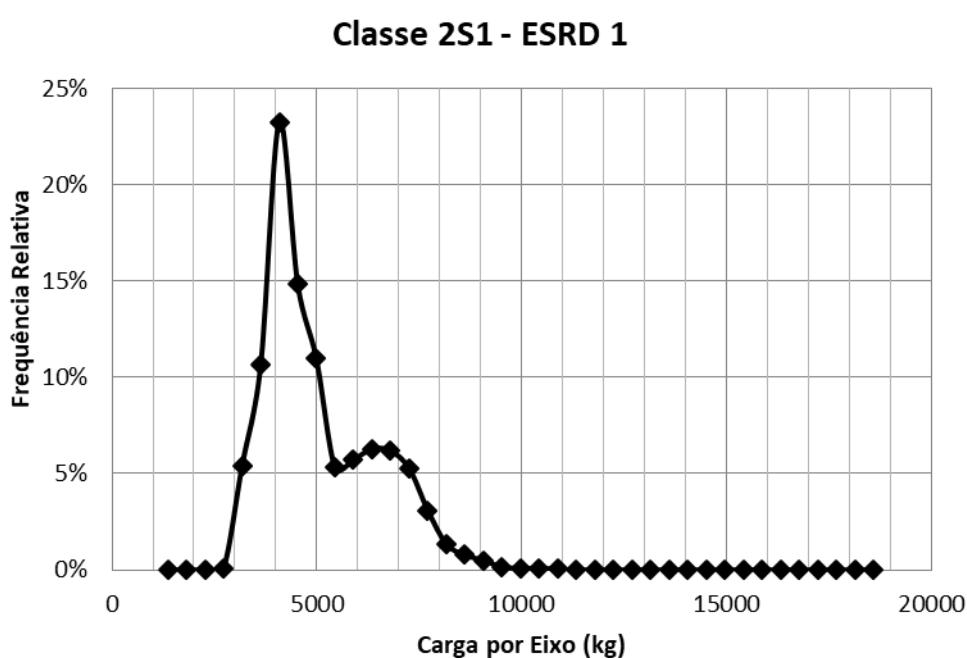
No terceiro e último estágio, as alternativas de estruturas que foram aprovadas no estágio anterior passam por um processo seletivo de análise de viabilidade, considerando custos do ciclo de vida da estrutura. Ao final, uma estrutura é selecionada e finda-se o processo.

Uma das diferenças chave entre o MEPDG e os métodos anteriores está na consideração das solicitações de tráfego. O conceito de equivalência de operações deixa de ser aplicado e cede lugar ao conceito de espectros de carga por eixo.

Os espectros de carga por eixo (*Axle-Load Spectra*) são histogramas que representam as frequências relativas das solicitações por intervalo de cargas, para cada tipo de eixo e veículo (AASHTO, 2015). Em outras palavras, o tráfego de veículos comerciais, com seus tipos de eixos e amplitudes de carga, é considerado

na íntegra. Na Figura 4, é apresentado um exemplo de espectro de cargas por eixo, obtido por Fontenele (2011), para um Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD) do veículo classe 2S1, do posto de pesagem localizado no quilômetro 28 da pista sul da Rodovia dos Imigrantes (SP-160), cujo Volume Diário Médio anual de tráfego em 2009 foi de 5.126 veículos comerciais.

Figura 4 – Espectro de carga anual para o ESRD do veículo classe 2S1



Fonte: Fontenele (2011).

No MEPDG, a introdução dos dados de tráfego tornou-se mais complexa que em métodos que utilizam o número equivalente de operações do eixo padrão, por exigir uma gama maior de dados (MAI *et al.*, 2014). Esses dados incluem: volume de tráfego, fatores de ajuste de volume de tráfego, espectros de carga por eixo, velocidade de operação dos veículos, percentual de distribuição dos veículos nas faixas de rolamento, configuração dos eixos, taxas de crescimento de tráfego, características dos pneus e pressão de inflação (NCHRP, 2004).

A obtenção destes dados de forma precisa, correspondente ao nível hierárquico 1, é onerosa. Para consideração dos espectros de carga específicos da via em análise, são necessários dados de postos de pesagem em movimento, por exemplo. A operação e manutenção das balanças requer quantia considerável de recursos financeiros. Li *et al.* (2019) afirmam que, devido ao alto custo operacional

das balanças, os dados para implementação de dados de nível 1 são escassos em regiões dos EUA. País onde se originou o MEPDG.

Por outro lado, a utilização de dados de tráfego de nível 3 (valores *default* do programa computacional, provenientes dos 200 postos de pesagem dinâmica do *Long-term Pavement Performance*) pode gerar resultados errôneos na previsão de desempenho de pavimentos (ROMANOSCHI *et al.*, 2011; NASSIRI *et al.*, 2014; HOSSAIN *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2019). Como solução, os autores Abbas *et al.* (2014), Mai *et al.* (2014) e Li *et al.* (2019) elaboraram, testaram e propuseram a utilização de dados de tráfego de nível 2.

A obtenção de dados precisos e específicos para análise de pavimentos não é onerosa apenas para os dados de tráfego. A mesma situação ocorre na consideração das propriedades dos materiais da estrutura e do subleito. Este assunto é discutido em mais detalhes no Capítulo 4 deste trabalho, que aborda a importância das análises de sensibilidade dos parâmetros para racionalizar a aplicação de recursos financeiros em um Sistema de Gerência de Pavimentos.

3.2 O DIMENSIONAMENTO E-M COM O PROGRAMA COMPUTACIONAL PERROAD

O programa computacional PerRoad foi desenvolvido por David H. Timm, sob o conceito do Pavimento Perpétuo, tradução do termo em inglês *Perpetual Pavement*. O termo, que teve origem nos EUA, refere-se aos pavimentos asfálticos de longa durabilidade, cuja vida útil da estrutura pode superar 50 anos. A estratégia dessa abordagem é limitar a ocorrência de defeitos à superfície do pavimento, de modo que, durante o período de manutenção, as correções sejam necessárias apenas nos primeiros centímetros da camada de revestimento asfáltico. Alguns benefícios podem ser apontados: reduz o custo do ciclo de vida; elimina a necessidade de reconstrução, ao final da vida útil; elimina a necessidade de intervenções robustas na pista, que podem gerar perturbações aos usuários; etc. (TIMM e NEWCOMB, 2006).

O *software* PerRoad, além de incorporar a abordagem do Pavimento Perpétuo, também é compatível com os métodos empíricos-mecanísticos convencionais. Uma vez que o dimensionamento E-M convencional pertence ao escopo deste trabalho, os procedimentos do programa PerRoad são abordados sob esta ótica. Maior profundidade do conceito Pavimento Perpétuo pode ser encontrada nos trabalhos de Newcomb *et al.* (2001), Timm e Newcomb (2006) e Islam *et al.*

(2018).

Na Figura 5, é apresentado o fluxograma do processo de dimensionamento no PerRoad, que é descrito na sequência segundo Timm e Newcomb (2006). Na primeira etapa, são definidos os dados de entrada, que estão divididos em 3 grupos: dados climáticos, dados de tráfego e parâmetros da estrutura (espessuras das camadas e propriedades dos materiais). Com os dados iniciais definidos, as respostas estruturais são calculadas com base na teoria das múltiplas camadas elásticas, por meio do programa *Waterways Experiment Station Layered Elastic Analysis* (WESLEA) de Van Cauwelaert *et al.* (1989).

Na etapa seguinte, as respostas estruturais são aplicadas em funções de transferência para determinação do número admissível de solicitações até a falência da estrutura (N_f), para cada condição climática (i) e configuração de carga de eixo (j). O programa permite uma abordagem probabilística para seleção randômica, utilizando número determinado de ciclos de Monte Carlo (m), das condições de carregamento e propriedades das camadas.

Monte Carlo é um método que consiste em selecionar randomicamente os valores que compõe o vetor das variáveis de entrada de um modelo, a partir de uma determinada função de distribuição de probabilidade. Maior aprofundamento sobre o tema pode ser obtido na literatura (CACUCI, 2003; BOLADO-LAVIN e BADEA, 2008; SALTELLI *et al.*, 2008).

Na sequência, calcula-se no PerRoad o dano acumulado linearmente (*Miner's Hypothesis*), considerando todas as condições selecionadas randomicamente.

Ao final do processo, verifica-se se o valor do dano acumulado (D) está abaixo do valor crítico considerado. Em caso afirmativo, finda-se o projeto. Caso o dano acumulado resultou acima do valor crítico, retorna-se à primeira etapa do processo, para redefinição dos parâmetros da estrutura. O processo é iterativo.

Os procedimentos de análise de pavimentos flexíveis no PerRoad 4.4 são abordados em mais detalhes nos itens seguintes.

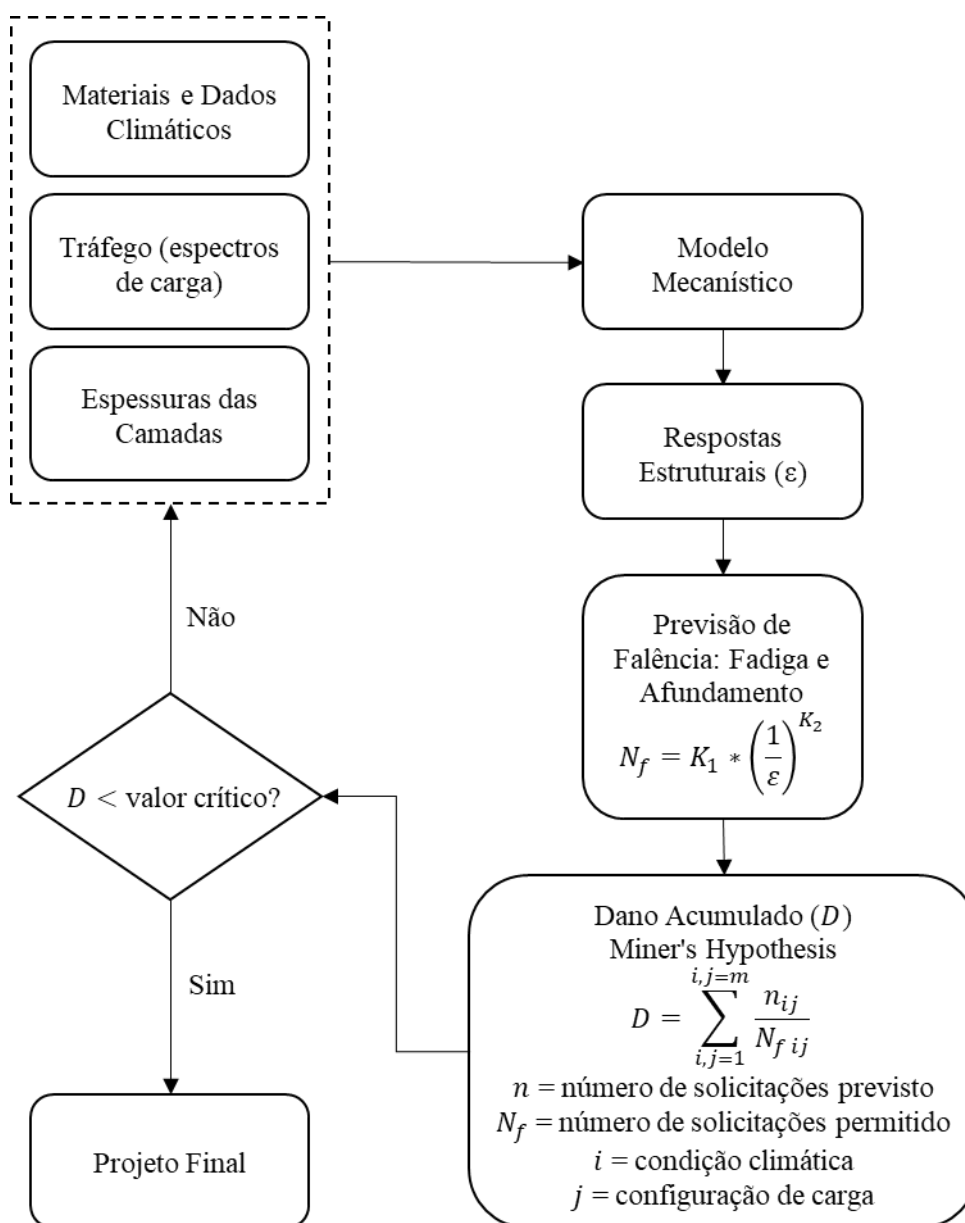
3.2.1 Dados Climáticos no PerRoad

Em termos de variações climáticas, no PerRoad 4.4 é possível distribuir as 52 semanas do ano em 5 condições sazonais e atribuir uma temperatura

do ar média para cada.

A entrada desses dados climáticos está vinculada aos dados da estrutura, pois além do *software* calcular o valor do módulo de resiliência da camada asfáltica por meio de uma função que o relaciona com a temperatura média sazonal, é possibilitado ao usuário atribuir módulos de resiliência diferentes para cada um dos 5 cenários de condições sazonais, para as demais camadas, em função da influência dos parâmetros climáticos sobre os módulos dos materiais. Na Figura 6, apresenta-se uma captura de tela do *software* com as opções de configurações climáticas.

Figura 5 – Fluxograma do processo de dimensionamento do PerRoad.



Fonte: Adaptado de Timm e Newcomb (2006)

Figura 6 – Configuração dos dados climáticos no PerRoad 4.4

Seasonal Information						
Season	<input checked="" type="checkbox"/> Summer	<input type="checkbox"/> Fall	<input type="checkbox"/> Winter	<input type="checkbox"/> Spring	<input type="checkbox"/> Spring2	Current Season
Duration (weeks)	<input type="text" value="52"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="Summer"/>
Mean Air Temperature, F	<input type="text" value="77"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="text" value="70"/>	<input type="checkbox"/> Temperature Correction

Fonte: Timm e Newcomb (2006)

3.2.2 Dados de Tráfego no PerRoad

Na Figura 7, é apresentada uma captura de tela do software das configurações das solicitações de tráfego. Pode-se observar que são solicitadas as frequências relativas por tipo de eixo, e os espectros de carga de cada um, conforme consideração dos parâmetros de tráfego proposta no NCHRP 1-37A (NCHRP, 2004), porém, os intervalos das faixas de cargas são diferentes. No PerRoad, os intervalos de carga são de 907 kgf, para quaisquer dos tipos de eixo. Os intervalos propostos no NCHRP 1-37A são diferentes para os eixos simples (453,5 kgf) e para o eixo tandem triplo (1360,5 kgf).

Para situações em que o usuário não possui os espectros de carga específicos para via em análise, o PerRoad dispõe uma base de dados de espectros *default* para diversas classes de vias, provenientes do *AASHTO Design Guide software* (NCHRP, 2004), do relatório FHWA (HALLENBECK *et al.*, 1997) e da base do LTPP. Entretanto, é preciso cautela ao considerar esta base de dados no dimensionamento de pavimentos de rodovias brasileiras, pois as informações contidas nessas bases são condizentes com as características do tráfego norte-americano.

Uma particularidade do PerRoad na consideração das solicitações de cargas de eixos é a abordagem probabilística. O programa aplica simulações de Monte Carlo como artifício para randomizar a magnitude das cargas de eixos previstas. O que o algoritmo do programa faz, exatamente, é selecionar randomicamente valores de cargas de eixo contidos em cada um dos intervalos de cargas, respeitando as frequências relativas (espectros de cargas) informadas pelo usuário.

Para ilustrar esta rotina do programa, na Figura 7 observa-se o espectro de cargas do eixo tandem triplo, que representa 13,25% do total de eixos

previsto. A cada ciclo de Monte Carlo, o programa calcula o dano causado no pavimento por uma carga de eixo selecionada randomicamente dos espectros de cargas configurados. Considerando que o usuário configure o programa para executar 5.000 ciclos, deste total, serão selecionadas 130 amostras de cargas de eixo tandem triplo, dentro da faixa de carga 58 klb a 60 klb (13,25% de 19,56%).

Conseqüentemente, esta rotina do programa gera dispersões nas variáveis respostas do programa. Por isso, os autores Timm e Newcomb (2006) recomendam que os usuários apliquem 5.000 ciclos de Monte Carlo, considerando que quanto maior o número de ciclos, mais próximo de zero será o desvio padrão da amostragem.

Figura 7 – Configuração dos dados de tráfego no PerRoad 4.4

Loading Configurations (Check All That Apply)

Single 20.86 %
 Tandem 33.37 %
 Tridem 13.25 %
 Steer 32.52 %
 Current Configuration: Tridem

Current Axle Load Distribution

Axle Wt kip	% Axles	Axle Wt kip	% Axles	Axle Wt kip	% Axles	Axle Wt kip	% Axles	Axle Wt kip	% Axles
0-2	0	24-26	0.47	48-50	3.96	72-74	0.01	96-98	0
2-4	0	26-28	0.45	50-52	4.66	74-76	0	98-100	0
4-6	0	28-30	0.43	52-54	5.36	76-78	0	100-102	0
6-8	0	30-32	0.54	54-56	10.25	78-80	0	102-104	0
8-10	0	32-34	0.64	56-58	14.9	80-82	0	104-106	0
10-12	0	34-36	0.74	58-60	19.56	82-84	0	106-108	0
12-14	0.04	36-38	1	60-62	13.6	84-86	0	108-110	0
14-16	0.4	38-40	1.14	62-64	8.12	86-88	0	110+	0
16-18	0.77	40-42	1.29	64-66	2.63	88-90	0	Total	100
18-20	0.54	42-44	1.87	66-68	0.25	90-92	0		
20-22	0.55	44-46	2.31	68-70	0.14	92-94	0		
22-24	0.56	46-48	2.76	70-72	0.03	94-96	0		

Fonte: Timm e Newcomb (2006)

3.2.3 Propriedades dos Materiais no PerRoad

Nas configurações da estrutura, é possível considerar uma análise linear elástica de até 4 camadas, cujas espessuras são editáveis, e um subleito (Figura 8). As propriedades dos materiais necessárias para análise são duas: o coeficiente de

Poisson e o módulo de resiliência. O programa dispõe de um banco de dados desses valores para materiais típicos, porém, é possível editar esses valores com certa liberdade, caso o usuário possua dados específicos dos materiais que serão utilizados para dimensionar a estrutura do pavimento.

Figura 8 – Configuração dos parâmetros da estrutura no PerRoad 4.4

	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
Material Type	AC	Soil	Soil	Soil	Soil
PG Grade	70 -22				
Min Modulus (psi)	50000	3000	3000	3000	3000
Modulus (psi)	522958	12000	12000	12000	12000
Max Modulus (psi)	4000000	40000	40000	40000	40000
Poisson's Ratio	0.35	0.45	0.45	0.45	0.45
Min - Max	0.15- 0.4	0.2- 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5
Thickness (in)	10	999	999	999	Infinite
	Variability	Variability	Variability	Variability	Variability
	Performance Criteria	Performance Criteria	Performance Criteria	Performance Criteria	Performance Criteria

Fonte: Timm e Newcomb (2006)

Figura 9 – Configuração das variabilidades dos parâmetros da estrutura no PerRoad

Input Variability

Layer: AC

Modulus Variability

Distribution Type: Log-normal

Coefficient of Variation: 30 %

Thickness Variability

Distribution Type: Normal

Coefficient of Variation: 5 %

Cancel Changes Accept Changes

Fonte: Timm e Newcomb (2006)

Para uma abordagem probabilística, o programa PerRoad possibilita ao usuário considerar variabilidades nos valores de espessuras e módulos de resiliência das camadas, aplicando distribuição normal ou log-normal, que são exploradas no momento da aplicação dos ciclos de Monte Carlo (Figura 9).

É importante destacar que, diferentemente de alguns programas computacionais como o ELSYM5, WESLEA e das próprias versões anteriores do PerRoad, em sua versão 4.4 não é possível editar as condições de aderência entre as camadas. Em todas as interfaces, as camadas são consideradas totalmente aderidas.

3.2.4 Variáveis Resposta no PerRoad

O *software* PerRoad 4.4 utiliza o WESLEA para calcular as respostas estruturais do pavimento devido ao carregamento. São aplicados ciclos de Monte Carlo para randomizar as aplicações de cargas de roda, respeitando os espectros de carga informados pelo usuário. Posteriormente, o programa calcula o número de aplicações de carga até a falência, para as tensões máximas geradas aleatoriamente em cada ciclo de Monte Carlo, por meio da Equação 12 (TIMM e NEWCOMB, 2006).

$$N_{fn} = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_n} \right)^{k_2} \quad (12)$$

Onde:

- N_f – Número de aplicações de carga até a falência;
- k_1 e k_2 – Constantes empíricas;
- ε – Resposta estrutural do pavimento (deformação específica máxima na localização crítica);
- n – Enésimo ciclo de Monte Carlo.

A Figura 10 é uma captura de tela do *software* da etapa de definição dos critérios de desempenho. Pode-se observar a consideração da tensão horizontal na parte inferior da primeira camada e a tensão vertical no topo da camada 4 (subleito), bem como as constantes empíricas das funções de transferência, k_1 e k_2 .

Sequencialmente, o programa calcula o dano causado por cada ciclo

de solicitação de carga (D_n) por meio da Equação 13.

$$D_n = \frac{1}{N_{fn}} \quad (13)$$

Após serem calculados os danos individuais para cada ciclo de Monte Carlo (D_n), eles são acumulados, aplicando a *Miner's Hypothesis* (Equação 14), onde “ m ” representa a quantidade de ciclos.

Figura 10 – Definição dos critérios de performance no PerRoad 4.4

Layer:	Position	Criteria	Threshold	Target Percentile	Transfer Function	k1	k2
1	<input type="checkbox"/> Top						
	<input type="checkbox"/> Middle						
	<input checked="" type="checkbox"/> Bottom	Horizontal Strain	-70 microstrain		<input checked="" type="checkbox"/>	2.83e-006	3.148
4	<input checked="" type="checkbox"/> Top	Vertical Strain	200 microstrain		<input checked="" type="checkbox"/>	6.026e-008	3.87

Note: The transfer functions are for strain only.

Fonte: Timm e Newcomb (2006)

$$D = \sum_{n=1}^m D_n \quad (14)$$

Para finalizar o processo de cálculo da vida útil do pavimento, o *software* calcula a média dos danos obtidos nos ciclos de Monte Carlo (D_{med}), por meio da Equação 15. Este valor representa o dano médio causado pela passagem de um eixo.

$$D_{med} = \frac{D}{m} \quad (15)$$

Determinado o dano médio, o programa calcula o tempo em anos até

o consumo de 10% e de 100% da vida útil, desde que o usuário informe o volume de tráfego previsto para o período em análise. O programa fornece, também, como variável resposta, o dano acumulado a cada um milhão de eixos (D_{10^6}), que pode ser obtido pela Equação 16.

$$D_{10^6} = D_{med} \times 10^6 \quad (16)$$

Na Figura 11, demonstra-se como exemplo a janela dos dados de saída do programa, na qual estão identificados os resultados dos danos acumulados por um milhão de eixos, para os dois defeitos, um na camada 1 e outro na camada 4 (subleito). O dano acumulado atinge o valor unitário quando o número de solicitações previsto é igual ao número de solicitações admissível até a falência. No exemplo em questão, as falências por fadiga do revestimento e afundamento plástico no topo do subleito ocorrerão antes de 10^6 solicitações, pois os valores de danos acumulados são maiores que a unidade (1,181 e 1,020).

Figura 11 – Janela de saída de dados do PerRoad 4.4

The screenshot displays the 'PerRoad 4.4' software interface. It is divided into two main sections: 'Thickness Design' and 'Reliability Analysis'.
 In the 'Thickness Design' section, the 'Number of Pavement Layers' is set to 4. Below this, there are five columns representing Layer 1 through Layer 5. Layer 1 has a material of 'AC' and a thickness of 2.95 inches. Layers 2, 3, and 4 have a material of 'Other' and thicknesses of 5.91, 7.87, and 9.99 inches, respectively. Layer 5 has a material of 'Other' and a thickness of 'Infinite'.
 The 'Reliability Analysis' section contains two buttons: 'Set Monte Carlo Cycles' and 'Perform Analysis'.
 Below these sections is a table titled 'Perpetual Pavement Design Results: Conventional Design with Transfer Functions'. The table has the following data:

Layer	Location	Criteria	Threshold	Units	Percent Below Critical	Damage/Million Axle	Years to D=0.1	Years to D=1.0
1	Bottom	Horizontal Str...	-70.	micr...	0.	1.181	-1.#IND	-1.#IND
4	Top	Vertical Strain	200.	micr...	3.68	1.02	-1.#IND	-1.#IND

Fonte: Timm e Newcomb (2006)

4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM PROJETOS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A análise empírico-mecânica (E-M) de pavimentos é viável por meio de programas computacionais. Para gerar as respostas estruturais e as previsões de desempenho do pavimento em análise, é necessário fornecer a esses programas uma série de variáveis iniciais. A quantidade de variáveis envolvidas e a maneira como elas interagem entre si tornam a análise complexa e impossível de ser representada adequadamente por um modelo matemático teórico simples.

Para contornar a complexidade das análises E-M, na tentativa de entender e expressar de maneira simplificada as relações entre os parâmetros de entrada (variáveis independentes) e os parâmetros de saída (variáveis dependentes), é possível obter modelos estatísticos por meio de análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade vem ganhando popularidade em experimentos aplicados à engenharia. Alguns autores têm direcionado esforços para aprimorar as técnicas de amostragem e mensuração dos efeitos. Entre esses autores, Saltelli e Sobol (1995) definem a análise de sensibilidade como o estudo de como as incertezas das variáveis resposta podem ser atribuídas às incertezas das variáveis de entrada.

Independentemente da área do conhecimento em que se aplica a análise de sensibilidade, ela tem propósitos parecidos que justificam sua importância na interpretação de fenômenos físicos: traduzir de forma simples modelos originalmente complexos; identificar falhas em modelos preexistentes; priorizar os esforços despendidos em pesquisas; identificar parâmetros de entrada críticos (SALTELLI *et al.*, 2008).

No campo da análise de pavimentos, Schwartz *et al.* (2013) afirmam que o conhecimento da sensibilidade aos dados de entrada é útil para identificar aqueles que mais influenciam o desempenho, indicando aos projetistas quais parâmetros necessitam de maior atenção e coleta mais minuciosa. Para ilustrar, pode-se citar o trabalho de Orobio e Zaniewski (2011). Os autores realizaram uma análise de sensibilidade do desempenho de pavimentos flexíveis aos parâmetros dos materiais de entrada no MEPDG. Como resultado, hierarquizaram os parâmetros dos materiais nos 3 níveis de acurácia, conforme proposto pelo MEPDG. Aos parâmetros que apresentaram maiores sensibilidades, foi atribuído o nível 1. Ou seja, são esses parâmetros que merecem maiores esforços na obtenção de valores precisos.

Os experimentos computacionais que exploram as sensibilidades dos parâmetros também são úteis para indicar aos desenvolvedores os modelos que necessitam de revisão. Um exemplo disso é a pesquisa realizada por Li *et al.* (2012). Ao realizarem uma análise de sensibilidade dos parâmetros da estrutura, utilizando o programa computacional MEPDG, observaram uma insensibilidade de alguns defeitos às propriedades das camadas granulares. Diante disso, eles recomendaram que o nível de influência das propriedades das camadas granulares e do subleito precisariam ser reavaliados nos modelos de deterioração do MEPDG.

Desde os primórdios da aplicação da análise de sensibilidade a experimentos de engenharia, muitos pesquisadores contribuíram com aprimoramentos das técnicas de amostragem e mensuração, que geraram diferentes vertentes.

4.1 MÉTODOS DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Este tópico apresenta uma breve revisão de alguns métodos de análise de sensibilidade aplicados às simulações computacionais, com aplicações na análise de desempenho de pavimentos rodoviários.

4.1.1 Análise de Sensibilidade Local

O método de análise de sensibilidade exploratória mais utilizado é a análise local denominada *One-At-a-Time* (OAT). Em análise de experimentos computacionais, a abordagem permite uma rápida exploração do comportamento do algoritmo, e é adaptável quando se deseja analisar um número expressivo de variáveis de entrada (IOOSS e LEMAÎTRE, 2015).

A denominação deste método (OAT) expressa claramente a abordagem. Primeiramente são selecionadas as variáveis de entrada e os valores que estas assumirão. O método se baseia na definição de valores de referência para cada variável, e o tratamento composto por estes valores é denominado linha de base. A cada simulação (tratamento), apenas o valor de um parâmetro é alterado, e os demais são mantidos fixos nos valores da linha de base (BOLADO-LAVIN e BADEA, 2008).

Para ilustrar a aplicação deste método, na Tabela 1 é apresentado o delineamento da análise de sensibilidade local realizada por Réus (2016), para avaliar

o efeito das variações das espessuras e módulos de resiliência das camadas, no desempenho dos pavimentos flexíveis.

A autora elaborou um esquema de 6 variáveis de entrada, com 4 níveis cada, e uma variável fixa, o módulo de resiliência da camada de revestimento asfáltico. Definiu como linha de base uma estrutura de pavimento de referência composta pelos valores destacados com asterisco na Tabela 1. A cada simulação computacional realizada no ELSYM5, uma das variáveis de entrada assumia um valor diferente daquele da linha de base, até que todos os 4 níveis de cada variável fossem explorados.

Tabela 1 – Análise de sensibilidade local realizada por Réus (2016)

Camada	Espessura (cm)	Módulo de resiliência
1	7,5; 10,0; 12,5*; 15,0	4.000*
2	15,0; 17,5; 20,0*; 22,5	276; 345; 400*; 483
3	20,0; 22,5; 25,0*; 27,5	186; 197; 206*; 217
Subleito	∞	48; 59; 70*; 79

* Valores de referência (linha de base).

Fonte: Réus (2016).

O método OAT é adequado para uma análise qualitativa, e tem o objetivo de analisar um sistema localmente, a partir de uma linha de base, para determinação das variáveis de entrada que tem pouca ou nenhuma influência sobre as variáveis resposta (CACUCI, 2003; IOOSS e LEMAÎTRE, 2015).

Uma vantagem atrelada à abordagem OAT é que, pelo fato de que a cada simulação apenas um parâmetro é alterado, é possível determinar exatamente o efeito correspondente na variável resposta (SALTELLI *et al.*, 2008).

Foi utilizada por diversos autores na análise de desempenho de pavimentos, mais intensamente após o lançamento do MEPDG.

Um dos exemplos de aplicação da análise local é o trabalho de Pelisson *et al.* (2013). Eles avaliaram o efeito das variações na espessura do revestimento de pavimentos flexíveis, e concluíram que as trincas longitudinais, trincas por fadiga e deformações permanentes no revestimento são bastante sensíveis a essas variações. Vidotto e Fontenele (2013) também identificaram alta sensibilidade dos defeitos trincas por fadiga e afundamentos nas trilhas de roda às

variações na espessura do revestimento asfáltico.

Réus (2016), por meio de análise de sensibilidade local, investigou também, além da espessura do revestimento, variações na espessura da base, sub-base, bem como no módulo de resiliência da base, sub-base e subleito. A autora alcançou resultados qualitativos de fácil interpretação e obteve êxito na identificação dos parâmetros da estrutura que mais influenciam na previsão dos defeitos estudados.

Mai *et al.* (2014) analisaram a sensibilidade dos dados de entrada de tráfego no software MEPDG. O objetivo dos autores foi de mensurar as variações na espessura de uma camada asfáltica diante da implementação de dados de tráfego de níveis 1 e 3, em relação ao nível 2 (linha de base). Para tanto, realizaram uma análise local (OAT) de 13 fatores, com 3 níveis cada. Consideraram 3 volumes de tráfego diferentes (alto, médio e baixo), e conseguiram identificar os parâmetros de tráfego mais críticos à análise de desempenho de pavimentos.

Li *et al.* (2012) realizaram uma análise OAT mais robusta. Também utilizaram o MEPDG para as 1.005 simulações que compuseram o estudo. Os autores consideraram 3 níveis de tráfego e 5 climas, totalizando 15 linhas de base diferentes (cenários). Avaliaram a sensibilidade de 33 variáveis de entrada, em sua maioria parâmetros da estrutura, por meio do índice denominado *design limit Normalized Sensitivity Index* (NSI) e classificaram essas variáveis em hipersensíveis, muito sensíveis, sensíveis e insensíveis.

O índice de sensibilidade NSI também foi aplicado por outros autores, como Schwartz *et al.* (2011) e Ceylan *et al.* (2012). De acordo com Schwartz *et al.* (2011), este índice permite uma interpretação prática ao relacionar o percentual de variação do parâmetro de entrada com o percentual de variação nas respostas correspondentes, considerando os valores limites de projeto.

Mais recentemente, os autores Yang *et al.* (2017), em uma abordagem OAT, utilizaram o NSI para mensurar a sensibilidade das entradas de dados de variáveis climáticas no *AASHTOWare Pavement EM Design®*. Eles consideraram dois cenários diferentes: volume médio e volume alto de tráfego. O estudo foi composto por 5 variáveis climáticas, com 6 níveis cada, correspondentes a 6 localizações geográficas no estado de Michigan – EUA. Ao final, o estudo permitiu uma interpretação prática das sensibilidades dos defeitos (trincas transversais, trincas longitudinais, trincas por fadiga do revestimento, afundamento do revestimento e total e IRI) aos parâmetros climáticos.

Apesar de suas vantagens e da ampla aplicação em análises de sensibilidade em simuladores de desempenho de pavimentos, a abordagem OAT tem duas limitações principais:

a) é ineficiente quando se tem muitas variáveis de entrada e poucas delas influenciam significativamente as variáveis resposta (SALTELLI *et al.*, 2008). Nestes casos, seria despendido grande esforço para obtenção de poucos resultados. Existem métodos mais eficientes, como o experimento fatorial fracionário, que é abordado neste trabalho, em momento oportuno;

b) só é aplicável quando a relação entre as variáveis de entrada e as de saída pode ser representada adequadamente por um modelo linear (CACUCI e IONESCU-BUJOR, 2004). Tratando-se de uma análise local, o método capta apenas os efeitos de primeira ordem. Entretanto, é comum em modelos computacionais complexos que haja interação entre os parâmetros. Box e Draper (1987) defendem que a abordagem OAT é ineficiente, principalmente porque os efeitos das interações são ignorados.

Mesmo diante destas desvantagens, as análises de sensibilidade locais são úteis em experimentos preliminares, quando pouco se conhece sobre o fenômeno estudado. Além disso, podem ser complementadas por análises mais sofisticadas, para entendimento quantificável e mais preciso do fenômeno estudado.

No final dos anos de 1980, com intuito de ampliar a análise de dados e verificar as interações entre as variáveis, surgiu no meio científico uma nova modalidade de tratamento estatístico, a análise de sensibilidade global. A vantagem do método reside no fato de que todas as variáveis independentes são alternadas simultaneamente (SALTELLI *et al.*, 2000). Algumas dessas modalidades são abordadas na sequência.

4.1.2 *Latin Hypercube Sampling*

A diferença essencial entre a análise de sensibilidade local (ASL) e a global (ASG) é que, nesta última, todas as variáveis independentes têm seus níveis variados simultaneamente, na composição de cada tratamento. Desta forma, é possível capturar os efeitos das interações entre as variáveis e representar mais adequadamente relações não lineares entre entradas e variáveis resposta.

Os métodos de ASG têm foco na representação de todo o espaço

amostral, levando em conta a distribuição dos valores das variáveis de entrada (BOLADO-LAVIN e BADEA, 2008). Para cumprir este propósito, o método mais comumente utilizado é o Monte Carlo, classificado como Amostragem Aleatória Simples, do inglês *Simple Random Sampling* (SRS), principalmente por sua simplicidade e ampla aplicabilidade. Entretanto, Damblin e looss (2013) afirmam que este método é pouco eficiente na representatividade amostral, pois, por ser randômico e sem memória, algumas regiões do todo podem ficar inexploradas, enquanto outras podem ter excesso de amostragem (*clusters*).

Nas últimas décadas, diversas técnicas de amostragem foram aprimoradas para aplicação em ASG. Alguns autores investiram esforços no aprimoramento de métodos randômicos de amostragem. Um desses métodos, que se trata de uma variação do Monte Carlo, é o *Latin Hypercube Sampling* (LHS).

Neste procedimento, os valores dos parâmetros são considerados em faixas, que por sua vez são estratificadas em intervalos de igual probabilidade. Para compor os tratamentos, um valor é extraído aleatoriamente de cada intervalo (CACUCI e IONESCU-BUJOR, 2004). Desta forma, obtém-se maior dispersão no campo amostral, o que torna o LHS mais eficiente que o clássico método de Monte Carlo. De fato, a abordagem LHS reduz o número necessário de simulações de 5 a 20 vezes em relação ao Monte Carlo, enquanto mantém representatividade completa das variáveis de entrada (SCHWARTZ *et al.*, 2013).

Em suma, o método LHS tem grande potencial para preencher adequadamente o espaço amostral e é eficiente na exploração de fenômenos e códigos complexos, quando não se possui conhecimento prévio deles. Entretanto, Keijnen (2005) aponta para uma possível desvantagem do método: tem potencial para gerar superfícies de resposta complexas e muitos fatores quantitativos para interpretação. Por isso, recomenda que o experimento seja bem planejado e que o analista tenha objetivos bem definidos.

A análise de sensibilidade global pelo método LHS vem sendo aplicada recentemente à previsão de desempenho de pavimentos. Alguns desses trabalhos são discutidos a seguir.

Orobio e Zaniewski (2011) analisaram a sensibilidade dos parâmetros de entrada de materiais do *software* MEPDG. Para tanto, os autores utilizaram o método LHS para amostrar um total de 48 parâmetros de dois tipos de estruturas de pavimento flexível. O experimento resultou em 500 simulações computacionais. Para

mensurar as sensibilidades dos defeitos aos parâmetros de entrada, utilizaram coeficientes de regressão padronizados e *rank transformation*. Apesar de trabalharem com um grande número de parâmetros, os autores obtiveram sucesso na representação clara daqueles que têm mais influência sobre os defeitos considerados, a partir de um número relativamente pequeno de simulações.

Schwartz *et al.* (2013) também realizaram uma análise de sensibilidade global dos parâmetros do MEPDG, aplicando o LHS. O delineamento experimental resultou em uma quantidade expressiva de simulações (mais de 40 mil), pois os autores investigaram 23 parâmetros (21 de materiais e 2 de tráfego) em 15 cenários diferentes (combinações de 3 volumes de tráfego com 5 regiões climáticas). Os autores utilizaram o já mencionado *Normalized Sensitivity Index* (NSI) para mensurar as sensibilidades de 6 defeitos aos parâmetros estudados, e obtiveram êxito em interpretar de maneira prática os resultados obtidos.

De fato, o método LHS parece ser uma boa escolha para realizar análises de sensibilidade dos parâmetros do MEPDG, pois eles são numerosos. Se os autores Orobio e Zaniewski (2011) tivessem optado por uma análise global por meio de um experimento fatorial de dois níveis, por exemplo, seriam necessárias $1,07 \times 10^9$ simulações computacionais. Uma quantidade impraticável.

Existem outros métodos para execução de análises de sensibilidade globais, quando se possui uma quantidade menor de parâmetros, em relação aos estudos anteriormente apresentados. Um deles é o delineamento no esquema fatorial, que é apresentado a seguir.

4.1.3 Ensaios Fatoriais

Uma maneira de realizar análise de sensibilidade global é por meio de ensaios fatoriais. Assim como no método LHS, os níveis dos fatores são variados simultaneamente, possibilitando a adequação dos modelos aos fenômenos não lineares. Entretanto, a diferença basal entre os dois métodos é que, diferentemente do LHS, os níveis dos fatores não são amostrados randomicamente. Esses níveis são criteriosamente selecionados na composição do delineamento de um experimento no esquema fatorial.

É possível projetar ensaios fatoriais com um número ilimitado de fatores e de níveis por fator. Porém, devido ao crescimento exponencial da quantidade

de simulações, os experimentos com fatores de 2 níveis são mais comuns (SALTELLI *et al.*, 2008).

Em ensaios fatoriais de dois níveis 2^k , sendo k o número de fatores envolvidos, o objetivo é estudar o comportamento do fenômeno natural ou do código computacional em dois diferentes níveis. Esses são chamados de níveis superiores e inferiores, representados pelos códigos (+1) e (-1), respectivamente (BOLADO-LAVIN e BADEA, 2008).

O experimento é representado em uma matriz fatorial, que contempla todas as combinações possíveis dos níveis superiores e inferiores dos fatores. Este delineamento possibilita conclusões sobre as interações entre os fatores. Isso ocorre quando a perturbação na variável resposta causada pela variação do nível de um fator não é a mesma quando se varia os níveis dos demais fatores. A possibilidade de identificar e quantificar essas interações é uma das vantagens que a análise global tem sobre a análise de sensibilidade local (MONTGOMERY, 2013).

Uma das desvantagens dos ensaios fatoriais é que, mesmo que sejam considerados apenas 2 níveis, a quantidade de fatores envolvidos na análise pode torná-la inviável. Para realizar um experimento com 10 fatores, por exemplo, seriam necessárias 1.024 simulações computacionais. Análises de algoritmos computacionais complexos envolvendo mais de 10 fatores não são incomuns, vide os trabalhos de Schwartz *et al.* (2013) e Orobio e Zaniewski (2011), que realizaram análises de sensibilidade dos parâmetros do MEPDG.

Para contornar esta desvantagem dos ensaios fatoriais, é possível realizar apenas uma fração do experimento completo e, ainda assim, obter resultados úteis (SALTELLI *et al.*, 2008). Esta variação do ensaio fatorial é chamada de experimento fatorial fracionário.

Os delineamentos fatoriais fracionários são mais populares nos estágios iniciais de uma análise de sensibilidade, quando os fatores são numerosos e pouco se sabe sobre a influência deles no fenômeno natural ou algoritmo que se pretende representar. Desta forma, esta técnica é útil para qualificar os fatores, identificando aqueles que têm pouca ou nenhuma influência sobre as variáveis respostas (MONTGOMERY, 2013).

Quando se considera apenas uma fração de um delineamento fatorial completo, perde-se parte da informação que seria gerada pela fração desconsiderada. Obviamente, quanto mais se fraciona o experimento menor será o número de

tratamentos e, conseqüentemente, mais informação será perdida, com maior impacto na quantificação dos efeitos das interações entre 2, 3 ou n fatores.

Os experimentos fatoriais fracionários são classificados em resoluções, que traduzem a acurácia da quantificação dos efeitos principais e de interações. Na sequência, as resoluções mais importantes são abordadas de acordo com as definições de Montgomery (2013).

a) Resolução III. Neste caso, não existe confundimento entre efeitos principais (efeitos que os fatores causam isoladamente nas variáveis resposta). Porém, existe confundimento entre efeitos principais e efeitos de segunda ordem (efeitos das interações entre 2 fatores), entre diferentes efeitos de segunda ordem e entre efeitos de ordens superiores (interações de 3 ou mais fatores).

b) Resolução IV. Não há confundimento entre efeitos principais, nem entre estes e os efeitos de segunda ordem. Entretanto, existe confundimento dos efeitos de segunda ordem entre si e entre efeitos de ordens superiores.

c) Resolução V. Em delineamentos desta resolução não há confundimento entre efeitos principais, entre efeitos principais e de segunda ordem, nem efeitos de segunda ordem entre si. Porém, existe confundimento entre efeitos de segunda e de terceira ordem e entre efeitos de ordens superiores.

Diante do exposto, cabe salientar que quanto maior a resolução do experimento menos restritas são as conclusões que se pode obter, porém, mais oneroso este será. No caso da Resolução V, é possível, além de inferir sobre a relevância dos efeitos principais, deduzir os efeitos de interações de segunda ordem. Entretanto, se o objetivo da análise for identificar os efeitos de primeira ordem mais significativos, um delineamento de Resolução IV é suficiente. Esta resolução fornece estimativas dos efeitos de primeira ordem sem confundimento, mesmo quando as interações de segunda ordem ou superiores são relevantes (KEIJNEN, 2005).

Após um experimento fatorial fracionário de Resolução IV, em estágios mais avançados da análise de sensibilidade, pode ser necessária uma investigação mais profunda, por meio de um experimento fatorial completo, possibilitando a quantificação dos efeitos principais e de interações entre os fatores.

4.2 SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS

O desempenho de pavimentos flexíveis é fortemente influenciado

pelos parâmetros climáticos. O conhecimento dos fatores externos como a precipitação, a temperatura e umidade relativa do ar, a profundidade do lençol freático, o percentual de insolação, a velocidade do vento e os ciclos de gelo-degelo é primordial. A maneira como o pavimento reage a esses fatores depende de fatores internos, relacionados aos materiais que compõe a estrutura, a saber: sensibilidade dos módulos de resiliência às variações de umidade e ciclos de gelo-degelo, capacidade de drenagem das camadas, sensibilidade do módulo dinâmico da camada asfáltica às variações de temperatura, entre outros (NCHRP, 2004).

Em especial, umidade e temperatura são as variáveis climáticas que podem afetar significativamente as propriedades das camadas e as do subleito, em relação à capacidade de suporte de carga. No caso de pavimentos flexíveis, devido às variações de temperatura, o módulo da camada asfáltica sofre grande variação ao longo do dia e, mais, ao longo das estações do ano. Na América do Norte, os módulos dessas camadas podem variar de 14 mil a 20 mil MPa, no inverno, a 700 MPa, durante os meses de verão (NCHRP, 2004).

Os módulos das camadas granulares também sofrem o impacto dos fatores climáticos, porém, estes são mais suscetíveis às variações de umidade. De forma que, quanto maior for o teor de umidade da camada, menor será o módulo de resiliência (NCHRP, 2004).

Desde os primeiros métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos, já era de conhecimento dos profissionais da área a relevância dos fatores climáticos no desempenho de pavimentos. Porém, somente nos métodos de análise de pavimentos mais atuais, de base empírico-mecanística, é que os parâmetros climáticos passaram a ser considerados mais cuidadosamente.

Na análise E-M desempenhada pelo *software* PerRoad, é possível considerar os efeitos das condições climáticas nas propriedades dos materiais. Porém, com exceção do módulo da camada asfáltica, para o qual existe um modelo que calcula variações de acordo com a temperatura do ar, as variações nos módulos das demais camadas são inseridas manualmente, para cada estação do ano.

No MEPDG, as simulações dos efeitos climáticos são mais complexas. O software possui um vasto banco de dados de mais de 800 estações meteorológicas, obtido por um período de coleta de 10 anos. Utiliza os parâmetros temperatura horária, precipitação, velocidade do vento, umidade relativa do ar e percentual de insolação para prever a temperatura e o teor de umidade das camadas

do pavimento (AASHTO, 2015). Desta maneira, as variações desses parâmetros das camadas são consideradas ao longo do ciclo de vida da estrutura, por meio da ferramenta de modelagem *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM). O EICM simula as variações nas propriedades dos materiais das camadas conforme as condições climáticas momentâneas (NCHRP, 2004).

O fato é que, o aumento da complexidade das simulações envolvendo parâmetros climáticos gerou uma demanda por estudos que aferissem a sensibilidade do desempenho de pavimentos em relação a esses parâmetros. Alguns desses estudos serão citados a seguir, com o propósito de demonstrar o que se sabe atualmente sobre a relevância dos parâmetros climáticos na previsão de defeitos.

Com o objetivo de quantificar a sensibilidade das previsões de desempenho do MEPDG às variáveis climáticas, Li *et al.* (2013) realizaram uma análise de sensibilidade local (OAT) considerando 3 regiões climáticas combinadas com 3 níveis de tráfego (9 cenários). Consideraram as variáveis climáticas: temperatura média anual, faixa de variação da temperatura média anual e diária, percentual médio de insolação, velocidade média do vento, precipitação média e umidade relativa média. O desempenho foi medido ao final da vida útil de 15 anos para os defeitos: trincas longitudinais, trincas por fadiga, afundamento plástico no revestimento, afundamento plástico total e IRI. Os resultados que os autores obtiveram corroboraram com o que era esperado para pavimentos flexíveis. Os parâmetros temperatura média anual e sua amplitude de variação foram os mais sensíveis, seguidos do percentual de insolação e da velocidade média do vento. Todos estes parâmetros tiveram maior impacto nos defeitos trincas longitudinais, afundamento plástico no revestimento e afundamento plástico total. Concluíram, também que a variável precipitação média tem efeito negligenciável e que os defeitos trincas por fadiga e IRI são pouco sensíveis a quaisquer variáveis climáticas.

Os estudos conduzidos por Yang *et al.* (2017) apresentaram muitas semelhanças com os de Li *et al.* (2013), tanto do ponto de vista metodológico quanto dos resultados. Neste estudo mais recente, os autores utilizaram o *software AASHTOWare Pavement ME Design* para aplicar uma análise de sensibilidade local (OAT), considerando 2 volumes de tráfego (médio e alto) em 6 regiões climáticas diferentes do estado de Michigan – EUA (12 cenários). Quantificaram as sensibilidades dos defeitos a 5 variáveis climáticas: temperatura, velocidade do vento, precipitação, percentual de insolação e umidade relativa do ar. Os autores concluíram

que a variável temperatura é a mais impactante na previsão de desempenho de pavimentos flexíveis, afetando todos os defeitos. A velocidade do vento foi a segunda variável mais importante, seguida do percentual de insolação. Por outro lado, as variáveis umidade relativa do ar e precipitação foram as menos significativas. De maneira geral, os defeitos afundamento plástico no revestimento e afundamento plástico total foram os mais sensíveis aos parâmetros climáticos.

O que chama a atenção nos dois estudos apresentados anteriormente é que, em ambos, as variáveis climáticas que afetam o teor de umidade dos materiais das camadas e, conseqüentemente, seus módulos de resiliência têm pouca influência nas previsões de desempenho. Isto pode ser atribuído ao fato de que a ferramenta EICM não considera o efeito da permeabilidade da superfície da estrutura. Outra limitação comum a estes dois estudos é que se tratam de análises de sensibilidade local. Sendo assim, as conclusões podem ser prejudicadas pela incapacidade do modelo em captar os efeitos não lineares e nem as interações entre os fatores. Portanto, um avanço significativo nos resultados poderia ser obtido por meio de uma análise de sensibilidade global.

4.3 SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS DE TRÁFEGO

Os dados de tráfego merecem especial atenção, pois a qualidade de sua coleta e posterior tratamento podem determinar o sucesso de uma análise de desempenho de pavimentos. São pré-requisitos para determinar a magnitude e frequência das cargas aplicadas no pavimento ao longo de sua vida útil (NCHRP, 2004).

Os programas computacionais de análise de desempenho de pavimentos mais recentes já não mais consideram o conceito de equivalência de carga do eixo padrão de 8,2 tf. O *AASHTOWare Pavement E-M Design* e o *PerRoad*, por exemplo, simulam o comportamento do pavimento por meio dos espectros de carga por eixo (do inglês *Axle Load Spectra – ALS*). Ambos os *softwares* possuem um banco de dados de ALS default de acordo com a classe técnica da via em análise. Estes bancos de dados podem ser úteis quando não se dispõe de dados específicos. Entretanto, deve-se ter cautela na utilização de valores default, pois podem gerar conclusões errôneas sobre a previsão de desempenho de pavimentos, como pode ser observado nos estudos de Romanoschi *et al.* (2011), Nassiri *et al.* (2014), Hossain *et*

al. (2016) e Santos *et al.* (2019). Dependendo da relevância do projeto pode ser necessária uma coleta de dados *in loco* por meio de balanças de pesagem dinâmica (do inglês *Weight-In-Motion* – WIM).

No entanto, um levantamento de tráfego preciso e de qualidade é oneroso e, conseqüentemente, esses dados não estão disponíveis de forma específica para determinadas regiões. Isto ocorre tanto em países desenvolvidos quanto, principalmente, em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

Para contornar este problema, diversos estudos vêm sendo realizados com intuito de possibilitar análises de desempenho de pavimentos adequadas em regiões onde não se dispõe de dados de tráfego específicos do local. Pesquisas como as de Fontenele e Fernandes Júnior (2014), Mai *et al.* (2014), Abbas *et al.* (2014) e Li *et al.* (2019) fornecem alternativas para coleta e tratamento de dados menos onerosas e, ainda assim, adequadas.

Paralelamente aos estudos que buscam oferecer alternativas menos custosas para consideração dos dados de tráfego, muitos pesquisadores têm avaliado o impacto da consideração desses dados alternativos ao invés do uso de dados extensivos obtidos *in loco*, na previsão de desempenho de pavimentos. Nos estudos de Li *et al.* (2009), Sayyady *et al.* (2010), El-Badawy *et al.* (2012), Mai *et al.* (2013), Nassiri *et al.* (2014), Hossain *et al.* (2016), Santos *et al.* (2019) e Koshigoe *et al.* (2019), foram aplicadas análises de sensibilidade para quantificar os efeitos de diferentes caracterizações de tráfego no desempenho de pavimentos.

Os autores Mai *et al.* (2014) utilizaram dados de 12 estações WIM para desenvolver dados de tráfego correspondentes aos níveis 1 e 2 do MEPDG. Conduziram uma análise de sensibilidade local para avaliar o quão sensível a espessura da camada asfáltica é em relação às variações dos dados de tráfego níveis 1, 2 e 3 (default do software). Estas foram as conclusões mais relevantes do estudo:

a) A espessura da camada asfáltica varia sensivelmente quando se considera dados de tráfego de nível 3, ao invés de nível 2, quando se trata de vias de alto volume de tráfego.

b) Dos 13 parâmetros de tráfego estudados, 10 apresentaram efeito insignificante na variação de espessura da camada asfáltica, quando se considera os dados de nível 2, ao invés do nível 1. Para os outros 3 parâmetros, os autores recomendam a utilização de dados de nível 1.

Outro estudo, que também aplicou uma análise de sensibilidade local,

foi o conduzido por Nassiri *et al.* (2014). Utilizaram os dados de 6 estações WIM localizadas no Canadá, para produzir dados de tráfego de nível 1 do MEPDG e quantificar as sensibilidades dos defeitos trincas por fadiga e afundamento plástico total às variações dos dados de tráfego entre os níveis 1, 2 (média regional) e 3 (*default* do MEPDG). Consideraram apenas 4 variáveis de tráfego: espectros de carga por eixo (ALS), frequência de veículos por classe, fator de distribuição horária e fator de distribuição mensal. Os autores observaram variações significativas na previsão dos defeitos quando utilizaram dados de nível 1, ao invés dos valores default, especialmente quando se tratou das variáveis ASL e frequência de veículos por classe. Entretanto, concluíram que é seguro utilizar dados da média regional (nível 2) como alternativa aos dados específicos do local, coletados em estações WIM.

O ponto forte dos estudos de Mai *et al.* (2014) e Nassiri *et al.* (2014) é a utilização de dados de diversas estações WIM e o cuidado no tratamento desses dados. Além disso, os autores tecem conclusões importantes sobre o uso de dados de tráfegos menos precisos, porém, menos onerosos (níveis 2 e 3 do MEPDG). Por outro lado, as análises de sensibilidade aplicadas nesses estudos são pouco robustas, desde a técnica de amostragem (*One-At-a-Time*) até a técnica utilizada para quantificar as sensibilidades. Os resultados desses estudos poderiam ter sido diferentes caso os autores tivessem utilizado técnicas de amostragem capazes de captar os efeitos da não-linearidade, como experimentos fatoriais e *Latin Hypercube Sampling* (LHS).

Um exemplo de estudo que teve maior foco na análise de sensibilidade em si, foi o realizado por Orobio e Zaniewski (2013), que aplicaram uma análise de sensibilidade global para quantificar os efeitos de 10 parâmetros de tráfego na previsão dos defeitos: IRI, afundamento plástico total e trincas por fadiga. Na análise, os pesquisadores consideraram duas estruturas de pavimentos flexíveis, em condições climáticas fixas (West Virginia – EUA), e utilizaram a técnica LHS para realizar 200 simulações no MEPDG. Para quantificar as sensibilidades, calcularam os Coeficientes de Regressão Padronizados (CRP). Segundo os autores, os defeitos apresentaram maior sensibilidade aos parâmetros: volume diário médio, fator de crescimento de tráfego e espaçamento entre rodas de semi-eixos duplos.

As pesquisas apresentadas neste capítulo contribuem para identificar as variáveis de tráfego mais relevantes para análise de desempenho de pavimentos e, conseqüentemente, possibilitam economia de recursos na coleta de dados de

tráfego. Adicionalmente, norteiam as decisões sobre quando é realmente necessário obter dados de tráfego específicos do local de análise e quando pode-se utilizar dados médios da região ou *default* de programas computacionais.

4.4 SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS DA ESTRUTURA

Com a evolução dos métodos de análise de desempenho de pavimentos dos modelos empíricos para os empírico-mecanísticos (E-M), os parâmetros dos materiais da estrutura, necessários para o cálculo das respostas estruturais, tornaram-se mais numerosos, resultando em análises mais complexas.

Os dados de entrada de materiais em análises E-M podem estar divididos em: propriedades dos materiais, utilizadas no cálculo das respostas (tensão, deformação específica e deslocamento) às cargas de tráfego; parâmetros para modelagem dos efeitos climáticos; e coeficientes para calibragem das funções de transferência (NCHRP, 2004). A obtenção desses dados com precisão requer um trabalho expressivo de campo e de laboratório e, conseqüentemente, envolve investimentos monetários elevados.

A análise de sensibilidade aos parâmetros dos materiais tem potencial para otimizar a aplicação de recursos, uma vez que é possível identificar aqueles que tem maior influência na previsão de desempenho de pavimentos e que necessitam de maior acurácia na sua obtenção (SCHWARTZ *et al.*, 2013). Os parâmetros menos influentes podem ser obtidos, por exemplo, com base na experiência prévia, gerando economia de recursos.

Após a publicação do MEPDG, o lançamento de novos programas computacionais e o conseqüente aumento da complexidade dos modelos de previsão, as análises de sensibilidade de parâmetros dos materiais tornaram-se mais frequentes no meio acadêmico. Em alguns desses estudos, como os de Schwartz *et al.* (2011), Li *et al.* (2012), Vidotto e Fontenele (2013), Mai *et al.* (2014), Pelisson *et al.* (2015), Réus e Fontenele (2016), foram utilizadas técnicas de análise de sensibilidade local. Outros autores, como Orobio e Zaniewski (2011), Schwartz *et al.* (2013), Li *et al.* (2014), Dilip e Babu (2016), Wu *et al.* (2017) e Harsini *et al.* (2018), realizaram análises de sensibilidade global, por meio de técnicas de amostragem randômica. Poucos pesquisadores, entre eles Kannekanti e Harvey (2005), Cooper *et al.* (2012) e Saad (2014), executaram experimentos fatoriais para analisar globalmente os parâmetros

dos materiais.

Os primeiros estudos publicados após a difusão dos métodos empírico-mecanísticos envolveram análises de sensibilidade local. Diante da quantidade de variáveis necessárias para os modelos computacionais de previsão de desempenho de pavimentos e do pouco conhecimento que se tinha sobre os efeitos delas, as análises *One-At-a-Time* pareceram mais atraentes pela sua simplicidade.

As análises de sensibilidade local têm sido úteis para triagem de variáveis, por ser uma técnica eficiente para distinguir aquelas mais significativas das demais. Aplicando esta técnica, Schwartz *et al.* (2011), entre os 26 parâmetros de materiais considerados, identificaram que o módulo dinâmico e espessura do revestimento são os que têm maior influência no desempenho de pavimentos flexíveis. Além disso, foram capazes de identificar diversos parâmetros com efeito insignificante, que puderam ser desconsiderados em uma futura análise de sensibilidade global.

Outro estudo relevante, que aplicou análise de sensibilidade OAT foi conduzido por Réus e Fontenele (2016). Neste, os autores utilizaram simulações nos softwares ELSYM5 e MEPDG para explorar a sensibilidade dos defeitos a 6 parâmetros da estrutura (módulos de resiliência e espessuras das camadas). Quando analisaram os resultados das simulações no MEPDG, concluíram que a espessura do revestimento, o módulo de resiliência e a espessura da base influenciam significativamente o surgimento de trincas por fadiga. Em relação ao afundamento plástico total, concluíram que a espessura do revestimento, o módulo de resiliência do subleito e da base são os parâmetros preponderantes na previsão de desempenho. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Schwartz *et al.* (2011).

No início da segunda década do século XXI, as análises de sensibilidade global tornaram-se mais expressivas. Os pesquisadores utilizam como lastro o conhecimento gerado em análises de sensibilidade local já realizadas, para obter resultados mais apurados sobre os modelos de previsão de desempenho. Schwartz *et al.* (2013), por exemplo, utilizaram a triagem de variáveis realizada em estudo anterior (SCHWARTZ *et al.*, 2011) para executar uma análise de sensibilidade global a partir de mais de 40 mil simulações no MEPDG. Utilizaram a técnica de amostragem LHS, uma variação de Monte Carlo e, para capturar os efeitos da não-linearidade nos modelos, aplicaram análise de redes neurais e superfícies de resposta.

Em uma pesquisa mais recente, Wu *et al.* (2017) utilizaram outra variação de amostragem randômica, o *Monte Carlo Filtering* (MCF), para analisar os efeitos dos parâmetros dos materiais. Trata-se de uma análise de sensibilidade regional que incorpora as vantagens da análise global, uma vez que a não-linearidade é representada nos modelos, porém, a amostragem não considera todo o espaço amostral. A análise é denominada regional, pois considera-se apenas os espaços amostrais que geram respostas próximas aos limites de projeto (valores limites aceitáveis para cada defeito). Os autores obtiveram resultados semelhantes aos de Schwartz *et al.* (2013). Entretanto, para isso, foram necessárias apenas 500 simulações no MEPDG, ao invés de mais de 40 mil.

As análises de sensibilidade global por meio de técnicas de amostragem derivadas de Monte Carlo são predominantes. Poucos estudos foram realizados por meio de experimentos fatoriais. O mais relevante aplicado a pavimentos flexíveis foi o conduzido por Saad (2014). O autor realizou um experimento fatorial completo de 2 níveis e apenas 4 fatores: módulo da base, módulo e Poisson do subleito e nível do lençol freático. Os resultados das simulações realizadas no ABAQUS indicaram que o nível do lençol freático (D), o módulo do subleito (B), a interação entre BD e o coeficiente de Poisson do subleito têm efeito significativo no afundamento plástico total. O defeito trinca por fadiga do revestimento não foi considerado neste estudo.

No APÊNDICE A, estão resumidas as principais publicações sobre análise de sensibilidade aos parâmetros dos materiais. Nas duas últimas colunas, foram relacionados os parâmetros que têm maior influência sobre, apenas, as previsões dos defeitos: trincas por fadiga e afundamento plástico total. Esses são os dois defeitos comumente considerados em métodos de dimensionamento de pavimentos e nos softwares gratuitos.

Observa-se que, na maioria das pesquisas relacionadas, os pesquisadores realizaram análises de sensibilidade global a partir dos resultados das previsões de desempenho geradas pelo MEPDG, cujas respostas estruturais são calculadas pelo método das múltiplas camadas elásticas. Outros dois softwares foram utilizados, o ABAQUS e o EVERSTRESSFE, que aplicam o método dos elementos finitos no cálculo das respostas estruturais. Independentemente do método de cálculo das respostas, em todos os estudos que consideraram a espessura do revestimento como variável, o seu efeito está entre os mais sensíveis na previsão dos dois tipos de

defeitos.

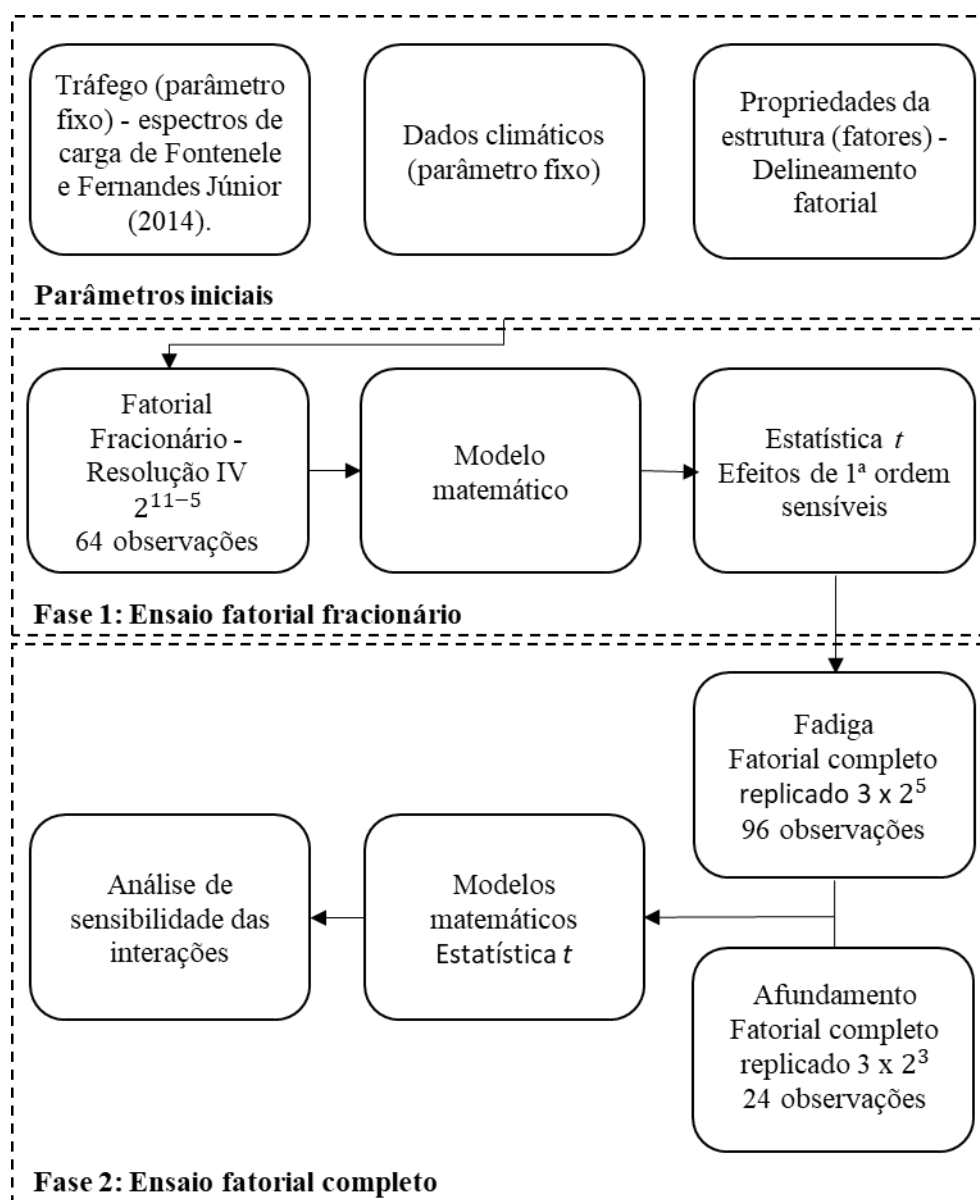
Especificamente no caso das trincas por fadiga, os parâmetros que aparecem como mais sensíveis na maioria dos estudos são: espessura, parâmetros volumétricos e módulo do revestimento; e módulo de resiliência da base. Tratando-se da previsão do defeito afundamento plástico total, os parâmetros mais sensíveis nessas pesquisas são: espessura do revestimento e módulo do subleito.

Os resultados dessas pesquisas são essenciais para nortear os esforços laboratoriais e de pesquisas futuras, com intuito de aumentar a eficiência e eficácia dos projetos de pavimentos flexíveis.

5 MÉTODO DE PESQUISA

A pesquisa foi dividida em duas fases, conforme fluxograma da Figura 12. No primeiro momento, por meio de revisão literária, foram determinados os parâmetros de entrada para realização das simulações computacionais no PerRoad 4.4, para previsão de desempenho em relação aos defeitos trincas por fadiga e afundamento plástico total nas trilhas de roda. Uma vez que a análise de sensibilidade se deu por meio de delineamento fatorial, a partir daqui os parâmetros da estrutura são tratados pela denominação “fatores”.

Figura 12 – Fluxograma do método



Fonte: o próprio autor.

Entre outros programas disponíveis, o PerRoad foi escolhido por contemplar o novo conceito de caracterização do tráfego por espectros de carga por eixos, por possibilitar a edição das funções de transferência utilizadas nas previsões de dano por fadiga e afundamento, além de ser um *software* gratuito e de fácil acesso.

A primeira fase consistiu na realização de um ensaio fatorial fracionário (1/32) de resolução IV, com intuito de explorar as sensibilidades dos defeitos a 11 fatores dos materiais e da geometria das camadas de uma estrutura de pavimento flexível hipotética de referência, para posterior exclusão daqueles menos significativos.

Na segunda fase, foi realizado um ensaio fatorial completo com os fatores que foram selecionados na primeira fase, aos quais os defeitos se apresentaram mais sensíveis.

5.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os fatores necessários para análise E-M no PerRoad 4.4 são divididos em 3 grupos: clima, tráfego e dados dos materiais da estrutura do pavimento.

Como esta pesquisa tratou de avaliar a sensibilidade dos fatores dos materiais, os fatores climáticos e de tráfego foram mantidos fixos nas simulações computacionais. Ao contrário dos fatores dos materiais, que foram variados de maneira a compor o delineamento fatorial.

Neste tópico, é apresentada a seleção dos fatores de entrada e seus níveis, bem como as variáveis respostas consideradas no estudo. Também, são abordadas as configurações utilizadas no programa computacional PerRoad 4.4 que culminaram nas respostas estruturais e, conseqüentemente, nas previsões de danos acumulados, em termos dos defeitos trincas por fadiga do revestimento e afundamento plástico total nas trilhas de roda.

5.1.1 Dados Climáticos

Assim como em outros programas computacionais para análise E-M de pavimentos flexíveis, o PerRoad considera os efeitos das variações climáticas nos parâmetros resistivos dos materiais das camadas, especificamente o efeito da variação da temperatura do ar ao longo das semanas do ano, que gera correções

automáticas no módulo de resiliência da camada asfáltica.

Como o foco desta pesquisa não é avaliar a sensibilidade dos fatores climáticos, estes foram desconsiderados. Ou seja, fixou-se um valor de temperatura do ar para todas as semanas do ano igual a 77° F (25° C).

5.1.2 Dados de Tráfego

Da mesma forma que o AASHTOWare, o software PerRoad permite a entrada dos dados de tráfego no formato das frequências relativas por tipo de eixo, chamados de espectros de carga.

Para esta pesquisa, foram utilizados os espectros de cargas por eixo obtidos por Fontenele e Fernandes Júnior (2014). Os autores geraram os espectros a partir de dados de um posto de pesagem de veículos, em operação em 2008, localizado no km 28 da pista sul da Rodovia dos Imigrantes (SP-160), no Estado de São Paulo.

Na Tabela 2, são apresentadas as frequências relativas dos veículos comerciais, obtidas por Fontenele e Fernandes Júnior (2014), conforme as classes estabelecidas no Quadro de Fabricantes de Veículos do DNIT (2012), bem como a correspondência dessas classes com as da AASHTO.

Tabela 2 – Frequências relativas dos veículos por classe AASHTO - DNIT

Classe AASHTO	Classes DNIT	Quantidade	Frequência (%)
5	2C	12.412	8,7
6	3C	10.550	7,4
8	2S1	11.974	8,4
	2S2	15.924	11,2
9	2S3	39.021	27,4
10	3S3	18.971	13,3
13	3D4	33.545	23,6
Totais		142.397	100,0

Fonte: Fontenele e Fernandes Júnior (2014).

A entrada de dados de tráfego no software PerRoad se dá por tipo de eixo, portanto, para desenvolvimento deste trabalho, as frequências relativas foram agrupadas em quatro tipos de eixos: eixo simples de rodas simples (ESRS), eixo simples de rodas duplas (ESRD), eixo tandem duplo (ETD) e eixo tandem triplo (ETT). Na Tabela 3 estão as frequências obtidas por Fontenele e Fernandes Júnior (2014) adequadas e agrupadas nos quatro tipos de eixos.

Para que os espectros de carga desenvolvidos por Fontenele e Fernandes Júnior (2014) fossem implementados no software PerRoad, foi necessário adaptá-los, pois os intervalos das faixas de cargas do software são diferentes daqueles adotados pelos autores. Eles seguiram os intervalos de carga estabelecidos no relatório NCHRP 1-37A (para ESRS e ESRD, intervalos de 453,5 kgf, para o ETD, intervalos de 907 kgf e, para o ETT, intervalos de 1.360,5 kgf). Por outro lado, no PerRoad, os intervalos de carga são de 907 kgf, para quaisquer dos tipos de eixos. Deste modo, apenas os espectros do ETD não necessitaram de adaptações.

No caso dos eixos simples (ESRS e ESRD), como os intervalos do NCHRP 1-37A são menores que os do software, as frequências relativas de cada intervalo foram agrupadas duas a duas.

Tabela 3 – Frequências relativas dos eixos dos veículos

Tipo de eixo	Frequência (%)
Eixo simples de rodas simples (ESRS)	32,52
Eixo simples de rodas duplas (ESRD)	20,86
Eixo tandem duplo (ETD)	33,37
Eixo tandem triplo (ETT)	13,25

Fonte: Fontenele e Fernandes Júnior (2014).

O método de adaptação dos espectros foi diferente no caso do ETT, pois, para este eixo, os intervalos do NCHRP 1-37A são 50% superiores aos intervalos do software. Desta forma, as frequências relativas de cada intervalo de carga foram divididas em três partes iguais, formando intervalos de 453,5 kgf. Posteriormente, as frequências foram somadas, duas a duas, resultando em intervalos de 907 kgf.

5.1.3 Fatores da Estrutura

No delineamento fatorial, tratou-se especificamente dos fatores da estrutura do pavimento flexível. Foram considerados os fatores: coeficientes de Poisson, espessuras das camadas e módulos de resiliência de um pavimento hipotético de referência formado por três camadas mais o subleito (Figura 13). A princípio, no delineamento fatorial fracionário, foi realizada uma análise fatorial de 11 fatores com 2 níveis cada. Na Tabela 4, são apresentados os fatores e seus níveis.

Figura 13 – Estrutura do pavimento flexível hipotético

Revestimento - CBUQ	Espessura / Módulo / Poisson
Base granular	Espessura / Módulo / Poisson
Sub-base de solo granular estabilizado	Espessura / Módulo / Poisson
Subleito	Módulo / Poisson

Fonte: o próprio autor

Para obter uma abordagem probabilística, no software PerRoad é possível que o usuário considere variações nos fatores da estrutura, seguindo uma distribuição normal ou log-normal. Entretanto, para atender os objetivos desta pesquisa, essas variações foram restritas às necessidades do delineamento fatorial. Portanto, não foram consideradas as faixas de variações propostas pelo programa computacional.

A seleção dos níveis superiores e inferiores de cada fator baseou-se em valores de referência de manuais e normas e em trabalhos de autores que pesquisaram as sensibilidades dos parâmetros da estrutura do pavimento.

Na seleção dos valores de coeficiente de Poisson, foram consideradas as faixas de valores razoáveis indicadas pela norma ASTM D5858 (ASTM, 2015). Para a camada de revestimento, os valores por faixa de temperatura do MEPDG (AASHTO, 2015). Também foram considerados os valores adotados por Schwartz *et al.* (2013) que, na análise de sensibilidade global realizada, consideraram

os valores 0,315 e 0,385 para todas as camadas e subleito.

Tabela 4 – Fatores da estrutura e níveis do delineamento fatorial fracionário

Fator	Descrição	Sigla	Nível (-1)	Nível (1)
A	Coef. de Poisson – revestimento	CPoi.R	0,30	0,40
B	Coef. de Poisson – base	CPoi.B	0,30	0,40
C	Coef. de Poisson – sub-base	CPoi.Sbb	0,30	0,40
D	Coef. de Poisson – subleito	CPoi.Sbl	0,30	0,40
E	Espessura – revestimento	Esp.R	7,5 cm	15,0 cm
F	Espessura – base	Esp.B	15,0 cm	23,0 cm
G	Espessura – sub-base	Esp.Sbb	20,0 cm	30,0 cm
H	Módulo resiliente – revestimento	Mr.R	3.000 MPa	7.000 MPa
I	Módulo resiliente – base	Mr.B	200 MPa	400 MPa
J	Módulo resiliente – sub-base	Mr.Sbb	100 MPa	200 MPa
K	Módulo resiliente - subleito	Mr.Sbl	50 MPa	100 MPa

Fonte: o próprio autor.

A referência principal para adoção dos níveis desse fator foram as recomendações da Instrução de Projeto de Pavimentação IP-DE-P00/001, do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER, 2006). Na Tabela 5, são apresentados os valores utilizados como referência.

Para seleção dos níveis superiores e inferiores das espessuras das camadas, tomou-se o cuidado de adotar valores razoáveis, possíveis de serem encontrados em pavimentos reais, e que não fossem valores extremos. Alguns autores concluíram que a espessura das camadas são fatores sensíveis ao desempenho de pavimentos, portanto, a adoção de valores extremos em uma análise fatorial de dois níveis poderia falhar na detecção dos efeitos de valores intermediários. Foram considerados como referências secundárias os trabalhos de Schwartz *et al.* (2013), Kargah-Ostadi (2015) e Ranadive (2016). Como referências principais, o trabalho de Réus (2016), o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006a) e a Instrução de

Projeto de Pavimentação IP-DE-P00/001 (DER/SP, 2006). Na Tabela 6, estão os valores das espessuras que influenciaram as escolhas dos níveis dos fatores de espessuras das camadas.

Tabela 5 – Valores de referência para o coeficiente de Poisson

Referência	Coeficiente de Poisson		Camada
	Valor mínimo	Valor máximo	
AASHTO (2015)	0,25 *	0,48 **	Revestimento - CBUQ
ASTM D5858 (2015)	0,30	0,40	Revestimento - CBUQ
	0,20	0,40	Base granular
	0,25	0,45	Subleito (solo coesivo)
DER/SP (2006)	0,15	0,45	Revestimento - CBUQ
	0,30	0,40	Base granular
	0,30	0,50	Subleito (solo)
PerRoad (<i>default</i>) – Timm e Newcom (2006)	0,15	0,40	Revestimento - CBUQ
	0,35	0,45	Base granular
	0,20	0,50	Subleito (solo)
Schwartz <i>et al.</i> (2013)	0,315	0,385	Revestimento - CBUQ
	0,315	0,385	Base granular
	0,315	0,385	Subleito

* Valor de referência para temperatura do revestimento igual a 4°C.

** Valor de referência para temperatura do revestimento superior a 55°C.

Fonte: o próprio autor.

Tabela 6 - Valores de referência para as espessuras das camadas

Referência	Espessura (cm)		Camada
	Valor mínimo	Valor máximo	
DNIT (2006a)	5,0	12,5	Revestimento - CBUQ
DER/SP (2006)	5,0	15,0	Revestimento - CBUQ
Schwartz (2013)	5,0	15,0	Revestimento - CBUQ
	1,0	18,0	Base
Kargah-Ostadi (2015)	5,0	25,0	Revestimento - CBUQ
	15,0	45,0	Base
Ranadive (2016)	10,0	25,0	Revestimento - CBUQ
	30,0	60,0	Base
Réus (2016)	7,5	15,0	Revestimento - CBUQ
	15,0	22,5	Base
	20,0	27,5	Sub-base

Fonte: o próprio autor.

Por ter sido identificado por alguns autores (vide APÊNDICE A) como fator sensível ao desempenho de pavimentos, na escolha dos níveis de módulo de resiliência, tomou-se o cuidado de selecionar valores que não representassem os extremos e que fossem razoáveis à realidade observada em campo.

A seleção dos níveis dos módulos de resiliência baseou-se no banco de dados do *Long-term Pavement Performance* (STUBSTAD *et al.*, 2006) e nos trabalhos de Orobio e Zaniewski (2011), Schwartz *et al.* (2013), Kargah-Ostadi e Stoffels (2015) e Ranadive e Tapase (2016). As referências principais para a seleção dos valores dos módulos de resiliência foi o trabalho de Réus (2016) e a Instrução de Projeto de Pavimentação IP-DE-P00/001 (DER/SP, 2006). Na Tabela 7, estão expostos os valores de referência e seus autores.

Tabela 7 - Valores de referência para os módulos de resiliência

Referência	Valores de módulo de resiliência (MPa)			Camada
	Mínimo	Médio	Máximo	
(Stubstad <i>et al.</i> , 2006)	2068	3447	10342	Revestimento - CBUQ
	103	207	276	Base granular
	55	103	172	Sub-base granular
	48	83	138	Subleito solo granular
	21	34	48	Subleito solo fino
DER/SP (2006)	2000	-	5000	Revestimento - CBUQ
	150	-	450	Base ou sub-base granular
	25	-	200	Subleito solo fino
Orobio e Zaniewski (2011)	172	-	241	Base granular
	103	-	172	Sub-base granular
	34	-	62	Subleito
Schwartz <i>et al.</i> (2013)	103	-	276	Base granular
	69	-	138	Subleito
Kargah-Ostadi e Stoffels (2015)	1500	-	20000	Revestimento - CBUQ
	30	-	400	Base granular
	10	-	200	Subleito
Ranadive e Tapase (2016)	-	1700	-	Revestimento - CBUQ
	100	300	450	Base granular
	-	80	-	Subleito
Réus (2016)	-	4000	-	Revestimento - CBUQ
	276	-	483	Base granular
	186	-	217	Sub-base granular
	48	-	79	Subleito

Fonte: o próprio autor.

A etapa subsequente à definição dos níveis de cada fator foi a concepção do delineamento fatorial. Um ensaio fatorial completo, com 11 fatores, resultaria em 2.048 simulações no PerRoad e, tratando-se da investigação do desempenho baseado em dois tipos de defeitos, 4.096 observações.

Como solução para reduzir a quantidade de observações, em um primeiro momento, optou-se por realizar um delineamento fatorial fracionário de resolução IV (2^{11-5}), resultando em 64 simulações computacionais. Esta resolução de delineamento fatorial, que tem caráter exploratório, é suficiente apenas para realizar uma triagem dos parâmetros que mais influenciam os consumos de danos em relação aos dois tipos de defeitos, e viabilizar uma investigação mais aprofundada com os parâmetros mais sensíveis, por meio de um delineamento em esquema fatorial completo.

5.1.4 Variáveis Reposta – Vida Útil da Estrutura

O desempenho do pavimento, para os dois defeitos considerados nesta pesquisa, foi medido em termos do consumo percentual de danos acumulados por um milhão de eixos, que se trata da variável resposta.

Nesta pesquisa, foram consideradas as constantes empíricas obtidas por Timm e Newcomb (2003). As falhas consideradas foram trincas por fadiga do revestimento e afundamento plástico total nas trilhas de roda, expressas por " N_f " e " N_r ", calculadas por meio das Equações 3 e 4 (funções de transferência), respectivamente. Na Equação 3, o limite de projeto, que corresponde à falência por fadiga, é de 10% da área da superfície trincada na trilha de roda. No caso do afundamento plástico, o limite de projeto é de 12,7 mm.

Pelo fato do propósito dessa pesquisa não ser o de determinar se o pavimento da rodovia SP-160 resiste ao volume de tráfego previsto, este não foi informado ao programa. Deste modo, considerou-se os danos acumulados por fadiga do revestimento e afundamento plástico total nas trilhas de roda, após a passagem de um milhão de eixos (Equação 16), como variáveis resposta para posterior análise de sensibilidade.

O D_{med} , obtido pela Equação 15 representa a média dos danos obtidos nos ciclos de Monte Carlo. Nesta pesquisa, foram definidos 5.000 ciclos para

todos os tratamentos fatoriais simulados, por ser esta a quantidade considerada suficiente na maioria dos cenários de análise de desempenho de pavimentos (TIMM e NEWCOMB, 2006).

5.2 ENSAIO FATORIAL FRACIONÁRIO

Como o objetivo principal desta pesquisa foi a investigação das sensibilidades do desempenho de pavimentos flexíveis aos parâmetros estruturais, decidiu-se considerar 3 parâmetros comuns em softwares de análise linear elástica de múltiplas camadas: as espessuras delas, os módulos de resiliência e os coeficientes de Poisson. Considerando um pavimento flexível hipotético de 3 camadas mais o subleito, são 11 fatores a serem investigados.

5.2.1 Elaboração da Matriz do Fatorial Fracionário

Em um delineamento fatorial, o ideal é que, a princípio, não se exclua nenhum dos fatores. Porém, um delineamento fatorial desta magnitude geraria uma quantidade excessiva de simulações computacionais.

Os delineamentos fatoriais de 2 níveis são populares entre os estatísticos. Eles são aplicados para que se conheça as sensibilidades das variáveis resposta às variáveis independentes, bem como os efeitos das interações entre dois ou mais fatores.

No caso de delineamentos fatoriais completos, é possível não apenas obter respostas confiáveis das sensibilidades de cada fator controle (efeito principal ou de 1ª ordem), como também das interações entre 2, 3, ..., n fatores (efeitos de 2ª ordem, 3ª ordem, ..., enésima ordem). Por outro lado, quando se realiza um delineamento fatorial fracionário, que considera apenas uma fração do experimento completo, há uma desvantagem: o surgimento de “confundimento” entre efeitos secundários e, dependendo da resolução, entre efeitos principais e secundários.

No caso do delineamento fracionário aqui adotado, que é de resolução IV, os efeitos principais podem ser confundidos apenas com efeitos de 3ª ordem ou superiores. Ainda, os efeitos de 2ª ordem podem se confundir entre si ou com efeitos de ordem mais alta.

Essas limitações do delineamento fatorial de resolução IV não

comprometem os objetivos desta etapa da pesquisa, pois os efeitos de 3ª ordem ou superiores, com os quais os efeitos principais podem estar confundidos, são normalmente irrisórios e comumente descartados do modelo matemático simplificado. Em outras palavras, e de acordo com as afirmações de Keijnen (2005) já abordadas no item 4.1.3 deste trabalho, a resolução IV atende adequadamente esta fase exploratória, que tem como propósito selecionar os efeitos de 1ª ordem mais significativos.

Diante desses esclarecimentos, o delineamento fatorial fracionário foi elaborado com as 64 observações ordenadas como exposto no APÊNDICE A. Para cada um dos 11 fatores (fator A ao fator K), os níveis são representados pelos códigos: (1), para os níveis superiores e (-1), para os níveis inferiores. Os valores desses níveis podem ser verificados na Tabela 4.

5.2.2 Modelo Matemático do Fatorial Fracionário

Após a montagem da matriz fatorial, os 64 tratamentos foram simulados no programa PerRoad 4.4. Desta forma, foram obtidos 64 valores da variável resposta dano acumulado por fadiga do revestimento e outros 64 valores da variável resposta dano acumulado por afundamento total nas trilhas de roda.

A matriz fatorial foi implementada no *software* estatístico R, juntamente com os dois vetores das variáveis resposta, para obtenção de um modelo matemático simplificado composto apenas pelo intercepto mais os efeitos principais dos 11 fatores. Desta forma, os 52 efeitos de 2ª ordem ou superiores foram considerados como resíduos.

Para identificar os efeitos de 1ª ordem mais sensíveis, foram calculados os p-valores do teste *t-student*.

5.3 EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO

O delineamento fatorial completo foi realizado considerando apenas os parâmetros estruturais mais sensíveis, selecionados a partir dos resultados do fatorial fracionário desta pesquisa. Para o dano acumulado por fadiga do revestimento, foram 3 os fatores selecionados: a espessura do revestimento e os módulos de resiliência do revestimento e da base. Os defeitos apresentaram pouco ou nenhuma

sensibilidade aos demais fatores, portanto eles não foram considerados nesta fase. Ao contrário, os valores destes fatores foram fixados, tendo como valores de referência para os coeficientes de Poisson, adotados por Fontenele e Fernandes Júnior (2014). No caso dos módulos da sub-base e do subleito e das espessuras da base e da sub-base, foram adotados os valores médios entre os níveis superiores e inferiores. Os valores fixos destes fatores são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores fixos dos fatores para o dano por fadiga do revestimento

Camada	Coeficiente de Poisson	Módulo de resiliência	Espessura
Revestimento	0,30	variável	variável
Base	0,40	variável	19,0 cm
Sub-base	0,40	150 MPa	25,0 cm
Subleito	0,45	75 MPa	semi-infinito

Fonte: o próprio autor.

Para o dano acumulado por afundamento nas trilhas de roda, foram 5 os fatores selecionados na primeira fase do método: as espessuras do revestimento, da base e da sub-base e os módulos de resiliência da base e do subleito. Assim como nos tratamentos para as simulações de dano por fadiga, foram fixados os valores dos fatores que foram considerados pouco influentes no dano acumulado por afundamento. Os valores destes fatores são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores fixos dos fatores para o dano por afundamento plástico

Camada	Coeficiente de Poisson	Módulo de resiliência	Espessura
Revestimento	0,30	5.000 MPa	variável
Base	0,40	variável	variável
Sub-base	0,40	150 MPa	variável
Subleito	0,45	variável	∞

Fonte: o próprio autor.

5.3.1 Elaboração da Matriz do Fatorial Completo

Os delineamentos fatoriais resultaram em duas matrizes distintas,

uma referente ao dano acumulado por fadiga e outra referente ao dano acumulado por afundamento, APÊNDICE C e APÊNDICE D, respectivamente.

Conforme descrito no item 3.2.2, o programa PerRoad aplica uma abordagem probabilística na consideração dos dados de tráfego e, conseqüentemente, existe variabilidade nas respostas. Desta forma, os experimentos foram realizados em triplicata.

Para a análise do dano acumulado por fadiga, o ensaio fatorial em triplicata com 3 fatores de 2 níveis (3×2^3) resultou em 24 simulações no PerRoad. No caso da análise do dano acumulado por afundamento, tratando-se de um ensaio fatorial com 5 fatores (3×2^5), foram realizadas 96 simulações no programa.

Cada linha das matrizes representa uma combinação de diferentes valores dos fatores. Nestas matrizes, estão contempladas todas as combinações possíveis, considerando variações em dois níveis de cada fator.

Por meio deste ensaio fatorial completo, é possível prever como os fatores influenciam individualmente (efeitos principais) o desempenho do pavimento, sem que haja confundimento com efeitos de ordens superiores. Além disso, é possível mensurar os efeitos das interações até a 7ª ordem, apesar de que os efeitos de 3ª ordem ou superiores são, normalmente, irrisórios.

5.3.2 Modelo Matemático Linear

O passo seguinte à definição das matrizes fatoriais foi a realização das simulações no programa PerRoad, para obtenção dos 120 valores das 2 variáveis resposta (danos acumulados por fadiga e afundamento).

Da mesma maneira que no ensaio fatorial fracionário, as matrizes (APÊNDICE C e APÊNDICE D) e os vetores das variáveis resposta foram implementados no *software* R, para a determinação do modelo matemático linear. No caso do dano acumulado por fadiga, o modelo foi composto pelo intercepto mais 7 coeficientes fatoriais. Já para o do dano acumulado por afundamento, o modelo foi composto pelo intercepto mais 31 coeficientes fatoriais.

Como os coeficientes fatoriais representam a relação dos efeitos, sejam eles principais ou de ordens superiores, foi possível julgar as relações dos fatores com o desempenho do pavimento (sensibilidade), bem como os efeitos das interações entre os diversos fatores.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está dividido em dois subcapítulos, correspondentes aos resultados da fase 1 e fase 2 da pesquisa. Em cada subcapítulo, são apresentados os principais resultados divididos em tópicos específicos para o dano acumulado por fadiga do revestimento e para o dano acumulado por afundamento plástico nas trilhas de rodas.

6.1 ENSAIO FATORIAL FRACIONÁRIO: SELEÇÃO DOS EFEITOS DE PRIMEIRA ORDEM

Este subcapítulo refere-se à fase 1 da pesquisa, que teve como objetivo principal interpretar e selecionar os fatores mais influentes nas previsões de desempenho. Porém, é realizada uma breve análise de sensibilidade das previsões de desempenho aos efeitos de primeira ordem. Para cumprir os objetivos desta fase, são apresentados os modelos matemáticos e diagramas de Pareto referentes às previsões de danos acumulados por fadiga e afundamento.

6.1.1 Modelo Matemático do Fatorial Fracionário para Previsão de Dano por Fadiga

A análise do modelo fatorial fracionário (2^{11-5}) realizado no software estatístico R resultou em uma função que relaciona o dano acumulado por fadiga do revestimento com os parâmetros estruturais. Para este delineamento fatorial, que resultou em 64 observações (simulações no *software* PerRoad), foi gerado o modelo matemático simplificado composto pelo intercepto mais os 11 coeficientes fatoriais correspondentes aos efeitos dos 11 fatores, conforme exposto na Tabela 10.

Os coeficientes fatoriais representam a sensibilidade de cada fator. Quanto maior for este coeficiente, mais sensível o defeito é em relação às variações de níveis do fator correspondente.

Coeficientes fatoriais negativos indicam que os fatores a eles relacionados reduzem o dano acumulado previsto após a passagem de 10^6 eixos, quando atribuídos a eles níveis superiores (+1). Ao contrário, quando atribuídos níveis inferiores (-1) resultam em aumento do dano acumulado previsto.

Tomando-se como exemplo o fator espessura do revestimento (Esp.R), que tem coeficiente fatorial igual a -0,8761, quando se atribui o nível superior

(+1) a este fator, no caso a espessura de 15,0 cm, o dano acumulado por fadiga do revestimento previsto sofre uma redução de 87,61%. Por outro lado, quando se atribui o nível inferior (-1), neste caso a espessura de 7,5 cm, o dano acumulado previsto sofre um aumento de 87,61%.

Tabela 10 - Modelo matemático do fatorial fracionário para previsão de dano acumulado por fadiga

Fator	Coefficiente	p-valor (teste t)
Intercepto	1,1811	< 0,0001
CPoi.R	-0,0289	0,805
CPoi.B	0,0661	0,573
CPoi.Sbb	0,0164	0,889
CPoi.Sbl	0,0058	0,961
Esp.R	-0,8761	< 0,0001
Esp.B	-0,0677	0,564
Esp.Sbb	-0,0048	0,967
Mr.R	-0,6614	< 0,0001
Mr.B	-0,5883	< 0,0001
Mr.Sbb	-0,1033	0,380
Mr.Sbl	-0,0302	0,797

Fonte: o próprio autor.

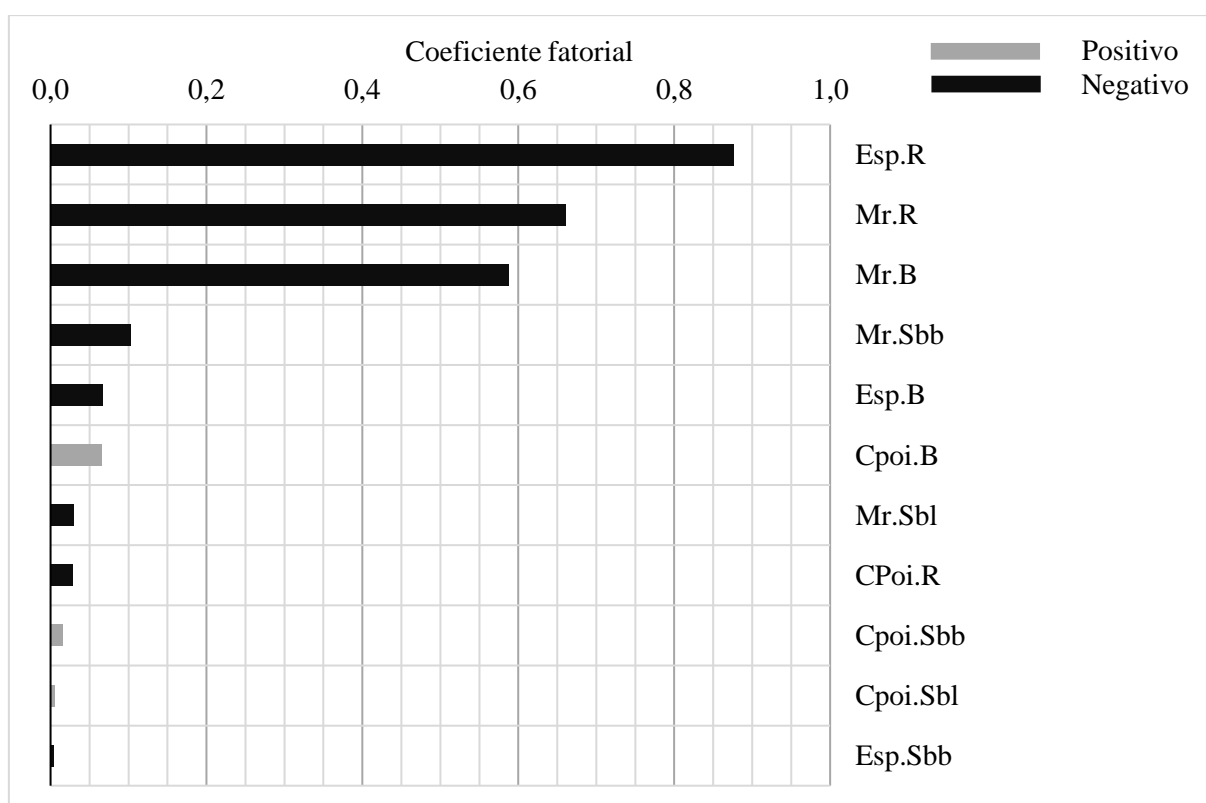
Conforme o exposto na metodologia deste trabalho, o modelo matemático gerado nesta etapa é composto apenas do intercepto e dos efeitos de primeira ordem. Os 52 efeitos de ordens superiores foram considerados como resíduos do modelo. Para a seleção dos fatores que têm maior influência nas previsões de dano acumulado por fadiga foi aplicado o teste *t-student* e calculados os p-valores (última coluna da Tabela 10). Tratando-se de uma fase exploratória, foi considerado um nível de significância de 0,10. Desta forma, foram selecionados para a fase 2 do método (delineamento fatorial completo) os fatores: espessura do revestimento (Esp.R), módulo do revestimento (Mr.R) e módulo da base (Mr.B).

A fim de possibilitar uma percepção visual das sensibilidades, foi elaborado um estudo (Figura 14) que apresenta os efeitos principais referentes aos

11 fatores do experimento. Na Figura 14, o eixo das abcissas é composto pelos valores dos coeficientes fatoriais. O fator de maior sensibilidade é (Esp.R), seguido dos fatores (Mr.R) e (Mr.B), todos com coeficientes fatoriais negativos. O desempenho do pavimento em relação ao dano acumulado por fadiga é, aparentemente, pouco sensível aos outros 8 fatores.

O gráfico da Figura 14, que indica diferença expressiva das sensibilidades dos fatores (Esp.R), (Mr.R) e (Mr.B) em relação aos demais fatores, corrobora com os resultados da estatística do teste apresentados na Tabela 10.

Figura 14 - Sensibilidade dos fatores ao dano acumulado por fadiga do revestimento – ensaio fatorial fracionário



Fonte: o próprio autor.

A espessura do revestimento asfáltico aparece entre os fatores da estrutura mais sensíveis ao dano por fadiga do revestimento, em todos os estudos contemplados no levantamento bibliográfico. Em alguns desses estudos, este é o fator mais sensível (PELISSON *et al.*, 2015; RÉUS e FONTENELE, 2016; WU *et al.*, 2017).

O módulo da camada de base também é um fator cujo dano por fadiga apresenta alta sensibilidade na maioria dos estudos apresentados no APÊNDICE A,

vide: Schwartz *et al.* (2013), Orobio e Zaniewski (2011), Réus e Fontenele (2016), Dilip *et al.* (2016) e Wu *et al.* (2017), de maneira que, quanto mais rígida a camada de base, menores as deformações específicas na fibra inferior do revestimento e, conseqüentemente, maior a vida útil do pavimento em relação à fadiga.

Alguns estudos apontam o módulo de resiliência do revestimento como um fator de alta sensibilidade. Destes, nos estudos realizados por Schwartz *et al.* (2013) e Li *et al.* (2012), foi o fator mais sensível à fadiga do revestimento. Nos trabalhos de Orobio e Zaniewski (2011), Schwartz *et al.* (2013) e Wu *et al.* (2017), outros fatores da camada de revestimento também apresentaram alta sensibilidade, são eles: o volume de vazios e o teor de asfalto.

Uma observação adicional à esta análise é que os únicos coeficientes fatoriais com valores positivos foram aqueles correspondentes aos fatores coeficiente de Poisson da base (Cpoi.B) e coeficiente de Poisson da sub-base (Cpoi.sbb). Isto indica que, apesar de pouco expressiva, a mudança do nível inferior (0,30) para o nível superior (0,40) desses fatores gera aumento do dano acumulado por fadiga do revestimento.

6.1.2 Modelo Matemático do Fatorial Fracionário para Previsão de Dano por Afundamento

A partir do ensaio fatorial fracionário, foi gerado o modelo matemático que relaciona o dano acumulado por afundamento com os fatores estruturais. Este modelo é composto pelo intercepto mais os 11 coeficientes fatoriais correspondentes aos efeitos dos 11 fatores, conforme exposto na Tabela 11.

A interpretação dos coeficientes fatoriais é a mesma para o modelo que representa o dano acumulado por fadiga. Quanto maior o valor do coeficiente, mais sensível o defeito é ao efeito correspondente. O sinal algébrico (+ ou -) indica de que maneira o efeito influencia o consumo do defeito (variável resposta), aumentando-o ou diminuindo-o.

Da mesma forma que no modelo para o dano acumulado por fadiga, para a seleção dos fatores que têm maior influência nas previsões de dano acumulado por afundamento foi aplicado o teste *t-student* e calculados os p-valores (última coluna da Tabela 11).

Considerando nível de significância de 0,10, foram selecionados para

a fase 2 do método (delineamento fatorial completo) os fatores: espessura do revestimento (Esp.R), módulo do subleito (Mr.sbl), espessura da base (Esp.B), espessura da sub-base (Esp.sbb) e módulo da base (Mr.B).

Tabela 11 - Modelo matemático do fatorial fracionário para previsão de dano por afundamento

Fator	Coefficiente	p-valor (teste t)
Intercepto	0,9848	< 0,0001
CPoi.R	0,0039	0,9758
CPoi.B	0,0595	0,6438
CPoi.Sbb	-0,0186	0,8850
CPoi.Sbl	-0,1433	0,2680
Esp.R	-0,6945	< 0,0001
Esp.B	-0,4133	2,15 x 10⁻³
Esp.Sbb	-0,3948	3,25 x 10⁻³
Mr.R	-0,1742	0,1793
Mr.B	-0,2552	5,14 x 10⁻²
Mr.Sbb	-0,1298	0,3150
Mr.Sbl	-0,6823	< 0,0001

Fonte: o próprio autor.

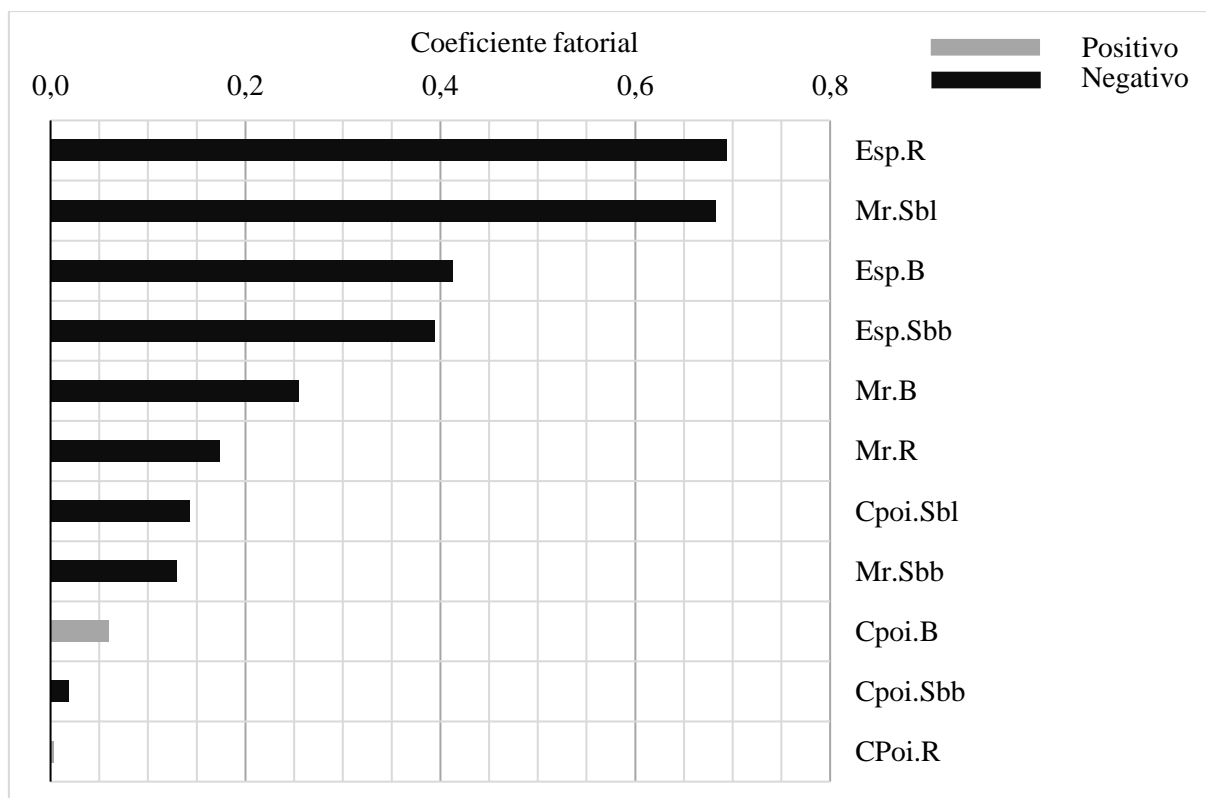
Foi elaborado um estudo (Figura 15) para possibilitar uma interpretação visual dos efeitos de 1ª ordem, dos 11 fatores considerados nesta fase do experimento.

A espessura do revestimento (Esp.R) e módulo do subleito (Mr.Sbl) se destacam no topo do diagrama. Entretanto, nota-se que diversos efeitos têm, aparentemente, valores de coeficientes significativos. Isso pode tornar as análises mais complexas do que a análise de sensibilidade em relação ao dano acumulado por fadiga do revestimento.

Em todos os estudos compilados no APÊNDICE A, que consideraram a espessura do revestimento como variável independente, este foi um dos fatores mais sensíveis ao afundamento plástico total. Nos estudos de Réus e Fontenele (2016), Pelisson *et al.* (2015) e Wu *et al.* (2017), foi o fator mais sensível. O módulo

do subleito também está entre os fatores mais sensíveis, e é apontado desta forma em quase todos os estudos apresentados. Nos resultados de Dilip *et al.* (2016) e Orobio e Zaniewski (2011), este foi o fator mais sensível ao afundamento plástico total.

Figura 15 - Sensibilidade dos fatores ao dano acumulado por afundamento – ensaio fatorial fracionário



Fonte: o próprio autor.

Além da espessura do revestimento e módulo do subleito, os parâmetros espessura da base (Esp.B), espessura da sub-base (Esp.Sbb), módulo da base (Mr.B), módulo do revestimento (Mr.R), coeficiente de Poisson do subleito (Cpoi.Sbl) e módulo da sub-base (Mr.Sbb) influenciam de maneira significativa a variável resposta (dano acumulado por afundamento). Todos esses efeitos principais citados apresentam coeficiente negativo. Ou seja, quando atribuídos a esses fatores seus níveis inferiores, eles farão com que o consumo do defeito, por 10^6 solicitações de eixos, aumente.

6.2 ENSAIO FATORIAL COMPLETO: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Este subcapítulo refere-se à fase 2, que teve como objetivo analisar a sensibilidade dos danos acumulados por fadiga e afundamento aos fatores, efeitos de primeira ordem, e interações entre duplas de fatores, efeitos de segunda ordem. Assim como na fase 1, são apresentados os modelos matemáticos e diagramas de Pareto. Entretanto, nesta fase os modelos são expandidos e contemplam todos os efeitos de primeira ordem e ordens superiores. Além disso, apresenta análise de sensibilidade mais detalhada, considerando os efeitos das interações entre fatores. Foram construídos gráficos de superfície para tangibilizar as interpretações das interações de segunda ordem.

6.2.1 Modelo Matemático do Fatorial para Previsão de Dano por Fadiga

Conforme descrito nos tópicos 5.3.1 e 6.1.1, dos 11 fatores considerados na fase 1, 3 fatores foram selecionados para a fase 2. Sendo assim, o esquema fatorial em triplicata (3×2^3), que gerou 24 simulações no PerRoad, foi implementado no R (R CORE TEAM, 2021) para obtenção do modelo matemático apresentado na Tabela 12. O modelo é composto pelo intercepto, os 3 efeitos de primeira ordem, 3 efeitos de segunda ordem e o único efeito de terceira ordem, referente à interação entre os 3 fatores.

O objetivo do cálculo do p-valor da estatística do teste foi de verificar o ajuste do modelo às variabilidades das respostas obtidas do esquema em triplicata, lembrando-se que o PerRoad não é determinístico, conforme exposto no item 3.2.2.

Como pode ser visto na última coluna da Tabela 12, todos os p-valores resultaram em valores inferiores a 2×10^{-16} , número que representa o limite inferior de sensibilidade do R. Este fato pode ser explicado pela quantidade de ciclos de Monte Carlo configurados nas simulações do PerRoad, que foi de 5.000, visto que quanto maior este número melhor o ajuste do modelo. Sendo assim, a quantidade de 5.000 aplicada ao PerRoad é suficiente para obter um modelo com bom ajuste.

Tabela 12 - Modelo matemático do fatorial completo para previsão de dano acumulado por fadiga

Fator	Coefficiente	p-valor (t)
Intercepto	1,2638	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R	-0,9362	$< 2 \times 10^{-16}$
Mr.B	-0,6376	$< 2 \times 10^{-16}$
Mr.R	-0,7090	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Mr.B	0,5195	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Mr.R	0,4911	$< 2 \times 10^{-16}$
Mr.B * Mr.R	0,4177	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Mr.B * Mr.R	-0,3268	$< 2 \times 10^{-16}$

* R-quadrado do modelo = 1,0000

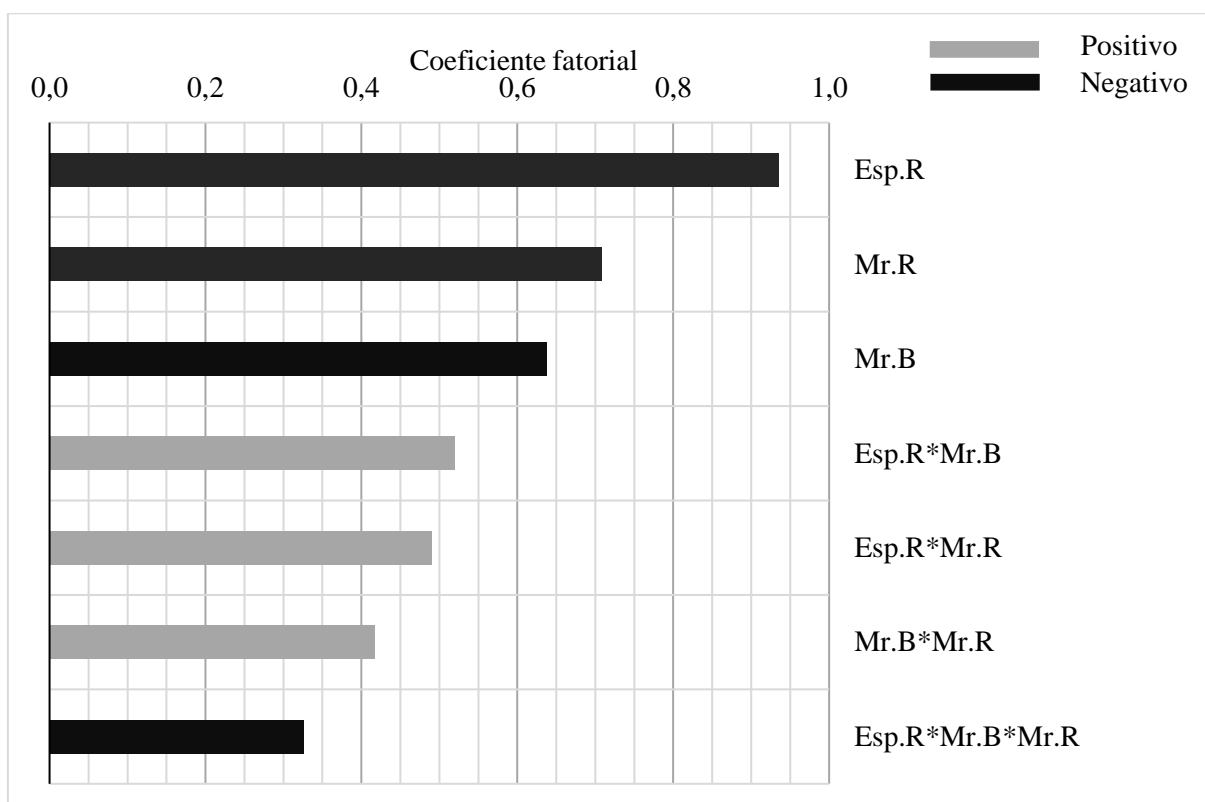
* R-quadrado ajustado do modelo = 0,9999

Fonte: o próprio autor.

No Diagrama de Pareto da Figura 16, os coeficientes fatoriais do modelo estão dispostos de maneira decrescente. Os efeitos principais dos 3 fatores (Esp.R, Mr.R e Mr.B) aparecem no topo do diagrama, na mesma ordem em que estão no diagrama da Figura 14. Logo, apenas o esquema fatorial fracionado da fase 1 do método seria suficiente para ranquear os 3 fatores mais influentes na previsão de dano acumulado por fadiga do revestimento. Da mesma forma que no modelo matemático gerado na fase 1 (Tabela 10), os efeitos desses 3 fatores apresentaram coeficientes negativos. Ou seja, atribuir a eles os valores dos níveis superiores resulta em redução no dano acumulado por fadiga.

Os coeficientes fatoriais das 3 interações de segunda ordem são relevantes para o modelo, principalmente para as interações que envolvem o fator Esp.R, que apresentaram valores próximos ao efeito de primeira ordem referente ao fator Mr.B. Porém, ao contrário dos efeitos de primeira ordem, os coeficientes fatoriais de segunda ordem são positivos. Isto significa que se a multiplicação dos níveis dos dois fatores envolvidos resultar em valor positivo haverá um acréscimo no dano acumulado por fadiga igual ao valor do coeficiente fatorial correspondente.

Figura 16 - Sensibilidade dos fatores ao dano acumulado por fadiga do revestimento
– ensaio fatorial completo



Fonte: o próprio autor.

Tomando-se como exemplo a interação entre Esp.R e Mr.B, que possui coeficiente fatorial igual a 0,5195. Caso fosse atribuído o valor 1 ao fator Esp.R, que corresponde ao seu nível superior (15,0 cm) e o valor -1 ao fator Mr.B, correspondente ao seu nível inferior (200 MPa) haveria um decréscimo de 0,5195 no dano acumulado por fadiga. O mesmo ocorreria caso fosse adotado o nível inferior para Esp.R e o nível superior para Mr.B. Esta mesma interpretação é válida para as outras interações de segunda ordem.

A única interação de terceira ordem do modelo apresentou um coeficiente negativo.

6.2.2 Análise das Interações entre Fatores para Previsão de Dano por Fadiga

Para interpretar as interações entre os fatores, foram gerados no R (R CORE TEAM, 2021) os gráficos das superfícies das respostas do modelo matemático apresentado na Tabela 12. O gráfico tridimensional possui no plano (x, y) os eixos

com valores entre (-1) e (1) de dois fatores. O terceiro fator não é apresentado no gráfico e possui o valor fixado em seu nível inferior ou superior. No eixo (z) estão os valores da variável resposta: dano acumulado por fadiga do revestimento. Portanto, a superfície, que também é representada no plano pelas curvas de nível, é composta pelas respostas do modelo ponto a ponto de uma malha retangular.

Os fatores foram comparados dois a dois, restando o terceiro fator com valor fixo. Este procedimento resultou nos 6 gráficos das superfícies de resposta apresentados nas Figuras 17, 18 e 19.

É importante esclarecer que as interpretações dos gráficos que seguem serão realizadas apenas para os vértices da base, onde os fatores assumem os níveis superiores (1) ou níveis inferiores (-1). Não serão considerados os pontos da superfície de resposta onde os fatores assumem valores intermediários entre (1) e (-1), pois o esquema fatorial desta pesquisa contém 2 níveis e, conseqüentemente, os modelos gerados podem não representar adequadamente a não linearidade.

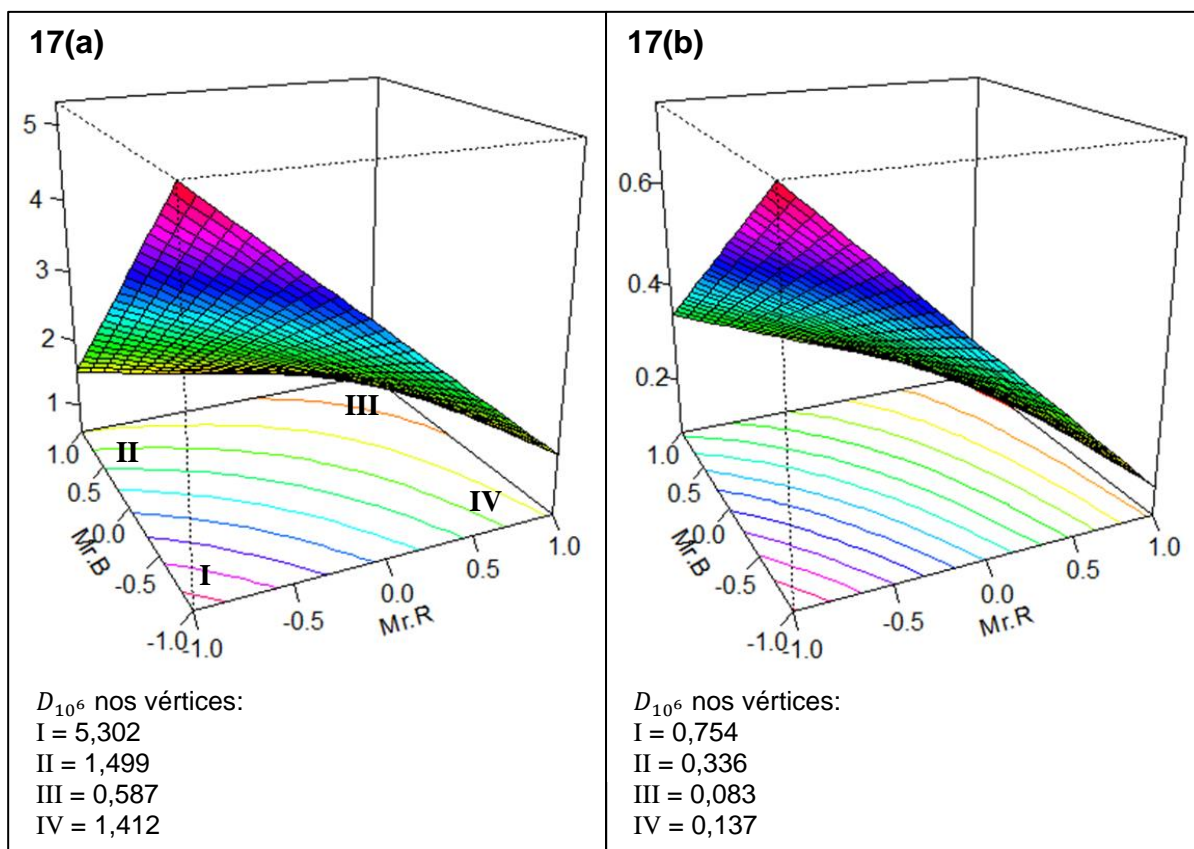
Nos gráficos da Figura 17 são comparadas as respostas obtidas para variações nos valores dos níveis dos fatores Mr.B e Mr.R, mantendo-se fixo o valor do fator Esp.R. No gráfico 17(a), o valor de Esp.R foi fixado em (-1), enquanto que no gráfico 17(b) o valor de Esp.R foi fixado em (+1)

Em ambos os gráficos da Figura 17, as cotas das superfícies de resposta decrescem em direção ao vértice III da base. Neste vértice, tem-se a condição ótima, em que os danos acumulados por fadiga são os menores possíveis dentro do intervalo considerado nesta pesquisa. Este comportamento era esperado, pois Mr.B e Mr.R possuem coeficientes fatoriais negativos.

Especialmente na Figura 17(b), percebe-se que as cotas da superfície de resposta também decrescem em direção ao vértice IV, em que Mr.B assume o nível (-1) e Mr.R o nível (+1). A cota da superfície neste vértice se aproxima da cota no vértice III, no qual se tem a condição ótima.

Esses resultados indicam que quando se tem uma estrutura de pavimento flexível com valores elevados de espessura e módulo do revestimento, neste caso com 15,0 cm e 7.000 MPa, respectivamente, o módulo da base tem pouca influência no dano acumulado por fadiga. Mesmo quando atribuído o nível inferior (-1) ao fator Mr.B, que corresponde a 200 MPa, o desempenho continua próximo à condição ótima.

Figura 17 – Gráficos das superfícies de Mr.B versus Mr.R fixado em Esp.R



17(a) Fixo em Esp.R = -1

17(b) Fixo em Esp.R = +1

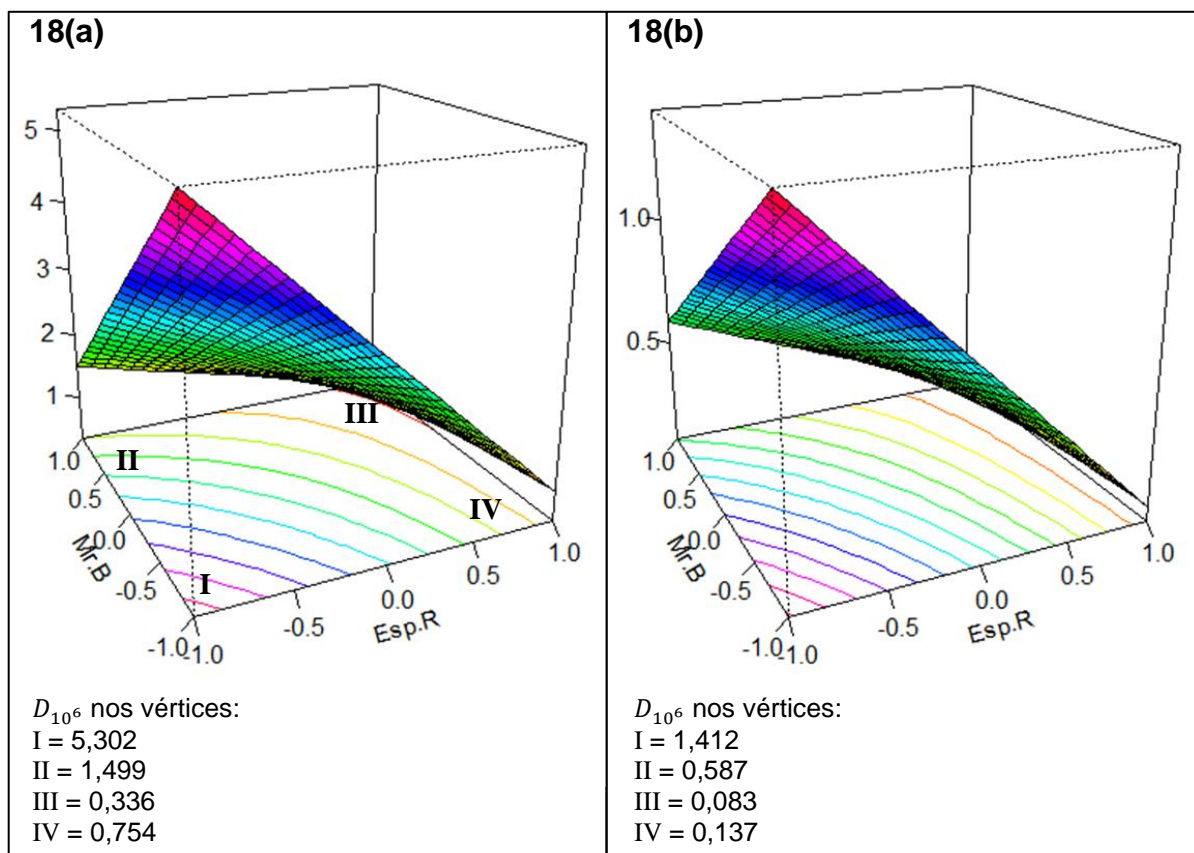
Fonte: o próprio autor

Na Figura 18, estão os dois gráficos das superfícies de resposta para as variações nos níveis de Mr.B e Esp.R, mantendo-se fixo o nível do fator Mr.R. No gráfico 18(a), o valor de Mr.R foi fixado em (-1), enquanto que no gráfico 18(b) o valor de Mr.R foi fixado em (+1).

Nos dois gráficos da Figura 18, os pontos mais baixos, que representam a condição ótima (menores valores de dano acumulado por fadiga), estão no vértice III da base, onde Mr.B e Esp.R assumem os níveis superiores (+1). Porém, tanto no gráfico 18(a) quanto no 18(b) as superfícies também apresentam declividades voltadas para o vértice IV da base.

No gráfico 18(b), em que o nível do fator Mr.R está fixo em (+1), esta declividade em direção ao vértice IV é ainda mais acentuada que no gráfico 18(a), chegando próximo ao valor de resposta da condição ótima. Este fato leva à seguinte conclusão: quando Mr.R e Esp.R assumem os valores de seus níveis superiores, o Mr.B tem pouca influência no dano acumulado por fadiga.

Figura 18 – Gráficos das superfícies de Mr.B versus Esp.R fixado em Mr.R



18(a) Fixo em Mr.R = -1

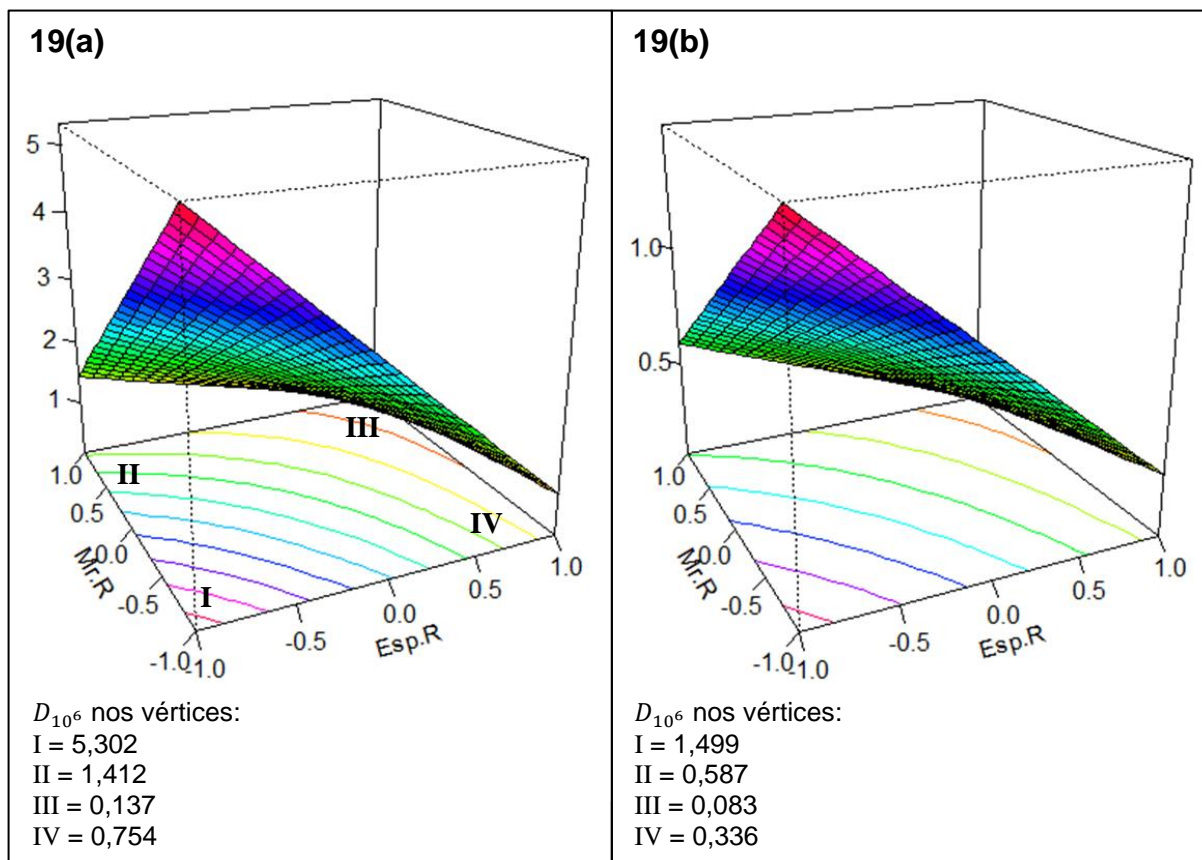
18(b) Fixo em Mr.R = +1

Fonte: o próprio autor

Na Figura 19, são apresentados os dois gráficos das superfícies de resposta para as variações nos níveis de Mr.R e Esp.R, mantendo-se fixo o nível do fator Mr.B. No gráfico 19(a), o valor de Mr.B foi fixado em (-1), enquanto que no gráfico 19(b) o valor de Mr.B foi fixado em (+1).

Como esperado, em ambos os gráficos da Figura 19 a condição ótima é referente ao vértice em Mr.R e Esp.R assumem os valores de seus níveis superiores. As superfícies também indicam leve declividade em direção ao vértice IV dos gráficos 19(a) e 19(b). De fato, as cotas nesses vértices são inferiores às cotas nos vértices Esp.R = -1 e Mr.R = 1, expressando-se a maior influência da espessura do revestimento na resposta do modelo.

Figura 19 – Gráficos das superfícies de Mr.R versus Esp.R fixado em Mr.B



19(a) Fixo em Mr.B = -1

19(b) Fixo em Mr.B = +1

Fonte: o próprio autor

6.2.3 Modelo Matemático do Fatorial para Previsão de Dano por Afundamento

Considerando os 5 fatores selecionados na fase 1 do método, em um delineamento fatorial em triplicata (3×2^5), que resultou em 96 simulações no PerRoad, foi obtido o modelo matemático apresentado na Tabela 13. O modelo é composto pelo intercepto, 5 efeitos principais, 10 efeitos de segunda ordem, 10 efeitos de terceira ordem, 5 efeitos de quarta ordem e um efeito de quinta ordem.

Na última coluna da Tabela 13 estão os p-valores do teste *t-student*, que resultaram todos em valor próximo de zero.

Tabela 13 - Modelo matemático do fatorial completo para previsão de dano acumulado por afundamento

Fator	Coefficiente	p-valor (t)
Intercepto	0,6778	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R	-0,5132	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.B	-0,2710	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.sbb	-0,2906	$< 2 \times 10^{-16}$
Mr.B	-0,1690	$< 2 \times 10^{-16}$
Mr.sbl	-0,4455	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.B	0,2204	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.sbb	0,2335	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.B * Esp.sbb	0,1230	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Mr.B	0,1426	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.B * Mr.B	0,0473	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.sbb * Mr.B	0,0748	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Mr.sbl	0,3269	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.B * Mr.sbl	0,1746	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.sbb * Mr.sbl	0,1855	$< 2 \times 10^{-16}$
Mr.B * Mr.sbl	0,1119	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.B * Esp.sbb	-0,1075	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.B * Mr.B	-0,0454	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.sbb * Mr.B	-0,0670	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.B * Esp.sbb * Mr.B	-0,0236	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.B * Mr.sbl	-0,1423	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.sbb * Mr.sbl	-0,1491	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.B * Esp.sbb * Mr.sbl	-0,0815	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Mr.B * Mr.sbl	-0,0936	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.B * Mr.B * Mr.sbl	-0,0320	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.sbb * Mr.B * Mr.sbl	-0,0508	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.B * Esp.sbb * Mr.B	0,0233	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.B * Esp.sbb * Mr.sbl	0,0699	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.B * Mr.B * Mr.sbl	0,0303	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.sbb * Mr.B * Mr.sbl	0,0447	$< 2 \times 10^{-16}$

Esp.B * Esp.sbb * Mr.B * Mr.sbl	0,0154	$< 2 \times 10^{-16}$
Esp.R * Esp.B * Esp.sbb * Mr.B * Mr.sbl	-0,0153	$< 2 \times 10^{-16}$

Fonte: o próprio autor.

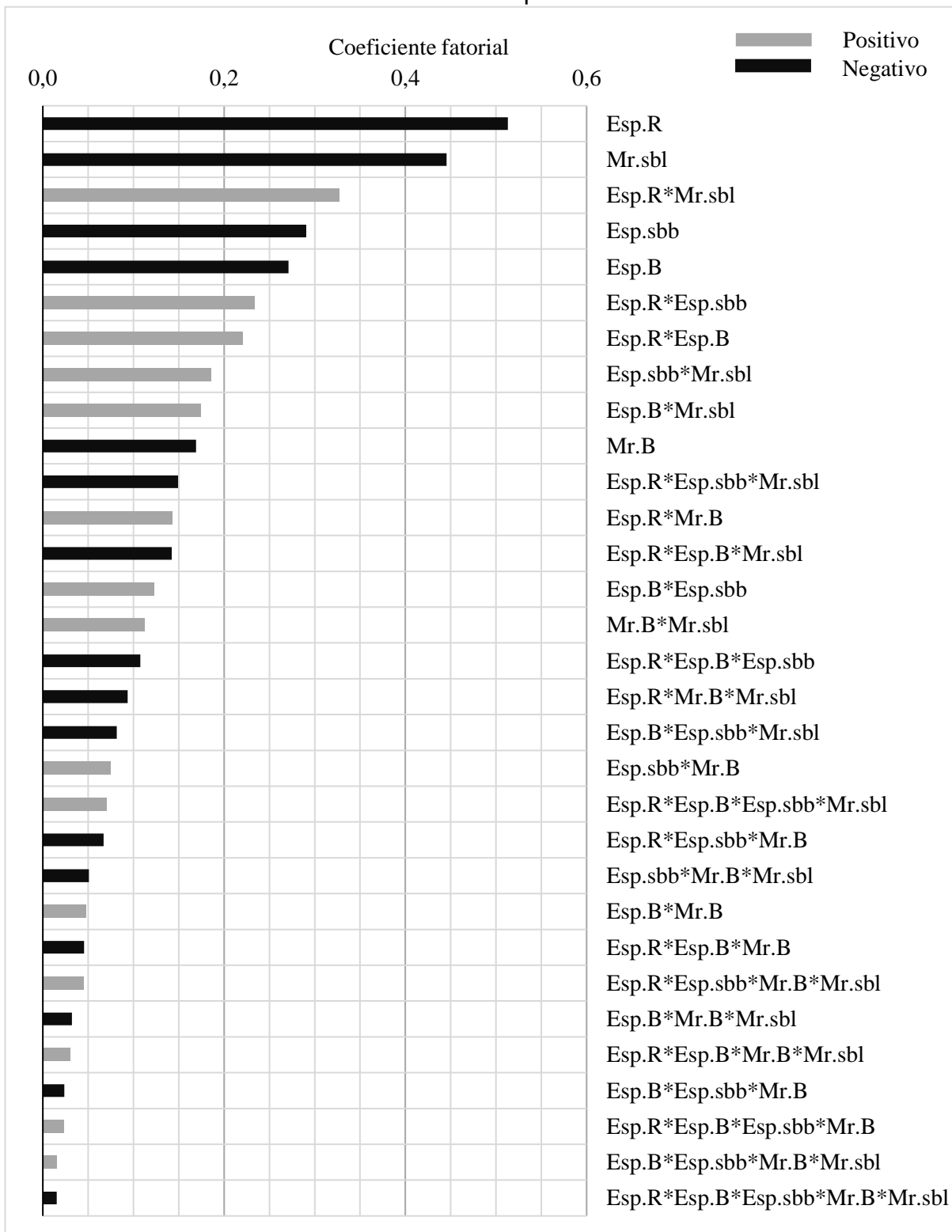
Os coeficientes fatoriais dos efeitos apresentados na Tabela 13 estão dispostos de maneira decrescente no Diagrama de Pareto da Figura 20. No topo do diagrama aparecem os coeficientes dos dois fatores que mais influenciam no consumo de dano acumulado por fadiga: a espessura do revestimento e o módulo do subleito. No modelo gerado a partir do delineamento fatorial fracionado, esses dois fatores também aparecem no topo do diagrama da Figura 15, porém, diferentemente do resultado do fatorial completo, no fracionado o coeficiente fatorial do Esp.R é apenas 1,79% superior ao do Mr.sbl. No modelo do fatorial completo, a diferença entre os dois coeficientes é mais expressiva, igual a 15,20%. Isto é, a influência da espessura do revestimento no modelo é ainda maior do que observado na fase 1 do método.

O terceiro efeito que mais influencia a variável resposta é o efeito da interação entre os fatores Esp.R e Mr.sbl. Este coeficiente, assim como todos os outros correspondentes aos efeitos de segunda ordem, apresenta valor positivo. Isto significa que sempre que forem atribuídos os valores dos níveis superiores ou inferiores a ambos os fatores, ou seja, quando eles possuírem o mesmo sinal (1 ou -1), o dano acumulado por fadiga receberá um aumento de 0,3269.

Os efeitos de terceira ordem e superiores apresentam coeficientes fatoriais menores que os efeitos de ordem inferiores, por isso não serão analisados individualmente. Além do que o significado dos efeitos de ordens superiores é mais complexo, comprometendo a objetividade desta análise.

Outros efeitos de segunda ordem também aparecem próximos ao topo do diagrama de Pareto, mostrando-se mais relevantes que um dos efeitos principais, o módulo da base, que por sinal é efeito principal de menor coeficiente fatorial, aparecendo apenas como décimo efeito mais relevante.

Figura 20 - Sensibilidade dos fatores ao dano acumulado por afundamento – ensaio fatorial completo



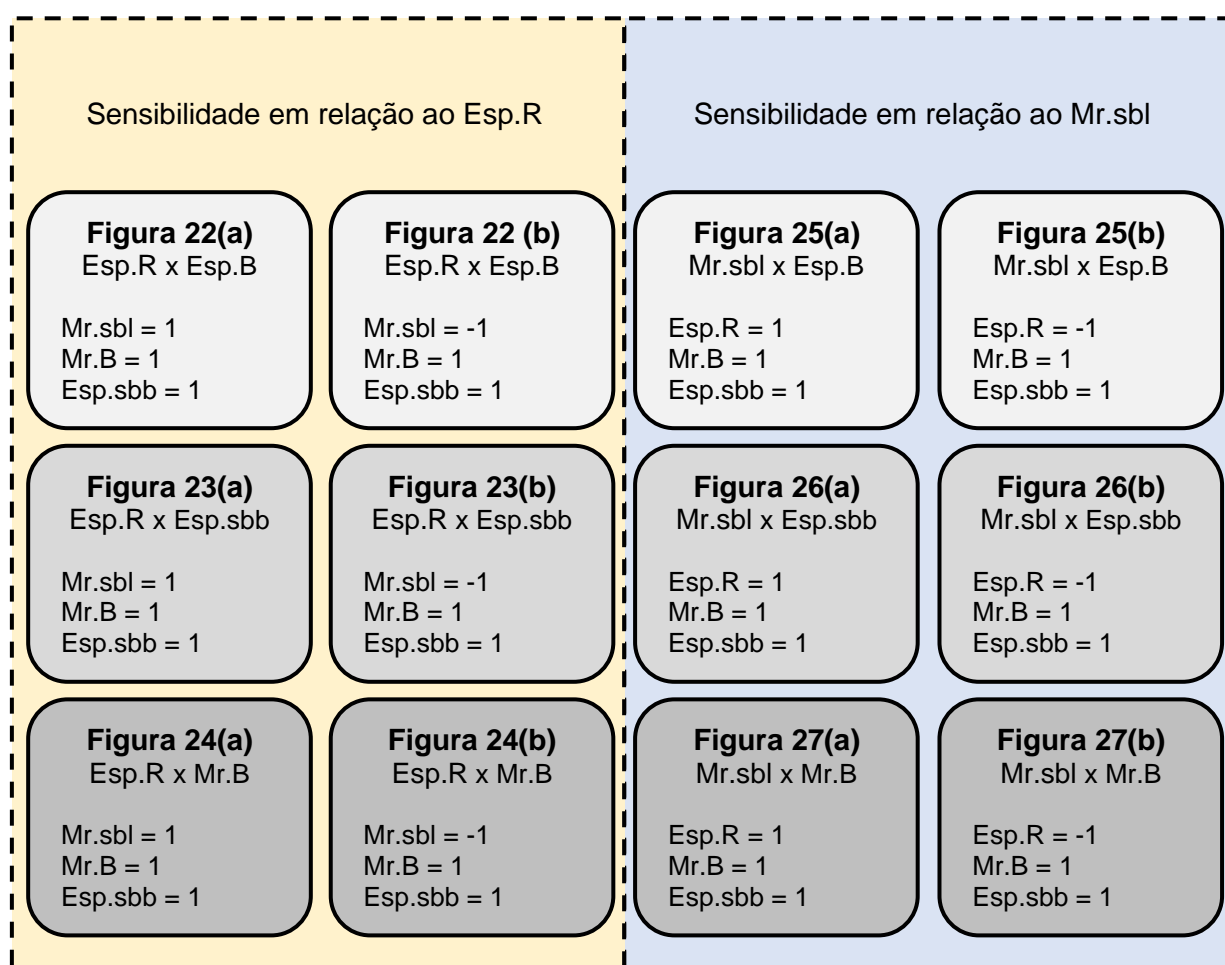
Fonte: o próprio autor.

6.2.4 Análise das Interações entre Fatores para Previsão de Dano por Afundamento

Os gráficos das Figuras 22 a 27 representam as superfícies de resposta do modelo matemático apresentado na Tabela 13. Não foram gerados todos os gráficos das superfícies de resposta das combinações possíveis de pares de fatores no plano (x, y), como feito nas análises do tópico 6.2.1, pois para isso seriam necessários 80 gráficos, o que comprometeria a objetividade da análise.

Diante disso, apenas os dois efeitos mais relevantes, no caso Esp.R e Mr.sbl, foram analisados com os outros fatores, resultando nos 12 gráficos das Figuras 22 a 27, conforme o esquema da Figura 21.

Figura 21 – Esquema dos gráficos de superfície de resposta para análise sensibilidade dos fatores

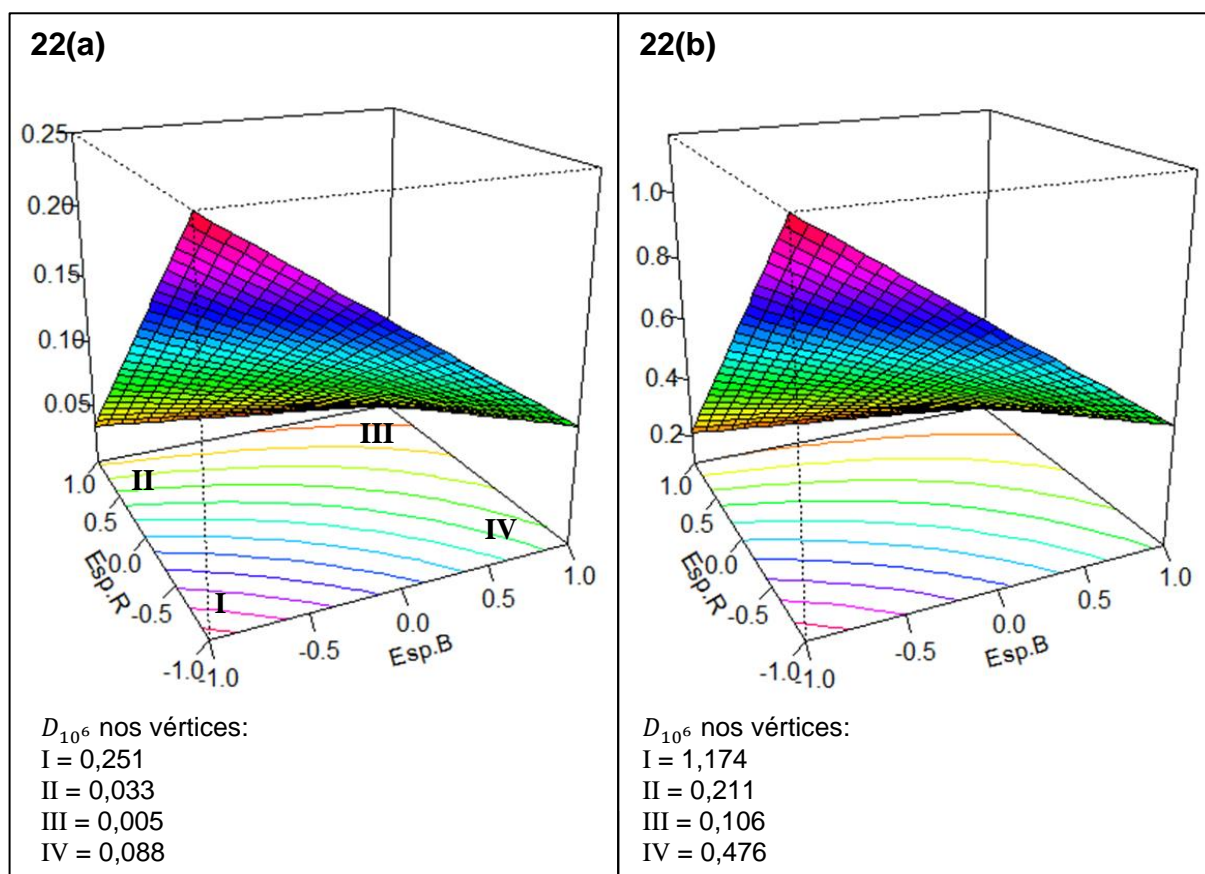


Fonte: o próprio autor.

Nos gráficos da Figura 22, é analisada a sensibilidade do fator Esp.R em relação ao fator Esp.B. Para isso, foram mantidos fixos os níveis dos fatores Mr.sbl, Mr.B e Esp.sbb. No gráfico 22(a) os níveis desses 3 fatores foram mantidos em seus níveis superiores (+1). No gráfico 22(b) os fatores Mr.B e Esp.sbb foram mantidos em (+1), e apenas o nível do Mr.sbl foi mantido em (-1), diferenciando-se do gráfico 22(a), para avaliar o impacto do nível de Mr.sbl nas respostas de Esp.R *versus* Esp.B.

Em ambos os gráficos, as superfícies indicam que o melhor desempenho do pavimento (condição ótima) ocorre quando Esp.R e Esp.B assumem os valores de seus níveis superiores, que corresponde ao vértice III da base.

Figura 22 – Gráficos das superfícies de Esp.R *versus* Esp.B



22(a) Fixo em Mr.sbl = +1; Mr.B = +1; Esp.sbb = +1

22(b) Fixo em Mr.sbl = -1; Mr.B = +1; Esp.sbb = +1

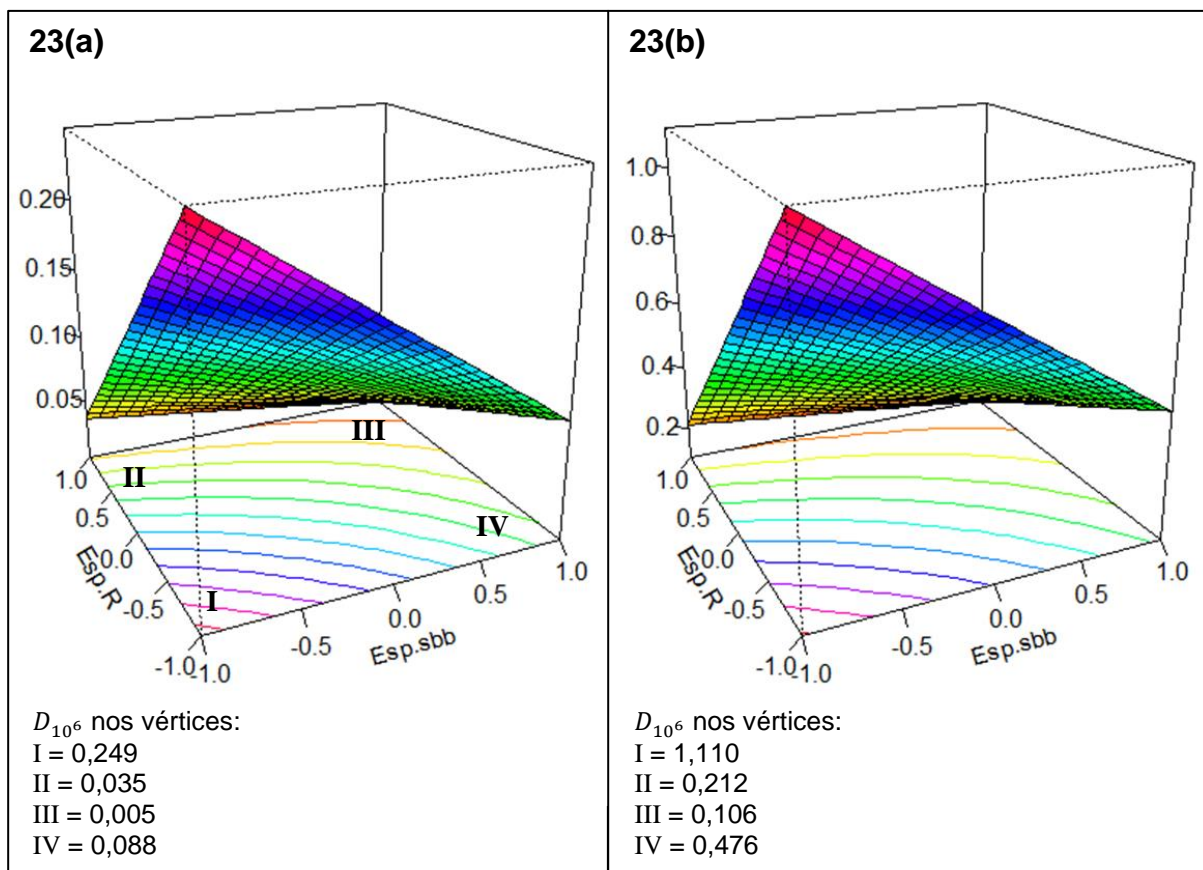
Fonte: o próprio autor.

As superfícies também apresentam declividades em direção ao vértice II, indicando desempenho mais próximo da condição ótima do que no vértice IV. Além disso, no vértice II da Figura 22(b), o desempenho se aproxima mais da

condição ótima que no mesmo vértice II do gráfico da Figura 22(a). Na Figura 22(b) o valor da variável resposta no vértice II é de 0,211, contra 0,106 da resposta no vértice referente à condição ótima. Uma diferença percentual de 98,8%. No gráfico da Figura 22(a) esta diferença percentual é de 619,0%. Isto significa que quando o módulo do subleito assume o nível inferior, que nesta pesquisa corresponde a 50 MPa, menor a influência da espessura da base no desempenho do pavimento.

Evidentemente, quanto menor o valor do módulo do subleito, menor a relevância da espessura da base. É possível que a influência de Esp.B continue a diminuir para valores inferiores a 50 MPa de módulo do subleito. Para confirmar esta hipótese seria necessário explorar uma faixa de valores mais ampla para Mr.sbl.

Figura 23 – Gráficos das superfícies de Esp.R versus Esp.sbb



23(a) Fixo em Mr.sbl = +1; Mr.B = +1; Esp.B = +1

23(b) Fixo em Mr.sbl = -1; Mr.B = +1; Esp.B = +1

Fonte: o próprio autor.

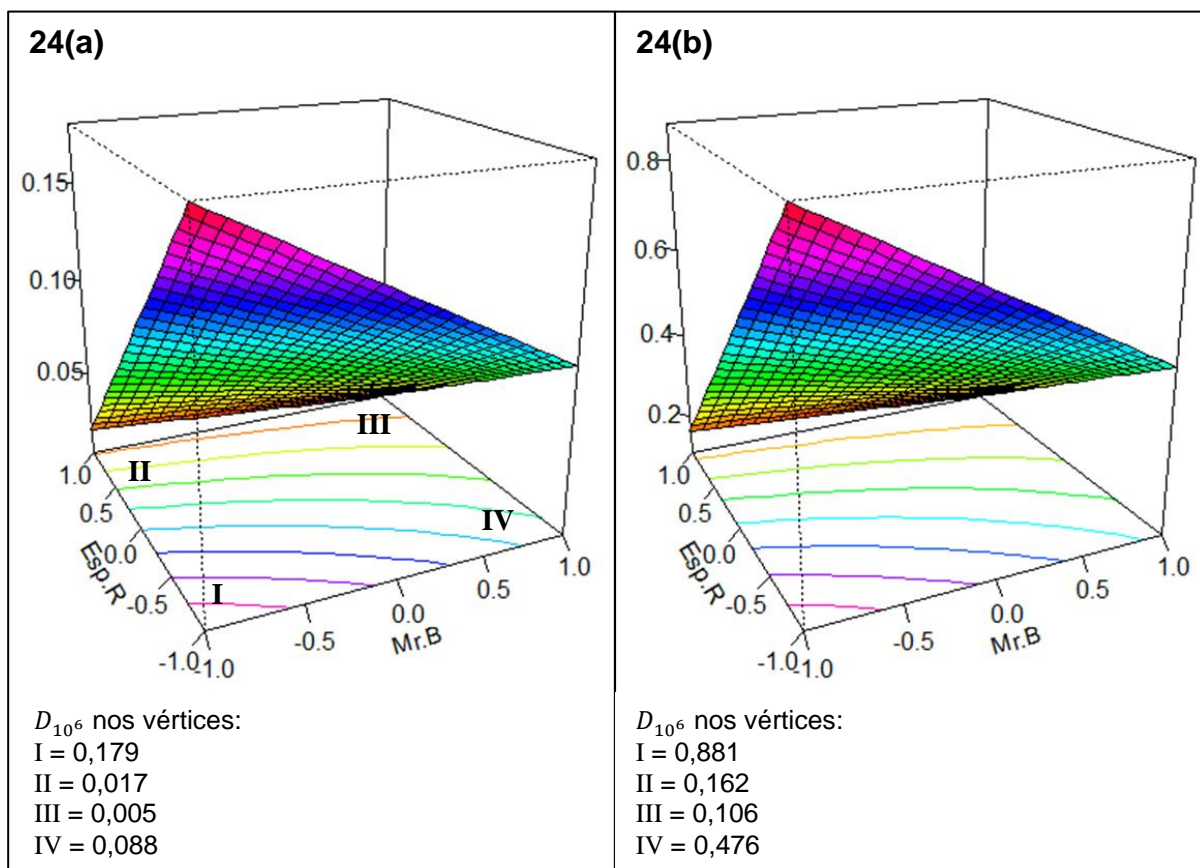
Na Figura 23, são apresentados os dois gráficos das superfícies de resposta para as variações nos níveis de Esp.sbb e Esp.R, mantendo-se fixos os fatores Mr.B e Esp.B em seus níveis superiores. No gráfico da Figura 23(a), o valor

de Mr.sbl foi fixado em (+1), enquanto que no gráfico da Figura 23(b) o valor de Mr.sbl foi fixado em (-1).

A interpretação destes dois gráficos é muito próxima daquela referente aos gráficos da Figura 22. As condições ótimas de desempenho são atingidas no vértice III da base dos dois gráficos da Figura 23, e as respostas do modelo mais próximas das condições ótimas são alcançadas nos vértices II. Além disso, os resultados indicam que quanto menor o valor do módulo do subleito, menor a influência da espessura da sub-base na variável resposta.

Nos dois gráficos de superfícies de resposta da Figura 24, que representam as respostas de Esp.R em relação a Mr.B, foram mantidos fixos os níveis dos fatores Esp.B e Esp.sbb em (+1). Para avaliar a influência de Mr.sbl nas respostas, este fator foi fixado em (+1) no gráfico 24(a), e fixado em (-1) no gráfico da Figura 24(b).

Figura 24 – Gráficos das superfícies de Esp.R versus Mr.B



24(a) Fixo em Esp.B = +1; Esp.sbb = +1; Mr.sbl = +1

24(b) Fixo em Esp.B = +1; Esp.sbb = +1; Mr.sbl = -1

Fonte: o próprio autor.

As interpretações são semelhantes às aquelas referentes aos gráficos das Figuras 22 e 23. Entretanto, nos dois gráficos de superfícies da Figura 24 os valores da variável resposta nos vértices II são mais próximos da condição ótima. É visível nas superfícies que as cotas neste vértice se aproximam das cotas do vértice que representa a condição ótima. Isto é explicado pelo maior contraste entre os fatores Esp.R e Mr.B. A espessura do revestimento possui o maior coeficiente fatorial entre todos os efeitos, e o Mr.B possui o menor.

Cabe salientar que a influência do módulo da base poderia ser ainda menor caso tivessem sido considerados valores de módulo do subleito inferiores a 50 MPa, pois a variável resposta no vértice II é mais próxima da condição ótima no gráfico 24(b), em que $Mr.sbl = -1$, do que no gráfico 24(a), em que $Mr.sbl = 1$.

Em termos práticos, os resultados indicam que, para valores baixos de módulo do subleito, um ligeiro aumento na espessura do revestimento pode impactar expressivamente o dano acumulado por fadiga, tornando o pavimento mais durável. Isto é observado mesmo quando o módulo da base assume o valor mínimo, que nesta pesquisa é de 200 MPa.

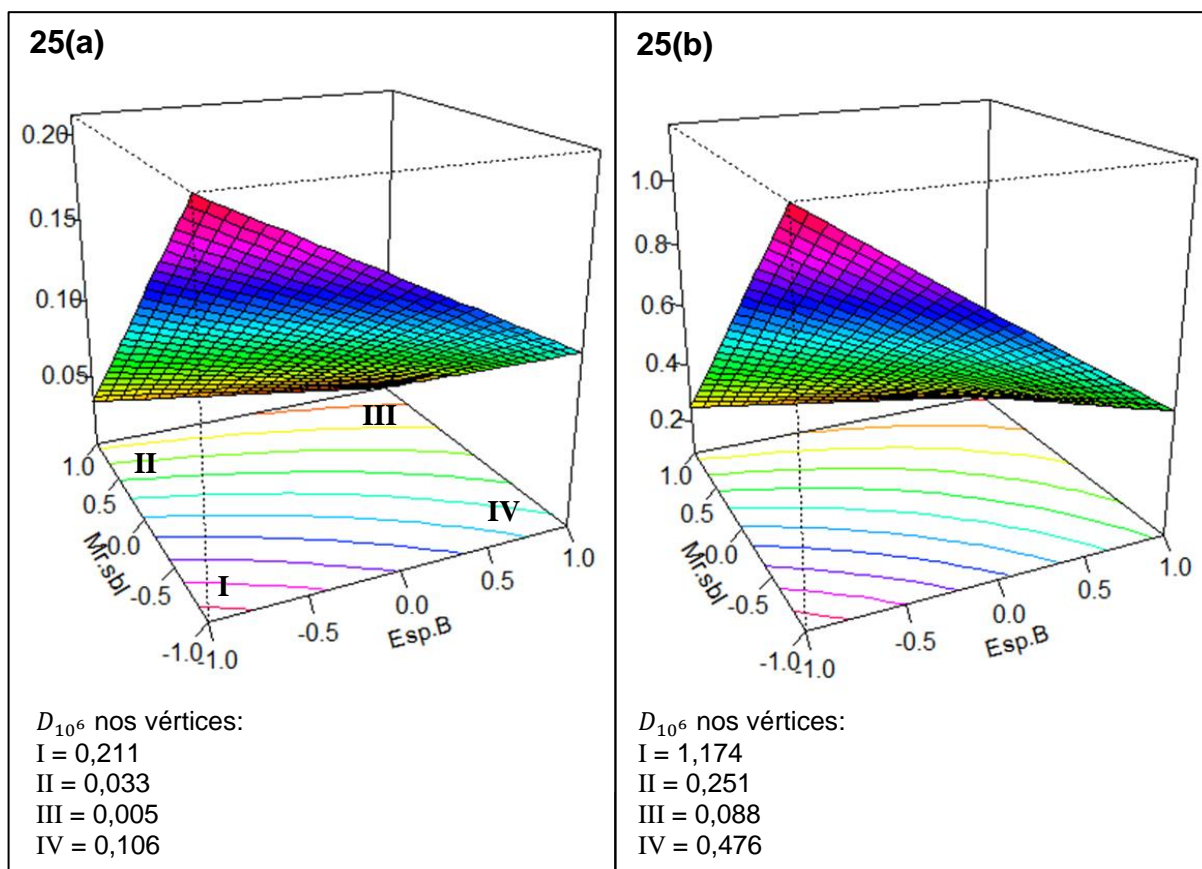
Conforme exposto no esquema da Figura 21, nos gráficos das Figuras 25, 26 e 27, a sensibilidade do fator Mr.sbl é relacionada com os fatores Esp.B, Esp.sbb e Mr.B, considerando variações nos níveis de Esp.R.

A partir dos gráficos da Figura 25, é analisada a sensibilidade do fator Mr.sbl em relação ao fator Esp.B. Para isso, foram mantidos fixos os níveis dos fatores Esp.R, Mr.B e Esp.sbb. No gráfico da Figura 25(a) o nível de Esp.R foi mantido em (+1) e no gráfico da Figura 25(b) foi mantido em (-1).

Em ambos os gráficos da Figura 25, tendo em vista que os fatores Mr.sbl e Esp.B possuem coeficientes fatoriais negativos, as superfícies apresentaram um comportamento já esperado: os menores valores de dano acumulado por fadiga (D_{10^6}) encontram-se no vértice III da base. Ou seja, este vértice representa a condição ótima.

Observa-se que as superfícies dos gráficos das Figuras 25(a) e 25(b) apresentam declividade em direção do vértice II, pois é neste vértice que o dano acumulado por fadiga mais se aproxima da condição ótima. Este também era um comportamento esperado, visto que o coeficiente fatorial do Mr.sbl é maior que o do Esp.B. Em outras palavras, o módulo do subleito tem maior influência que a espessura da base no dano acumulado por fadiga, a partir de simulações computacionais.

Figura 25 – Gráficos das superfícies de Mr.sbl versus Esp.B



25(a) Fixo em Mr.B = +1; Esp.sbb = +1; Esp.R = +1

25(b) Fixo em Mr.B = +1; Esp.sbb = +1; Esp.R = -1

Fonte: o próprio autor.

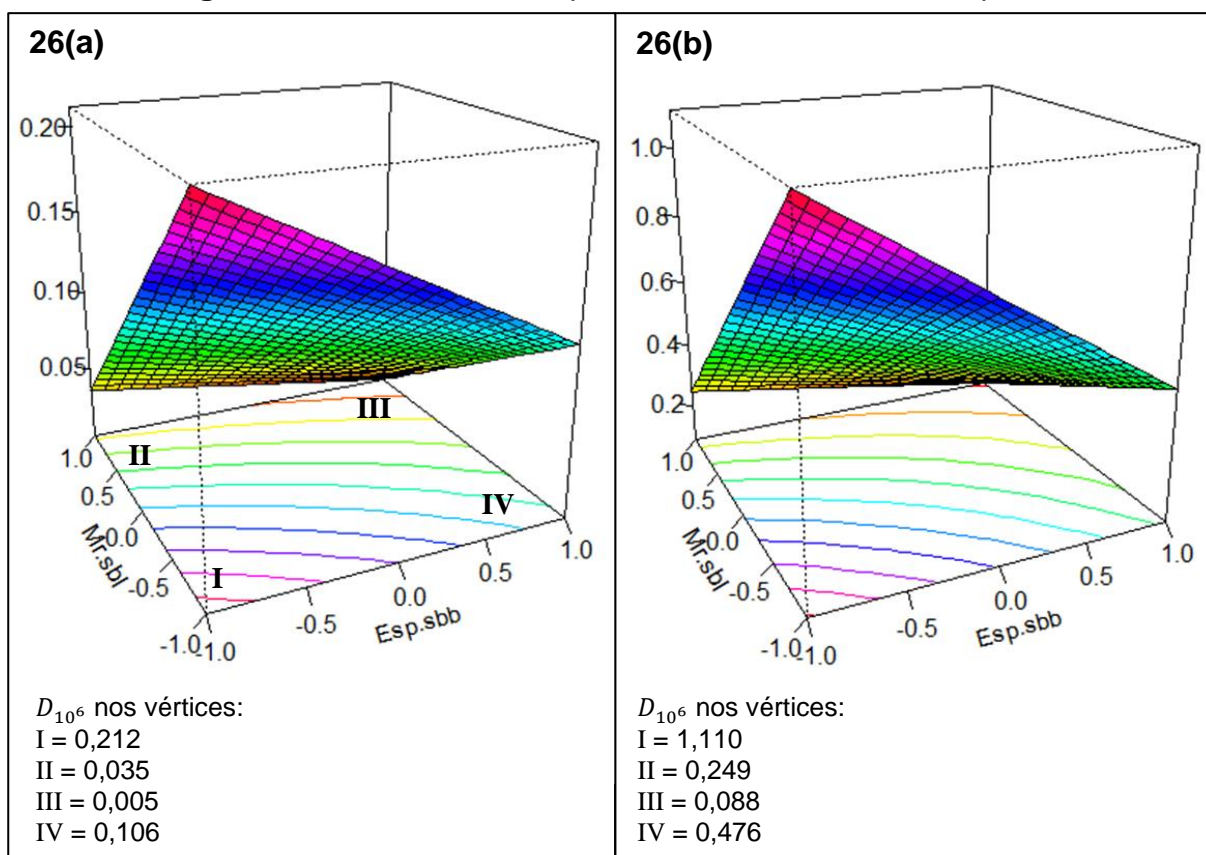
Entretanto, existem diferenças no comportamento das superfícies se comparados os dois gráficos. No gráfico da Figura 25(a), o D_{10^6} no vértice II é aproximadamente 720% maior que o D_{10^6} na condição ótima (vértice III). Já no gráfico da Figura 25(b), esta diferença é de 284%. Isto significa que quando a espessura do revestimento assume seu nível inferior, neste caso igual a 7,5 cm, a influência da espessura da base é menor no desempenho do pavimento, em termos de dano por afundamento.

Nos dois gráficos de superfícies de resposta da Figura 26, que representam as respostas de Mr.sbl em relação a Esp.sbb, foram mantidos fixos os níveis dos fatores Esp.B e Mr.B em (+1). Para avaliar a influência de Esp.R nas respostas, este fator foi fixado em (+1) no gráfico da Figura 26(a), e fixado em (-1) no gráfico 26(b).

As interpretações dos gráficos da Figura 26 são semelhantes àsquelas dos gráficos da Figura 25, possivelmente porque os valores dos coeficientes fatoriais

dos fatores Esp.B e Esp.sbb são próximos. Nos gráficos da Figura 26, a condição ótima também é observada no vértice III, onde Mr.sbl e Esp.sbb assumem os níveis superiores.

Figura 26 – Gráficos das superfícies de Mr.sbl versus Esp.sbb



26(a) Fixo em Mr.B = +1; Esp.B = +1; Esp.R = +1

26(b) Fixo em Mr.B = +1; Esp.B = +1; Esp.R = -1

Fonte: o próprio autor.

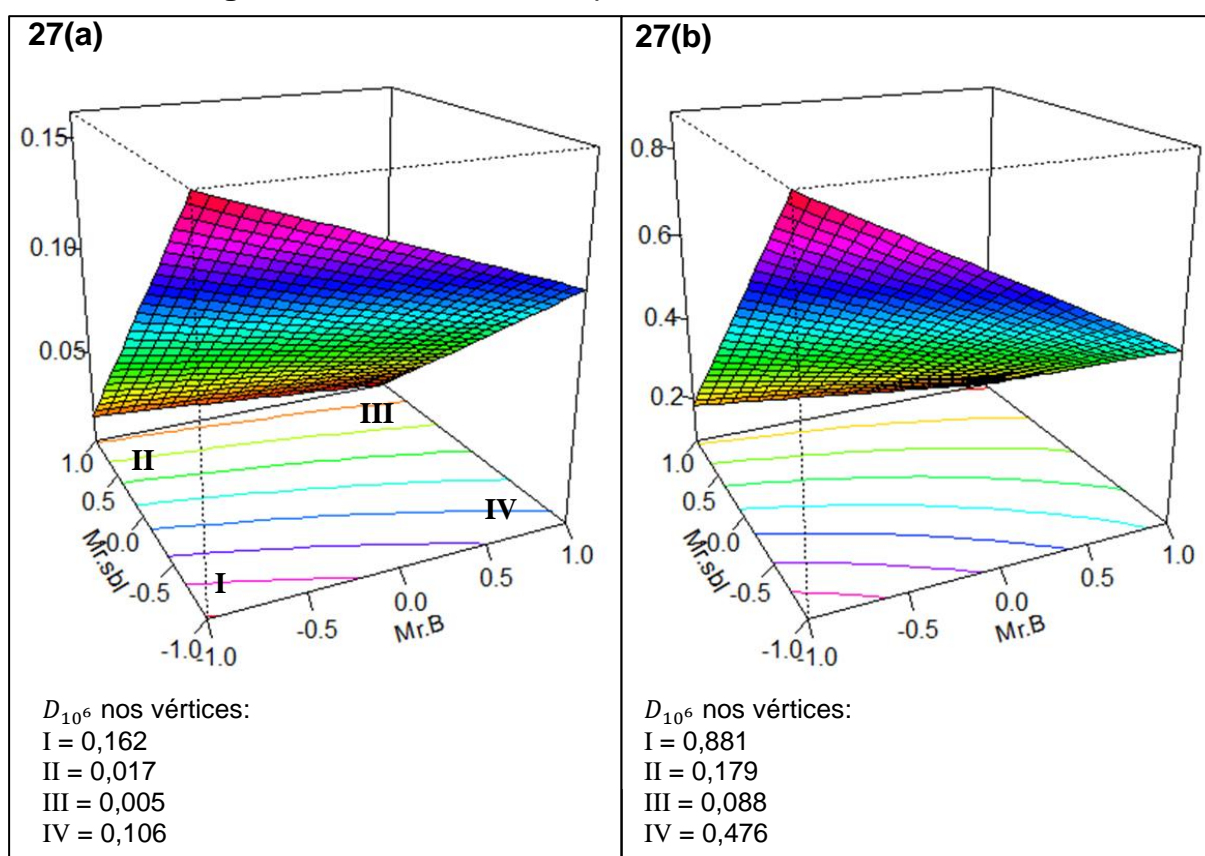
No vértice II, tem-se as respostas que mais se aproximam da condição ótima, em relação aos demais vértices. Entretanto, no vértice II do gráfico da Figura 26(b) o dano acumulado por afundamento aproxima-se mais da condição ótima que no mesmo vértice do gráfico da Figura 26(a). Ou seja, a espessura da sub-base tem menos influência no desempenho do pavimento quando a espessura do revestimento é inferior.

Nos dois gráficos de superfícies de resposta da Figura 27, que representam as respostas de Mr.sbl em relação a Mr.B, foram mantidos fixos os níveis dos fatores Esp.B e Esp.sbb em (+1). Para avaliar a influência de Esp.R nas respostas, este fator foi fixado em (+1) no gráfico da Figura 27(a), e fixado em (-1) no gráfico da

Figura 27(b).

Nos 4 gráficos das Figuras 25 e 26, o vértice III representa a condição ótima, condição em que se obtém o menor valor de dano acumulado por afundamento. Ao contrário, o vértice I representa a pior condição, em que se obtém o maior valor de dano. Este comportamento não é diferente nos gráficos da Figura 27. O que difere as superfícies de resposta desta figura daquelas superfícies das figuras anteriores é que, nos gráficos da Figura 27, as respostas no vértice II estão mais próximas da condição ótima (vértice III).

Figura 27 – Gráficos das superfícies de Mr.sbl versus Mr.B



27(a) Fixo em Esp.sbb = +1; Esp.B = +1; Esp.R = +1

27(b) Fixo em Esp.sbb = +1; Esp.B = +1; Esp.R = -1

Fonte: o próprio autor.

No gráfico da Figura 27(a), o dano acumulado no vértice II é 375% superior ao dano acumulado no vértice III, enquanto que no gráfico da Figura 27(b) esta diferença é de 203%. Isto significa que a influência do módulo da base é menor quando a espessura do revestimento assume o nível inferior considerado nesta pesquisa.

É possível que a influência da base no dano acumulado por afundamento continue diminuindo para valores de espessura de revestimento inferiores ao considerado nesta pesquisa. Isto tornaria o valor de D_{10^6} no vértice III ainda mais próximo da condição ótima.

7 CONCLUSÕES

O propósito deste trabalho foi de contribuir com o desenvolvimento e otimização de sistemas de gerência de pavimentos, fornecendo informações sobre a influência de fatores relacionados às espessuras das camadas da estrutura e parâmetros resistivos dos materiais, bem como os impactos das interações entre esses fatores, no que se refere à previsão de desempenho de pavimentos flexíveis.

Nos próximos tópicos deste capítulo, são apresentadas as considerações sobre os resultados alcançados. São tratadas separadamente as considerações sobre uma análise comparativa entre os dois delineamentos fatoriais aplicados, sobre a análise de sensibilidade do defeito trincas por fadiga e análise de sensibilidade do dano por afundamento nas trilhas de roda.

7.1 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DELINEAMENTOS FATORIAIS

Para a análise do dano acumulado por fadiga, o delineamento fatorial fracionado foi suficiente para determinar corretamente os fatores que mais influenciam no desempenho estrutural, pois resultou no mesmo ranqueamento de fatores obtido no delineamento fatorial completo: em primeiro lugar, a espessura do revestimento, em segundo, o módulo do revestimento e, em terceiro, o módulo da base.

O mesmo não ocorreu para o desempenho segundo o dano acumulado por afundamento. O ranqueamento dos efeitos principais dos fatores obtido por meio do fatorial fracionado difere daquele obtido pelo fatorial completo apenas nas posições dos fatores espessura da base e espessura da sub-base. No fatorial completo, o coeficiente fatorial deste fator resultou em valor superior ao daquele. No caso do fatorial fracionado, ocorreu o inverso. Entretanto, em ambos os delineamentos, os valores dos coeficientes da espessura da base e da sub-base são próximos.

De maneira geral, o fatorial fracionário cumpriu o objetivo de determinar, em ordem decrescente de efeito, os fatores que mais influenciam no desempenho estrutural, com apenas 64 simulações no PerRoad. Uma abordagem fatorial semelhante a desta pesquisa poderia ser facilmente implementada, por meio de algoritmos, em programas computacionais de dimensionamento de pavimentos,

com intuito de determinar a estrutura que resultaria na melhor relação custo *versus* benefício. Isto forneceria contribuição direta a um sistema de gerência de pavimentos.

7.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DANO ACUMULADO POR FADIGA

Diante da análise de sensibilidade realizada no programa PerRoad, por meio do delineamento fatorial, conclui-se que os fatores da estrutura aos quais o dano acumulado por fadiga é mais sensível são: a espessura e o módulo de resiliência do revestimento e o módulo de resiliência da camada de base. Esses 3 fatores apresentaram coeficientes fatoriais negativos, ou seja, a previsão de vida útil do pavimento aumenta quando atribuídos valores superiores a eles. Dentre os 3 fatores, a espessura do revestimento se destaca como mais influente.

Ressalta-se que os resultados obtidos são provenientes de um experimento fatorial de 2 níveis. Portanto, no caso da camada de revestimento, a consideração da espessura de 15,0 cm resulta em um ganho de vida útil em relação à espessura de 7,5 cm. Espessuras mais elevadas de revestimento reduzem as deformações específicas nas fibras inferiores desta camada e, conseqüentemente, retardam o surgimento das trincas por fadiga do revestimento.

Valores superiores dos módulos resilientes das camadas de revestimento e da base também reduzem as deformações específicas das fibras inferiores do revestimento. É evidente que camadas asfálticas mais rígidas apresentem menores deformações específicas. No caso da camada de base, quanto maior sua rigidez, menor sua deformação vertical específica e, conseqüentemente, menos liberdade a camada de revestimento tem para se deformar na flexão.

O dano acumulado por fadiga apresentou pouca ou nenhuma sensibilidade aos demais fatores, com destaque para o módulo do subleito, os coeficientes de Poisson do revestimento, da sub-base e do subleito e a espessura da sub-base, que apresentaram os menores coeficientes fatoriais, ou seja, influenciam de maneira pouco significativa a previsão de desempenho do pavimento em termos da fadiga do revestimento. Isto se deve ao fato de que o mecanismo de surgimento deste defeito está relacionado às deformações específicas que ocorrem nas primeiras camadas da estrutura.

No que tange às interações entre os 3 principais fatores que influenciam no dano acumulado por fadiga do revestimento, pode-se dizer que a

principal contribuição deste trabalho é direcionada às interações com o módulo da base: em uma estrutura de pavimento flexível com valores elevados de módulo e espessura do revestimento, é provável que o módulo da base tenha pouca influência no desempenho estrutural. Esta constatação poderia ser melhor explorada em um delineamento experimental que considerasse uma faixa de valores mais ampla para os fatores, bem como pontos centrais, com intuito de captar o efeito da não-linearidade nos modelos.

7.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DANO ACUMULADO POR AFUNDAMENTO

Diante dos resultados obtidos da análise de sensibilidade do dano por afundamento 5 fatores da estrutura se destacaram, tanto no delineamento fatorial fracionado quanto no completo, em ordem decrescente de coeficiente fatorial: espessura do revestimento, módulo de resiliência do subleito, espessura da sub-base, espessura e módulo de resiliência da base.

Esta maior quantidade de fatores que impactam consideravelmente o dano acumulado por afundamento, em comparação com o dano acumulado por fadiga, pode ser explicada pelo fato de que o mecanismo do afundamento envolve todas as camadas da estrutura do pavimento. No programa PerRoad, o afundamento plástico total da estrutura é atribuído exclusivamente às deformações verticais específicas que ocorrem no topo do subleito. Ou seja, as deformações específicas que podem ocorrer individualmente em cada camada não são computadas para a deformação plástica total. Porém, a deformação específica no topo do subleito depende da tensão aplicada nesta região que, por sua vez, é dependente do espraiamento de tensões que ocorre ao longo de toda a espessura da estrutura. Sendo assim, é evidente que os parâmetros de todas as camadas tenham influência no mecanismo desta deterioração.

Dos 5 fatores considerados no delineamento fatorial completo, a espessura do revestimento e o módulo do subleito se destacaram como os mais influentes. Devido ao mecanismo considerado no PerRoad para ocorrência do afundamento plástico, comentado anteriormente, era de se esperar que o módulo do subleito fosse um dos parâmetros mais sensíveis, mesmo quando considerado o método E-M da AASHTO, como nos estudos de Orobio e Zaniewski (2011), Dilip *et al.* (2016), Réus e Fontenele (2016) e Wu *et al.* (2017).

A partir das análises das interações entre o módulo de resiliência do subleito com os demais fatores, pode-se concluir que a influência das espessuras da base e da sub-base no dano acumulado por afundamento é reduzida quando o módulo do subleito assume o nível inferior, que é de 50 MPa. Ainda, é possível que a influência das espessuras dessas duas camadas seja ainda menor para valores menores de módulo do subleito.

A espessura do revestimento, assim como para o dano acumulado por fadiga, também é parâmetro fundamental em análises E-M de pavimentos flexíveis que consideram o dano por afundamento. Os revestimentos asfálticos possuem elevados módulos de elasticidade. Desta forma, pequenas variações de espessura influenciam significativamente o mecanismo de espraçamento de tensões e, conseqüentemente, a tensão de compressão que atinge o topo do subleito.

Na tentativa de aumentar a vida útil prevista para um pavimento flexível, pode ser mais eficiente aumentar a espessura do revestimento do que considerar um material de base mais nobre, com valor de módulo e de custos elevados. É mais provável que isto se verifique em locais de material de subleito com valores baixos de módulo de resiliência. Esta hipótese poderia ser confirmada por meio de um estudo que aborde a análise do ciclo de vida do pavimento.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, A. R.; FRANKHOUSER, A.; PAPAGIANNAKIS, A. T. Effect of traffic load input level on mechanistic-empirical pavement design. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2443, p. 63–77, 2014.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS EXECUTIVE COMMITTEE – AASHTO. **Mechanistic-Empirical Pavement Design. Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice**. 2. Ed. 2015.
- ASPHALT INSTITUTE. **MS-1 - Thickness Design Asphalt Pavements for Highways and Streets**. 9. Ed. 2008.
- ASTM D5858 (2015) **Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory**. American Society for Testing and Materials, USA.
- BOLADO-LAVIN, R.; BADEA, A. C. **Review of Sensitivity Analysis Methods and Experience for Geological Disposal of Radioactive waste and Spent Nuclear Fuel**. Luxembourg: European Communities, 2008.
- BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. **Empirical Model- Building and Response Surfaces**. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- BURMISTER, D. M. The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. **Journal of Applied Physics**, v. 15, p. 89-94, 1945.
- CACUCI, D. G. **Sensitivity and uncertainty analysis**. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2003.
- CACUCI, D. G.; IONESCU-BUJOR, M. A Comparative Review of Sensitivity and Uncertainty Analysis of Large-Scale Systems—II: Statistical Methods. **Nuclear Science and Engineering**, v. 147, n. 3, p. 204-217, 2004.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES – CNT. **Acidentes rodoviários e infraestrutura**. – Brasília : CNT, 2018a.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial**. – Brasília : CNT, 2018b.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES – CNT. **Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos**. – Brasília : CNT, 2017a.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES – CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**. – Brasília : CNT, 2017b.
- COOPER, S. B.; ELSEIFI, M. A.; MOHAMMAD, L. N. Parametric Evaluation of Design

Input Parameters on the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Predicted Performance. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 5, n. 4, p. 218-224.

DAMBLIN, G.; COUPLET, M.; IOOSS, B. Numerical studies of space-filling designs: optimization of Latin Hypercube Samples and subprojection properties. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 4, p. 276-289, 2013.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DER/SP. Diretoria de Engenharia. **Instrução de Projeto de Pavimentação IP-DE-P00/001A**. São Paulo, 2006. 53p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. Diretoria Geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Guia para Execução de Segmentos Experimentais – PRO - MeDiNa**. Brasília, 2020. 65p. (IPR. pub., 749).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Manual de gerência de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2011. 189p. (IPR. pub., 745).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006a. 274p (IPR. pub., 719).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006b. 310p (IPR. pub., 720).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. Diretoria de Infraestrutura Rodoviária. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. **Quadro de fabricantes de veículos**. Rio de Janeiro, 2012. 166p.

DILIP, D. M.; BABU, G. L. S. Methodology for Global Sensitivity Analysis of Flexible Pavements in a Bayesian Back-Analysis Framework. **ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering**, v. 2, n. 4, p. 04016002, 2016.

EL-BADAWY, S. M.; BAYOMY, F. M.; FUGIT, S. W. Traffic characteristics and their impact on pavement performance for the implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide in Idaho. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 5, n. 6, p. 386–394, 2012.

ELKINS, G. E.; THOMPSON, T.; OSTROM, B.; VISINTINE, B. (2018). **Long-Term Pavement Performance Information Management System User Guide**. Report FHWA-RD-03-088 (revision). Federal Highway Administration.

FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos**. 1995. 293 f. Tese (Doutorado) – Pós-

graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1994.

FONTENELE, H. B.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. O efeito da caracterização do tráfego no desempenho do pavimento flexível. **Ciência & Engenharia**, v. 23, n. 1, p. p. 09-16, 2014.

FONTENELE, H. B. **Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos**. 2011. 287 p. Tese (Doutorado) - Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2011.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos**. 2016. 262 p. Tese (Doutorado) – Programa de Engenharia Civil. UFRJ/ COPPE, Rio de Janeiro. 2016.

HALLENBECK, M.; RICE, B.; SMITH, C.; CORNELL-MARTINEZ, C.; WILKINSON, J. (1997). **Vehicle volume distributions by classification**. Report FHWA-PL-97-025. Federal Highway Administration.

HARSINI, I.; HAIDER, S. W.; BRINK, W. C.; BUCH, N.; CHATTI, K. Investigation of significant inputs for pavement rehabilitation design in the Pavement-ME. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 45, n.5, p. 386-392, 2018.

HOSSAIN, N.; SINGH, D.; ZAMAN, M. Sensitivity of traffic input parameters on rutting performance of a flexible pavement using Mechanistic Empirical Pavement Design Guide. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 450–459, 2016.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2. Ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2004.

IOOSS B.; LEMAÎTRE, P. A review on global sensitivity analysis methods. **Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications**, Springer, 2015.

ISLAM, S.; SUFIAN, A.; HOSSAIN, M.; MILLER, R.; LEIBROCK, C. Mechanistic-Empirical design of perpetual pavement. **Road Materials and Pavement Design**, v. 21, n.5, p. 1224-1237, 2018.

KARGAH-OSTADI, N.; STOFFELS, S. M. Backcalculation of Flexible Pavement Structural Properties Using a Restart Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 04014035-1 – 04014035-8, 2015.

KANNEKANTI, V.; HARVEY, J. (2005). **Sensitivity Analysis of 2002 Design Guide Rigid Pavement Distress Prediction Models**. Report. The California Department of Transportation.

KLEIJNEN, J. P. C.; SANCHEZ, S. M.; LUCAS, T. W.; CIOPPA, T. M. A User's Guide

to the Brave New World of Designing Simulation Experiments. **INFORMS Journal on Computing**, v. 17, n. 3, pp. 263–289, 2005.

KOSHIGOE, A. S. H.; ZANONI, F. C. V.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Effect of variation of the average daily volume and traffic growth rate on flexible pavements performance. **Ingeniare. Revista chilena de ingeniería**, v. 27, n. 1, p. 58–68, 2019.

LI, J.; PIERCE, L. M.; HALLENBECK, M. E.; UHLMAYER, J. Sensitivity of axle load spectra in the mechanistic-empirical pavement design guide for Washington state. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2093, p. 50-56, 2009.

LI, R.; SCHWARTZ, C. W.; KIM, S.; CEYLAN, H. Local sensitivity of mechanistic-empirical flexible pavement performance predictions to unbound material property inputs. **Proc., Geo Congress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering**, 2012.

LI, X.; ZHANG, R.; ZHAO, X.; WANG, H. Sensitivity Analysis of Flexible Pavement Parameters by Mechanistic-Empirical Design Guide. **Applied Mechanics and Materials**, v. 590, p. 539-545, 2014.

LI, Q. J.; MINNEKANTI, S. P.; YANG, G.; WANG, C. Traffic inputs for pavement ME design using Oklahoma data. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 12, n. 2, p. 154-160, 2019.

LI, R.; SCHWARTZ, C. W.; FORMAN, B. Sensitivity of Predicted Pavement Performance to Climate Characteristics. In: 2013 Airfield & Highway Pavement Conference, 2013, Los Angeles. **Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements**. Los Angeles: American Society of Civil Engineers, 2013. p. 760-771.

MAI, D.; TUROCHY, R.; TIMM, D. H. Correlation-based clustering of traffic data for the mechanistic-empirical pavement design guide. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2339, p. 104–111, 2013.

MAI, D.; TUROCHY, R. E.; TIMM, D. H. Sensitivity of Flexible Pavement Thickness to Traffic Factors in Mechanistic-Empirical Pavement Design. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 2, p. 04013005, 2014.

MONISMITH, C. L. Flexible Pavement Analysis and Design - A Half Century of Achievement. **Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress 2012**, p. 187-220, 2012.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

NASSIRI, S.; BAYAT, A.; KILBURN, P. Traffic inputs for mechanistic-empirical pavement design guide using weigh-in-motion systems in Alberta. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 15, n. 6, p. 483–494, 2014.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - NCHRP 1-37A. (2004). **Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures**. Report. Transportation Research Board.

NEWCOMB, D E; BUNCHER, M; HUDDLESTON, I J. Concepts of perpetual pavements. **Transportation Research Circular**, n. 503, p. 4-11, 2001.

OROBIO, A.; ZANIEWSKI, J. Sampling-based sensitivity analysis of the mechanistic-empirical pavement design guide applied to material inputs. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2226, p. 85-93, 2011.

OROBIO, A.; ZANIEWSKI, J. Sensitivity of the mechanistic-empirical pavement design guide to traffic inputs: a space-filling approach. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, n.3, p. 735-746, 2013.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement Design and Materials**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2008.

PAPAGIANNAKIS, A. T. Mechanistic-Empirical Pavement Design: A Brief Overview. **Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA**, v. 44, n. 1, p. 75-82, 2013.

PELISSON, N. D.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Efeito da variação da espessura do revestimento no desempenho de pavimentos flexíveis avaliados pelo MEPDG. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 7, n. 2, 2013.

PELISSON, N. D.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis. **Journal of Transport Literature**, v. 9, n. 1, p. 20-24, 2015.

R Core Team (2021). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RANADIVE, M. S.; TAPASE, A. B. Parameter sensitive analysis of flexible pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, p. 466-472, 2016.

RÉUS, T. F. **Efeito das variações das espessuras e módulos de resiliência das camadas no desempenho dos pavimentos flexíveis**. 2016. 115 p. Dissertação de Mestrado (Edificação e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2016.

RÉUS, T. F; FONTENELE, H. B. Sensibilidade de métodos empírico-mecanísticos para análise de pavimentos flexíveis. **Ciência & Engenharia**, v. 25, n. 1, p. 57-65, 2016.

ROMANOSCHI, S. A.; MOMIN, S.; BETHU, S.; BENDANA, L. Development of traffic

inputs for new Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2256, p. 142–150, 2011.

SAAD, B. Factorial Numerical Analysis of Flexible Pavement Foundations with Emphasis on Groundwater Table Effect. In: **Geo-Congress 2014 Technical Papers, Atlanta, Georgia**. 2014.

SAYYADY, F.; STONE, J. R.; TAYLOR, K. L.; JADOON, F. M.; KIM, Y. R. Clustering Analysis to Characterize Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide Traffic Data in North Carolina. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2160, p. 118-127, 2010.

SALTELLI, A.; SOBOL, I. M. About the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 50, n. 3, p. 225-239, 1995.

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F. Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. **Statistical Science**, v. 15, n. 4, p. 377-395, 2000.

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global Sensitivity Analysis. The Primer**. West Sussex: John Wiley and Sons, 2008.

SANTOS, T. A.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. The effect of axle load spectra from AASHTO method on flexible pavement performance. **Acta Scientiarum – Technology**, v. 41, e35117, 2019.

SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY. **Shell pavement design manual : asphalt pavements and overlays for road traffic**. Londres: Shell International Petroleum Co., 1978.

SCHWARTZ, C. W.; Li, R.; Kim, S.; Ceylan, H.; Gopalakrishnan, K. (2011). **Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction**. Final report, NCHRP Project 1-47. Transportation Research Board of the National Academies.

SCHWARTZ, C. W.; CARVALHO, R. L. Implementation of the NCHRP 1-37A design guide. **Final report**, v. 2, p. 77, 2007.

SCHWARTZ, C. W.; LI, R.; CEYLAN, H.; KIM, S.; GOPALAKRISHNAN, K. Global Sensitivity Analysis of mechanistic-Empirical Performance Predictions for Flexible Pavements. **Transportation Research Board Annual Meeting**. 2013.

STUBSTAD, R. N.; JIANG, Y. J.; LUKANEN, E. O. (2006) **Guidelines for Review and Evaluation of Backcalculation Results**. Report FHWA-RD-05-152. Federal Highway Administration.

TERZI, S. Modeling the Pavement Present Serviceability Index of Flexible Highway Pavements Using Data Mining. **Journal of Applied Sciences**, v. 6, n. 1, p. 193-197, 2006.

TIMM, D. H.; NEWCOMB, D. E. Calibration of Flexible Pavement Performance Equations for Minnesota Road Research Project. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1853, p. 134-142, 2003.

TIMM, D. H.; NEWCOMB, D. E. Perpetual pavement design for flexible pavements in the US. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 7, n. 2, p. 111-119, 2006.

TOMPKINS, D.; KHAZANOVICH, L. (2007). **MnROAD Lessons Learned**. Report MN/RC-2007-06. Minnesota Department of Transportation.

WU, Z.; YANG, X.; SUN, X. Application of Monte Carlo filtering method in regional sensitivity analysis of AASHTOWare Pavement ME design. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 4, n. 2, p. 185-197, 2017.

VAN CAUWELAERT, E J.; ALEXANDER, D. R.; WHITE, T. D.; BARKER, W. R. Multilayer Elastic Program for Backcalculating Layer Moduli in Pavement Evaluation. **American Society for Testing and Materials**, p. 171-188, 1989.

VIDOTTO, J. P.; FONTENELE, H. B. Efeito da variação da espessura do revestimento nas respostas estruturais do pavimento flexível. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 34, n. 2, p. 155-166, 2013.

YANG, X.; YOU, Z.; HILLER, J.; WATKINS, D. Sensitivity of flexible pavement design to Michigan's climatic inputs using pavement ME design. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 18, n. 7, p. 622-632, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A Revisão de análises de sensibilidade dos parâmetros estruturais de pavimentos flexíveis

Autor / Ano	Método	Software	Parâmetros mais significativos aos defeitos	
			Trincas por Fadiga	Afundamento Plástico Total
Schwartz <i>et al.</i> (2013)	Análise de sensibilidade global; amostragem por LHS; Redes neurais e modelagem de superfícies de resposta; NSI para mensurar sensibilidade.	MEPDG (40 mil simulações)	(1) Módulo dinâmico e (2) espessura do revestimento; (3) módulo do subleito; (4) volume de vazios e (5) teor de CAP do revestimento; (6) módulo da base.	(1) Módulo dinâmico; (2) espessura e (3) Poisson do revestimento;
Dilip <i>et al.</i> (2016)	Análise de sensibilidade global; amostragem por Markov Chain Monte Carlo; Sobol Indices para ranquear sensibilidade; 4 variáveis consideradas.	EVERSTRESSFE (Método dos Elementos Finitos)	(1) Módulo da base; (2) espessura do revestimento.	(1) Módulo do subleito; (2) espessura da base; (3) espessura do revestimento.
Réus e Fontenele (2016)	Análise de sensibilidade local (OAT); 6 parâmetros de 4 níveis cada; Coeficiente de Regressão Padronizado para medir sensibilidade.	MEPDG e ELSYM5	No ELSYM5: (1) espessura do revestimento e da (2) sub-base; (3) módulo da base. No MEPDG: (1) espessura do revestimento, (2) módulo e (3) espessura da base.	No ELSYM5: (1) espessura da sub-base e (2) módulo do subleito. No MEPDG: (1) espessura do revestimento; (2) módulo do subleito e (3) módulo da base.
Pelisson <i>et al.</i> (2015)	Análise de sensibilidade local (OAT); 3 parâmetros (espessuras das camadas) de 4 níveis cada; mensuração de sensibilidade por diferença percentual.	MEPDG	(1) Espessura do revestimento e (2) espessura da base.	(1) Espessura do revestimento.
Orobio e Zaniewski (2011)	Análise de sensibilidade global com 18 variáveis (espessuras fixas); amostragem por LHS; Coeficiente de Regressão Padronizado para medir sensibilidade.	MEPDG (500 simulações)	(1) Volume de vazios e (2) teor de asfalto do revestimento; (3) módulo da base; (4) Poisson do revestimento e da (5) base; (6) módulo da sub-base.	(1) Módulo do subleito; (2) volume de vazios do revestimento; (3) módulo da sub-base e da (4) base; (5) teor de asfalto e (6) Poisson do revestimento.
Li <i>et al.</i> (2012)	Análise de sensibilidade local com 33 variáveis, 3 níveis cada; NSI para mensurar sensibilidade.	MEPDG (1.005 simulações)	(1) Módulo dinâmico e (2) espessura do revestimento.	(1) Módulo dinâmico; (2) espessura e (3) Poisson do revestimento.
Saad (2014)	Fatorial de 2 níveis e 4 fatores: módulo da base, módulo e Poisson do subleito e nível do lençol freático. Diagrama de Pareto e Método de Lenth para determinar efeitos críticos.	ABAQUS (Método dos Elementos Finitos)	N/A	(1) Nível do lençol freático (D); (2) módulo do subleito (B); (3) interação BD; (4) Poisson do subleito.
Wu <i>et al.</i> (2017)	Análise de sensibilidade regional (RSA) com Monte Carlo Filtering (MCF).	AASHTOWare Pavement ME Design (500 simulações)	(1) Espessura do revestimento; (2) módulo da base; (3) volume de vazios e (4) teor de asfalto do revestimento.	(1) Espessura do revestimento; (2) módulo do subleito; (3) volume de vazios e (4) teor de asfalto do revestimento; (5) módulo da base.

Fonte: o próprio autor.

APÊNDICE B
Matriz do experimento fatorial fracionário 2^{11-5}

Observação	Fatores										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
10	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1
11	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
13	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
14	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
16	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
17	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1
18	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
19	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
20	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1
21	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
22	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1
23	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1
24	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
25	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
26	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
27	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
28	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
29	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1
30	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1
31	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1
32	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1
33	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1
34	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
35	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
36	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1
37	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
38	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
39	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1

APÊNDICE C

Matriz do experimento fatorial completo para o dano acumulado por fadiga do revestimento

Observação	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-1	-1	-1
10	1	-1	-1
11	-1	1	-1
12	1	1	-1
13	-1	-1	1
14	1	-1	1
15	-1	1	1
16	1	1	1
17	-1	-1	-1
18	1	-1	-1
19	-1	1	-1
20	1	1	-1
21	-1	-1	1
22	1	-1	1
23	-1	1	1
24	1	1	1

APÊNDICE D

Matriz do experimento fatorial completo para o dano acumulado por afundamento plástico total nas trilhas de roda

Observação	A	B	C	D	E
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1
10	1	-1	-1	1	-1
11	-1	1	-1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	-1
14	1	-1	1	1	-1
15	-1	1	1	1	-1
16	1	1	1	1	-1
17	-1	-1	-1	-1	1
18	1	-1	-1	-1	1
19	-1	1	-1	-1	1
20	1	1	-1	-1	1
21	-1	-1	1	-1	1
22	1	-1	1	-1	1
23	-1	1	1	-1	1
24	1	1	1	-1	1
25	-1	-1	-1	1	1
26	1	-1	-1	1	1
27	-1	1	-1	1	1
28	1	1	-1	1	1
29	-1	-1	1	1	1
30	1	-1	1	1	1
31	-1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1
33	-1	-1	-1	-1	-1
34	1	-1	-1	-1	-1
35	-1	1	-1	-1	-1
36	1	1	-1	-1	-1
37	-1	-1	1	-1	-1
38	1	-1	1	-1	-1

39	-1	1	1	-1	-1
40	1	1	1	-1	-1
41	-1	-1	-1	1	-1
42	1	-1	-1	1	-1
43	-1	1	-1	1	-1
44	1	1	-1	1	-1
45	-1	-1	1	1	-1
46	1	-1	1	1	-1
47	-1	1	1	1	-1
48	1	1	1	1	-1
49	-1	-1	-1	-1	1
50	1	-1	-1	-1	1
51	-1	1	-1	-1	1
52	1	1	-1	-1	1
53	-1	-1	1	-1	1
54	1	-1	1	-1	1
55	-1	1	1	-1	1
56	1	1	1	-1	1
57	-1	-1	-1	1	1
58	1	-1	-1	1	1
59	-1	1	-1	1	1
60	1	1	-1	1	1
61	-1	-1	1	1	1
62	1	-1	1	1	1
63	-1	1	1	1	1
64	1	1	1	1	1
65	-1	-1	-1	-1	-1
66	1	-1	-1	-1	-1
67	-1	1	-1	-1	-1
68	1	1	-1	-1	-1
69	-1	-1	1	-1	-1
70	1	-1	1	-1	-1
71	-1	1	1	-1	-1
72	1	1	1	-1	-1
73	-1	-1	-1	1	-1
74	1	-1	-1	1	-1
75	-1	1	-1	1	-1
76	1	1	-1	1	-1
77	-1	-1	1	1	-1
78	1	-1	1	1	-1
79	-1	1	1	1	-1
80	1	1	1	1	-1
81	-1	-1	-1	-1	1
82	1	-1	-1	-1	1
83	-1	1	-1	-1	1

84	1	1	-1	-1	1
85	-1	-1	1	-1	1
86	1	-1	1	-1	1
87	-1	1	1	-1	1
88	1	1	1	-1	1
89	-1	-1	-1	1	1
90	1	-1	-1	1	1
91	-1	1	-1	1	1
92	1	1	-1	1	1
93	-1	-1	1	1	1
94	1	-1	1	1	1
95	-1	1	1	1	1
96	1	1	1	1	1