



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ANTHONY BELO VASCONCELOS SANTOS

**CONTRIBUIÇÕES PARA UM MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: INFLUÊNCIA DA
TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DE TRÁFEGO NA PREVISÃO DE ÁREA
TRINCADA**

FORTALEZA

2020

ANTHONY BELO VASCONCELOS SANTOS

CONTRIBUIÇÕES PARA UM MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: INFLUÊNCIA DA
TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DE TRÁFEGO NA PREVISÃO DE ÁREA
TRINCADA

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte integrante da obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes, na Área de Concentração: Infraestrutura de transportes.

Orientador:
Jorge Barbosa Soares, Ph.D

Coorientador:
Lucas Feitosa de Albuquerque Lima
Babadopulos, Ph.D

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S233c Santos, Anthony Belo Vasconcelos.
Contribuições para um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos :
Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada / Anthony Belo
Vasconcelos Santos. – 2020.
165 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
Coorientação: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.
1. Dimensionamento. 2. Pavimentos asfálticos. 3. Fadiga. 4. Método mecanístico-empírico. 5. Dano
contínuo. I. Título.
-

ANTHONY BELO VASCONCELOS SANTOS

CONTRIBUIÇÕES PARA UM MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: INFLUÊNCIA DA
TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DE TRÁFEGO NA PREVISÃO DE ÁREA
TRINCADA

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte integrante da obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes, na Área de Concentração: Infraestrutura de transportes.

Aprovada em: 26/06/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Luis Alberto Herrmann do Nascimento
Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/Petrobrás)

Prof. Dr. Márcio Muniz de Farias
Universidade de Brasília (UnB)

AGRADECIMENTOS

Ao meus pais, que foram exemplos de luta com dedicação e perseverança, por terem tido tanto trabalho nesse grande projeto da vida, que é criar um filho com tanto capricho e amor.

Ao Professor Jorge Soares, que além de orientador na elaboração desse estudo, com muita paciência, sabedoria e incentivo, foi um tutor quanto a vida. Muito obrigado por tantos ensinamentos e pela confiança dada desde o primeiro momento.

Ao Professor Lucas Babadopulos, por ter coorientado e definido tantas etapas importantes da pesquisa. Obrigado também pela amizade e inspiração, sua sabedoria fez grande parte das minhas decisões.

Aos Professores Heber Oliveira, Márcio Muniz e ao Dr. Luis Alberto Nascimento, por terem se dedicado no exame deste trabalho e contribuído no seu aperfeiçoamento.

À minha namorada, Ana Karisse, por ter me acompanhado desde os primeiros momentos de meu mestrado e de tantas etapas importante da minha vida, com tanta paciência e amor.

Aos meus colegas da Universidade Federal do Ceará que contribuíram em aspectos humanos, na provocação e entendimento da pesquisa, desde etapas iniciais às mais profundas.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, por terem formado, com esplendor, as bases de meus conhecimentos técnicos e de meu caráter.

Aos meus colegas que estiveram em momentos próximos de descontração, companheirismo e de afeto. As longas amizades comprovam uma grande camaradagem e um espírito de convívio.

Aos meus colegas da Aeronáutica que participaram do meu cotidiano e contribuíram para minha formação como profissional.

RESUMO

A recente proposição de atualização do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional implica em significativos avanços para a infraestrutura rodoviária do país. A análise estrutural dos sistemas de camadas e o monitoramento de trechos nacionais em termos de evolução de defeitos em campo são unidos pela aplicação de Funções de Transferência (FT), possibilitando a prática de um dimensionamento mecanístico-empírico. Os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) para rigidez e Compressão Diametral (CD) para fadiga estão presentes na proposição avaliada para análises estruturais e a previsão de fadiga, respectivamente. Apesar de práticos, os ensaios de MR e CD não incorporam variáveis viscoelásticas relevantes tanto na modelagem da rigidez como da vida de fadiga. Além disso, críticas consagradas em literatura, em particular ao ensaio de CD, ensejam uma maior compreensão sobre a mais apropriada caracterização quanto à fadiga de misturas asfálticas no Brasil. Neste estudo, são realizadas análises de predição de área trincada (%AT) que fazem uso de resultados de ensaios que incorporam variáveis viscoelásticas do material asfáltico, como o Módulo Dinâmico ($|E^*|$) para rigidez e ensaios de Tração-compressão Uniaxial Direta (TD) para fadiga. Para modelagem dos resultados de fadiga, utiliza-se a abordagem S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*), ainda pouco difundida no Brasil. Para ampliar a compreensão da importância da consideração de parâmetros viscoelásticos na modelagem da rigidez e de fadiga, são realizados estudos de sensibilidade de resultados de %AT com relação a parâmetros de: (i) tráfego, em intensidade e velocidade; (ii) clima, em temperatura do ar e no pavimento; e (iii) parâmetros da modelagem de dano S-VECD. Para atingir os objetivos, uma nova FT é calibrada a partir de dados de 23 trechos monitorados pela Rede de Tecnologia em Asfaltos (RTA) e ajustada ao programa CAP3D-D, desenvolvido na Universidade Federal do Ceará (UFC). Os resultados indicam particular relevância do parâmetro de temperatura do ar nos resultados previstos de %AT e significativa importância da intensidade do tráfego. O estudo de sensibilidade dos parâmetros S-VECD permitiu uma maior compreensão do modelo e o comportamento das principais variáveis individualizadas, como a identificação de maior sensibilidade ao parâmetro Δ , da curva $G^R(N_f)$, além de importantes discussões sobre o parâmetro β . Este parâmetro, especificamente, ensejou proposições relevantes de estudos futuros acerca de simplificações e premissas de simulações e análises estruturais.

Palavras-chave: Dimensionamento. Pavimento asfáltico. Fadiga. Método mecanístico-empírico. Dano contínuo.

ABSTRACT

The recent proposed asphalt pavement design method brings significant improvement to Brazilian roadway infrastructure. Pavement layers structural analysis and monitoring of test sections, in terms of cracked area, allow the use of Transfer Functions (TF) to predict cracking evolution under a mechanistic-empirical method. The Resilient Modulus (RM) for stiffness and Diametral Indirect Tensile (DT) test for fatigue characterization are intended to be used for structural analysis inputs and fatigue simulation, respectively, on the method currently considered. Although the tests are state of practice in many laboratories, they do not incorporate viscoelastic parameters neither in stiffness nor in fatigue simulation. In addition, criticisms are found in the literature, particularly to the DT test, and they provide a greater understanding for more appropriate characterization of Hot Mix Asphalt (HMA) in Brazil. This research carries out analysis of predicted cracked area (%CA) using a viscoelastic test system characterization, such as Dynamic Modulus ($|E^*|$) for stiffness and Uniaxial Direct Tension-compression (DTC) test for fatigue. For fatigue modeling, the S-VECD (Simplified Viscoelastic Continuum Damage) approach is used, which is yet largely disseminated in Brazil. In order to broaden the understanding of appropriate viscoelastic characterization for pavement design, sensitivity analysis are performed upon %CA with respect to the following variables: (i) traffic, with respect to intensity and speed; (ii) climate, with respect to air temperature; (iii) S-VECD modeling parameters for damage. To achieve such desired analysis, a new TF is calibrated for 23 monitored sections under Petrobras's Asphalt Technology Network, in CAP3D-D software, developed at Federal University of Ceará (UFC). The results indicate particular relevance of air temperature in predicted %CA, as well as significant relevance of traffic intensity. The sensitivity tests of S-VECD parameters allowed a deeper understanding of the DTC modeling under continuum damage theories, identifying the most sensible parameters, as Δ in $G^R(N_f)$, besides major discussions regarding the β parameter. This parameter, specifically, originated relevant propositions for future researches regarding simulations and structural analysis.

Keywords: Design. Asphalt pavement. Fatigue. Mechanistic-empirical method. Continuum damage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Lógica do Método de Dimensionamento mecanístico-empírico.	19
Figura 2 – Relação entre tensão e deformação para: (a) sólidos elásticos; (b) líquidos newtonianos; (c) materiais viscoelásticos com diferentes históricos de carregamento.....	26
Figura 3 – Ensaio de <i>creep</i> estático com informações de tensão e deformação no ensaio. ...	26
Figura 4 – Tensões e deformações senoidais com ângulo de fase: (a) material elástico; (b) material viscoso à direita.	28
Figura 5 – Curva sigmoideal (curva mestra) do Módulo Dinâmico.....	30
Figura 6 – Comportamento do $ E^* $ e Ângulo de Fase para diferentes níveis de tensão ou de deformação.	30
Figura 7 – Temperatura média compensada anual.	31
Figura 8 – Variabilidade mensal do Módulo de Resiliência da camada de base: (a) sem acostamento; (b), 0,5 de acostamento; (c) 1,0m de acostamento; e (d) 1,5m de acostamento.	32
Figura 9 – Distribuição transversal das passagens das rodas nas rodovias para um eixo simples.	34
Figura 10 – Ensaio de fadiga para misturas asfálticas. (I) Ensaio de Compressão Diametral; (II) Ensaio de Trapézio; (III) Ensaio de viga; (IV) Ensaio de Tração-Compressão Uniaxial Direta.....	35
Figura 11 – Curvas de Wöhler para misturas asfálticas.	36
Figura 12 – Representação visual de uma malha de elementos finitos e condições de contorno para solução de um problema estrutural em pavimentos.....	38
Figura 13 – Determinação da espessura do pavimento a partir do ISC do subleito na metodologia adaptada pelo engenheiro Murillo Lopes.	39
Figura 14 – SisPav 2007.....	41
Figura 15 – MeDiNa 2018.....	42
Figura 16 – Lógica de um dimensionamento de pavimentos mecanístico-empírico.	45
Figura 17 – Inclinação dos ciclos da relação entre tensão e pseudo-deformação após a danificação (perda de rigidez).	46
Figura 18 – Diagrama de tensões e deformações de um material viscoelástico submetido a ciclos de carregamento a tensões constantes, e o mesmo ciclo de carregamento, porém com a utilização da pseudo-deformação no lugar da deformação.....	47

Figura 19 – (a) inclinação da curva log-log do módulo de relaxação; (b) comparação do comportamento de α com m para ensaios com controle do deslocamento do atuador.	49
Figura 20 – Curva C vs. S para diferentes amplitudes de deformação.....	50
Figura 21 – Pulsos de tração e compressão com a ilustração da obtenção de β	53
Figura 22 – Variação da direção das tensões principais em elementos sob o carregamento no pavimento.	54
Figura 23 – Evolução do $ E^* $ e ângulo de fase durante o ensaio de Tração-compressão Direta com controle do atuador.	55
Figura 24 – Representação da pseudo-energia de deformação liberada.....	56
Figura 25 – Relação de WCR por ciclo de carregamento em ensaio com controle de deslocamento do atuador, à esquerda, e taxa de WCR correspondente, à direita.	56
Figura 26 – (a) G^R vs. N_f em escala log-log para diferentes modos de carga. (b) obtenção da falha em simulação a partir de uma curva $G^R(N_f)$ definida em ensaio.	57
Figura 27 – Malha de 20 pontos utilizada em análise para a nova Função de Transferência proposta por Fritzen (2019).	61
Figura 28 – Malha para obtenção da média de dano nos pontos analisados no programa CAP3D-D.	62
Figura 29 – Interface do programa CAP3D-D.	63
Figura 30 – Exemplo de variação de temperatura com a profundidade do pavimento utilizado no programa LVECD com base no EICM.....	64
Figura 31 – Comparação entre resultados hipotéticos de D_{acm} em estruturas diferentes.	66
Figura 32 – Relação entre o Dano Médio e a Área Trincada para as misturas do Projeto Fundão.	67
Figura 33 – Relação entre $T_{0,35}$ e $AT@10\%$ para os estudos iniciais do Projeto Fundão.	68
Figura 34 – Relação entre o Dano Médio e a %AT obtida por Fritzen (2016).	69
Figura 35 – Relação entre $T_{0,35}$ e o valor de Dano correspondente a %AT de 10.....	71
Figura 36 – Função S calibrada por Santiago (2017).	72
Figura 37 – Lógica do sistema de dimensionamento proposta no CAP3D-D.....	73
Figura 38 – Fluxograma do processo para determinação da Função de Transferência.....	75
Figura 39 – Simulação do Dano Médio em situações distintas de ensaios de rigidez e de fadiga.	76
Figura 40 – Evolução da Área Trincada observada em relação ao número N para 35 trechos do Projeto Fundão.....	76

Figura 41 – Esquema com a localização dos pontos na versão anterior proposta por Fritzen (2016), à esquerda, e na proposta do estudo apresentado por Fritzen <i>et al.</i> (2019).	77
Figura 42 – Comparação da Área Trincada observada com a Área Trincada estimada nos segmentos utilizados na calibração e nos segmentos utilizados na validação.	78
Figura 43 – Variação do Dano Médio Acumulado, Dano Reduzido Acumulado, %AT e valor de S em função do aumento do tráfego inicial, utilizando-se a versão anterior do CAP3D-D.	80
Figura 44 – Classificação das misturas asfálticas em relação ao desempenho à fadiga.....	86
Figura 45 – Curvas mestras para o $ E^* $ das misturas analisadas.	89
Figura 46 – Estrutura utilizada na análise de sensibilidade à variação de espessuras.....	91
Figura 47 – Curvas $C(S)$ das misturas apresentadas.....	92
Figura 48 – Curvas $G^R(N_f)$ das misturas apresentadas.	93
Figura 49 – Curvas de Wöhler (vida de fadiga) das misturas utilizadas em análises em uma temperatura de 20°C.	94
Figura 50 – Relação entre $T_{0,35}$ e o $D@AT10\%$	99
Figura 51 – S em função de $T_{0,35}$ e N_{ini}	100
Figura 52 – Relação entre o D_{red_s} e a %AT em função do tráfego inicial (N_{ini}).	101
Figura 53 – Relação entre o D_{red_s} e a %AT em função do tráfego inicial ($T_{0,35}$).	102
Figura 54 – Relação entre o D_{acm} e a %AT para calibração direta entre dano médio e %AT (sem redução do dano médio).....	102
Figura 55 – (a) calibração da função N_{ini} ; (b) calibração em função do $T_{0,35}$; e (c) calibração para D_{acm} diretamente.	103
Figura 56 – Representação de anomalia corrigida em incremento de danificação a pós calibração da FT.	104
Figura 57 – (a) resultados de D_{acm} do LVECD e CAP3D-D; (b) resultados de %AT em função de $S(T_{0,35})$; (c) resultados de %AT em função de $S(N_{ini})$	106
Figura 58 – Comparação entre curvas características de dano consideradas na simulação de fadiga do revestimento para diferentes valores de C inicial.	107
Figura 59 – Resultados de %AT no MeDiNa para revestimento classe 4 em diferentes níveis de tráfego.	108
Figura 60 – Resultados obtidos para variações de tráfego no MeDiNa.	109
Figura 61 – Desempenho das misturas testadas no clima NORDESTE.....	110
Figura 62 – Desempenho das misturas testadas no clima SUDESTE.....	110

Figura 63 – Desempenho das misturas testadas no clima SUL.....	110
Figura 64 – Variação de rigidez para diferentes temperaturas e frequências de carregamento.	112
Figura 65 – Resultados de D_{acm} e %AT para variação da velocidade de tráfego em diferentes climas e níveis de tráfego – M3.....	113
Figura 66 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para velocidade de 60km/h e variação de tráfego em diferentes climas – M3.....	113
Figura 67 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M3.	114
Figura 68 – Resultados de $T_{0,35}$ e de $S(T_{0,35})$ para variações de níveis de tráfego a 60km/h em diferentes climas - M3.	114
Figura 69 – Resultados para variações de estruturas.....	117
Figura 70 – Resultados de Dano Médio Acumulado ao fim de 120 meses para as variações de α nas 7 misturas avaliadas.	118
Figura 71 – Variações de N_f em função de α a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m}/\text{m}$	119
Figura 72 – Resultados de D_{acm} ao fim de 120 meses para as variações de C_{11} nas 7 misturas avaliadas.	120
Figura 73 – Variações de N_f em função de C_{11} a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m}/\text{m}$	120
Figura 74 – Resultados de D_{acm} ao fim de 120 meses para as variações de C_{12} nas 7 misturas avaliadas.	121
Figura 75 – Variações de N_f em função de C_{12} a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m}/\text{m}$	121
Figura 76 – Resultados de D_{acm} ao fim de 120 meses para as variações de γ nas 7 misturas avaliadas.	122
Figura 77 – Variações de N_f em função de γ a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m}/\text{m}$	122
Figura 78 – Resultados de D_{acm} ao fim de 120 meses para as variações de Δ nas 7 misturas avaliadas.	123
Figura 79 – Variações de N_f em função de Δ a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m}/\text{m}$	123
Figura 80 – Variação do parâmetro β para as 7 misturas a 10Hz, 25°C e 150 μsT	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de ajuste para modelos de previsão de fadiga.....	59
Tabela 2 – Valores hipotéticos de dano médio e dano médio acumulado em comparação. .	65
Tabela 3 – Variação dos valores de Dano com o parâmetro $T_{0,35}$ e S para versão anterior do CAP3D-D.	80
Tabela 4 – Dados dos trechos experimentais e utilizados para calibração.	83
Tabela 5 – Dados estruturais das camadas investigadas.....	87
Tabela 6 – Dados de agregados e ligantes utilizados nas misturas analisadas.	88
Tabela 7 – Dados de rigidez por $ E^* $ das misturas testadas.....	88
Tabela 8 – Temperaturas médias por turno por mês utilizadas nas análises no CAP3D-D. .	90
Tabela 9 – Valores dos coeficientes das curvas de $C(S)$ e $G^R(N_f)$ utilizados.	92
Tabela 10 – Valores dos parâmetros S-VECD utilizados nas análises de sensibilidade.	95
Tabela 11 – Parâmetros da calibração da Função S e da FT por variável da Função S.	100
Tabela 12 – Resultados de %AT em análises no programa MeDiNa.	108
Tabela 13 – Resultados de %AT final para os climas e velocidades variadas de acordo com o tráfego inicial de $1E+06$	115
Tabela 14 – Resultados de %AT final para os climas e velocidades variadas de acordo com o tráfego inicial de $5E+06$	115
Tabela 15 – Resultados de %AT final para os climas e velocidades variadas de acordo com o tráfego inicial de $1E+07$	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%AT	Percentual de Área Trincada
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
AT	Área Trincada
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAP3D-D	CAP3D – Dimensionamento
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CD	Compressão Diametral
CNT	Confederação Nacional do Transporte
C(S)	Curva Característica de Dano
D_{acm}	Dano Médio Acumulado
D_{red}	Dano Médio Reduzido Acumulado
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes
E*	Módulo Dinâmico
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LVECD	<i>Layered Viscoelastic Pavement Analysis</i>
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEPDG	<i>Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide</i>
MR	Módulo de Resiliência
N	Número de Eixos Padrões
N_{ini}	Tráfego Inicial acumulado em 12 meses
N_f	Vida de Fadiga
NSCU	<i>North Carolina State University</i>
RBV	Relação betume-vazios
RTA	Rede de Tecnologia em Asfaltos Petrobras
S-VECD	<i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage</i>
TE	Trecho Experimental
TD	Tração-compressão Uniaxial Direta
UFC	Universidade Federal do Ceará

USACE	<i>United States Corps of Engineers</i>
VECD	<i>Viscoelastic Continuum Damage</i>
VMD	Volume Médio Diário de Tráfego
Vv	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Considerações Iniciais	15
1.2	Contextualização	15
1.3	Problemas e Questões de Pesquisa	20
2	QUESTÕES DE PESQUISA	22
2.1	Objetivos	23
2.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>23</i>
2.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>23</i>
2.2	Estrutura da Dissertação	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	Considerações Iniciais	25
3.2	Propriedades Básicas de Materiais Viscoelásticos.....	25
3.3	Clima no Brasil	31
3.4	Tráfego nas rodovias brasileiras	32
3.5	Fadiga em Misturas Asfálticas	35
3.6	Métodos Nacionais de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos.....	38
3.7	Mecânica do Dano Contínuo.....	45
3.7.1	<i>Princípio da Correspondência Elástica-viscoelástica</i>	<i>46</i>
3.7.2	<i>Princípio da superposição tempo-temperatura.....</i>	<i>47</i>
3.7.3	<i>Teoria do Trabalho Potencial de Schapery</i>	<i>48</i>
3.7.4	<i>Modelagem do dano contínuo à luz da abordagem S-VECD.....</i>	<i>51</i>
3.8	Critério de Falha.....	55
3.9	Obtenção do Dano Médio em Simulação.....	58
3.10	CAP3D-D	61
3.11	Funções de Transferência	64
4	MATERIAIS E MÉTODOS	79
4.1	Considerações Iniciais	79
4.2	Calibração da Função S e da FT no CAP3D-D.....	79
4.3	Comparações com outros programas: <i>FlexPave e MeDiNa.....</i>	<i>84</i>
4.4	Análise de sensibilidade.....	86
4.5	Tráfego, estrutura do pavimento analisado e misturas investigadas.....	87
4.6	Análise de sensibilidade para temperaturas, velocidade e níveis de tráfego variados.....	89

4.7	Pequena análise de sensibilidade a variações na estrutura.....	90
4.8	Análise de sensibilidade de parâmetros S-VECD: $C(S)$, $G^R(N_f)$, α e β	91
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	97
5.1	Considerações Iniciais	97
5.2	Resultados.....	97
5.2.1	<i>Calibração da FT no CAP3D-D.....</i>	<i>98</i>
5.2.2	<i>Comparações e Benchmark Parcial: LVECD e MeDiNa.....</i>	<i>105</i>
5.2.3	<i>Desempenho das misturas analisadas no CAP3D-D</i>	<i>110</i>
5.2.4	<i>Velocidade de Tráfego, Clima e Intensidade de Tráfego</i>	<i>111</i>
5.2.5	<i>Análise de sensibilidade para variações na estrutura</i>	<i>116</i>
5.2.6	<i>Variações para parâmetros da modelagem S-VECD: C_{11}, C_{12}, γ, Δ e α.....</i>	<i>118</i>
5.2.7	<i>Variações para o parâmetro da modelagem do carregamento no S-VECD: β.....</i>	<i>123</i>
5.2.8	<i>Considerações finais de análises.....</i>	<i>125</i>
5.2.8.1	<i>Análise de sensibilidade ambiental e da estrutura</i>	<i>125</i>
5.2.8.2	<i>Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo S-VECD.....</i>	<i>126</i>
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128
6.1	Principais contribuições desta dissertação	128
6.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	132
	REFERÊNCIAS.....	137
	APÊNDICE A – AJUSTES DE DADOS EXPERIMENTAIS À CURVA	
	SIGMOIDAL DO MÓDULO DINÂMICO (E^*)	145
	APÊNDICE B – DADOS DAS MISTURAS <i>DEFAULT</i> DO PROGRAMA	
	MEDINA UTILIZADAS NAS ANÁLISES.....	148
	APÊNDICE C – RESULTADOS DE D_{ACM} E %AT PARA VARIAÇÕES DE	
	CLIMA E TRÁFEGO	152
	APÊNDICE D – RESULTADOS DE N_F PARA VARIAÇÕES DE β.....	162

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo descreve uma contextualização que apresenta a lógica de um método de dimensionamento mecanístico-empírico, bem como o estado da prática em comparação com o estado da arte de metodologias nacionais. Trata ainda de conceitos introdutórios relacionados à mecânica do dano contínuo e à Teoria do Trabalho Potencial de Schapery (Schapery, 1984; Park *et al.*, 1996), sistematizados no modelo simplificado de dano contínuo em meio viscoelástico (S-VECD – *Simplified Viscoelastic Continuum Damage model*). Em seguida, é apresentado o problema de pesquisa, cujo a complexidade de previsão da ocorrência de trincas por fadiga em pavimentos asfálticos é discutida. Por fim, o objetivo geral e os objetivos específicos são descritos, além da estrutura do trabalho.

1.2 Contextualização

No Brasil, o novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos apoiado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) promove avanços técnico-científicos para o país. O método incorpora análises mecanísticas para obtenção de parâmetros que, por meio do acompanhamento de trechos experimentais, podem ser associados a previsões da evolução de defeitos e, conseqüentemente, ao dimensionamento das camadas do pavimento. A proposição formal de um novo método é um grande passo para a pavimentação atual no Brasil, que tem consolidado, até então, métodos de natureza mais empírica (Souza, 1981; DNIT, 2006; Soares, 2020).

O objetivo de um método de dimensionamento é proporcionar ao projetista meios para a determinação de uma estrutura adequada do pavimento. Em estruturas convencionais da construção civil, os métodos de dimensionamento disponíveis apoiam-se na utilização de parâmetros da carga, estática ou dinâmica, e da resistência dos materiais para que seja garantido, com segurança, a compatibilidade entre solicitações e respostas das peças estruturais. Usualmente, os métodos de cálculo em estruturas envolvem análises computacionais e fatores empíricos, como a adoção de modelos simplificados e de coeficientes de majoração da carga e minoração da resistência com base em experiência consagrada e devidamente documentada em normas. A maior certeza em torno do concreto de cimento *Portland*, material elástico utilizado em escala industrial desde meados do século XIX, todavia, contribui para a diminuição de imprecisões e dependências de fatores empíricos.

Determinar a espessura adequada de um pavimento, entretanto, traz desafios nos dois universos que normalmente orientam um método de dimensionamento: cargas e materiais. Observa-se que o efeito do clima acaba frequentemente negligenciado nos projetos de sistemas de camadas. As cargas, na pavimentação, relacionam-se ao tráfego. Os materiais relacionam-se às características físicas dos elementos granulares ou modificados que compõem as camadas e o subleito, além do material asfáltico que usualmente compõe o revestimento. As incertezas envolvidas nos parâmetros de tráfego e no material asfáltico, que tem comportamento termo-viscoelástico, isto é, dependente da temperatura e frequência de carregamento, implicam em grandes desafios. Além disso, a utilização de um método de análise estrutural em pavimentos ainda se mostra incipiente no Brasil, diferentemente do que é encontrado para estruturas convencionais da construção civil há décadas.

A consideração de um método que alie análises mecanicistas a parâmetros empíricos em pavimentos, em âmbito nacional, foi feita de maneira mais formal recentemente (DNIT, 2018). O método em questão consiste na seguinte lógica: (i) um sistema de dimensionamento é usado para a previsão de defeitos a partir das condições de carregamento; e (ii) propriedades dos materiais selecionados, e que o projetista, variando os materiais e as espessuras, opta por uma combinação adequada de estrutura de camadas e subleito que proporcione o atendimento aos requisitos técnicos de projeto.

Dentre os defeitos possíveis a serem encontrados em um pavimento asfáltico, destacam-se o afundamento de trilha de roda e o trincamento por fadiga. De acordo com Guimarães (2009) e Bastos (2017), o afundamento de trilha de roda se dá pela atuação direta do tráfego, pelo clima e/ou pelos materiais utilizados na construção do pavimento. A deformação permanente pode ocorrer de maneira generalizada ou localizada, prejudicando a drenagem no pavimento e facilitando a ocorrência de hidroplanagem.

O trincamento por fadiga ocorre devido à repetição de solicitações de tráfego (ASTM, 1979; Nascimento, 2015). A fadiga do material da camada de rolamento proporciona a propagação de trincas e a consequente perda da capacidade de resistir aos esforços solicitantes, gerando o desprendimento e a exposição das camadas subjacentes. Portanto, dentre os principais defeitos, optou-se, no método atualmente em processo de validação, por considerar o trincamento por fadiga como balizador do dimensionamento das espessuras das camadas, enquanto o afundamento de trilha de roda é controlado na escolha de materiais que sejam julgados suficientemente resistentes a esse defeito. Dentre outros motivos, a escolha deve-se ao trincamento por fadiga ser um defeito primário, isto é, que dá origem a outros

defeitos funcionais e estruturais nos pavimentos, e por ser de relativamente fácil apreciação em campo (presença de trincas e panelas).

Devido ao comportamento viscoelástico do ligante asfáltico (Goodrich, 1991; Pinto, 1991; Park e Kim, 1998), a simulação do real comportamento do material do revestimento é de difícil realização (Motta e Medina, 2015). Portanto, uma análise mecanística do pavimento como um todo é complexa. A utilização de conceitos da Física Mecânica, como a teoria da elasticidade e a resistência dos materiais, além de análises numéricas, possibilita estudar o pavimento como estrutura (Love, 1944; Allen e Haisler, 1985; Huang, 2003). Por esses conceitos, agrupados no que se denomina Mecânica dos Pavimentos, aliados aos conhecimentos sobre materiais viscoelásticos, possibilita um método de análise mais mecanicista.

Na abordagem mecanicista – obtenção das tensões, deformações e deslocamentos na estrutura – parte-se de dados de rigidez das camadas e do subleito do pavimento, assim como de geometria da estrutura e da informação sobre as cargas. No revestimento, a rigidez pode ser obtida por ensaios de Módulo de Resiliência (MR) (Hveem, 1945) ou Módulo Dinâmico ($|E^*|$) (Papazian, 1962), este incorporando propriedades viscoelásticas e, portanto, efeitos da frequência e da temperatura na rigidez do material asfáltico (Daniel *et al.*, 1998). A compreensão da rigidez do material encerra o primeiro passo necessário às análises mecanicistas, referente ao comportamento do material sob ação de pequenas deformações e pequenas quantidades de repetição de cargas. Como passo subsequente, ensaios cíclicos de natureza diferente (já que produzem defeitos e não linearidades) dos ensaios de rigidez podem caracterizar a mistura quanto à vida de fadiga e à deformação permanente.

Quanto à fadiga, a utilização de ensaios de tração indireta por Compressão Diametral (CD) foi proposta no método de dimensionamento apoiado pelo DNIT (2018). O ensaio de CD (DNIT-ME 183/2018) é bastante conhecido no país, e possui suas origens na caracterização de resistência última à tração de concretos de cimento *Portland*, em 1943, no Rio de Janeiro, pelo Prof. Fernando Lobo Carneiro, e utilizado para caracterização de fadiga em misturas asfálticas desde 1980 (Medina e Motta, 2015). Apesar de prático, entretanto, o ensaio não é capaz de incorporar parâmetros viscoelásticos em análises, além de apresentar efeitos de danificação no material não proporcionados apenas por fadiga (mas também por fluência excessiva), premissa fundamental das teorias de evolução do dano mais aceitas (Babadopulos *et al.*, 2015).

Na lógica atual de sistemas de dimensionamento semelhantes ao considerado pelo DNIT, como o caso do sistema americano desenvolvido no âmbito do MEPDG (*Mechanistic-empirical Pavement Design Guide*), *DARWin-ME* e *AASHTO ME Design* (nessa sequência de desenvolvimento) ensaios e simulações computacionais também investigam e caracterizam os materiais e as estruturas. Entretanto, nos estudos no âmbito do MEPDG realizados pelo *National Cooperative Highway Research Board* (NCHRP, 2004), os ensaios de $|E^*|$ e Tração-compressão Uniaxial Direta (TD) são protocolados pelas normas AASHTO T 342 (2011) e TP 107 (2018), respectivamente. No Brasil, apenas o ensaio de $|E^*|$ é protocolado pelo método de ensaio DNIT 416/2019-ME (DNIT, 2019).

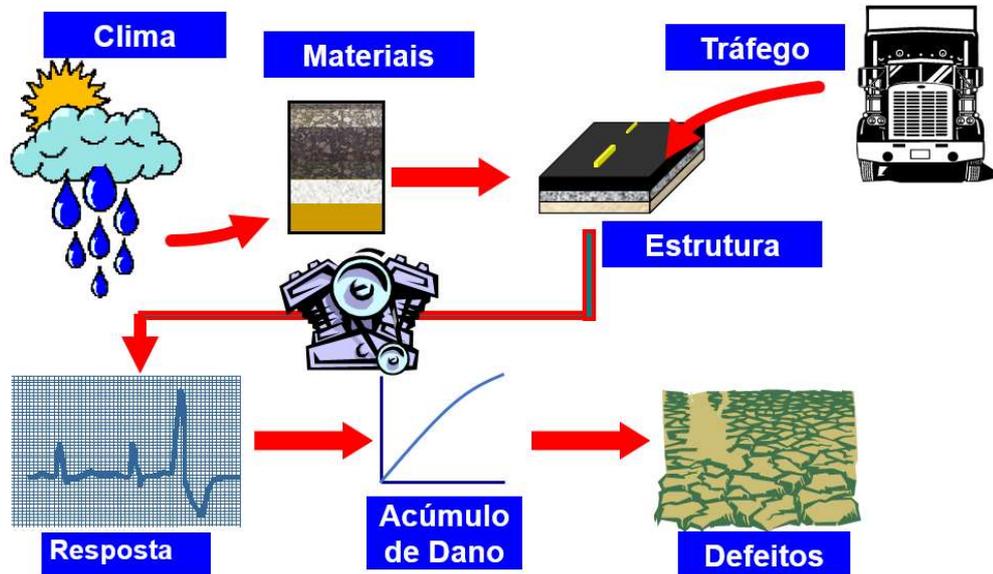
A obtenção de parâmetros previstos através das análises estruturais e da vida de fadiga em laboratório finalizam a parcela mecanicista do método. Os resultados obtidos em termos de distribuição volumétrica de defeitos no material asfáltico, como a simulação da danificação no revestimento asfáltico devido à repetição de ciclos, entretanto, não podem ser medidos em campo diretamente. Mesmo em laboratório, ainda é difícil aceder a variáveis de distribuição volumétrica de defeitos (dano) por outro método que não seja a perda de rigidez observada após o carregamento. As observações em trechos experimentais, portanto, passam pela coleta de parâmetros observáveis na superfície e que possibilitem uma associação objetiva com os defeitos previstos de maneira distribuída no material. No sistema atual, tem-se adotado a utilização do parâmetro de área trincada em termos percentuais da área total da superfície do pavimento (%AT). Este parâmetro é usualmente coletado por meio de levantamentos contínuos de seções homogêneas no pavimento, definidas por amostragem, que possibilitam uma obtenção da razão entre um número de amostras trincadas por um número total de área de pavimento levantado.

Os modelos de previsão de defeitos têm como entrada, portanto, parâmetros de laboratório advindos de ensaios como de rigidez e de fadiga (parâmetros mecanicistas), e resultam em %AT ao longo dos anos determinados a partir de projeto, por meio de equações empíricas de correlação desenvolvidas para trechos controlados. A esses modelos que relacionam defeitos em campo e ensaios laboratoriais atribui-se o nome de Funções de Transferência (FT) (NCHRP, 2004).

Em um sistema holístico de dimensionamento de pavimentos, devido ao particular efeito do clima no pavimento (Araújo, 2019), considera-se relevante a incorporação de parâmetros de temperatura e de umidade. A lógica do processo até então descrito, que incorpora clima, tráfego e materiais para previsão de defeitos em um sistema mecanístico-empírico de

dimensionamento está simplificada na Figura 1. O símbolo do motor na Figura indica a ferramenta de cálculo utilizada em análise, seja ela qual for.

Figura 1 – Lógica do Método de Dimensionamento mecânico-empírico.



Fonte: INCT (2018), adaptado de Kim (2016).

Dada a grandeza continental do Brasil, é normal que o banco de dados utilizado na calibração dos modelos de previsão envolva pavimentos que estão submetidos a diferentes condições de umidade e temperatura, fatores de grande influência no comportamento dos pavimentos (Huang, 2003; Bastos, 2013). A utilização do método proposto pelo DNIT (2018), entretanto, considera parâmetros de rigidez que não levam em consideração o comportamento viscoelástico do material asfáltico, que traduz a dependência do comportamento do material com relação à frequência de carregamento e à temperatura (Yoder e Witczak, 1975). Na prática, mesmo que desejável, a incorporação de temperatura e velocidade de tráfego nas análises, o sistema de ensaios de caracterização no nível prático atual (MR e CD) não possibilitam, dentro dos protocolos atuais, simulações com a incorporação desses parâmetros.

Tratando-se da modelagem dos resultados de ensaios de fadiga por TD, a análise da danificação do material pode ser feita pela mecânica do dano contínuo. A teoria descreve que um material se danifica continuamente em seu volume, onde microtrincas geradas pelas solicitações repetitivas dão origem à macrotrincas (Lemaitre, 1996). Estas provocam a perda de rigidez, ou da capacidade de resistir a esforços de tração (Kim *et al.*, 2009). Dentre as modelagens possíveis embasadas nas teorias do dano contínuo, tem-se o VECD (*Viscoelastic Continuum Damage Model*), que possibilita a utilização de parâmetros fundamentais do material, como curvas características de dano e critérios de falha (AASHTO, 2018) para a

avaliação da perda da capacidade de resistir às solicitações, possibilitando a modelagem e a quantificação da danificação e formação de trincas. Derivado da modelagem VECD, a modelagem S-VECD (“S” de *Simplified*, ou simplificado) incorpora ensaios de rigidez e de fadiga que levam em consideração propriedades viscoelásticas dos materiais asfálticos por meio de premissas simplificadoras para carregamento cíclico da abordagem VECD, reduzindo o esforço computacional necessário em análises. O estudo do dano contínuo à luz da modelagem S-VECD por meio de ensaios de TD permite a incorporação de parâmetros viscoelásticos e a incorporação de efeitos de temperatura e frequência de carregamento na danificação do material asfáltico.

Aprofundando a compreensão do citado modelo viscoelástico de dano contínuo, comenta-se a importância de compreendê-lo e divulgá-lo cientificamente e tecnicamente com o intuito de proporcionar novos avanços nos métodos mecanístico-empíricos nacionais e na capacidade de previsão de defeito do trincamento por fadiga em campo. Assim, torna-se também necessário, além do estudo de impacto de variáveis de velocidade de tráfego e temperatura na danificação de materiais asfálticos, o estudo da aplicabilidade e da sensibilidade dos parâmetros relacionados à utilização da modelagem S-VECD.

Com o intuito de tornar possíveis as análises das variáveis mencionadas, realiza-se a pesquisa apresentada nesta dissertação sobre a avaliação da sensibilidade da previsão de trincamento por fadiga em campo com respeito a variações de velocidade de tráfego e temperatura. Com o fito de tornar possível a realização dessa análise, novas FT são calibradas no programa CAP3D-D, desenvolvido na Universidade Federal do Ceará (UFC), por meio de dados de ensaios, simulações computacionais e parâmetros de monitoramentos de trechos da Rede de Tecnologia em Asfaltos (RTA) em campo. Além disso, um estudo da modelagem S-VECD é desenvolvido utilizando-se resultados de ensaios de $|E^*|$ e de TD. Proporciona-se ainda a difusão do conhecimento das teorias de dano contínuo com parâmetros viscoelásticos e também se estuda a sensibilidade de resultados da vida de fadiga (N_f) para variações de parâmetros utilizados na modelagem S-VECD.

1.3 Problemas e Questões de Pesquisa

O trincamento por fadiga em pavimentos asfálticos revela-se como um dos principais defeitos encontrados em rodovias nacionais, prejudicando características funcionais e estruturais de vias em todo o país. A previsão da evolução do trincamento por fadiga mostra-

se então essencial no combate ao surgimento deste tipo de defeito, possibilitando o adequado dimensionamento das camadas do pavimento asfáltico.

O método recentemente apoiado pelo DNIT, o MeDiNa, proporciona diversas atualizações relevantes e novos paradigmas para a área de pavimentação nacional. Além de proporcionar uma ruptura no grau de empirismo empregado no método de dimensionamento até então vigente (Souza, 1981), o método incorpora ensaios para caracterização da rigidez, como o ensaio de MR (DNIT 135/2018 – ME), e da vida de fadiga, como o de CD (DNIT 183/2018 – ME).

Apesar de proporcionar avanços relevantes, a não incorporação de propriedades viscoelásticas em ensaios, tanto na rigidez como na vida de fadiga, torna o método proposto não condizente com a realidade das propriedades físicas do material asfáltico. Além disso, dada a importância do ensaio de fadiga na capacidade de previsão de trincamento em campo, é importante que se considerem ensaios que testem o material exclusivamente quanto à danificação por fadiga. O ensaio de Compressão Diametral proporciona a aplicação de tensões de tração indiretas no material, com carregamento executado sempre no mesmo sentido num dado ponto e plano de avaliação das tensões. Em outras palavras, há dano por fluência no material, que difere fundamentalmente do fenômeno de fadiga (Di Benedetto e De La Roche, 1998; Di Benedetto *et al.*, 2004). As cargas repetidas são controladas, mas as tensões que se desenvolvem no corpo de prova ocorrem de forma controlada apenas durante a aplicação dos primeiros carregamentos (quando ainda não há dano), visto que há uma danificação não homogênea no corpo de prova e uma conseqüente alteração da distribuição de tensão no mesmo (Babadopulos *et al.*, 2015). Ensaios como os de TD permitem obter distribuição teoricamente homogênea de tensões e de deformações, de maneira que são mais adequados para análise de resultados de ensaios com dano.

Além da produção de danificação observada na área de contato entre os frisos e o corpo de prova, a aplicação de carregamento monotônico no ensaio de Compressão Diametral também induz à produção de efeitos de fluência, o que pode fazer com que na verdade o ensaio tenha deformações acumuladas de maior importância que o próprio efeito da carga desviadora, a depender da temperatura (Di Benedetto e De La Roche, 1998; Di Benedetto *et al.*, 2004). A utilização do ensaio de Compressão Diametral, na verdade, alinha-se com a praticidade e a cultura de sua aplicação já difundida em centros de pesquisa nacionais. Como mencionado, o ensaio diametral foi desenvolvido para avaliar tensão última de tração de concreto de cimento Portland (Carneiro, 1943), com propriedades significativamente diferente dos materiais

asfálticos (notadamente uma pequena importância relativa de efeitos transientes como a fluência em carregamentos curtos, o que não é verdade para materiais asfálticos). O ensaio foi posteriormente adaptado aos materiais asfálticos e utilizado desde então (Falcão e Soares, 2002).

O equilíbrio entre os estados da prática e da arte é algo que deve ser sistematicamente avaliado. Portanto, não se descarta a relevância de metodologias com ensaios não homogêneos, de grande importância para a introdução de estudos mecanísticos de pavimentos. Torna-se essencial, entretanto, o entendimento e o aprimoramento de técnicas que ultrapassem a justificativa de praticidade com vistas a contribuir com futuras atualizações do método de dimensionamento ou até mesmo ao desenvolvimento de métodos alternativos.

A escolha da metodologia de ensaio dos materiais para o dimensionamento do pavimento impacta diretamente, à luz de métodos mecanístico-empíricos atuais, na qualidade da previsão de área trincada em campo. Este parâmetro essencial no processo de dimensionamento pode divergir significativamente a depender da caracterização laboratorial proposta, impactando o emprego de recursos necessários para a melhoria do sistema viário (Di Benedetto *et al.*, 2004).

O desenvolvimento de estudos que apontam para soluções que visam aprimorar as técnicas vigentes de dimensionamento torna-se essencial para garantir a aplicação correta de recursos humanos e materiais em pesquisas direcionadas à infraestrutura viária do país. Percebe-se a importância dada ao tema, ainda em desenvolvimento, embora encontrem-se estudos de destaque em andamento e publicados nos últimos anos.

2 Questões de Pesquisa

- a) De que modo a variação de temperatura em território nacional pode impactar na previsão de área trincada de pavimentos asfálticos?
- b) De que modo variações no tráfego, em termos de velocidade e níveis de intensidade, podem influenciar nos resultados de previsão de área trincada de pavimentos asfálticos?
- c) De que modo a aplicação de ensaios de vida de fadiga que consideram propriedades viscoelásticas em materiais asfálticos à luz do dano contínuo contribui para a confiabilidade do dimensionamento de pavimentos asfálticos?
- d) Quais possíveis contribuições para um método de dimensionamento de pavimentos asfálticos rodoviário podem ser desenvolvidas a partir de análises de sensibilidade?

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para o conhecimento da falha por fadiga em misturas asfálticas, conforme estudado em laboratório, e para a subsequente capacidade de predição de área trincada em revestimentos asfálticos de pavimentos por meio de um sistema mecanístico-empírico.

2.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar os efeitos da variação de temperatura tipicamente encontrada em pavimentos nacionais na previsão de área trincada em pavimentos asfálticos;
- b) Avaliar os efeitos da variação da velocidade de tráfego e de níveis de tráfego nos resultados de área trincada prevista em pavimentos asfálticos;
- c) Investigar a utilização de ensaios de fadiga à luz do dano contínuo com incorporação de parâmetros viscoelásticos em casos de previsão de área trincada em pavimentos asfálticos nacionais;
- d) Identificar as contribuições ao método de dimensionamento mecanístico-empírico nacional a partir das análises de sensibilidade realizadas.

2.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é dividida em cinco capítulos. Os capítulos são divididos de forma a proporcionar o alcance dos objetivos gerais e específicos determinados no âmbito desta pesquisa.

No Capítulo 1 são discutidas as principais diferenças entre os níveis de análises mecanística-empíricas de dimensionamento, em termos do sistema de ensaios para caracterização dos materiais e da lógica do método propriamente dito. Descreve-se brevemente o estado da prática relacionado à atualização do método de dimensionamento nacional e o estado da arte, já em implementação por instituições internacionais (AASHTO, 2018). Além disso, são descritos os objetivos, questões de pesquisa e a problemática que ensejou a realização do presente trabalho, assim como a descrição da estrutura deste documento.

No Capítulo 2 são apresentados os principais conceitos relevantes para o entendimento e o embasamento do leitor para as análises do método de pesquisa deste trabalho. Os assuntos são abordados na seguinte ordem:

- i. Propriedades básicas de materiais viscoelásticos, onde são discutidos conceitos fundamentais da mecânica dos pavimentos, viscoelasticidade, e propriedades dos materiais asfálticos, além de descrever as variações;
- ii. Clima do Brasil, em termos de variações de temperaturas nacionais e a importância de precipitações na umidade de camadas granulares e mudanças nos módulos de rigidez; e tráfego nas rodovias brasileiras, discutindo os principais parâmetros de tráfego relevantes ao dimensionamento de pavimentos;
- iii. Fadiga em misturas asfálticas, que apresenta a evolução da caracterização dos materiais quanto à fadiga;
- iv. Métodos nacionais de dimensionamento de pavimentos asfálticos rodoviários, onde é realizada uma breve descrição do histórico de evolução do método de dimensionamento de pavimentos no Brasil e a evolução do empirismo ao mecanicismo proposto com algumas intervenções empíricas na atualidade;
- v. Mecânica do dano contínuo e critério de falha, demonstrando os principais conceitos relacionados à teoria e como a utilização de ensaios como o TD proporcionam parâmetros para simulações;
- vi. Descrição da obtenção do dano em simulação e a aplicabilidade de uma FT, bem como uma breve descrição dos métodos para obtenção de equações de previsão de defeitos.

No Capítulo 3 são apresentados os parâmetros de ensaios de caracterização dos materiais escolhidos para análises, além do método de pesquisa para alcance dos objetivos delineados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos a partir dos materiais e métodos descritos no Capítulo 3, além de apresentar análises e comentários a respeito de conclusões a respeito dos valores obtidos, com vistas ao alcance dos objetivos estabelecidos.

No Capítulo 5, por fim, são feitas conclusões da pesquisa deste trabalho, além de se propor a realização de estudos futuros sugeridos a partir das conclusões e observações de lacunas a serem preenchidas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo descreve informações referentes ao dano por fadiga em materiais asfálticos, bem como os modelos por trás das teorias que embasam este tipo de estudo. Os primeiros itens contêm os fundamentos, à medida que os demais aprofundam a abordagem do dano contínuo e aqueles aspectos relevantes para modelagem e simulações. Também são apresentadas as premissas que embasam a presente pesquisa.

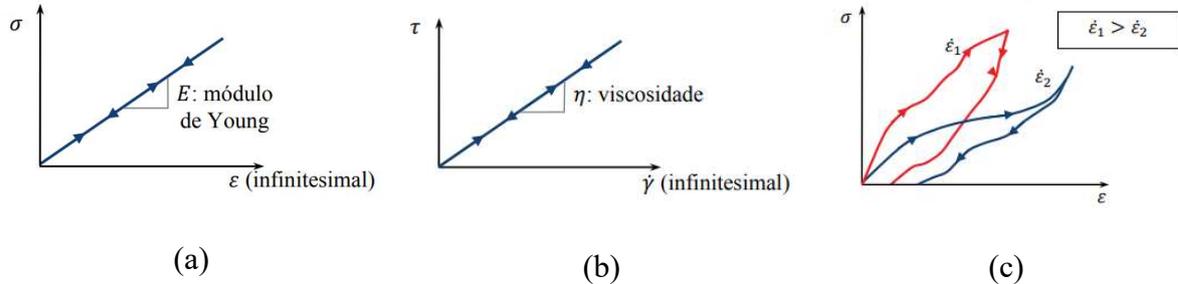
3.2 Propriedades Básicas de Materiais Viscoelásticos

Os materiais asfálticos têm comportamento complexo quando comparados a outros comumente utilizados na engenharia, como o concreto de cimento *Portland*. Este usualmente tem modelo constitutivo representado por equações lineares que dificilmente falham em representar adequadamente o material durante sua vida útil. A proporcionalidade entre tensões e deformações, traduzida pelo módulo de Young (E), mantém-se constante para pequenas deformações, usualmente aceitas nas análises para estruturas comuns. Além disso, nesse tipo de modelagem, é assumido que o caminho do carregamento e descarregamento é o mesmo. Em outras palavras, um par de tensão, σ , e de deformação, ε , é o mesmo, seja em processo de carregamento ou descarregamento. A relação entre tensão e deformação para materiais elásticos é demonstrada na Figura 2a. Semelhantemente, o modelo constitutivo usualmente empregados na hidrodinâmica para líquidos newtonianos, isto é, que têm proporção constante entre a tensão cisalhante, τ , e a taxa de deformação cisalhante corrente, $\dot{\gamma}$, também é adotado como constante. A esquematização do comportamento é demonstrada na Figura 2b.

Para materiais viscoelastoplásticos, ou viscoelástico em pequenas deformações (Ferry, 1980), entretanto, o comportamento entre tensões e deformações não obedece a uma taxa constante como observado para relações lineares em sólidos e líquidos. Para esses materiais, em situação de tensão constante há o incremento de deformações com o tempo, efeito conhecido como fluência (*creep*). Em situação similar, com a constância da deformação, há uma diminuição da tensão, efeito conhecido como relaxação. Nesse tipo de material, além dos efeitos de fluência e relaxação, o histórico de carregamento também tem influência no comportamento da relação entre tensão e deformação (Schapery, 1982; Christensen, 1982). Assim, um ponto de tensão e deformação durante o processo de carregamento é diferente de um ponto durante o processo de descarregamento, mantendo-se rigorosamente a taxa de

deformação pela tensão, $\dot{\epsilon}$. A Figura 2c ilustra o comportamento descrito em materiais viscoelásticos (pequenas deformações).

Figura 2 – Relação entre tensão e deformação para: (a) sólidos elásticos; (b) líquidos newtonianos; (c) materiais viscoelásticos com diferentes históricos de carregamento.

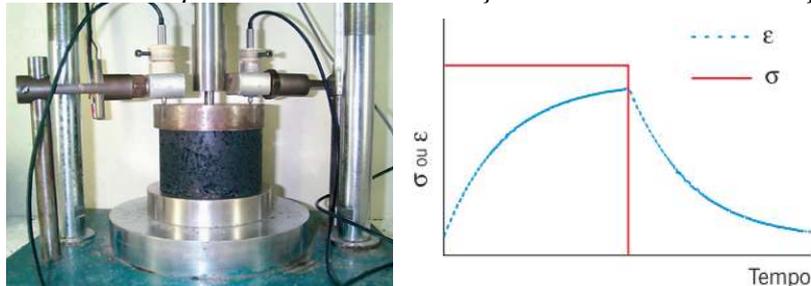


Fonte: Henrique e Silva (2009).

Diversos trabalhos sugerem que, de maneira geral, o modelo constitutivo de materiais asfálticos pode ser interpretado pelo modelo viscoelástico (Goodrich, 1991; Pinto, 1991; Lee e Kim, 1998), comumente descrito como a mistura de comportamento elástico e viscoso, em que o material depende do tempo de carregamento e da taxa de aplicação de carga para deformar. Assim, o material pode se aproximar do comportamento sólido quando submetido a carregamentos de rápida aplicação (alta frequência), enquanto se comporta de forma semelhante a um líquido viscoso quando submetido a carregamentos lentos (baixa frequência).

As propriedades de fluência (ou *creep*) e relaxação podem ser obtidas por meio da aplicação de tensão constante e observação do aumento da deformação, ou pela aplicação de uma deformação constante e decréscimo da tensão aplicada. Essas observações podem ser realizadas por meio, por exemplo, de ensaios de fluência (*creep* estático, demonstrado na Figura 3) e de relaxação, respectivamente (Bernucci *et al.*, 2010).

Figura 3 – Ensaio de *creep* estático com informações de tensão e deformação no ensaio.



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Dois regimes principais de comportamento viscoelástico podem ser definidos: linear ou não linear. Em regime não linear, a variação de tensão não é proporcional à variação

de deformação. No regime linear, entretanto, admite-se que pequenas variações de tensões implicam variações proporcionais de deformações, sendo os sinais de tensão e deformação devidamente tratados como funções do tempo. Em ambos os casos, a relação tensão-deformação depende do tempo, t .

Para que o material seja considerado viscoelástico linear, alguns princípios devem ser observados (Boltzmann, 1878). De maneira geral, admite-se que o material viscoelástico pode ter comportamento muito próximo do regime linear quando submetido a pequenos níveis de deformação (em torno de valores menores que 90 *micro-strains* ($\mu\text{m/m}$), no caso de misturas asfálticas). Outra característica importante de materiais viscoelásticos é a dependência do histórico de carregamento (deformações ou tensões). O material tem “memória” aos carregamentos previamente aplicados, e as respostas futuras dependem dos carregamentos passados. Admitindo-se um regime linear de comportamento para o material viscoelástico, sua tensão, em 1D, pode ser calculada em função do histórico de deformação através da integral na Equação 1, tendo como resposta a tensão. A memória do carregamento também é levada em consideração pela equação.

$$\sigma = \int_0^{\xi} E(\xi - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (1)$$

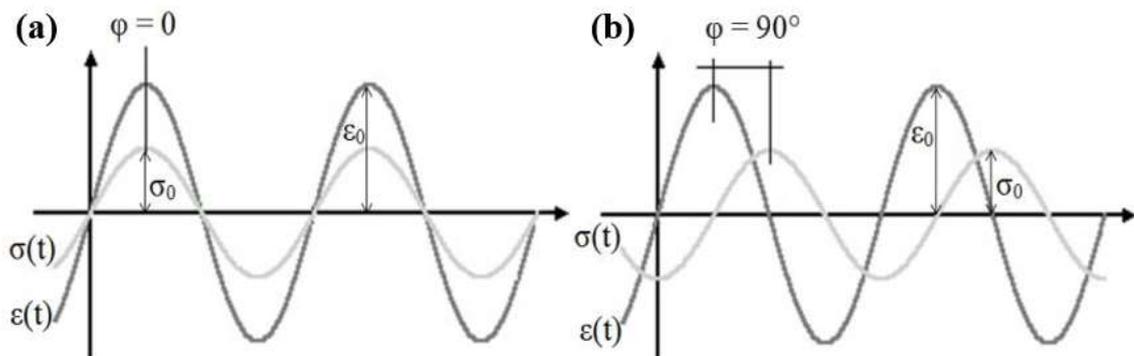
Onde σ e ε são os tensores de tensão e deformação, respectivamente, $E(t)$ a matriz do módulo de relaxação, ξ o tempo reduzido (que depende do tempo real e da temperatura em que ocorre a deformação) e τ a variável da integral de convolução que representa os tempos de carregamento. A integral apresentada é conhecida como integral de convolução, ou integral hereditária (Schapery, 1972). De acordo com Souza (2018), as integrais de convolução expressam que a tensão (ou a deformação) em um tempo presente t é igual à superposição linear das deformações (ou das tensões) previamente aplicadas, multiplicadas pelo valor da função característica do material (nesse caso, módulo de relaxação) correspondente no intervalo de tempo $(t - \tau)$ que se passou desde a aplicação da respectiva deformação (ou tensão). A demonstração dessa equação é relevante para as próximas seções deste trabalho.

Para caracterização das misturas asfálticas, é fundamental que seja considerado um parâmetro de rigidez que incorpore propriedades viscoelásticas para estudos que visam avaliar efeitos de temperatura e frequência de carregamento. Neste sentido, o $|E^*|$ surgiu como alternativa mais fundamental de caracterização de misturas comparativamente ao Módulo de Resiliência (Papazian, 1962). O $|E^*|$ é adotado no dimensionamento mecânico-empírico na

Europa e nos Estados Unidos (SETRA/LCPC, 1994; AASHTO, 2004) e tem sua obtenção possibilitada por meio de ensaios de carregamento senoidal, como o ensaio de compressão axial (DNIT 419/2019-ME e AASHTO T 362/2011).

O ensaio para obtenção do $|E^*|$ consiste na aplicação de pulsos senoidais de carregamento, conforme Figura 4. O material viscoelástico apresenta uma defasagem entre a aplicação da tensão e a observação da deformação, conhecida como ângulo de fase (φ). Quanto maior o valor do ângulo de fase (próximo a 90°), mais a resposta de deformação do material se aproxima a de um material viscoso linear, ao passo que quanto menor o ângulo de fase (próximo a 0°), maior a resposta de deformações no material se aproxima a de um material elástico linear.

Figura 4 – Tensões e deformações senoidais com ângulo de fase: (a) material elástico; (b) material viscoso à direita.



Fonte: Souza (2018).

A tensão aplicada em ensaio pode ser interpretada pela Equação 2. O material se deforma também por meio de funções senoidais, conforme demonstrado na Equação 3, sendo ω a frequência de carregamento e φ o ângulo de fase, que descreve o retardo do sinal de deformação em relação ao de tensão.

$$\sigma = \sigma_0 \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

O Módulo Dinâmico é o valor absoluto do módulo complexo (E^*). Este tem parcela elástica (E') e viscosa (E''), ao passo que a parcela elástica representa a parte real do módulo complexo e a parcela viscosa a parte imaginária, também conhecidos como módulos de armazenamento e de perda, respectivamente. A Equação 4 apresenta esses parâmetros em notação de Euler.

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} = E' + iE'' \quad (4)$$

O ensaio, padronizado pelo DNIT na norma 416/2019-ME (DNIT, 2019), é realizado em três temperaturas [4; 20; 40°C] e seis frequências de carregamento [25; 10; 5; 1; 0,5; 0,1Hz]. Por meio desses parâmetros de carregamento, é possível a obtenção do módulo em função da frequência de carregamento em cada temperatura. Pela utilização de fatores de transladação, isto é, que parametrizam as curvas em função de um parâmetro em comum, denominado frequência reduzida, f_R , é possível a obtenção de uma curva única do módulo em função de f_R . Os fatores de transladação (a_T) podem ser obtidos por meio da função de potência do segundo grau, demonstrada na Equação 5. Na Equação 6 tem-se a obtenção de f_R , ou frequência correspondente à temperatura analisada “x”, em graus Celsius (Nascimento, 2015). Observa-se que o fator de transladação necessariamente diz respeito à transladação de uma resposta ao carregamento obtida a uma dada temperatura em comparação a uma resposta em uma temperatura de referência, arbitrária e que deve ser fixa para o ajuste dessas funções.

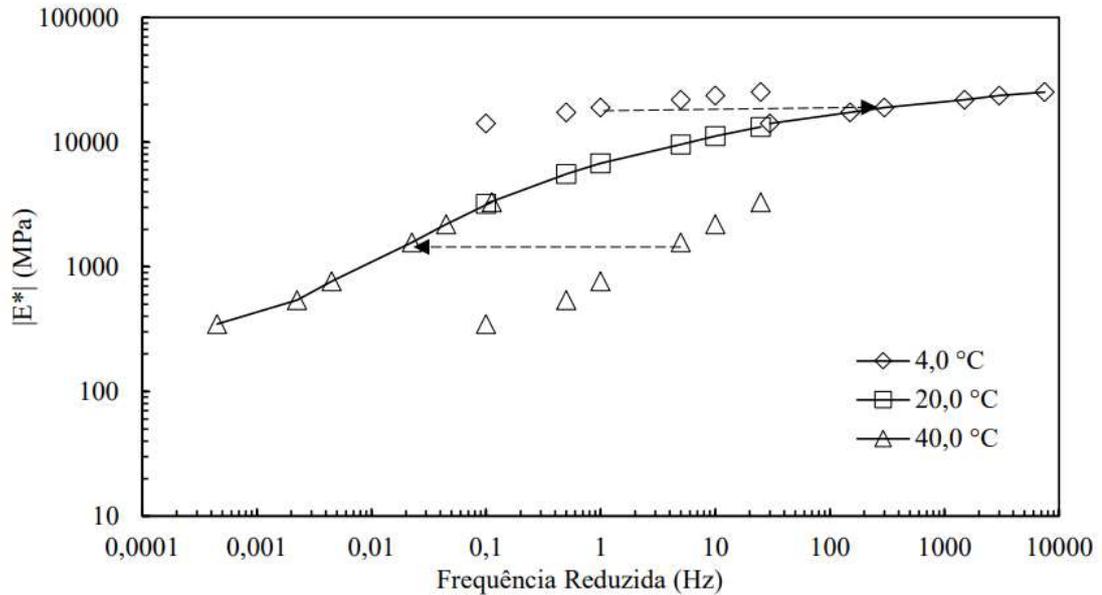
$$\log(a_T) = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (5)$$

$$f_R = f \cdot a_T \quad (6)$$

Os dados de rigidez do Módulo Dinâmico resumem-se, portanto, aos parâmetros da curva sigmoideal, ou curva mestra, conforme Figura 5. Esta curva é o resultado da aplicação dos fatores de transladação para a temperatura de referência, usualmente adotada de 20°C por ser a temperatura intermediária de ensaio.

A curva mestra de módulo associada aos fatores de transladação tempo-temperatura permite a obtenção de valores de rigidez para diferentes conjuntos de temperatura e frequência de carregamento (velocidade de tráfego). Observa-se que o módulo de misturas asfálticas pode variar teoricamente de cerca de 40MPa (alta temperatura e baixa velocidade) a cerca de 40.000MPa (baixa temperatura e alta velocidade), a depender dos módulos de equilíbrio que apresenta e da temperatura e da frequência de carregamento. O NCHRP recomenda a utilização do $|E^*|$ como parâmetro de rigidez na caracterização de misturas asfálticas para o dimensionamento de pavimentos (NCHRP, 2004).

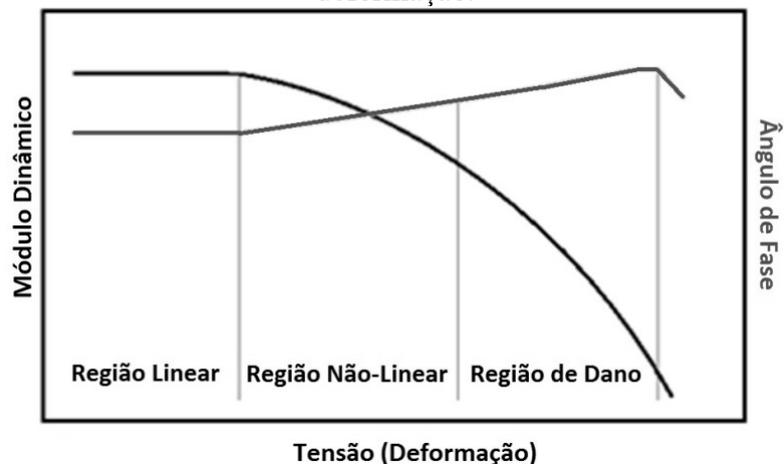
Figura 5 – Curva sigmoidal (curva mestra) do Módulo Dinâmico.



Fonte: DNIT (2019).

Soares *et al.* (2011) trazem a diferenciação do comportamento do $|E^*|$ e do ângulo de fase entre os regimes viscoelástico lineares e não-lineares, apresentando ainda o comportamento dessas variáveis quando fora dos regimes citados e já em ocorrência de dano por fadiga (Figura 6). O estudo aponta a sutil diferença no comportamento mecânico do material asfáltico no limiar entre a fase não-linear e de dano. A separação entre tais fases é importante para diferenciar o que é resposta viscoelástica e resposta pelo desenvolvimento de dano por fadiga.

Figura 6 – Comportamento do $|E^*|$ e Ângulo de Fase para diferentes níveis de tensão ou de deformação.

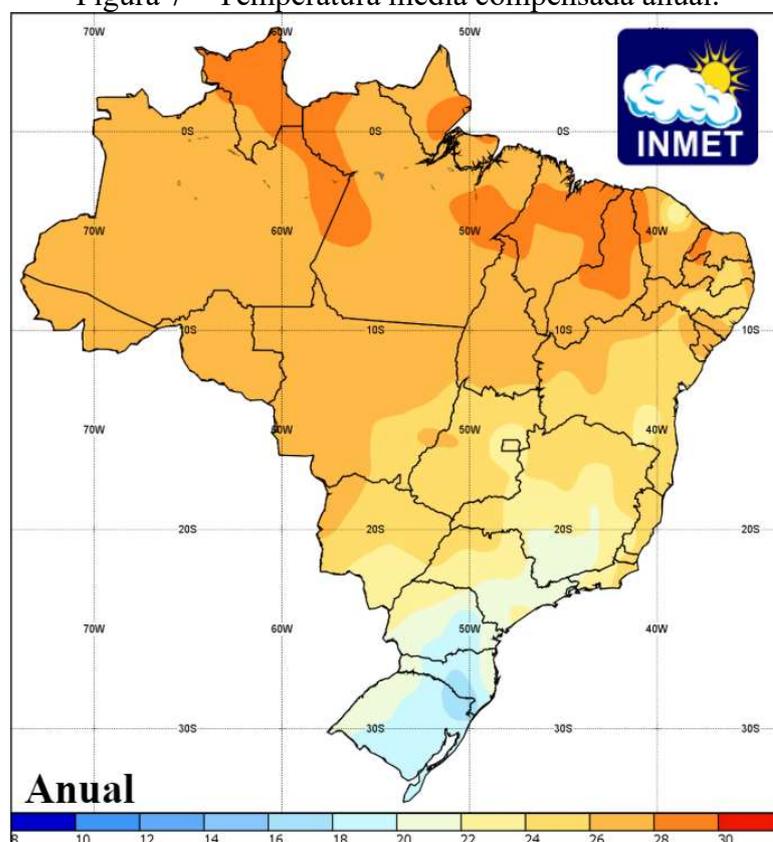


Fonte: Soares *et al.* (2011).

3.3 Clima no Brasil

O Brasil, por suas dimensões continentais, apresenta uma vasta variedade de climas, o que proporciona uma grande biodiversidade e presença de diferentes relevos. A temperatura pode ser descrita pelos seus valores mínimos, máximos ou pela média considerando os dados observados. Em uma estação meteorológica, não são coletadas informações durante a madrugada, devido ao horário de descanso do observador ou da equipe de observação. Para compensar a ausência do dado coletado durante esse tempo, a média é realizada levando em consideração, além das observações pontuais feitas ao longo do dia, a mínima e a máxima observadas. Assim, se três pontos são observados ao longo do dia, a média compensada envolverá cinco dados: os três pontos observados mais dois dados de temperaturas máximas e mínimas. As temperaturas médias compensadas anuais das regiões do Brasil, segundo as normais climatológicas do INMET obtidas entre os anos de 1981 e 2010, variam entre 14°C na região da Serra Gaúcha a 28°C em regiões do Nordeste Setentrional (mais ao Norte) e da Região Norte do país. A Figura 7 ilustra a variação da temperatura média compensada anual no Brasil.

Figura 7 – Temperatura média compensada anual.

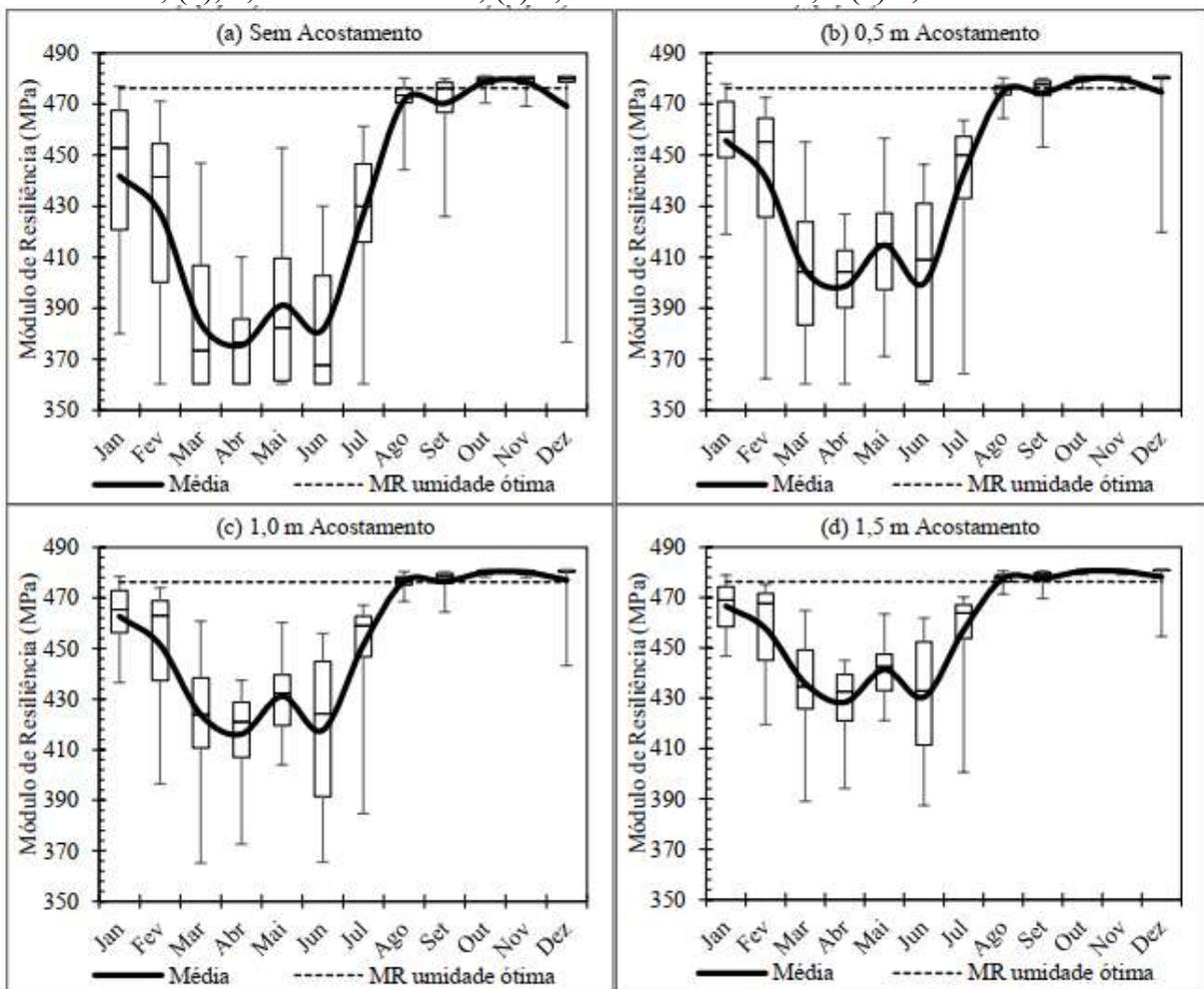


Fonte: INMET (2019).

Além da variação de temperatura, há uma variação pluviométrica grande entre as regiões do Brasil. Batista (2016) e Lucas Júnior (2019) apresentam em seus trabalhos a

importância da umidade no comportamento das camadas granulares e do revestimento asfáltico, respectivamente. Araújo (2019) apresenta o desenvolvimento de modelos para viabilização de um sistema de gestão integrada de infraestrutura e clima. A autora aponta a importância da utilização de parâmetros hidrológicos e suas interferências no MR das camadas granulares. Além disso, também são apresentados modelos de caracterização de escoamento e infiltração da água na superfície do pavimento e por meio de seu acostamento. A Figura 8 apresenta alguns resultados obtidos pela autora para variação do MR em diferentes níveis de umidade da base.

Figura 8 – Variabilidade mensal do Módulo de Resiliência da camada de base: (a) sem acostamento; (b), 0,5 de acostamento; (c) 1,0m de acostamento; e (d) 1,5m de acostamento.



Fonte: Araújo (2019).

3.4 Tráfego nas rodovias brasileiras

Segundo o Código de Trânsito Brasileiro (1997), Art. 61, parágrafo primeiro, inciso I, a velocidade máxima permitida em rodovias e vias arteriais urbanas depende da categoria do veículo, sendo:

“§ 1º. Onde não existir sinalização regulamentadora, a velocidade máxima será de:

I - nas vias urbanas:

a) oitenta quilômetros por hora, nas vias de trânsito rápido;

b) sessenta quilômetros por hora, nas vias arteriais;

c) quarenta quilômetros por hora, nas vias coletoras;

d) trinta quilômetros por hora, nas vias locais;

II - nas vias rurais:

a) nas rodovias:

1) cento e dez quilômetros por hora para automóveis e camionetas;

2) noventa quilômetros por hora, para ônibus e micro-ônibus;

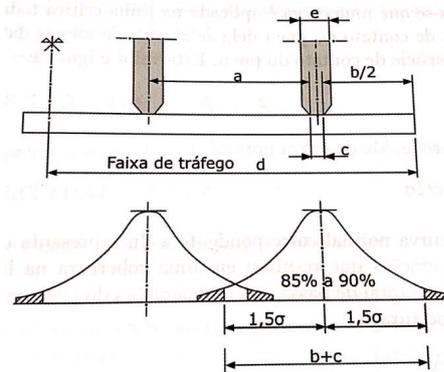
3) oitenta quilômetros por hora, para os demais veículos;

b) nas estradas, sessenta quilômetros por hora.”

Para efeitos de cálculo de dimensionamento, costuma-se utilizar a frota de veículos de carga e outros veículos pesados, como ônibus e micro-ônibus. Assim, é razoável assumir que a velocidade máxima de 80km/h, em estradas, pode ser representativa da maior parte da frota de carga, responsável efetivamente pela deterioração dos pavimentos. Vale ressaltar que em rodovias concessionadas, usualmente pelo grande volume de tráfego utilizam-se de recursos tecnológicos mais avançados durante construções e operações de manutenção e reabilitação (M&R) nos quesitos relacionados a escolha de material e métodos construtivos. Assim, por esses tipos de rodovias apresentarem melhores condições de rodagem, pode-se obter maiores valores de velocidade de tráfego, como na rodovia Ayrton Senna (SP-70), que liga a cidade de São Paulo ao município de Guararema, que o limite de velocidade para caminhões e demais veículos pesados é de 90km/h.

Além da velocidade, um parâmetro importante é a real intensidade de tráfego, ou nível de tráfego, à qual o pavimento estará submetido. A caracterização adequada do tráfego é um importante desafio científico e técnico para a pavimentação. Muitas variáveis podem ser englobadas no estudo do tráfego, a depender do nível de aprofundamento necessário. Medina e Motta (2015) apontam que além da própria carga dos eixos, que por si já é parâmetro de grande discussão - como demonstrado por Fernandes Jr. (1994) e Albano (2005) - há a variação da posição transversal de passagem do tráfego. A distribuição lateral do tráfego está representada na Figura 9, onde a representa a distância entre as rodas do eixo simples, e a largura total da roda, b a largura de variação transversal, c a largura da roda em contato com o pavimento, d a faixa de tráfego.

Figura 9 – Distribuição transversal das passagens das rodas nas rodovias para um eixo simples.



Fonte: Medina e Motta (2015).

O tráfego é frequentemente considerado por meio do número de eixos padrões equivalentes para a distribuição qualquer de tráfego (DNIT, 2006). O eixo simples de rodas duplas padrão de 8,2tf e 5,6kgf/cm² é utilizado pelo DNIT desde a concepção do método de dimensionamento atualmente em vigor, descrito em mais detalhes na Seção 3.6 deste capítulo. O cálculo desta variável usualmente parte do volume médio diário de veículos comerciais durante a vida de projeto, obtido a partir de estudos de tráfego (DNIT, 2006), conforme Equação 7.

$$N = V_t \cdot FV \cdot FR \quad (7)$$

Onde V_t é o volume de tráfego total durante o período de projeto, FV o fator de veículo, obtido pelo produto entre o FC (fator de carga) e FE (fator de equivalência), este descrito em mais detalhe na Seção 3.6 deste capítulo, e FR o fator climático regional. A quantidade diária de tráfego é então traduzida em quantidade anual considerando uma taxa de crescimento aritmético, conforme Equação 8, ou geométrico, conforme Equação 9. O parâmetro de V_t também é apresentado como Tráfego Inicial (N_{ini}) para efeitos de análise em softwares com bases mecanísticas (CAP3D-D, MeDiNa), ou em termos de VMD (volume médio diário) (FlexPave, AASHTOWare Pavement ME Design).

$$V_t = 365 \cdot Vmd \cdot P \quad (8)$$

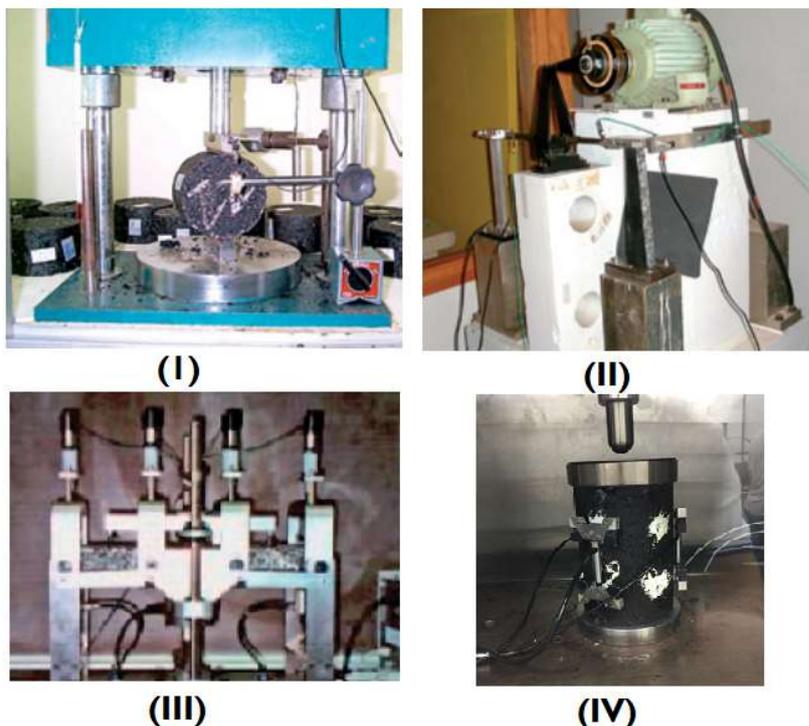
$$V_t = 365 \cdot Vmd \cdot \left[\frac{\left| \left(1 + \frac{i}{100} \right)^P - 1 \right|}{\frac{i}{100}} \right] \quad (9)$$

Onde P é o tempo considerado de projeto, V_t o volume total ao longo de um ano, i a taxa de crescimento no caso geométrico e V_{md} o volume médio diário de tráfego.

3.5 Fadiga em Misturas Asfálticas

Misturas asfálticas vêm sendo vastamente estudadas quanto à resistência à fadiga em laboratório, desde parâmetros relacionados à geometria de corpos de prova, modos de carga (unidirecional, bidirecional ou multidirecional), temperatura, frequência de carregamento e amplitudes de deformação ou de tensão (Di Benedetto *et al.*, 2004). Variações em escala também têm sido estudadas, como o estudo de fadiga nos ligantes asfálticos ou em misturas de agregados finos (MAF). A demonstração de alguns ensaios convencionais utilizados para testar misturas asfálticas quanto à fadiga constam na Figura 10.

Figura 10 – Ensaio de fadiga para misturas asfálticas. (I) Ensaio de Compressão Diametral; (II) Ensaio de Trapézio; (III) Ensaio de viga; (IV) Ensaio de Tração-Compressão Uniaxial Direta.

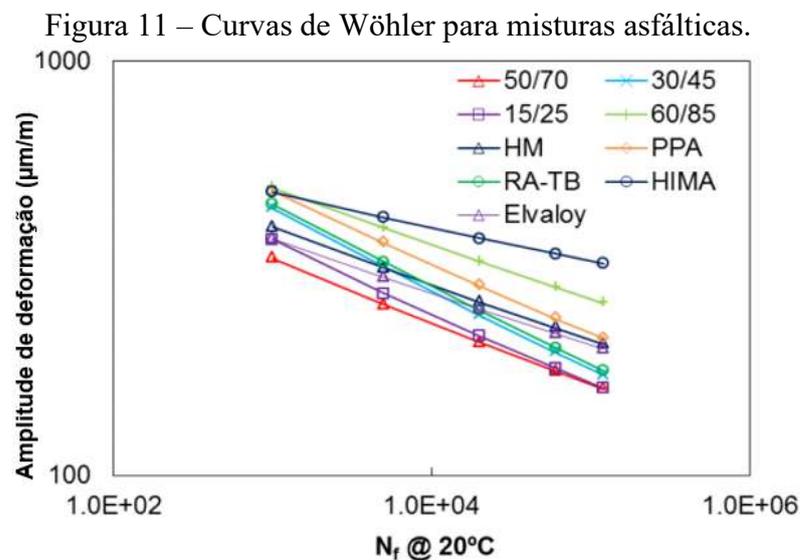


Fonte: Bernucci *et al.* (2010), adaptado pelo Autor.

Ressalta-se a importância da escolha do ensaio adequado para definição da lógica do sistema de dimensionamento a ser utilizado. Babadopulos *et al.* (2015) demonstram que o ensaio de Compressão Diametral, por exemplo, apresenta limitações quanto ao modo de carregamento, isto é, a maneira como a carga é transferida nas solicitações ao corpo de prova. No referido ensaio, esta dá-se em apenas um sentido, caracterizando uma monotonicidade. Segundo os referidos autores, a presença de carga em apenas uma direção cria no material um

acúmulo de deformações no sentido da carga devido ao efeito de fluência do material asfáltico. A aplicação da tensão por meio da força no atuador do ensaio também pode gerar uma concentração de tensões na região próxima ao contato entre a amostra de ensaio e o friso do atuador. Assim, somando os dois efeitos, há uma considerável possibilidade de presença de outros fenômenos na danificação do material não relacionados à fadiga propriamente dita, o que pode influenciar na qualidade de interpretação dos ensaios. Vale ressaltar também que os demais ensaios apresentados na Figura 10 não estão isentos de efeitos que interfiram na danificação por fadiga, como apresentado por Di Benedetto *et al.* (2004) e Babadopoulos (2017). Tais efeitos estão relacionados à tixotropia e a dissipações de energia no material durante ensaio, que provoca aquecimento e perda de energia não relacionada efetivamente ao dano.

O principal objetivo da obtenção de parâmetros de fadiga em misturas asfálticas atualmente, além da própria compreensão do fenômeno, é proporcionar variáveis laboratoriais para associação com parâmetros de campo na tentativa de desenvolver aquilo que seria um sistema de dimensionamento baseado na lógica de previsão de defeitos. Este assunto é discutido em mais detalhes na Seção 3.6. Usualmente, apresenta-se os resultados de vida de fadiga a partir de curvas da deformação (*strain*) em função do número de ciclos até a falha (*N_f*). Essas curvas são conhecidas como curvas S-N ou curvas de Wöhler, autor que estudou a fadiga em materiais metálicos e apresentou conceitos fundamentais no século XIX.



Fonte: Nascimento (2015).

Predições de falha do pavimento são usualmente associadas ao dano que se acumula no material devido à repetição de carga. O acúmulo de microtrincas no material interfere na resposta mecânica da estrutura, dando origem a concentrações de tensões e à propagação das

microtrincas até que se manifestem de maneira generalizada no volume do material (Balbo, 2007).

Várias abordagens mecanicistas são possíveis quando relacionadas à evolução da danificação em material asfáltico devido à fadiga. Uma das possíveis abordagens é a da micromecânica (Salam, 1971; Monismith e Salam, 1973; Soares e Freitas, 2003). Esta abordagem busca estudar a evolução do tamanho e da quantidade de microtrincas, analisadas de maneira discreta e individualizada no material, perturbando localmente as distribuições de tensão e de deformação. A modelagem microscópica do material asfáltico à fratura, diferentemente de demais abordagens, permite a caracterização do comportamento mecânico do material a partir de características individuais de seus constituintes, como comportamento constitutivo, geometria e frações em volume na mistura (Aragão *et al.*, 2014). Uma abordagem alternativa à microscópica é a modelagem macroscópica, que analisa a estrutura como um todo e homogeneiza os defeitos individuais e heterogêneos no volume do material. Um exemplo de modelagem macroscópica é a estudada à luz da mecânica do dano contínuo (Kim e Little, 1990; Underwood *et al.*, 2006; Kim, 2009).

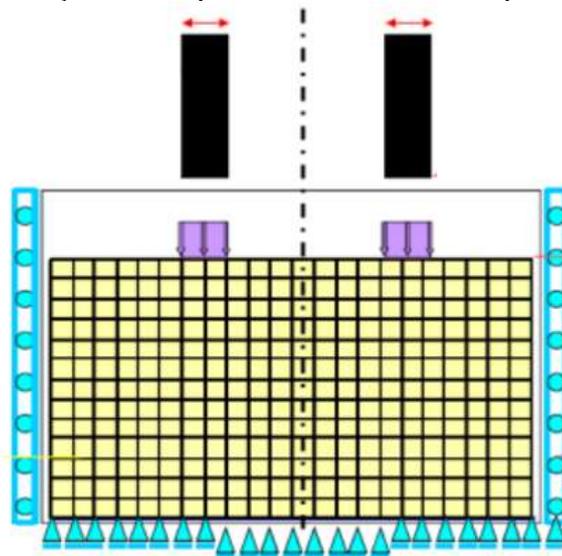
Como alternativa à obtenção de parâmetros viscoelásticos em ensaios muitas vezes ainda considerados complexos, como o de TD (ainda não normatizado no Brasil), alguns estudos têm sido realizados para permitir modelagens computacionais do comportamento de misturas. Almeida (2019) estudou as propriedades homogeneizadas de misturas asfálticas a partir de propriedades de seus constituintes. Foram utilizadas teorias do dano contínuo, que consta em mais detalhe na Seção 3.7, e de viscoelasticidade linear para uma modelagem computacional de Copos de Prova Virtuais (CPVs). Estes compostos de agregados e Matriz de Agregados Finos (MAF), permitem a obtenção de dados experimentais com ensaios de caracterização em escalas distintas.

A definição de dano pode variar de acordo com a literatura (Shah *et al.*, 1995; Lemaitre, 1996; Kim, 2009). O conceito também diverge de acordo com a referência associada à sua utilização. Por exemplo, à luz do dano contínuo mais clássico (Lemaitre, 1996), a definição de dano é a de perda de seção resistente, que pode normalmente ser estimada baseado na perda de rigidez do material testado. Enquanto isso, em simulação, a quantificação do dano costuma se dar pelo consumo relativo de vida de fadiga, de acordo com as definições de Miner (1945), que são apresentadas adiante. De acordo com Kim (2009), a amplitude de deformação está associada diretamente à vida de fadiga. Assim, para um dado material, maiores amplitudes

de deformação implicam menores vidas de fadiga (Lemaitre, 1996), assim como identificado em curvas de Wöhler (cf. Figura 11).

A obtenção do dano computacionalmente se dá por meio de algumas etapas que se iniciam na análise estrutural das camadas. Com o objetivo de realizar as análises de tensões e deformações, *softwares* comumente empregam o Método dos Elementos Finitos (MEF). Com o intuito de aplicar o MEF, a camada analisada é dividida em pontos que formam uma malha com condições de contorno predefinidas. A Figura 12 apresenta uma ilustração de uma malha de elementos finitos utilizada em análises estruturais em pavimentos.

Figura 12 – Representação visual de uma malha de elementos finitos e condições de contorno para solução de um problema estrutural em pavimentos.



Fonte: Gupta e Kumar (2014).

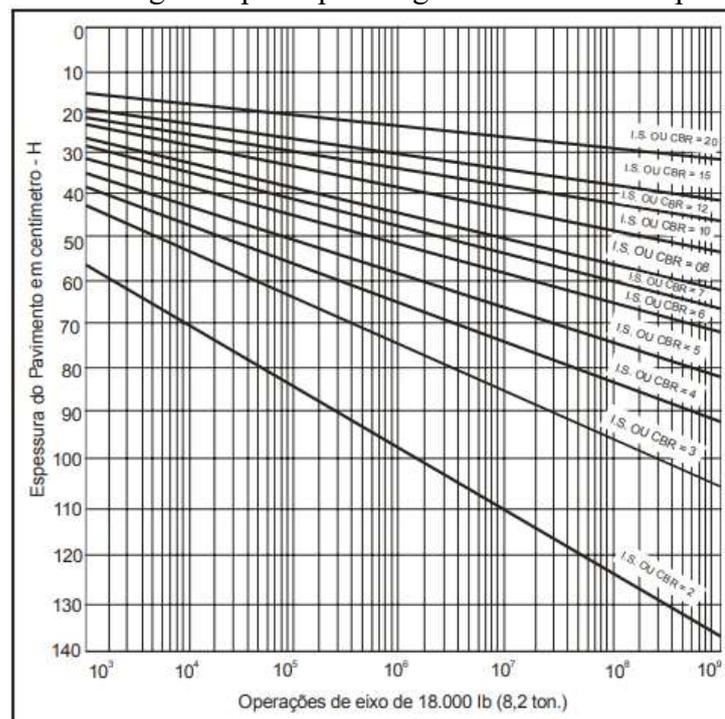
Uma etapa fundamental para utilização de um sistema para cálculo de tensões e deformações é o ensaio adotado para obtenção da rigidez do material, como discutido na Seção 3.2. Com a definição de uma rigidez em laboratório para o material simulado e a associação de um parâmetro de fadiga obtido em laboratório, fecha-se um ciclo de análises puramente mecanicistas limitadas à confiabilidade dos ensaios utilizados. A plena utilização desta análise mecanicista em um sistema de dimensionamento, entretanto, é uma etapa de grande desafio à ciência dos pavimentos.

3.6 Métodos Nacionais de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

Em 1961 o então Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) criou o primeiro método de dimensionamento nacional para pavimentos flexíveis. O método,

influenciado por estudos do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (*United State Corps of Engineers, USACE*), passou por adaptações pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza no fim da década de 50, sendo oficializado pelo DNER poucos anos depois. Com o passar do tempo e a influência do aumento da capacidade de carga de eixos rodoviários, algumas adaptações foram realizadas ao método para que eixos em tandem triplo fossem incorporados nas análises, até que chegasse em sua fase final, em 1981 (DNIT, 2006). Os principais parâmetros utilizados para a determinação das espessuras das camadas do pavimento eram o nível de tráfego e um parâmetro do material conhecido como Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio (CBR)*. O tráfego era convertido através de fatores de equivalência de carga em número de eixos simples de rodas duplas, considerado eixo padrão rodoviário (ESAL), com 8,2tf de carregamento e 5,6kgf/cm² de pressão de inflação dos pneus. A conversão era possível entre eixos simples e tandens duplos ou triplos. O ISC foi criado por O. J. Porter em 1929 para avaliar a capacidade de suporte relativa das camadas granulares comparada à de uma brita de referência (Turnbull *et al.*, 1962). Através do tráfego e do ISC é possível obter a espessura total do pavimento necessária a partir da resistência do subleito (Figura 13), com base em experiências catalogadas. Por meio de uma metodologia puramente empírica foi possível o dimensionamento e a aprovação de um método ainda hoje muito arraigado na cultura nacional na área da pavimentação.

Figura 13 – Determinação da espessura do pavimento a partir do ISC do subleito na metodologia adaptada pelo engenheiro Murillo Lopes.



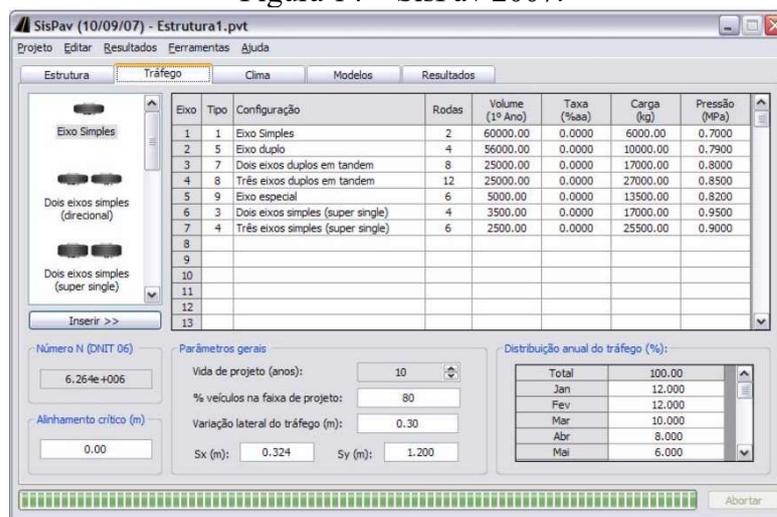
Fonte: DNIT (2006).

A partir da década de 90, com os trabalhos desenvolvidos por Motta (1991), Ceratti (1991) e Franco (2000), começou a ser apresentado a um grupo mais amplo da indústria e da academia as capacidades de um sistema de dimensionamento baseado em teorias mecanicistas que permitissem a obtenção da deformabilidade elástica em pavimentos asfálticos (Medina e Motta, 2015).

Na década de 90 eram poucos os laboratórios no Brasil que dispunham de equipamentos de ensaios por meio de carga repetida, impossibilitando a implantação de um sistema de dimensionamento amplo que tivesse como base ensaios como o de Módulo de Resiliência. Pinto (1991) apresentou funções de correlação entre campo e laboratório que traduziam resultados de ensaio de fadiga em área trincada esperada em campo. O autor utilizou dados de duas rodovias federais em trechos no estado do Rio de Janeiro monitorados durante 6 anos. Percebe-se, nesta época, uma carência de recursos para implantação de um método mecanístico, tanto em quesitos de materiais (ensaios) quanto de tráfego e monitoramento da evolução de defeitos (trechos). A experiência rodoviária nacional ainda era restrita a poucos profissionais, ainda de forma não formalizada e visível, para que a comunidade como um todo pudesse acessar e contribuir. Isso ocorria em grande parte até pela ausência de tecnologias que permitissem uma ampla e instantânea divulgação das informações. Quando isso ocorre, novos ensaios ou metodologias de projeto podem surgir, com o legítimo lastro das experiências existentes, contudo, não podem ser aferidas pelos pares, ou pelo menos não de modo sistemático. Desta forma, compromete-se um pilar absolutamente essencial do avanço do conhecimento. A sustentação do que é proposto fica restrita a validação no tempo. Com o passar dos anos, felizmente, surgiram ferramentas tecnológicas capazes de registrar bases de dados mais robustas e garantir o envolvimento de agentes do governo, da academia e da indústria, criando uma oportunidade única para a consolidação de ensaios e de um método compatível com o que há de melhor em termos de teoria e prática disponíveis (Soares, 2020).

A tese de doutorado de Franco (2007) refletiu estudos importantes de dimensionamento realizados à época. O autor apresentou o *software* SisPav, que considerava aspectos de carregamento e da estrutura para o cálculo de tensões e deformações no pavimento por meio de métodos analíticos da elasticidade linear (apenas em uma temperatura) em uma interface intuitiva, demonstrada na Figura 14. O NCHRP (2004) apontou que a incerteza em volta do método para cálculo de tensões e deformações é muito pequena quando comparada à incerteza de outros parâmetros do dimensionamento, o que encoraja o uso de análises estruturais simplificadas (normalmente elásticas lineares).

Figura 14 – SisPav 2007.



Fonte: Franco (2007).

O sistema e interface do SisPav deu origem ao MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, em homenagem ao professor Jacques de Medina), desenvolvido a partir do convênio COPPE-UFRJ/DNIT. Entretanto, os *softwares* apresentam métodos de previsão de defeitos distintos, compartilhando, hoje, essencialmente, apenas o módulo estrutural *Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC)* e alguns aspectos da lógica do sistema de dimensionamento. A essência de determinar a espessura das camadas a partir de um sistema que faz previsão de defeitos continua no sistema atual. Entretanto, no SisPav, o defeito utilizado para análise é o dano, considerado por meio de um dos seguintes parâmetros: (i) deformação plástica no topo do subleito; (ii) deflexão na superfície do pavimento; (iii) dano por fadiga associado a ensaios em laboratório e a tração no fundo do revestimento.

Segundo Medina e Motta (2015), apesar da qualidade das análises mecânicas do SisPav, como cálculo estrutural, as funções de previsão de defeitos não eram muito bem calibradas à época que o programa foi apresentado. Na modelagem do dano por fadiga, a deformação específica de tração no fundo do revestimento asfáltico é associada à vida de fadiga (N_f) por meio de modelos calibrados dentro da lógica do programa, demonstrado na Equação 10, onde o R^2 representa a correlação do modelo e os parâmetros de ensaio em laboratório. Percebe-se que além da deformação específica no fundo do revestimento (ϵ_f), o MR também era necessário para obtenção do resultado. Com a obtenção de N_f , é possível a determinação do acúmulo de dano de fadiga por meio da Lei de Miner (Equação 26, explicada em mais detalhe na Seção 3.9).

$$N_f = 1,904 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,821} \cdot \left(\frac{1}{MR}\right)^{0,74} ; R^2 = 0,805 \quad (10)$$

No MeDiNa, o sistema de determinar a espessura de camadas continua por meio da previsão de defeitos, entretanto agora fazendo uso de Funções de Transferência (FT) que correlacionam parâmetros de laboratório a defeitos na superfície do pavimento em campo. Essas funções também foram propostas nos trabalhos do NCHRP (2004). A interface do programa consta na Figura 15.

Figura 15 – MeDiNa 2018.

The screenshot shows the MeDiNa 2018 software interface. At the top, there are tabs for 'ESTRUTURA', 'MODELAGEM', and 'RESULTADOS'. Below the tabs, there are input fields for 'RESPONSÁVEL:', 'EMPRESA:' (Universidade Federal do Ceará), 'PROJETO:', and 'MODO:' (Pavimento Novo (Nível A)). A table titled 'Alterar Estrutura >>' lists material layers with columns for 'CAMADA', 'DESCRIÇÃO DO MATERIAL', 'TIPO', 'ESPESSURA (cm)', 'MÓDULO (MPa)', and 'COEFICIENTE DE POISSON'. The table contains four rows: 1. CONCRETO ASFÁLTICO (RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba, 10,0 cm, 9000 MPa, 0,30); 2. MATERIAL GRANULAR (Brita Graduada - Gnaisse C5, 20,0 cm, 381 MPa, 0,35); 3. SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO (Solo Argiloso LG'(1), 20,0 cm, 250 MPa, 0,45); 4. SUBLEITO (Solo Siltoso NS', 0,0 cm, 189 MPa, 0,45). Below the table, there is a section for 'EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO' and 'DADOS DO TRÁFEGO' with various input fields for traffic data. At the bottom, there are buttons for 'Projeto novo' and 'NÍVEL <A>'.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: MeDiNa v.1.1.0.0. (2018).

Na prática, o sistema atual tem uma FT que recebe os dados mecanicistas de dano explicado em mais detalhe na Seção 3.9 deste capítulo, advindos do módulo de análise *AEMC*, no revestimento asfáltico, e converte esse resultado em %AT na superfície do pavimento por meio de equações empíricas resultantes do monitoramento de trechos em campo. A FT implementada no MeDiNa, em sua versão de 2018, foi calibrada pelos trabalhos de Fritzen (2016) e, mais recentemente, em atualizações do sistema (Fritzen *et al.*, 2019). Um pouco mais sobre algumas premissas do programa é discutido mais adiante, ainda nesta seção.

A análise mecanicista em pavimentos, portanto, é semelhante à análise estrutural utilizada em diversas obras de engenharia, nas quais são calculadas tensões e deformações a

partir de parâmetros de rigidez e de carregamento nos materiais. O dimensionamento adequado deve incorporar variáveis relevantes de modo a permitir um cálculo e uma confiança que garantam o bom desempenho da estrutura e economicidade do projeto, sem superestimar ou subestimar a ocorrência de defeitos (Huang, 2003). Nos parágrafos seguintes serão explicadas as etapas que levaram à viabilização de um sistema de dimensionamento na lógica atual, com previsão de defeitos em termos de %AT como balizador do método.

Em 2006, através de uma parceria entre a COPPE/URFJ com o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Miguez (CENPES), da Petrobras, iniciou-se aquilo que ficou conhecido como Projeto Fundão. O projeto tinha como objetivo testar novos produtos asfálticos em desenvolvimento e fazer acompanhamentos sistemáticos de trechos experimentais na Cidade Universitária (Fritzen, 2016). Atualmente, a RTA conta com a participação de um grande número de universidades espalhadas pelo Brasil, como a Universidade Federal do Ceará (UFC), Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), entre outras.

A evolução da filosofia do sistema de dimensionamento em meio acadêmico mostrou-se bastante acentuada no fim dos anos 90 e início dos anos 2000, até que culminasse numa ação mais concreta do órgão central rodoviário do Brasil, o DNIT, para a atualização de um sistema de dimensionamento. Vale observar, todavia, que mesmo antes das atualizações mais recentes, o DNIT já havia formalizado procedimentos que fazem uso da Mecânica dos Pavimentos, ainda que de forma carregada de empirismo e também pouco disponível em termos da base de dados que possibilitou o método (DNIT, 2006). Sem esta abertura ampla dos dados, qualquer método perde a oportunidade de ser avaliado e melhorado pela comunidade ainda durante a sua construção. Trata-se de uma lição importante que o país deve aproveitar para suas atualizações, não apenas a atual, mas no porvir.

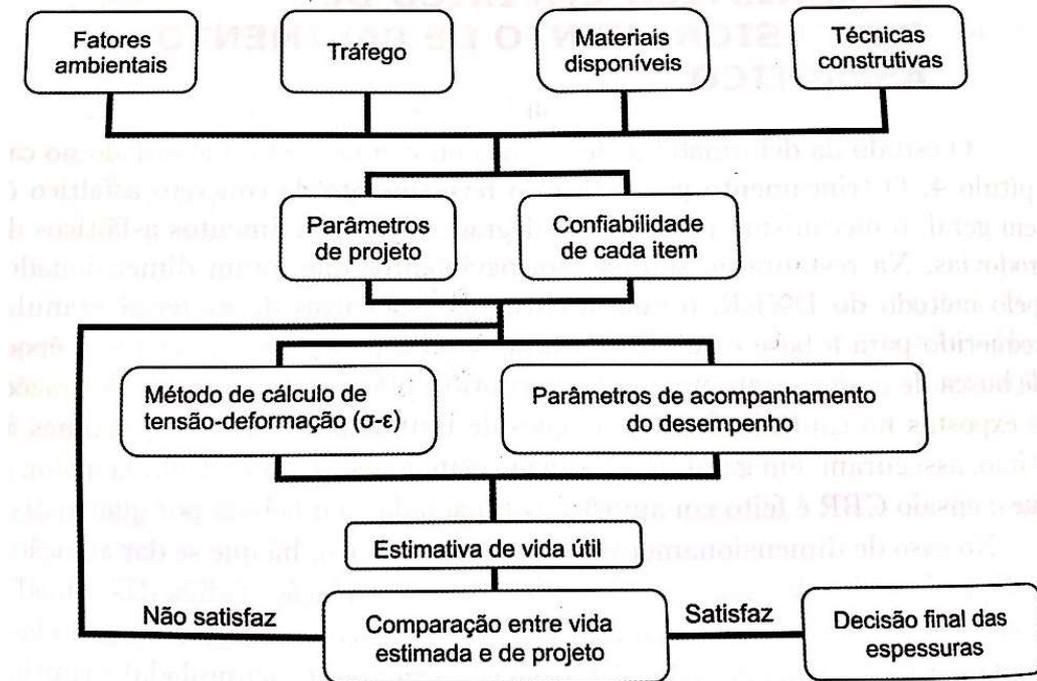
De qualquer forma, a inclusão das tensões e deformações em análises mecanicistas que proporcionassem parâmetros computacionais confiáveis avançou os métodos de dimensionamento. A resposta estrutural do sistema de camadas, aliada ao monitoramento dos trechos correspondentes em campo e a construção de uma base de dados proporcionada pelas universidades pertencentes à RTA, fez com que a lógica de dimensionamento levasse a um método mecanístico-empírico mais sólido. Ajustes finais estão em curso e apenas a validação ao longo de mais tempo, com o devido monitoramento da evolução de defeitos em trechos específicos, produzirá a confiança necessária para as mudanças implementadas.

Dentro da lógica atual proposta no MeDiNa, parâmetros de vida de fadiga (N_f) são incorporados a partir de ensaios de CD, parâmetros de rigidez por meio do MR e parâmetros de carga e crescimento do tráfego por meio de número de eixos padrões (N). A escolha do ensaio de CD e MR sinaliza um sistema de ensaios de caracterização com parâmetros de relativa fácil obtenção (Fritzen, 2016). Parâmetros viscoelásticos, que possibilitam conhecer a dependência da frequência de carregamento e temperatura, não foram considerados na primeira proposta. A simplificação tem sido justificada por aspectos práticos, a despeito da interferência da temperatura e frequência de carregamento ter significativo impacto nas propriedades dos materiais asfálticos, como rigidez e vida de fadiga, conforme reconhecido há bastante tempo na literatura (Yoder e Witzak, 1975; Huang, 2003).

O tipo de análise mecanística-empírica que considera ensaios de MR para rigidez e CD para fadiga, tratando-se de dimensionamento, é destacado por alguns autores como o nível A (Franco, 2007; Fritzen, 2016; Santiago, 2017). O nível B é hierarquicamente superior ao nível A, passando a contemplar análises viscoelásticas por meio de parâmetros de ensaios de $|E^*|$ para rigidez e TD para fadiga. A hierarquização do nível de sistema de ensaios para realização de análises mecanística-empíricas foi inicialmente proposta pelo NCHRP (2004) no âmbito do desenvolvimento do MEPDG. Na classificação do NCHRP (2004), os níveis de caracterização hierárquica são divididos em 3, onde 1 é o nível mais sofisticado de caracterização. Note-se que, letras no Brasil e algarismos nos Estados Unidos, possuem lógicas inversas de nomeação dos níveis mais sofisticados (Nos Estados Unidos, 1 é o mais avançado; mas no Brasil, A não o é).

A Figura 16 apresenta a lógica do sistema de um dimensionamento mecanístico-empírico, de processo interativo, ou seja, onde há a previsão da vida útil, para, então, haver a alteração da estrutura do pavimento (em materiais ou em geometria).

Figura 16 – Lógica de um dimensionamento de pavimentos mecanístico-empírico.



Fonte: Motta (1991).

3.7 Mecânica do Dano Contínuo

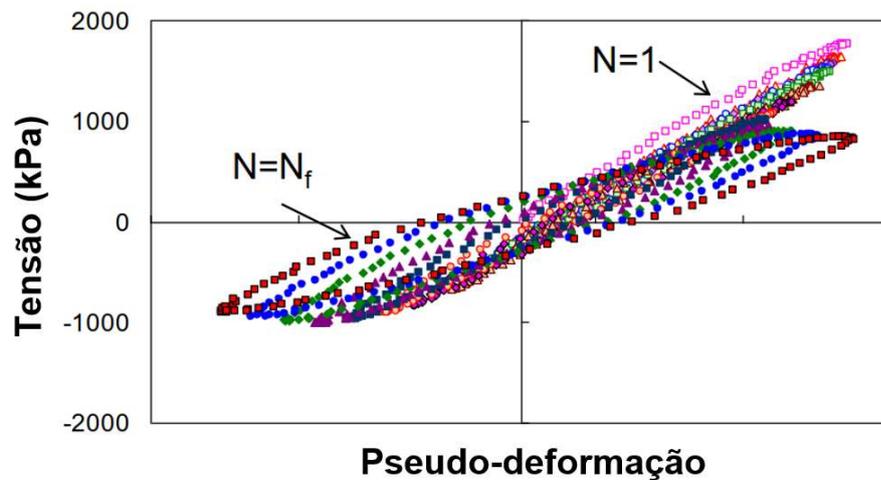
A mecânica do dano contínuo despreza comportamentos específicos de microescala e observa apenas propriedades macroscópicas do material (Lemaitre, 1996). O objetivo de utilização de um modelo de dano contínuo é possibilitar a simplificação da análise de diferentes pontos de fratura no material testado, estudados de maneira distribuída no volume do material. A avaliação do dano se dá, portanto, à luz da teoria do dano contínuo, na análise dos efeitos combinados de dano na estrutura do material analisado (Souza, 2018). Dentre as mudanças observadas, tem-se, por exemplo, a redução de rigidez do material viscoelástico.

O modelo VECD (*Viscoelastic Continuum Damage*) ganhou notoriedade a partir dos anos 90. É resultante da utilização de desenvolvimentos a partir da teoria do trabalho potencial de Schapery (1990) e a implementação de pseudo-variáveis. Schapery (1990) faz uso de conceitos baseados nos princípios da termodinâmica dos processos irreversíveis para desenvolver trabalhos à luz do dano contínuo. A teoria admite que a energia armazenada no processo de deformação do material é parcialmente consumida pelo dano provocado neste material a cada ciclo de carregamento (Teoria do Trabalho Potencial de Schapery).

Como mencionado anteriormente, a danificação no material à luz da teoria do dano contínuo se dá pela perda de sua rigidez. Este comportamento é observável em materiais

elásticos pela redução de inclinação da curva tensão-deformação, ao passo que para materiais viscoelásticos esta observação não é tão simples. Torna-se necessário a transformação de variáveis de problemas viscoelásticos em variáveis correspondentes elásticas para simplificação do problema. Através do uso de pseudo-variáveis, as relações constitutivas de materiais viscoelásticos podem ser consideravelmente simplificadas. Assim, o comportamento da perda de rigidez (danificação) de material viscoelástico pode ser observado pela redução da inclinação da curva tensão vs. pseudo-deformação, analogamente ao material elástico.

Figura 17 – Inclinação dos ciclos da relação entre tensão e pseudo-deformação após a danificação (perda de rigidez).



Fonte: Nascimento (2015), adaptado pelo.

A apresentação da conversão do problema viscoelástico em elástico é feita por meio do princípio da correspondência elástico-viscoelástica, apresentado a seguir. Além deste princípio, utiliza-se também, na teoria do dano contínuo viscoelástico, o princípio da superposição tempo-temperatura com dano crescente, apresentado no item 3.7.2., e o princípio do trabalho potencial de Schapery, apresentado no item 3.7.3.

3.7.1 Princípio da Correspondência Elástica-viscoelástica

O princípio da correspondência elástica-viscoelástica consiste na utilização de uma pseudo-variável de deformação, ou pseudo-deformação (ε^R), possibilitando a transformação de equações de materiais viscoelásticos, de maior complexidade, em equações equivalentes a materiais elásticos, de maior simplicidade (Schapery, 1984). A obtenção da pseudo-deformação é feita por meio da Equação 11.

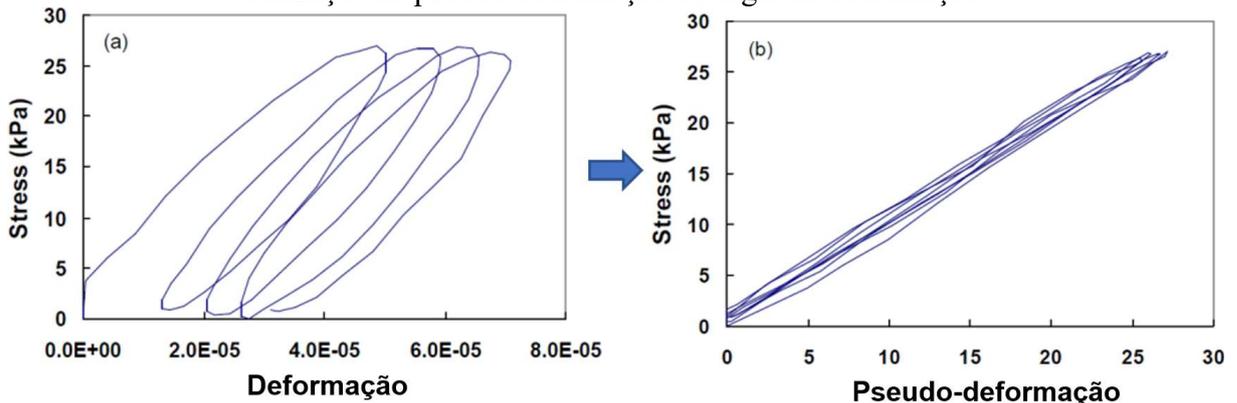
$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int D(t - \tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \partial \tau \quad (11)$$

Onde E_R é o módulo de referência, de valor constante e com mesma unidade de medida do módulo de relaxação, D é o dano, t é o tempo iniciado de um referencial qualquer e τ é o tempo de início do carregamento. Nota-se a necessidade de obtenção da integral de convolução (Equação 1) para o cálculo da pseudo-deformação. Assim, aplicando a Equação 1 obtém-se a relação $\sigma = E_R \varepsilon^R$. Então, uma correspondência pode ser obtida com a relação tensão vs. deformação elástica linear. Kim (2009) sugere que o módulo de referência seja igual a 1. Assim, a pseudo-deformação passa a ser simplesmente o valor numérico da tensão viscoelástica linear (tensão sem ocorrência de dano) para um dado valor de deformação, conforme a Equação 12, ao assumir $E_R = 1$.

$$\varepsilon^R = \frac{\sigma}{E_R} = \sigma \quad (12)$$

O poder de utilização da pseudo-deformação pode ser melhor visualizado na Figura 18, que mostra a obtenção de um diagrama de tensões e deformações para um carregamento cíclico em regime viscoelástico linear. O carregamento desenvolve apenas deformações acumuladas por pura viscoelasticidade, sem envolver parcelas de dano. Com a utilização da pseudo-deformação, em vez da deformação, observa-se que todos os ciclos de carregamento se desenvolvem na mesma inclinação quando não há dano.

Figura 18 – Diagrama de tensões e deformações de um material viscoelástico submetido a ciclos de carregamento a tensões constantes, e o mesmo ciclo de carregamento, porém com a utilização da pseudo-deformação no lugar da deformação.



Fonte: Nascimento (2015).

3.7.2 Princípio da superposição tempo-temperatura

O princípio da superposição tempo-temperatura com dano crescente permite que seja admitido que os fatores de transladação da frequência para cálculo da frequência reduzida (caso a análise seja em temperaturas diferentes das temperaturas de referência do ensaio de $|E^*|$) sejam os mesmos para situações com ou sem dano (Chehab *et al.*, 2002; Chehab *et al.*, 2003).

Com a utilização dos princípios apresentados e a teoria do trabalho potencial de Schapery (1984), além de adaptações advindas dos trabalhos de Park *et al.* (1996), o dano no material pode ser finalmente associado a uma variável medida em ensaio simplesmente a partir de dados de tensões e deformações.

3.7.3 Teoria do Trabalho Potencial de Schapery

Os trabalhos desenvolvidos por Schapery foram inicialmente feitos para materiais elásticos e posteriormente adaptados a materiais viscoelásticos por meio de pseudo-variáveis. Considerando que o dano pode ser interpretado por uma variável interna de estado (S_m , onde m representa o número de parâmetros de dano considerados no modelo) e aplicação de uma função de densidade de deformação (W), que depende da deformação e das variáveis de estado interno [$W = W(\epsilon, S_m)$], tem-se a lei de evolução do dano, que baliza a teoria do trabalho potencial, apresentada na Equação 13.

$$-\frac{dW}{dS_m} = \frac{dW_S}{dS_m} \quad (13)$$

Onde W_S é a energia dissipada devido às mudanças estruturais ocasionadas pelo dano no material, dentre elas, a própria danificação, em função das variáveis de estado interno S_m . Babadopulos (2017) apresenta também evidência experimental da relevância de efeitos reversíveis que interferem na rigidez aparente do material sem provocar efetivamente dano ao longo de ensaios cíclicos, tais quais a não-linearidade física, o auto aquecimento devido à dissipação de calor, e efeitos de tixotropia. Utilizando-se do princípio da correspondência elástica-viscoelástica e assumindo que a tensão aplicada pode ser apresentada como $\sigma = dW/d\epsilon$, a função apresentada passa a ter dependência em pseudo-variáveis. Entretanto, a lei de evolução do dano apresentada para materiais viscoelásticos e adaptada com pseudo-variáveis também depende de mais alguns fatores para a consideração em análise. Além disso, pode-se substituir W por $W^R(\epsilon^R, S_m)$ para incluir efeitos de viscoelasticidade com uso de pseudo-variáveis. Assim, a Equação 13 pode dar origem à Equação 14, por meio de algumas modificações e adaptações necessárias a materiais viscoelásticos.

A transformação apresentada na Equação 13 considera que a taxa de danificação em um material viscoelástico em função das variáveis de estado interno é de mesma proporção em um material elástico, o que não é observado de fato. Assim, faz-se uso de uma variável que represente o potencial de crescimento do dano no material viscoelástico (que se supõe ser tão maior quanto menor for a capacidade de relaxação desse material), passando a taxa de evolução

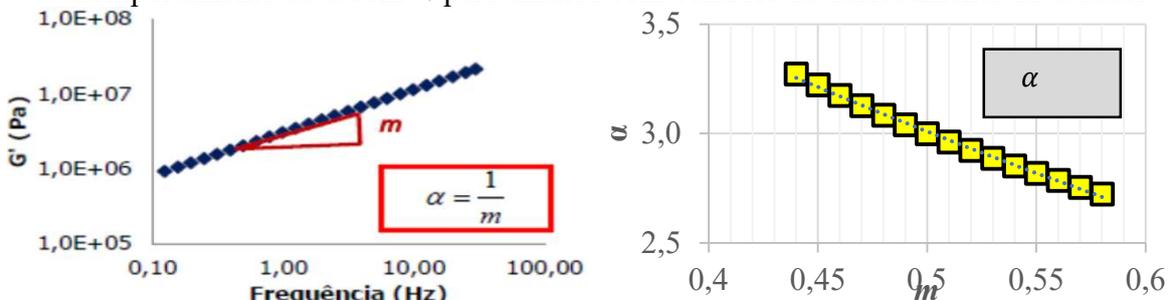
do dano em materiais viscoelásticos, \dot{S}_m , a ser representada pela Equação 14 (Park *et al.*, 1996), onde α é um valor constante, por simplicidade.

$$\dot{S}_m = - \left(\frac{\partial W_m^R}{\partial S_m} \right)^\alpha \quad (14)$$

De acordo com Park *et al.* (1996), a constante α é baseada nas características mecânicas do material viscoelástico. Assim, seu uso se deve ao fato de a taxa de evolução do dano neste material ser associada à função de pseudo-energia de deformação (W^R). Esta, por sua vez, é associada a um critério de falha (adotado neste trabalho como sendo a envoltória de ruptura proposta por Sabouri e Kim, 2014, baseada no G^R). Então, a liberação da W^R está associada ao dano no material de acordo com um fator de potência, indicando um crescimento exponencial para materiais viscoelásticos.

Em muitos problemas viscoelásticos, a velocidade de trincamento é governada pela α -ésima potência da taxa de liberação de energia, onde α é relacionado à propriedade de relaxação do material. De acordo com Underwood *et al.* (2009), sob a ótica do VECD na caracterização de misturas asfálticas, o valor de α é relacionado à inclinação da relação log-log do módulo de relaxação, m , e é dependente do tipo de ensaio utilizado para caracterizar o modelo. Algumas expressões foram propostas para representar o valor de α . Em ensaios monotônicos por controle do atuador, $\alpha = 1+1/m$, onde $m = - [\text{dlog}E(t)/\text{dlog}(t)]_{\text{max}}$, segundo comparação proposta por Schapery (1975) para materiais em borracha. A obtenção do α para o ensaio de relaxação, com a carga cisalhante para produzir 0,1% de deformação em diferentes frequências de carregamento, está demonstrada na Figura 19^a. O comportamento de α para diferentes valores de m é ilustrado na Figura 19b. Para ensaios em tensão controlada, $\alpha = 1/m$.

Figura 19 – (a) inclinação da curva log-log do módulo de relaxação; (b) comparação do comportamento de α com m para ensaios com controle do deslocamento do atuador.



Fonte: (a) INCT (2020); (b) Elaborado pelo autor.

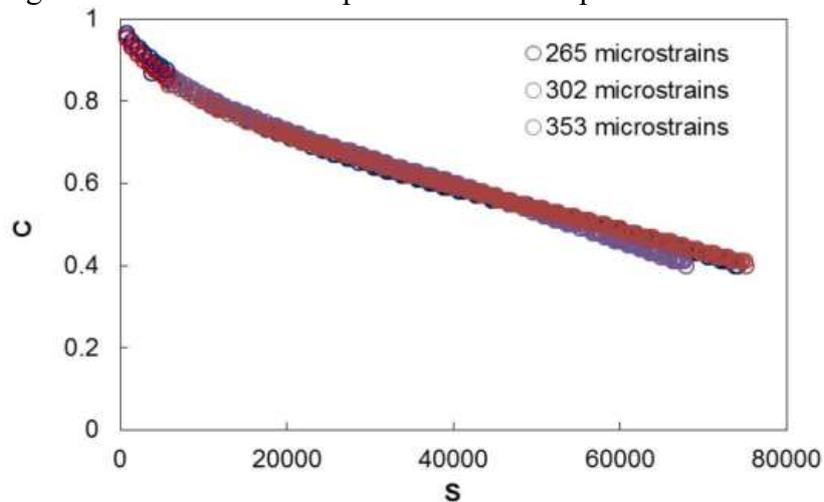
Kim (2009) associa o trincamento em material asfáltico submetido a ensaios uniaxiais de Tração-compressão Direta com o parâmetro S , que é a variável de estado interno escolhida para associação com o dano. O referido autor utiliza apenas uma variável de estado interno para a descrição de todas as mudanças no material que ocorrem ao longo do processo de fadiga, de maneira que as diversas possíveis variáveis de estado, S_m , na teoria do trabalho potencial, possam ser resumidas em apenas uma variável interna S . Partk *et al.* (1996) apresentam a função de densidade de energia de pseudo-deformação do material simplificada na Equação 15.

$$W^R = \frac{1}{2} C(S) (\varepsilon^R)^2 \quad (15)$$

A relação desta variável com a rigidez do material em termos de pseudo-variáveis, convencionada de pseudo-módulo de rigidez, ou integridade, (C), e pode ser descrita pela Equação 16, onde C_{11} e C_{12} são parâmetros de ajuste de curva (Daniel e Kim, 2002). A Figura 20 apresenta o traçado da curva $C(S)$ obtida para diferentes amplitudes de deformação.

$$C(S) = 1 - C_{11} S^{C_{12}} \quad (16)$$

Figura 20 – Curva C vs. S para diferentes amplitudes de deformação.



Fonte: Nascimento (2015).

É importante notar que a variação da amplitude de deformação não resulta em mudança significativa na curva $C(S)$. O mesmo se aplica à diferenciação entre ensaios cíclicos ou monotônicos, de tensão ou deformação controlada, com diferentes amplitudes, em diferentes frequências ou diferentes temperaturas (Nascimento, 2015). A repetibilidade nessas condições distintas indica que a curva característica de dano se aproxima de uma propriedade fundamental do material.

Ressalta-se, todavia, que as curvas apresentadas como modelagem dos resultados de ensaio são oriundas de curvas médias obtidas para cada corpo de prova ensaiado, e que pouco se sabe a respeito do impacto dessas variações nos resultados de vida de fadiga e de %AT nos pavimentos correspondentes quando se utilizam esses parâmetros como *inputs*. As poucas variações se repetem quando são mudados os tipos de ensaio: tensão controlada, deformação controlada ou deslocamento do atuador controlado. Mostra-se, portanto, essencial a sensibilidade de variações de parâmetros da curva $C(S)$ e seus impactos nos resultados esperados.

Por meio de artifícios matemáticos, é possível a obtenção explícita de S , demonstrado na Equação 17. Como C e ε^R são dependentes do tempo, t , uma aproximação numérica pode ser usada com os dados medidos, obtendo-se, assim, S em função do tempo (Lee, 1996 *apud* Nascimento, 2015), conforme Equação 18.

$$S = \int_0^t \left[\frac{1}{2} \frac{dC}{dt} (\varepsilon^R)^2 \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} dt \quad (17)$$

$$S(t) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} (\varepsilon^R)_i^2 (C_{i-1} C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (18)$$

3.7.4 Modelagem do dano contínuo à luz da abordagem S-VECD

Nascimento (2015) destaca que, apesar da complicação que o modelo VECD pode apresentar, por meio do uso de algumas simplificações que impactam pouco nos resultados finais de dano, pode-se optar por um modelo simplificado, ou S-VECD (“S” de *Simplified*). A simplificação permite a redução do custo computacional para realização dos cálculos de obtenção dos parâmetros do modelo, como cálculos das pseudo-variáveis por meio de valores pico a pico dos pulsos de carregamento e resposta, em vez de obtê-las a cada instante de ensaio. Essa simplificação permite, por exemplo, que não seja necessário o cálculo da integral de convolução (Equação 1) para obtenção da pseudo-deformação em todas as variações de carregamento, utilizando-se apenas o valor da tensão viscoelástica linear (valor de tensão caso não houvesse dano no material).

A energia por trás da quantificação do trabalho apresentada por Schapery resume-se a uma variável advinda de trabalhos com diversas funções, como a densidade de energia de deformação [$W = W(\varepsilon, S_m)$], a relação tensão-deformação ($\sigma = dW/d\varepsilon$) e a lei de evolução do dano.

A obtenção dos resultados das equações constitutivas do material a cada instante n de ensaio pode gerar milhões de resultados e uma carga computacional demasiada, inviabilizando a obtenção da contagem de dano por meio das variáveis S e a curva de integridade $C(S)$. Underwood *et al.* (2009) propuseram então simplificações ao cálculo da pseudo-deformação, ε^R , da pseudo-rigidez ou integridade $C(S)$, e também à lei de evolução do dano em materiais viscoelásticos. A obtenção do parâmetro de dano, S , se dá, diferentemente da abordagem demonstrada na Equação 18, de maneira discretizada, por ciclo de carregamento, por meio da Equação 19.

$$S(t) = S_n + \left(\frac{1}{2} C_{11} C_{12} S_n^{(C_{12}-1)} (\varepsilon_n^R)^2 \right)^\alpha \Delta t \quad (19)$$

Onde n é o n -ésimo instante de ensaio e Δt a variação de tempo entre o instante $n-1$ e o instante n .

Admitindo que o dano é desenvolvido apenas em deformações de tração, e examinando a pseudo-deformação máxima, esta passa a ser calculada pela Equação 20, agora dependente apenas da deformação máxima obtida no ciclo de carregamento n e de um parâmetro β .

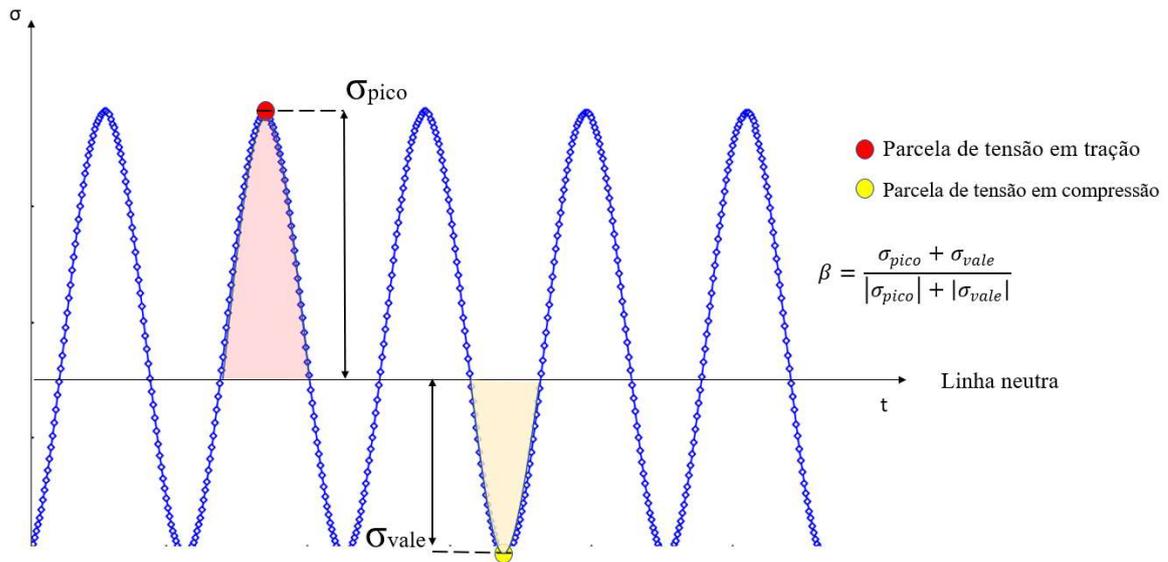
$$(\varepsilon_{max}^R)_n = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} |E^*| (\varepsilon_{max})_n \quad (20)$$

Observando os picos e vales do deslocamento no carregamento senoidal (Figura 4), o parâmetro β é calculado, por sua vez, pela Equação 21. A Figura 21 ilustra as parcelas de tração e compressão, bem como o cálculo do β , para os pulsos de carregamento em ensaio.

$$\beta = \frac{\sigma_{pico} + \sigma_{vale}}{|\sigma_{pico}| + |\sigma_{vale}|} \quad (21)$$

Matematicamente, o parâmetro β , ou fator de função de forma, permite a seguinte consideração: quando o seu valor é $+1,0$, apenas tração consta no histórico de tensões do material; se igual a zero a parcela de tração é igual a de compressão e; se igual a $-1,0$, o histórico de tensão é de total compressão no material.

Figura 21 – Pulsos de tração e compressão com a ilustração da obtenção de β .

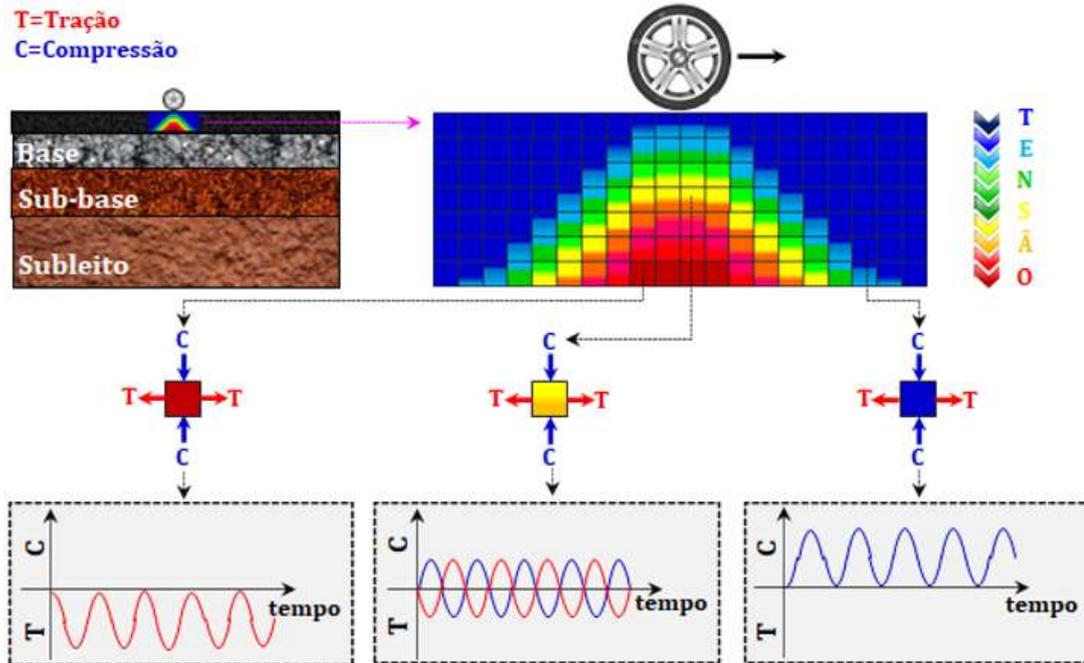


Fonte: Elaborado pelo autor.

É de se esperar, portanto, que quanto mais positivo o parâmetro β , maior a danificação no material, visto que este foi submetido a maior parcela de tração e que este é o esforço indutor do dano. Nascimento (2015) observou que para a maior parte de seus ensaios, o valor de β era bem representado pelo valor de -0,08.

No ensaio laboratorial, o valor de β é facilmente obtido observando os pulsos de carregamento advindos dos sensores do equipamento utilizado. No ensaio de TD, espera-se, inclusive, que os pontos apresentem homogeneidade na distribuição de tensões. Na simulação computacional do pavimento, entretanto, há complicações relacionadas aos estados de tensão que cada ponto na malha de elementos finitos está submetido sob carregamento. Para melhor ilustrar o pensamento descrito, a Figura 22 demonstra a direção das tensões e deformações em três elementos distintos sob o carregamento no pavimento, além dos diferentes pulsos de carregamentos que estão submetidos, em termos de parcelas de tração (T) ou compressão (C). É de se pensar que em diferentes estados de tensões e deformações, pontos apresentem distintas parcelas de tração e compressão. Neste caso, o valor de β fixo para todos os pontos não representa adequadamente a realidade de simulação.

Figura 22 – Variação da direção das tensões principais em elementos sob o carregamento no pavimento.



Fonte: INCT (2020).

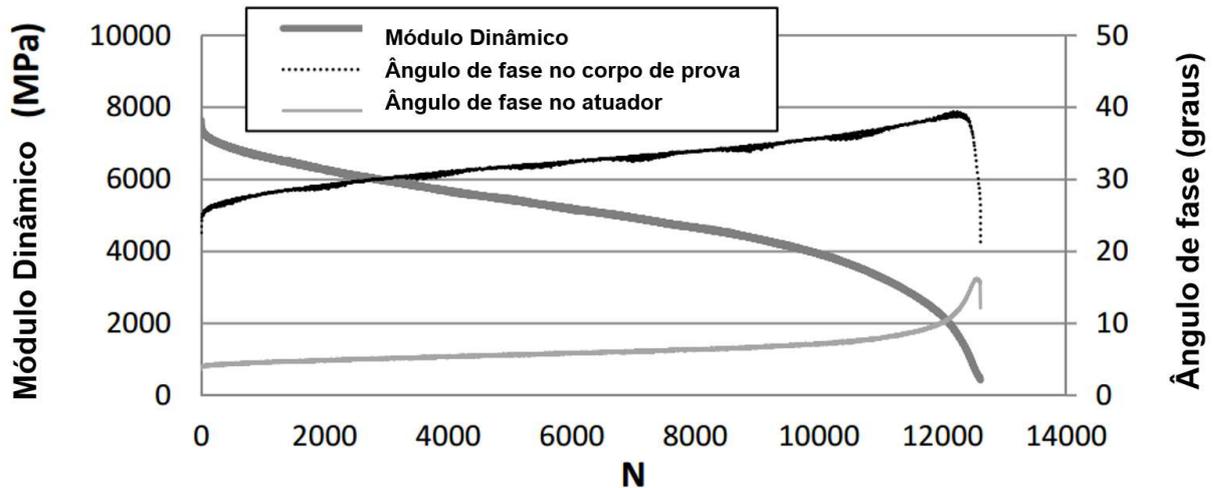
É de se imaginar, portanto, que tensões de direções e magnitudes variáveis durante a passagem do carregamento imponham diferentes parcelas de tração e compressão no histórico de carregamento do material em pontos distintos da análise. Além da posição do carregamento, sua velocidade e magnitude também podem influenciar nessas parcelas. Assim, percebe-se que a obtenção do β em simulações acrescenta muitas variáveis à problemática.

Com o intuito de simplificar a análise, opta-se por usar o valor de β constante em todos os pontos da seção do pavimento analisada. Utiliza-se, comumente, o valor de -0,08, como recomendado por Nascimento (2015), sob o argumento que se aproxima dos resultados de ensaios devido a leve compressão média que se costuma observar na pilotagem das prensas hidráulicas, lidas pelos LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*). Em ensaio de laboratório, tal observação é válida. Entretanto, na prática mostra-se de difícil obtenção um valor de β para cada ponto da malha de elementos finitos, dado que as deformações obtidas variam conforme o ciclo de carregamento. Haveria, portanto, a necessidade de se obter um valor de β para cada instante ao passo que a vida de fadiga é calculada, em tempo real de simulação, o que comprometeria o gasto computacional das análises.

3.8 Critério de Falha

Durante um ensaio laboratorial, a falha é determinada pela ocorrência do pico do ângulo de fase, podendo ser medido no corpo de prova ou no atuador pilotado no equipamento, como demonstrado na Figura 23 (Babadopulos *et al.*, 2015). O pico de ângulo de fase coincide com a queda brusca do $|E^*|$ do material, representando a incapacidade do material de resistir a solicitações.

Figura 23 – Evolução do $|E^*|$ e ângulo de fase durante o ensaio de Tração-compressão Direta com controle do atuador.



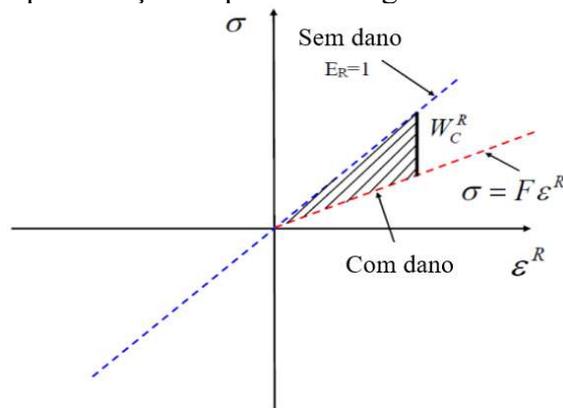
Fonte: Babadopulos *et al.* (2015).

O fenômeno apresentado é facilmente observado em ensaios. Entretanto, a simulação computacional não permite a obtenção da falha pelo ângulo de fase, cuja variação não é prevista nos modelos. É importante, portanto, que seja possível a obtenção do momento de falha no material para o cálculo da vida de fadiga por meio de outra variável.

Zhang *et al.* (2013) introduziram uma nova maneira de medida de pseudo-energia que descreve a taxa de dissipação do dano no material. Segundo Nascimento (2015), esta relação pode ser utilizada na modelagem S-VECD. Como demonstrado na Equação 22, W_C^R , que é a energia total de pseudo-deformação liberada, é representada pela área do triângulo formado entre a linha da pseudo-energia com e sem dano, conforme Figura 24.

$$(W_C^R)_i = \frac{1}{2} (1 - C^*)_i \cdot (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \quad (22)$$

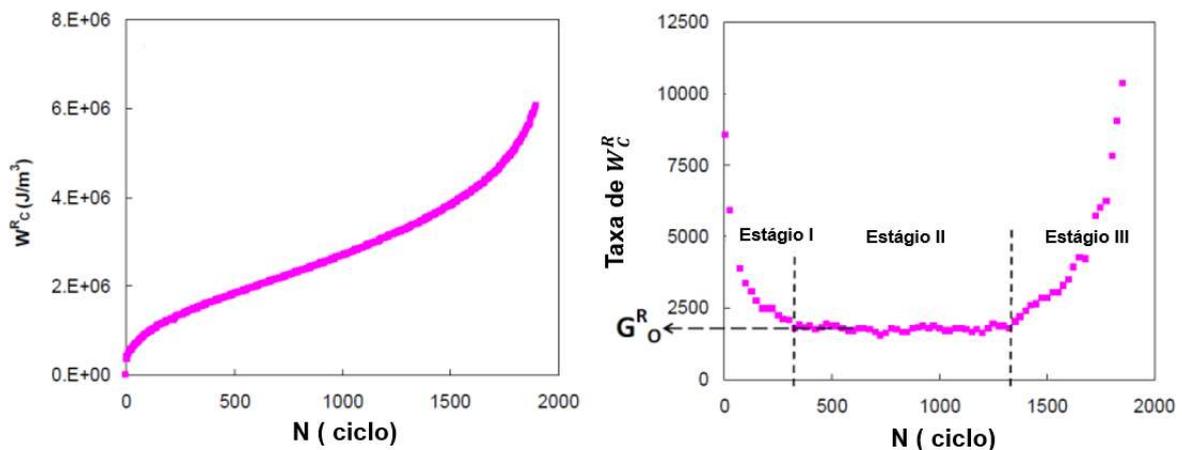
Figura 24 – Representação da pseudo-energia de deformação liberada.



Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Nascimento, 2015.

Zhang *et al.* (2013) avaliaram que a relação entre a variável W_C^R e o número de ciclos em ensaio de fadiga pode ser dividido em três estágios, como demonstrado na Figura 25. Segundo o autor, é observado que durante o estágio II, a taxa de liberação de pseudo-energia de deformação é constante por ciclo. Este estado constante na taxa, chamado de G_0^R , apresentou uma boa relação com o número de ciclos até a falha para várias misturas testadas em diferentes temperaturas.

Figura 25 – Relação de W_C^R por ciclo de carregamento em ensaio com controle de deslocamento do atuador, à esquerda, e taxa de W_C^R correspondente, à direita.



Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Zhang *et al.*, 2013.

Sabouri e Kim (2014) avaliaram a utilização de G_0^R para ensaios de fadiga de TD em três modos de carga: controle do deslocamento do atuador, controle de deformação no corpo de prova e tensão controlada. Observou-se que o parâmetro de G_0^R não se relacionava adequadamente com resultados de ensaios com o controle da deformação no corpo de prova. Portanto, concluíram que este parâmetro para critério de falha era dependente do modo de carregamento. Os referidos autores chegaram à conclusão de que o critério baseado na taxa de

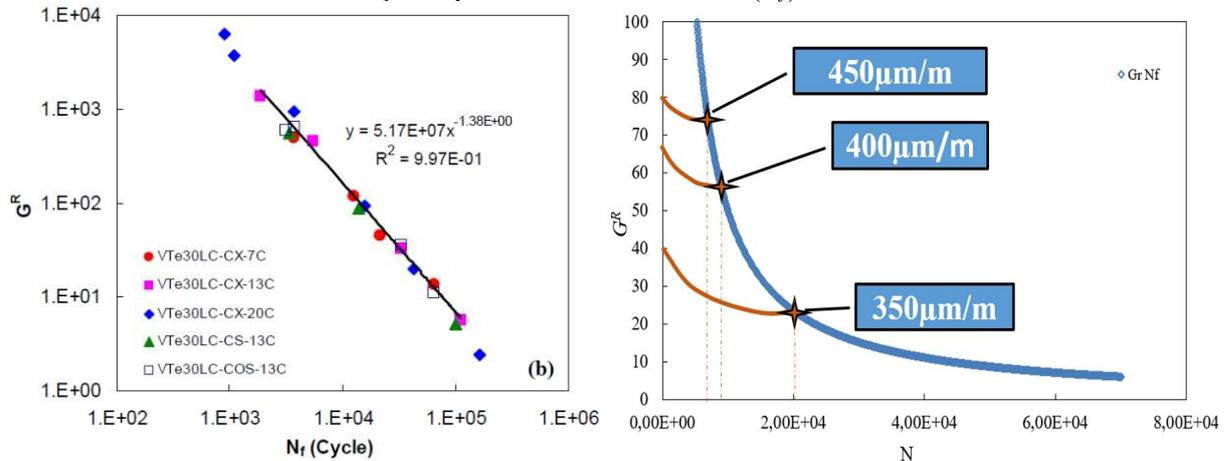
mudança média de pseudo-energia acumulada liberada (G^R), demonstrado na Equação 23, é a que melhor possibilita a observação da falha para qualquer tipo de carregamento.

$$G^R = \frac{\bar{W}_C^R}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R}{N_f^2} \quad (23)$$

Onde N_f é o número de ciclos até a falha em ensaio. O cálculo da W_C^R depende apenas da variável de pseudo-deformação (à luz do S-VECD, de igual valor à tensão viscoelástica linear) e da integridade (C), obtida pela divisão da amplitude de tensão em ensaio pela amplitude de pseudo-deformação. Tem-se um valor de G^R e N_f para cada ensaio realizado, portanto uma curva (G^R vs. N_f) utilizada como parâmetro de falha em simulação.

A Figura 26a demonstra $G^R(N_f)$ para diferentes modos de carregamento, evidenciando, novamente, uma relação fundamental do material. Esta curva fornece o maior valor da taxa média de pseudo-energia liberada por ciclo, sendo a envoltória formada pela plotagem dos valores de G^R para vários valores de N_f uma característica intrínseca do material, que permite a obtenção da falha em qualquer sollicitação. Para melhor ilustração, a Figura 26b também é apresentada. Nela é possível observar o comportamento de $G^R(N_f)$ em diferentes amplitudes de deformação, até que a relação atinja a envoltória definida como critério de falha. Assim, é possibilitado a obtenção da falha do material em simulação. A curva final G^R vs. N_f pode ser apresentada como na Equação 24, onde γ e Δ são parâmetros de ajustes aos resultados experimentais.

Figura 26 – (a) G^R vs. N_f em escala log-log para diferentes modos de carga. (b) obtenção da falha em simulação a partir de uma curva $G^R(N_f)$ definida em ensaio.



Fonte: (a) Sabouri e Kim (2014); (b) Elaborado pelo Autor.

$$G^R = \gamma N_f^A \quad (24)$$

A utilização dos parâmetros que advêm das análises dos resultados de ensaio de TD à luz do S-VECD, aliados ao critério de falha G^R vs. N_f , permitem, portanto, a obtenção da vida de fadiga do material para qualquer amplitude de deformações. Assim, em simulações para variados carregamentos e situações, é possível a obtenção do dano, traduzido em consumo dessa vida de fadiga estipulada para esse material. Com a obtenção do Dano Médio na seção do pavimento analisada e o procedimento de mais alguns passos mostrados adiante, considera-se possível a obtenção da %AT do pavimento previsto em campo para qualquer período de análise.

3.9 Obtenção do Dano Médio em Simulação

A definição de dano diverge dependendo do material, das premissas, entre outros aspectos. Para Kim (2009), dano é a perda de resistência de um material provocado por algum mecanismo de falha. Para Shah *et al.* (1995), a mecânica do dano é dirigida para a obtenção de índices que descrevem a redução da capacidade funcional de estruturas, em termos da redução de rigidez, como demonstrado na Equação 25.

$$E_{dan} = E_{orig}(1 - D) \quad (25)$$

Onde: E_{dan} é a rigidez do material danificado, E_{orig} é a rigidez do material original (não danificado), D é o dano conforme definido classicamente (entre 0 e 1, onde $D = 0$ significa não danificado e $D = 1$ significa totalmente danificado, Lemaitre, 1996). Conforme observado por Babadopulos (2014), a variável clássica de dano D se relaciona com a variável conhecida como “integridade” C (Equação 16) de maneira que somadas valem 1. Essas variáveis de dano (tanto o dano clássico D , quanto a integridade (C) são acessadas através de ensaios, relacionando-se com a variação de rigidez ao longo do tempo. Poderiam teoricamente ser utilizadas para atualizar o valor de rigidez em cada ponto na estrutura ao longo das simulações. Porém, isso raramente é utilizado.

Segundo a Lei de Miner (1945), para evolução do dano acumulado por fadiga em materiais metálicos utilizados em aviões, a ruptura por fadiga ocorre quando o valor da Equação 26 é igual a 1.

$$\sum_{i=1}^T D_{i(acumulado)} = N_i / N_{fi} = 1 \quad (26)$$

Onde T é o número total de períodos analisados, D_i o dano acumulado no período “i” de análise, N_i é o número de solicitações de carga impostas em análises e N_{fi} o número de solicitações até a ruptura do material (vida de fadiga advinda de ensaios laboratoriais).

A obtenção do dano em simulação por meio de uma análise estrutural baseada no MEF, portanto, depende de dois fatores fundamentais: (i) ensaio de fadiga para determinação do número máximo de repetições para dada amplitude de deformação do material asfáltico (N_f); e (ii) realização de análise estrutural para determinação da amplitude de deformação em cada ponto de uma malha e, por conseguinte, contabilizar as solicitações em cada instante de passagem da carga para incremento do dano D_i .

A determinação do parâmetro de vida de fadiga (N_f) pode obedecer diferentes critérios. Inicialmente, os modelos de obtenção de N_f costumavam levar em consideração apenas parâmetros de deformação de tração, como apresentado por Verstraeten *et al.* (1982). Outros métodos utilizam variáveis dos materiais além de respostas de deformação de tração para determinação do desempenho de fadiga, conforme a relação apresentada na Equação 27.

$$N_f = C' k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3} \quad (27)$$

Onde N é o número de eixos padrões até a falha por fadiga, C' é fator de correção, k_1 , k_2 e k_3 coeficientes de ajuste, E é o módulo de rigidez da mistura asfáltica em temperatura intermediária e ε_t a deformação de tração no fundo do revestimento asfáltico.

Os parâmetros de ajuste podem ser obtidos a partir de uma vasta gama de métodos de ensaio, mas os mais comuns no meio prático são os indicados na literatura pela *Shell Oil* e o *Asphalt Institute*, conforme apresentado na Tabela 1. A rigor, esses parâmetros deveriam ser obtidos através de ensaios laboratoriais, como qualquer outra propriedade dos materiais.

Tabela 1 – Parâmetros de ajuste para modelos de previsão de fadiga.

Referência	k_1	k_2	k_3
Asphalt Institute	$7,96 \cdot 10^{-2}$	3,291	0,854
Shell Oil	1,0	5,0	1,4

Fonte: Bessa (2017).

A utilização de ensaios com modo de carga unidirecional de tração e compressão, como o ensaio uniaxial de Tração-compressão Direta, permite a utilização de premissas viscoelásticas para obtenção da vida de fadiga. A associação de parâmetros da modelagem do dano contínuo em regime viscoelástico (S-VECD) permite a utilização da Equação 28, apresentada por Nascimento (2015). Esta Equação está implementada no CAP3D-D em sua versão de maio de 2020, com algumas atualizações implementadas no presente trabalho de mestrado. As alterações foram necessárias após comparações entre resultados em planilha, com o cálculo analítico de resultados, e resultados diretos da rotina do programa.

$$N_f = \left(\frac{\delta}{\gamma \left(\frac{C_{12}}{p} + 1 \right)} \right)^{\frac{1}{\Delta+1-\frac{C_{12}}{p}}} \quad (28)$$

Onde:

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon_{TA}^R)^2 C_{11} \left(\frac{p(C_{11}C_{12})^\alpha (\varepsilon_{TA}^R)^{2\alpha} k_1}{f_R 2^\alpha} \right)^{\frac{C_{12}}{p}}$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1$$

$$G^R = \gamma(N_f)^\Delta - \text{Critério de falha};$$

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} - \text{Curva característica de dano};$$

ε_{TA}^R é a amplitude de pseudo-deformação de tração, dado por $\varepsilon_{TA}^R = \frac{1}{E_R} \frac{\beta+1}{2} ((\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE})$, em que E_R é o módulo de referência, adotado como 1,0 para situações em que há o regime viscoelástico-linear estabelecido, ou seja, pequenas amplitudes de deformações (menores que 90 *micro-strains*); $\varepsilon_{0,pp}$ é a amplitude de deformação pico a pico; e $|E^*|_{LVE}$ é o Módulo Dinâmico viscoelástico linear nas condições de temperatura e frequência em ensaio, advindo do *finger-print* do ensaio de TD.

α = taxa de evolução do dano;

k_1 = fator de forma do pulso de carga;

f_R = frequência reduzida;

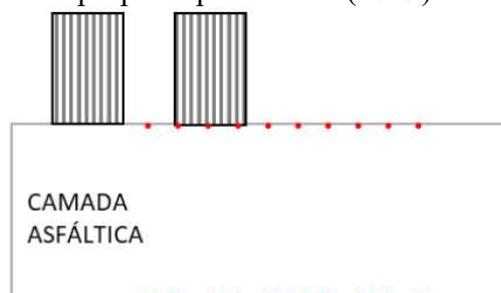
N_f = número de ciclos até a falha;

β = parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração (valor usual adotado de -0,08);

Assim, a ocorrência da fadiga se dá por acúmulo de dano quantificável do ponto de vista matemático. As análises computacionais englobam essa perspectiva e utilizam o que é chamado de “consumo de vida de fadiga” para a determinação do dano em um dado ponto da seção analisada. Entende-se por seção analisada o conjunto dos pontos de interesse para análises de tensões e deformações sob o carregamento. A malha utilizada para análise é uma decisão arbitrária e pode ser devidamente implementada no *software* a ser empregado.

Fritzen (2019) comenta sobre atualizações nos modelos de previsão de fadiga para o *software* MeDiNa (DNIT, 2018). A malha analisada na atualização proposta consiste em 20 pontos, 10 na superfície e 10 na fibra inferior do revestimento asfáltico, como ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Malha de 20 pontos utilizada em análise para a nova Função de Transferência proposta por Fritzen (2019).

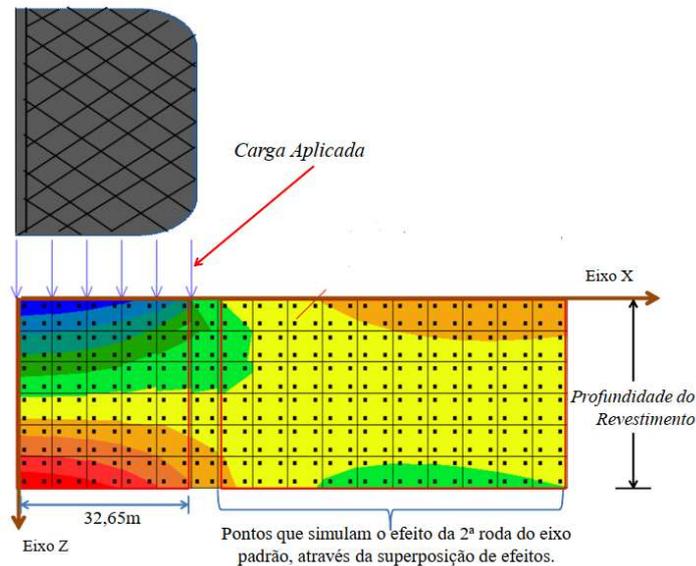


Fonte: Fritzen (2019).

3.10 CAP3D-D

A malha utilizada no *software* CAP3D-D, consiste em 240 pontos de Gauss distribuídos, contidos em 60 elementos, sendo 30 logo a baixo da carga, conforme proposição de Santiago (2017), indicado na Figura 28. O programa tem como base a análise estrutural advinda do Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo capaz de tratar modelos planos, axissimétricos e tridimensionais, permitindo também a utilização de elementos de diferentes formas e ordens de interpolação, a depender do que for definido pelo desenvolvedor. Atualmente, em sua versão v2.1. de 2020, utiliza-se o eixo axissimétrico para análise. Apesar da axissimetria assumida, a roda dupla é considerada por meio da superposição de efeitos, pois se trata de um modelo linear (Santiago *et al.*, 2018)

Figura 28 – Malha para obtenção da média de dano nos pontos analisados no programa CAP3D-D.

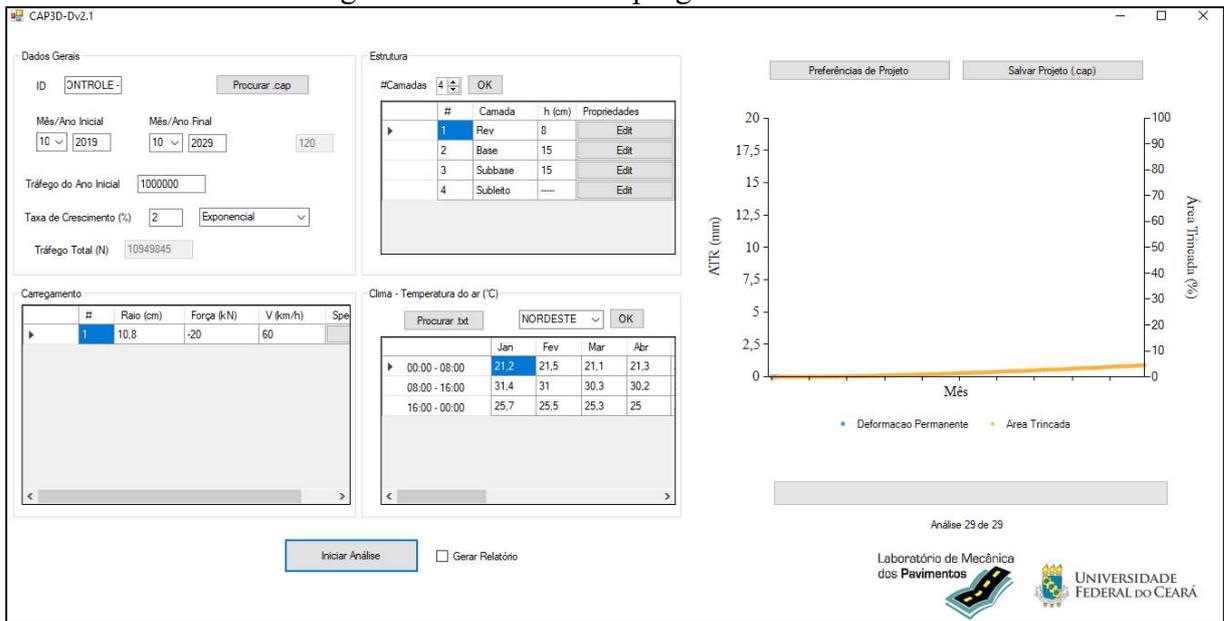


Fonte: Santiago (2018).

O CAP3D-D faz uso de análises elástico-lineares para obtenção das tensões, deformações e deslocamentos. Entretanto, o programa é capaz de simular análises elástico-lineares a partir de respostas de módulos obtidos por meio da curva mestra do $|E^*|$. Este tipo de análise comprovou apresentar menor custo computacional, além de relativa alta precisão quando comparado ao método de análise viscoelástico-linear (Silva *et al.*, 2013), tendo sido adotado no CAP3D-D. Para as camadas granulares, faz-se o uso de um módulo constante (MR), haja visto o comportamento elástico-linear dessas camadas. No subleito, é considerada uma dimensão semi-infinita. Uma tela da interface atual do programa é demonstrada na Figura 29.

O programa também permite que o usuário insira valores de MR para rigidez da camada asfáltica e CD para caracterização à fadiga. Nesse caso, o sistema realiza o cálculo do Dano Médio, mas a Função de Transferência, explicada em detalhe na próxima seção, é calibrada apenas para entradas de $|E^*|$ e ensaios de fadiga de TD. Em outras palavras, a FT existente no programa é calibrada apenas para *inputs* no sistema de caracterização $|E^*|$ e TD, fornecendo resultados de %AT previstos apenas nesses casos.

Figura 29 – Interface do programa CAP3D-D.



Fonte: INCT (2020).

O CAP3D-D é capaz de levar em consideração os efeitos da temperatura em análises por meio de algumas equações. A primeira é referente à obtenção da temperatura na superfície do revestimento (T_{sup}) a partir da temperatura do ar (T_{ar}), demonstrado na Equação 29 (Baker *et al.*, 1977).

$$T_{sup} = 1,2T_{ar} + 3,2 \quad (29)$$

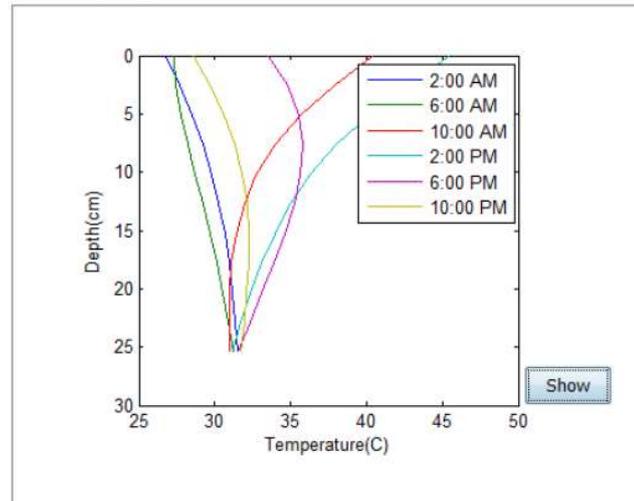
A segunda equação é a determinação da temperatura em uma dada profundidade “x” no revestimento a partir da equação empírica de Motta (1991), baseada na Pesquisa de Avaliação Estrutural de Pavimentos (PAEP) do IPR/DNER, conforme a Equação 30.

$$T(x) = T_{sup} + (T_{sup} - T_{ar})(1 - e^{(0,06855 - 0,002633x)x}) \quad (30)$$

Onde $T(x)$ é a temperatura a uma profundidade “x” no revestimento.

O já referido programa FlexPave também incorpora parâmetros de temperatura a partir de um gradiente em análises por meio da utilização do *Enhanced Integrated Climate Model* (EICM) (Eslaminia *et al.*, 2012). Um exemplo de gradiente de temperatura para o clima típico da cidade de Miami, FL, nos Estados Unidos, está exposto na Figura 30.

Figura 30 – Exemplo de variação de temperatura com a profundidade do pavimento utilizado no programa LVECD com base no EICM.



Fonte: LVECD versão 1.0.

A velocidade de tráfego, por sua vez, interfere em análises por meio da aplicação da Equação 31, que converte a velocidade em tempo de carregamento (Brown, 1973). A frequência é considerada o inverso do tempo obtido.

$$\log t = 0,5y - 0,2 - 0,94 \log v \quad (31)$$

Onde “y” é a profundidade, em m, no pavimento, e “v” a velocidade, em km/h. Para exemplificar, em uma velocidade de 20 km/h, nesta Equação, uma frequência de 25Hz é encontrada para uma profundidade de 4 cm no revestimento, ao passo que uma velocidade de 80 km/h, a frequência de 93 Hz é encontrada na mesma profundidade.

Com a possibilidade de incorporação dos parâmetros de velocidade e temperatura é possível a associação a frequências reduzidas à luz de ensaios de $|E^*|$, e conseqüentemente a incorporação de parâmetros viscoelásticos valiosos para simulações da natureza do material asfáltico.

3.11 Funções de Transferência

Conforme já mencionado, o caráter mecanístico de um método de dimensionamento consiste na inclusão da análise estrutural, que envolve o cálculo de parâmetros como tensões e deformações, e a quantificação de defeitos associados a esses parâmetros. No caso da fadiga, o parâmetro associado ao trincamento em campo é, nos casos do MeDiNa (DNIT, 2018), CAP3D-D (Holanda *et al.*, 2006; Santiago *et al.*, 2018) e LVECD (Eslaminia *et al.*, 2012), o Dano Médio Acumulado, chamado daqui em diante de D_{acm} por simplificação. O termo acumulado se deve

ao fato de o parâmetro ser acrescido do seu valor anterior durante o histórico de solicitações. Assim, mesmo que cada passagem apresente um valor específico de dano, como em uma fotografia tirada em um instante da análise, ou mesmo o valor para um mês inteiro da análise, o seu acúmulo ao longo do tempo é o que efetivamente será associado à ocorrência de defeitos em campo. A Tabela 2 apresenta a comparação entre resultados hipotéticos de Dano Médio e D_{acm} para uma passagem de tráfego N , em termos de eixo padrão, em 6 meses de análise.

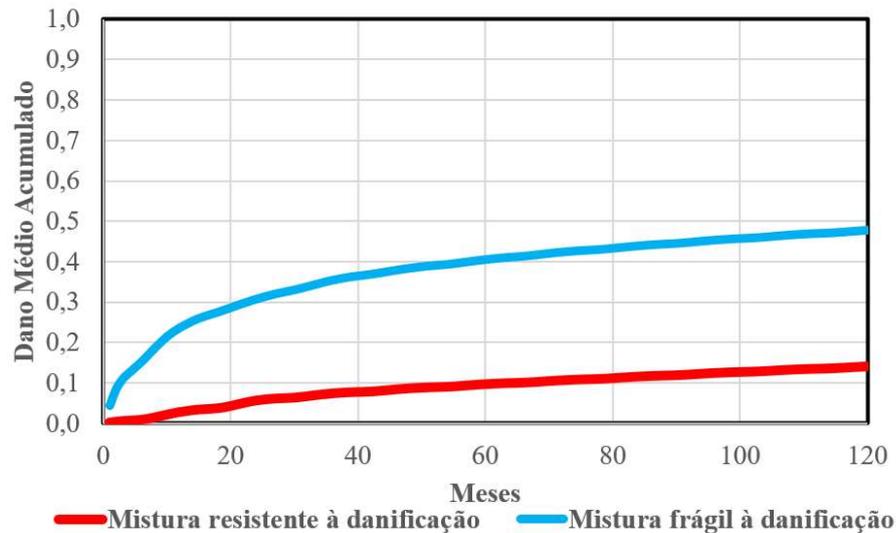
Tabela 2 – Valores hipotéticos de dano médio e dano médio acumulado em comparação.

Mês	N	Dano Médio	N acumulado	Dano Médio Acumulado
1	82450	0,000012	82450	0,000012
2	82450	0,000012	164900	0,000024
3	82450	0,000012	247350	0,000036
4	82450	0,000012	329800	0,000048
5	82450	0,000012	412250	0,000060
6	82450	0,000012	494700	0,000072

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A sensibilidade quanto aos valores absolutos de D_{acm} , com o objetivo de incorporar um julgamento quanto a capacidade de uma estrutura suportar a ocorrência de defeitos associados a fadiga, é de difícil obtenção. Em outras palavras, é difícil dizer, apenas pelo resultado do valor de dano, o quanto aquela mistura apresentará sensibilidade ao trincamento. Este, na verdade, é um grande desafio do método atual, que visa associar um parâmetro volumétrico de dano de análise mecanicista a um parâmetro de superfície (%AT) por meio de equações empíricas. Como será visto adiante nesta seção, tudo vai depender da FT calibrada. Assim, um resultado de D_{acm} de 0,6 pode proporcionar %AT de 20% para uma FT, ao passo que pode apresentar 60% em outra FT, calibrada com outra base de dados, ou até com um sistema de ensaios de caracterização distinto. Entretanto, uma realidade pode ser observada assumindo que o dano está diretamente associado com o surgimento de trincas: maiores valores de D_{acm} devem proporcionar maiores valores de trincamento. Para passar esta percepção ao leitor, a Figura 31 apresenta os resultados hipotéticos de duas estruturas com suscetibilidades distintas à danificação.

Figura 31 – Comparação entre resultados hipotéticos de D_{acm} em estruturas diferentes.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os valores obtidos, como mencionado anteriormente, dependem dos *inputs* de tráfego, estrutura (rigidez e espessura das camadas) e do clima, caso esta variável seja incorporada no sistema utilizado. Esta etapa, portanto, finaliza aquilo concebido a partir dos fundamentos da Mecânica dos Pavimentos (Huang, 2003; Kim *et al.*, 2009; Nascimento, 2015).

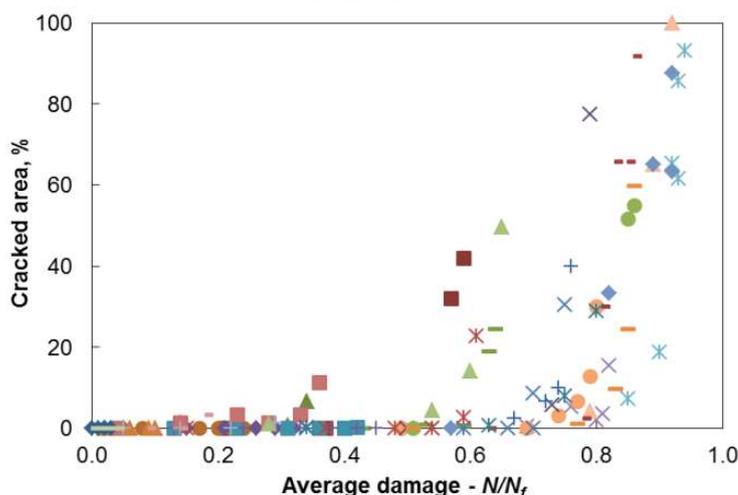
O caráter empírico de um sistema de dimensionamento mecanístico-empírico, por sua vez, está no uso da modelagem dos resultados de laboratório (normalmente de uma propriedade distribuída no volume do material) de forma a que se obtenha dados de campo (normalmente de uma observação de defeito detectável na superfície em campo). Isso é feito através de uma equação capaz de relacionar empiricamente o surgimento e propagação de defeitos em campo a partir do acúmulo de alguma variável mecanística simulada em laboratório. Deve ser entendido que o parâmetro de Dano Médio é obtido em caráter volumétrico na espessura do revestimento, enquanto o parâmetro escolhido para associação com defeitos em campo, a Área Trincada (%AT), é obtido em caráter superficial no pavimento, portanto, em duas dimensões. São variáveis de natureza diferente. Relaciona-las representa um grande passo na modelagem, dado que a associação deixa de ser mecanicista e passa a englobar parâmetros empíricos, conforme explicado a seguir.

Fritzen (2016) se refere à Função de Transferência, nome dado em literatura à equação de previsão de área trincada em campo (NCHRP, 2004), como Função Campo-Laboratório. Este tipo de função já vem sendo estudada há um longo tempo no Brasil por autores como Pinto (1991), Motta (1991) e Franco (2000). Portanto, trata-se de uma função capaz de

ter como *inputs* resultados de laboratório e ter como um *output* parâmetros de campo em termos de %AT.

Segundo Nascimento (2015), o Dano Médio plotado versus a área trincada (%AT) apresenta grande dispersão, dada a variabilidade das características dos materiais e estruturas monitoradas no âmbito do Projeto Fundão. A relação é apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Relação entre o Dano Médio e a Área Trincada para as misturas do Projeto Fundão.

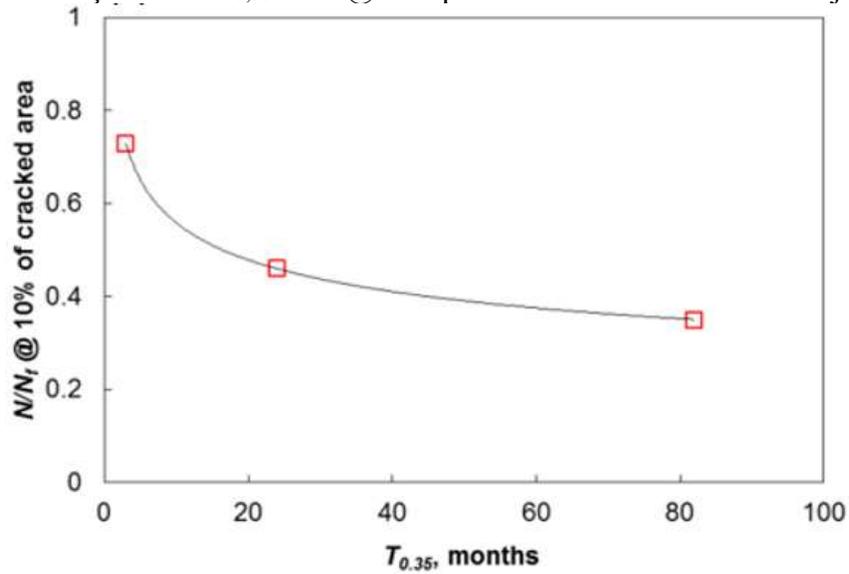


Fonte: Nascimento (2015).

Para a obtenção de uma relação única entre o parâmetro de laboratório (Dano Médio) e o de campo (%AT), mostra-se necessário, portanto, um ajuste da relação dispersa apresentada na Figura 32. A proposta analisada por Nascimento (2015) foi definir um valor de referência de Dano Médio e fazer com que as demais curvas fossem transladadas para o valor de referência definido, criando uma relação única entre a %AT e o dano transladado.

Dentre as possibilidades de criação de um valor de referência, foi adotado pelo referido autor a observância de uma relação entre o início da área trincada em campo, definido como AT@10%, e um aumento na taxa de crescimento do Dano Médio no momento em que a %AT atingisse o início de trincamento definido. Testes com diferentes valores de Dano Médio foram realizados para que se chegasse ao valor de 0,35 (D@0,35) como o mês em que as misturas tendem a apresentar a AT@10%. Como objetiva-se apresentar uma relação final de %AT com o mês, ou seja, uma variável “x” no domínio do tempo, optou-se por utilizar o mês em que o D@0,35 ocorresse, denominado de $T_{0,35}$.

Figura 33 – Relação entre $T_{0,35}$ e $AT@10\%$ para os estudos iniciais do Projeto Fundão.

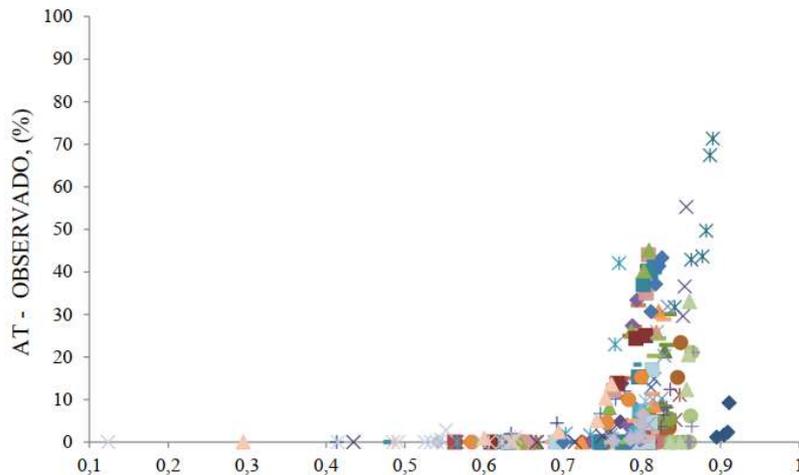


Fonte: Nascimento (2015).

Fritzen (2016) utilizou ensaios de CD para determinação da vida de fadiga de materiais da RTA para calibração de uma função de transladação do Dano Médio. O referido autor arbitrou a associação entre $AT@10\%$ e o mês em que o dano alcança 0,80 ($D@0,80$), diferentemente do que foi utilizado por Nascimento (2015), dado que o sistema de caracterização dos materiais asfálticos, no caso de Fritzen (2016), utiliza CD e MR. Uma das explicações para o maior valor de dano encontrado neste trabalho pode estar nos menores valores de vida de fadiga usualmente demonstrado em ensaios de CD (Medina e Motta, 2015).

Ao parâmetro utilizado para a transladação horizontal da curva de %AT por Dano Médio dá-se o nome de *shift factor*. A variável obtida após a transformação do Dano Médio é denominada de Dano Médio Reduzido (*Dred*). A Figura 34 apresenta a relação entre o *Dred* e a %AT. Percebe-se a grande diferença após o ajuste, em comparação com a Figura 32. Nos próximos parágrafos será descrito, em mais detalhe, o processo de obtenção dos valores de *Dred*.

Figura 34 – Relação entre o Dano Médio e a %AT obtida por Fritzen (2016).



Fonte: Fritzen (2016).

A metodologia aqui descrita é resultante da tese de doutorado de Nascimento (2015), também avaliadas por Fritzen (2016) e Santiago (2017). Destaca-se que estudos mais recentes, como em Fritzen *et al.* (2019) e Santos (2020), outros métodos também vêm sendo estudados. A utilização de uma variável para transformar o Dano Médio em um parâmetro que se ajuste melhor aos resultados de %AT observados em campo mostra-se, portanto, parte ainda persistente de pesquisa direcionada à modelagem.

A transformação apresentada por Nascimento (2015) pode ser feita, basicamente, a partir de duas abordagens: (i) a utilização de um parâmetro que seja acrescido ao resultado de Dano Médio, sendo, portanto, esse resultado de uma soma (Equação 32); o parâmetro referenciado em literatura é denominado Δ (*delta*), e sua obtenção se dá através de uma função que tem como entrada uma variável advinda da calibração dos dados, a ser descrita mais adiante; e (ii) a utilização de parâmetro para obtenção de um produto (Equação 33) entre a resposta de Dano Médio (Função S). Ambas as abordagens foram avaliadas por Nascimento (2015), Fritzen (2016) e Santiago (2017).

$$Dred_{\Delta} = Dmédiao_{ac} + \Delta \quad (32)$$

$$Dred_S = Dmédiao_{ac} \cdot S \quad (33)$$

Fritzen (2016) explica a metodologia de obtenção das funções Δ e S. De acordo com o autor, a utilização da função Δ na pesquisa em questão mostrou pouca aderência aos resultados de campo e foi descartada para utilização no processo de calibração de uma Função de Transferência, seguindo o que foi sugerido por Nascimento (2015). Para calibração da

Função S (Dano Reduzido em função de S), Fritzen (2016) optou-se pela equação do primeiro grau com coeficientes descritos na Equação 34.

$$S = 0,8756(T_{0,35}) + 0,0307 \quad (34)$$

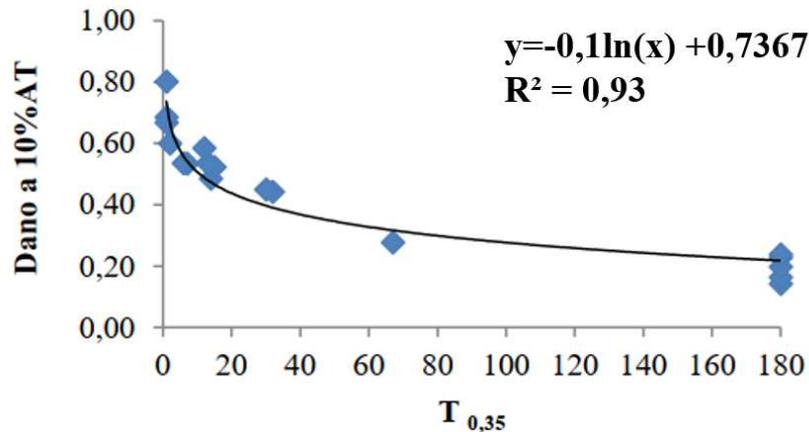
Onde $T_{0,35}$ representa o mês, para um trecho monitorado dentro do processo de calibração, em que o Dano Médio alcançou o valor de 0,35. O Dano Médio de 0,35 foi escolhido por Nascimento (2015) para os trechos analisados dentro do Projeto Fundão por representar o valor de dano em que a %AT aproxima-se de 10%, considerado pelo referido autor como o momento em que o dano começa a influir significativamente no surgimento de trincas, nomeado de “dano inicial”. O autor considera uma relação linear entre o parâmetro $T_{0,35}$ e S , como demonstrado na Equação 35.

$$S = 0,008274(T_{0,35}) + 0,635237 \quad (35)$$

A explicação para este fenômeno pode estar associada à redistribuição de tensões após a danificação inicial, que faz com que o dano aumente aceleradamente a partir desse momento. A metodologia apresentada por Nascimento (2015) foi a mesma adotada por Fritzen (2016) para a calibração da Função de Transferência que atualmente encontra-se em fase de testes no MeDiNa.

O processo descrito por Nascimento (2015) e adaptado por Fritzen (2016) para os demais trechos compreendidos na RTA da Petrobras foi também adotado por Santiago (2017). Esta autora utilizou mais análises para contemplar a proposição de outros meses como dano inicial, como $T_{0,25}$ e $T_{0,45}$, além do próprio $T_{0,35}$ sugerido por Nascimento (2015). O estudo concluiu que o mês do dano de 0,35 como correspondente ao dano a %AT = 10% foi o que apresentou a melhor aderência entre as funções calibradas para o *shift fator*. A Figura 35 apresenta a relação com o índice de correlação, R^2 .

Figura 35 – Relação entre $T_{0,35}$ e o valor de Dano correspondente a %AT de 10.



Fonte: Santiago (2017).

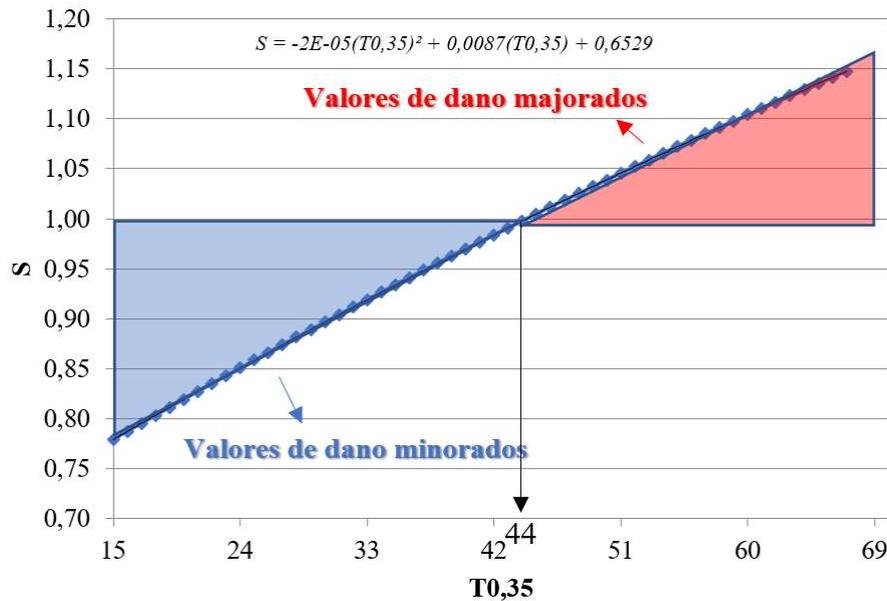
Na Figura 35 também é possível observar que a partir de um certo momento, o crescimento de $T_{0,35}$ passa a influenciar pouco nos resultados de dano a AT de 10%. Santiago (2017) afirmou que o valor de 67 meses era, portanto, o limite para $T_{0,35}$ com base na ausência de interferência de valores maiores deste parâmetro. Nascimento (2015) observou, semelhantemente, o número 80 em suas análises. Assim, a Função S para obtenção do Dano Médio reduzido no programa CAP3D-D seguiu os mesmos fundamentos apresentados por Nascimento (2015) e Fritzen (2016). A Função S proposta por Santiago (2017) apresenta os coeficientes calibrados e validados conforme Equação 36, com $T_{0,35}$ limitado a 67.

$$S = -2 \cdot 10^{-05} (T_{0,35})^2 + 0,0087 (T_{0,35}) + 0,6529 \quad (36)$$

Apesar de ser uma equação do segundo grau, observa-se que a pequena taxa de variação (primeira derivada) em relação ao valor de $T_{0,35}$ remete a um comportamento praticamente linear, como nas equações obtidas por Nascimento (2015) e Fritzen (2016).

A utilização do D_{red} tem consequência de, resumidamente, diminuir valores de Dano Médio em situações que o pavimento se danifique rapidamente, já nos primeiros meses, e em aumentar os valores de Dano Médio em situações que o pavimento demore a se danificar. Na prática, o resultado é que misturas muito resistentes terão $D_{red} > D_{med}$ ao passo que misturas pouco resistentes terão o $D_{red} < D_{med}$. A Figura 36 demonstra os valores de $T_{0,35}$ em função dos valores de S, que majorarão ou minorarão os resultados de Dano Médio, resultando no Dano Médio Reduzido.

Figura 36 – Função S calibrada por Santiago (2017).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O Dano Médio reduzido é, então, confrontado com observações de área trincada em trechos situados em rodovias reais, de maneira a se obter uma equação empírica chamada de função de correspondência campo-laboratório, ou Função de Transferência. A equação é ajustada com seus parâmetros de calibração C_1 e C_2 , como apresentado na Equação 37.

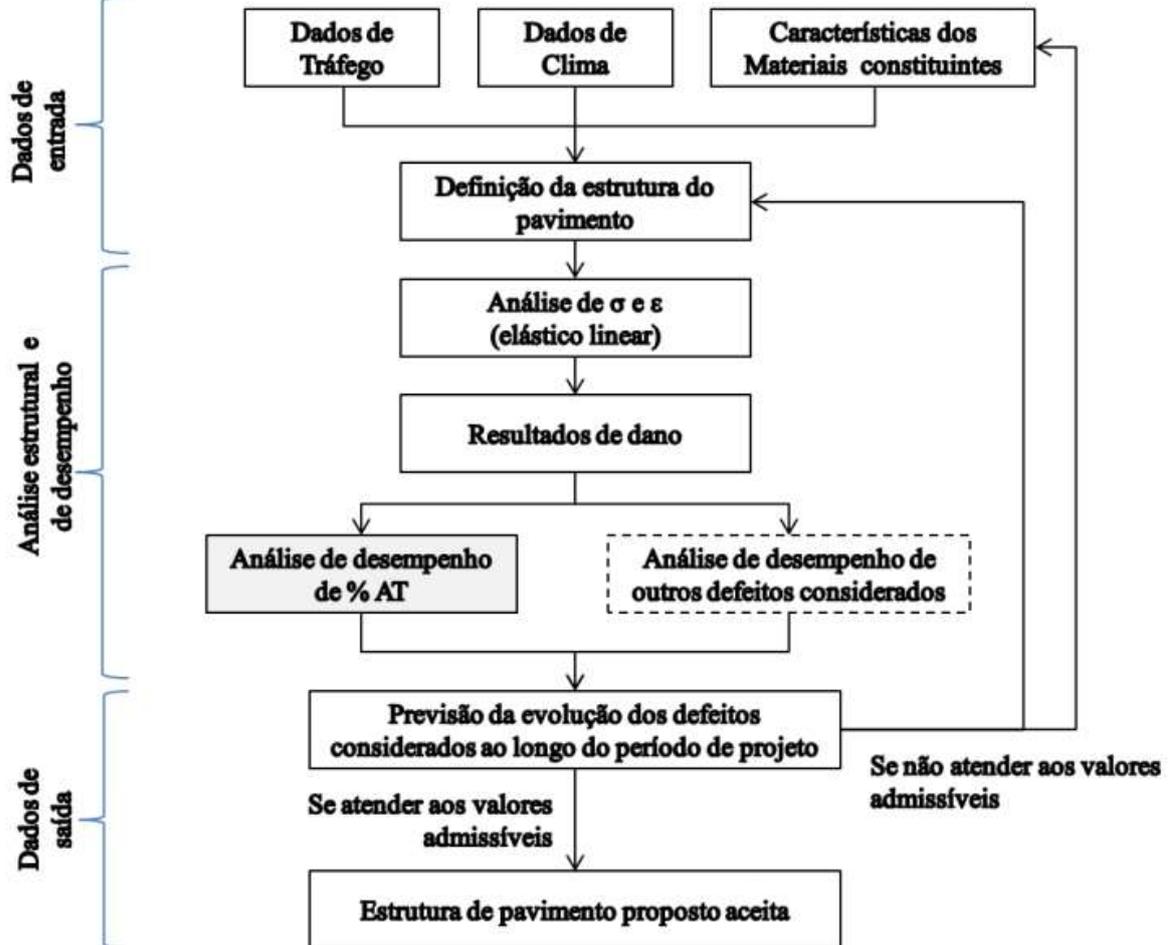
$$\%AT = C_1 \left(\frac{N}{N_f} red_s \right)^{C_2} \quad (37)$$

A elaboração de uma função que relacione dados de laboratório com o campo foi possível no Brasil graças à RTA capitaneada pela Petrobras, que conglomerou diversos centros de pesquisa nacionais e trechos monitorados, abastecendo uma base de dados responsável por calibrar e validar as funções testadas para o MeDiNa e também para outros sistemas de dimensionamento como o CAP3D-D.

A obtenção de um dimensionamento de pavimento asfáltico é realizada a partir de processo semelhante, como no programa *DARWin-ME* do método americano de dimensionamento mecanístico-empírico (MEPDG). Há a interação contínua entre projetista e programa para que seja atingido uma espessura ideal de camadas de acordo com a resposta de previsão de defeitos. Em outras palavras, o usuário insere os dados para que sejam realizadas análises estruturais e obtidas respostas de tensão, deformação e deslocamento. Tais entradas geram uma resposta de dano e, a partir de uma FT, obtém-se %AT. A partir da previsão, o projetista deve avaliar se os mesmos estão satisfatórios. Não sendo satisfatórios, a estrutura deve ser alterada, nas espessuras das camadas ou nas características dos materiais. Assim, feito

o dimensionamento. A Figura 37 demonstra o fluxograma da lógica do dimensionamento, desde os dados de entrada à obtenção dos resultados e análises do projetista.

Figura 37 – Lógica do sistema de dimensionamento proposta no CAP3D-D.



Fonte: Santiago (2017).

As premissas do método hoje em consideração pela DNIT não incorporam influências de temperatura e velocidade do tráfego na análise estrutural. Levanta-se, então, o questionamento quanto à real necessidade de tais variáveis no cálculo de uma FT. Há disponíveis *softwares* que já levam em consideração tais variáveis, como o LVECD (Eslaminia *et al.*, 2012) da *North Carolina State University* (NCSU), atualmente conhecido como FlexPave, em nível de análise viscoelástica e o CAP3D-D da Universidade Federal do Ceará (UFC) em nível de análise elástico-linear equivalente, que simula o efeito do caráter viscoelástico do material asfáltico no comportamento do pavimento (Santiago *et al.*, 2018).

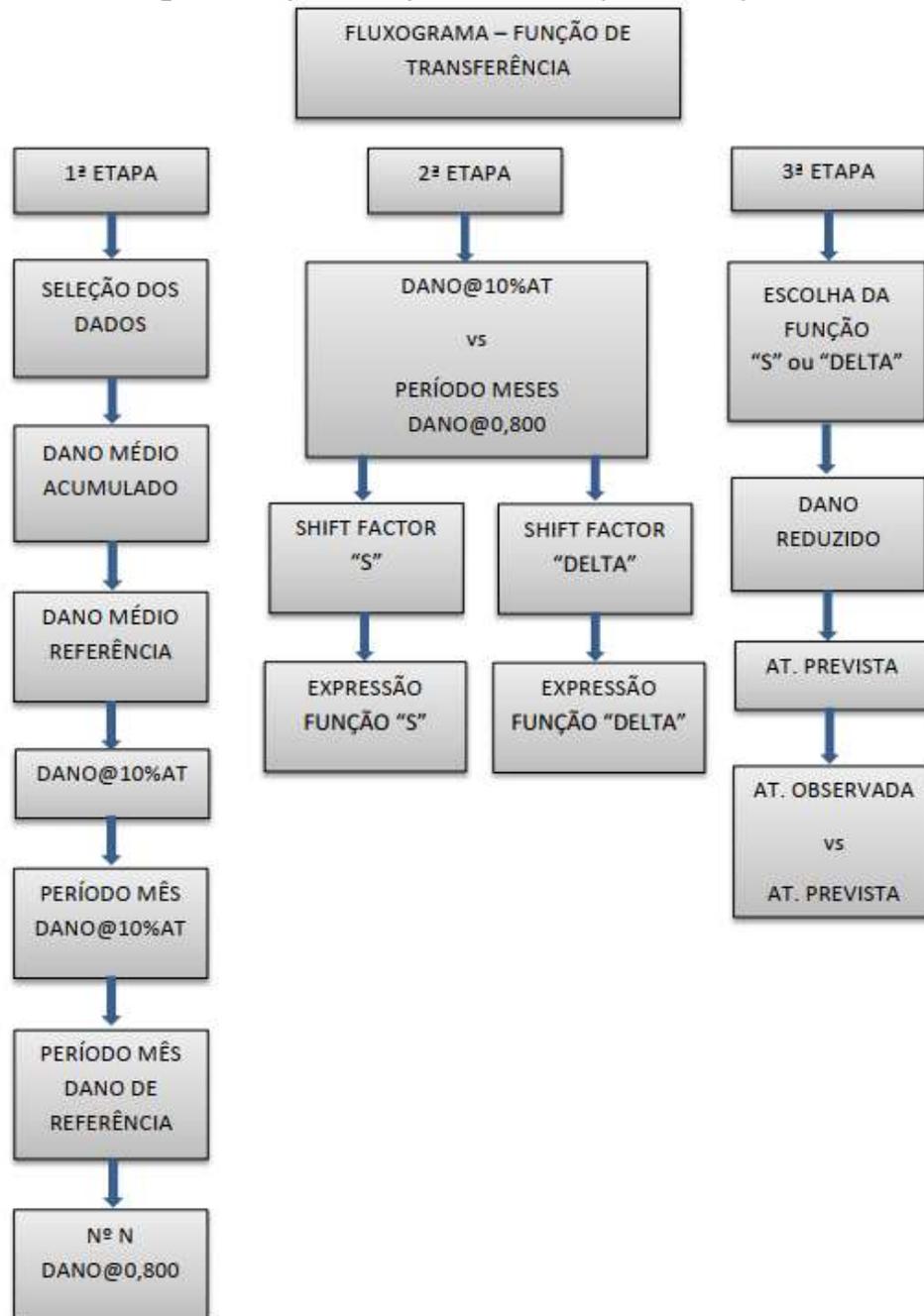
Em relação ao novo método apoiado pelo DNIT, a FT inicialmente calibrada para a fase de testes do MeDiNa (DNIT, 2018) surgiu do Projeto Fundação, contando com diversos ensaios e o monitoramento de 113 segmentos espalhados por 12km de malha na Cidade

Universitária (UFRJ) de vias restauradas entre 2006 e 2009. O acompanhamento deu-se até o ano de 2015. O controle continha contagem de tráfego, ensaios em usinas e em campo, sondagens, acompanhamento da evolução de defeitos e diversas técnicas construtivas de restauração, além de 6 tipos de misturas diferentes, ou seja, um ambiente de controle com contornos bem definidos.

O processo consistiu em utilizar uma variável que conecta análises mecánísticas (análises estruturais) à ocorrência de defeitos em campo. Como adotado por Nascimento (2015), o conceito de *Dred* como parâmetro de “ligação” com a %AT foi utilizado. Assim, no caso do MeDiNa, o conceito foi coletar dados de %AT em campo e confrontá-los com dados de *Dred* advindos de análises estruturais e parâmetros de fadiga de ensaios de Compressão Diametral realizados nas misturas asfálticas correspondentes aos trechos dos quais os dados de campo foram obtidos. O processo detalhado está descrito nos trabalhos de Fritzen (2016) e é demonstrado simplificadamente na Figura 38.

A FT calibrada mostrou-se sensível a pequenas variações na espessura do revestimento asfáltico (Fritzen *et al.*, 2019). Segundo os autores, a principal causa deveu-se ao fato de o dano ser limitado a 1 e a curva de vida de fadiga do ensaio de Compressão Diametral ser muito severa, o que proporcionou uma proposta de atualização.

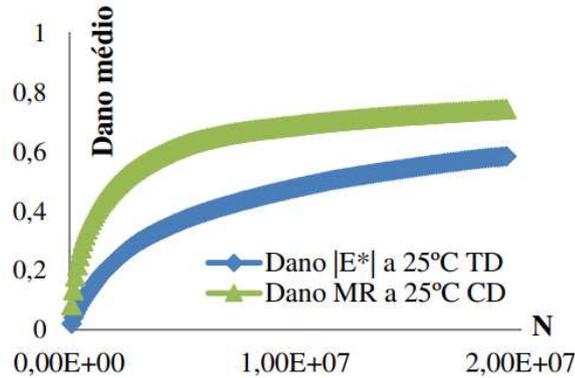
Figura 38 – Fluxograma do processo para determinação da Função de Transferência.



Fonte: Fritzen (2016).

Santiago *et al.* (2018) demonstram a diferença da curva de Dano Médio utilizando o par $|E^*|/TD$ e MR/CD como ensaios de rigidez e de fadiga, respectivamente, apresentado na Figura 39. Os resultados demonstram que a curva de evolução do dano com a utilização do ensaio de CD fornece valores mais acentuados quando comparados a curva com *inputs* de ensaio de TD. Uma das explicações para esse resultado é a maior agressividade do ensaio de CD, que proporciona menores valores de fadiga e, portanto, maiores valores de danificação.

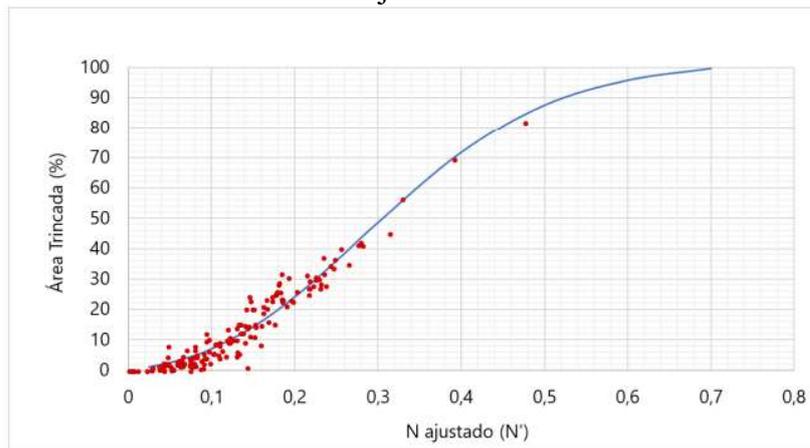
Figura 39 – Simulação do Dano Médio em situações distintas de ensaios de rigidez e de fadiga.



Fonte: Santiago *et al.* (2018).

Na atualização da FT proposta por Fritzen *et al.* (2019), foi definido que a evolução da área trincada seria representada por uma curva sigmoideal ($N \times AT$), no lugar de uma função potencial (Dano Médio Acumulado \times AT) como era na proposta anterior. Trata-se, portanto, de um ajuste do método anterior com vistas a uma melhor predição. A Figura 40 apresenta resultados de três trechos do Projeto Fundão (Nascimento, 2015; Fritzen, 2016) com dados de área trincada com relação ao N ajustado. O parâmetro de N ajustado é obtido por método semelhante ao utilizado na calibração da FT por Fritzen (2016). Os dados desses trechos também foram utilizados em estudos por Santiago (2017).

Figura 40 – Evolução da Área Trincada observada em relação ao número N para 35 trechos do Projeto Fundão.



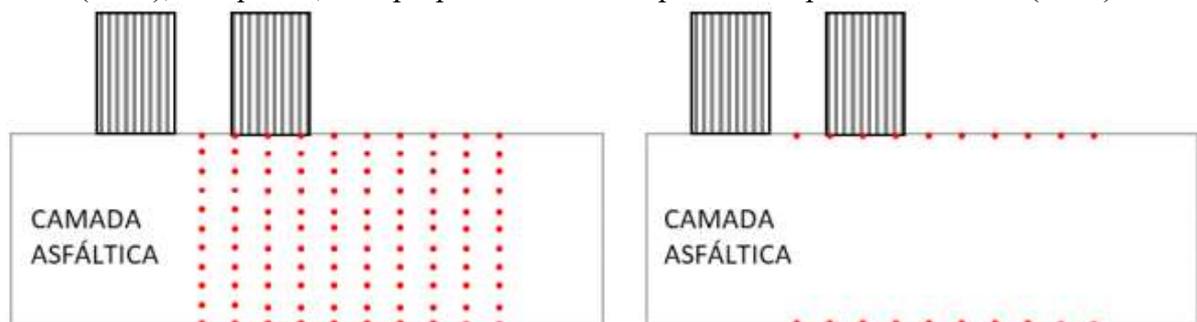
Fonte: Fritzen *et al.* (2019).

Além disso, para haver uma correlação dos resultados de campo com parâmetros estruturais, os autores sugerem a utilização de uma malha de pontos reduzida, contemplando apenas 20 pontos, 10 na fibra inferior e 10 na fibra superior do revestimento sem o dano limitado ao valor de 1,0, como demonstrado na Figura 41. Este método é baseado na premissa de que apenas os pontos inferiores e superiores da camada do revestimento asfáltico contribuem

efetivamente para o trincamento na superfície. No referido estudo, o parâmetro de dano também não ficou limitado a 1,0. Ter o parâmetro de dano “livre” em simulação, ou seja, não limitado ao valor de 1,0, significa que mesmo depois que o número de solicitações impostas alcance o valor de N_f , como demonstrado na Lei de Miner (Equação 26), o valor do D_{acm} continua aumentando indefinidamente. A limitação do dano a 1,0 tem a falha de admitir que o elemento que atingir a vida de fadiga - ou seja, igualar o número de solicitações impostas ao número total de solicitações suportadas - deixará de contribuir com a propagação de defeitos mesmo que um número maior de solicitações continue sendo impostas no material.

O parâmetro de dano é incorporado no cálculo do *shift factor* para transladar o parâmetro N utilizado como “x” da equação da nova função de transferência por meio da relação demonstrada nas Equações 38 e 39.

Figura 41 – Esquema com a localização dos pontos na versão anterior proposta por Fritzen (2016), à esquerda, e na proposta do estudo apresentado por Fritzen *et al.* (2019).



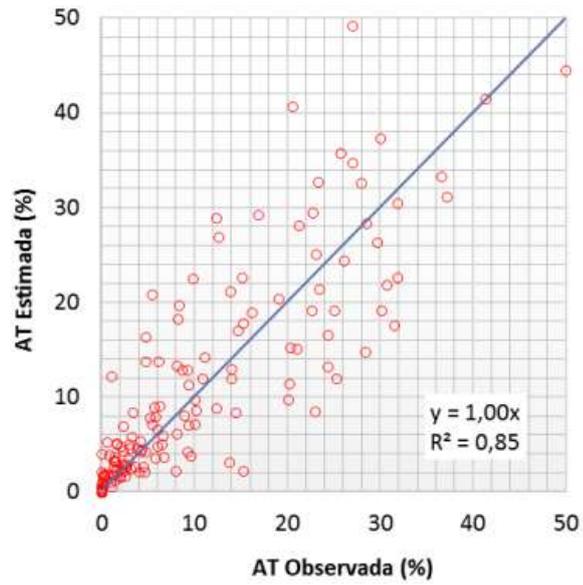
Fonte: Fritzen *et al.* (2019).

$$f_s = C_1(D_{m\u00e9dio})^{C_2} \quad (38)$$

$$N' = N \cdot f_s \cdot 10^{-10} \quad (39)$$

Onde f_s é o fator de transladação e N' o tráfego reduzido. Os referidos autores utilizaram dados de 8 trechos monitorados para validação da nova FT calibrada, e o resultado após ajuste de função erro consta na Figura 42.

Figura 42 – Comparação da Área Trincada observada com a Área Trincada estimada nos segmentos utilizados na calibração e nos segmentos utilizados na validação.



Fonte: Fritzen *et al.* (2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações Iniciais

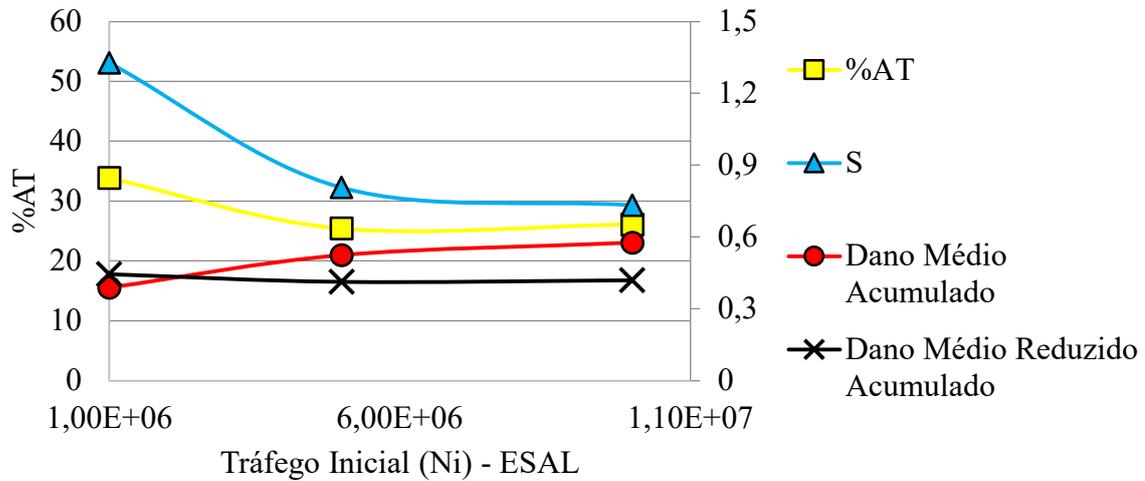
Este capítulo apresenta as informações relacionadas aos materiais investigados e aos métodos de simulação e análise utilizados para alcançar os objetivos geral e específicos deste estudo. Contém ainda as premissas adotadas nas análises, simplificações, além de apresentar quais são os ensaios laboratoriais utilizados para fornecimento dos parâmetros de análises.

4.2 Calibração da Função S e da FT no CAP3D-D

As premissas e hipóteses simplificadoras presentes no CAP3D-D estão descritas na Seção 3.9 do Capítulo de Revisão Bibliográfica. Rodadas iniciais no programa revelaram a necessidade de ajustes em suas rotinas. Foram observados que valores previstos de área trincada estavam sendo consideravelmente afetados pela Função S. Comparando dois cenários, A e B, em que sejam obtidos resultados de Danos Médios Acumulados (D_{acm}) ao fim de 120 meses de simulação, o cenário que apresentasse maior valor de danificação, como $D_{acm-A} > D_{acm-B}$, não necessariamente apresentaria $\%AT_A > \%AT_B$. Esse tipo de resultado foi intrigante e ensejou várias horas de análise, de maneira a identificar as causas para essa inconsistência. Trata-se de mais uma contribuição da presente dissertação, uma vez que tal aspecto deve sempre ser observado, independente do *software* utilizado.

Para melhor ilustrar a observação em questão, foi elaborada a Figura 43. Nela é possível ver a variação dos valores de D_{acm} , Dano Médio Reduzido Acumulado (D_{red_s}), $\%AT$ e de S em função do tráfego inicial (N_i). Os três valores de N_i apresentados variam entre $1E+06$, $5E+06$ e $1E+07$. Como pode ser observado, o valor do D_{acm} aumenta com o incremento do tráfego, o que é de se esperar dado o maior número de repetições no pavimento ao fim das análises, proporcionando maior danificação no material testado. Os valores de $\%AT$, entretanto, não acompanharam esta tendência, diminuindo seus valores entre o incremento de tráfego: $N_i = 1E+06$ a $5E+06$. Para melhor entender o porquê deste acontecimento, também foi plotado o valor de S , variando entre 1,15 e 0,75, responsável por transformar o D_{acm} em D_{red_s} , como explicado em detalhe na Seção 3.11 do Capítulo 2 ($D_{red_s} = D_{acm} \cdot S$). Como pode se perceber, a queda no valor de S é demasiadamente acentuada quando comparado ao incremento de D_{acm} com aumento do tráfego.

Figura 43 – Variação do Dano Médio Acumulado, Dano Reduzido Acumulado, %AT e valor de S em função do aumento do tráfego inicial, utilizando-se a versão anterior do CAP3D-D.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O leitor é referido a Equação 34, que demonstra como é obtido o valor de S . Nesta, a variável $T_{0,35}$, que é o mês da simulação em que o D_{acm} atinge o valor de 0,35, é responsável por modificar o valor de S inversamente proporcional. Assim, misturas ou cenários que têm crescimento do dano rápido, ou seja, menor $T_{0,35}$, como N_i de $5E+06$ em comparação a $1E+06$, apresentam valores de S significativamente menores. Menores valores de S levam a menores valores de D_{redac} , portanto.

Quando a queda dos valores de S não é tão acentuada, como no cenário da passagem do tráfego de $5E+06$ a $1E+07$, o aumento do D_{acm} entre esses cenários é suficiente para proporcionar um aumento de %AT. A queda menos acentuada é proporcionada por uma menor variação de $T_{0,35}$ entre cenários, como demonstrado na Tabela 3. Os demais efeitos são também numericamente demonstrados nesta tabela, onde as setas verdes (para cima) representam crescimentos em relação ao tráfego imediatamente menor e as setas vermelhas (para baixo) representam decaimentos. Os tamanhos das setas indicam a magnitude da variação.

Tabela 3 – Variação dos valores de Dano com o parâmetro $T_{0,35}$ e S para versão anterior do CAP3D-D.

Tráfego Inicial (ESAL)	D_{acm}	$T_{0,35}$ (meses)	$S = f(T_{0,35})$	D_{red_s}
1E+06	0,388	67	1,147	0,446
5E+06	0,525	17	0,807	0,413
1E+07	0,577	9	0,733	0,416

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas observações motivaram uma revisão mais aprofundada do programa CAP3D-D. Dentre as observações feitas, foi notado que o cálculo analítico de N_f por meio da Equação 28 não condizia com o cálculo da rotina do programa. Esta observação já havia sido objeto de discussão no grupo de pesquisa, suspeitando-se que houve um erro de interpretação de símbolos na equação inicialmente proposta por Nascimento (2015), o que foi observado em outras planilhas de cálculo do N_f que circulavam pela comunidade nacional. O problema foi avaliado e corrigido. O impacto do mesmo, na maior parte dos casos, era pequeno o suficiente para que a calibração da parte empírica do modelo pudesse atenuá-lo, de maneira que não havia sido percebido anteriormente. Como consequência da identificação do problema, algumas rotinas de cálculo foram alteradas. As mudanças implementadas no programa dizem respeito a adaptações no cálculo de N_f por meio da Equação 28, que impactam diretamente no cálculo do dano (Equação 26) e procedimento esquematizado na Figura 28 em simulações. Além disso, as observações também deram origem à conclusão de que a Função S estava muito sensível aos resultados de $T_{0,35}$. Com a mudança nas rotinas de cálculo do Dano Médio e ajustes no módulo de análise, novas funções S e FT precisaram ser calibradas, o que foi feito neste trabalho, conforme descrito a seguir.

O processo de calibração de ambas as funções, S e FT , tratando-se de um sistema de dimensionamento baseado na previsão de defeitos associados à fadiga no revestimento asfáltico, depende de dois requisitos: (i) a definição de uma metodologia de ensaio que seja possível fornecer parâmetros suficientes para obtenção do Dano Médio em laboratório; e (ii) dados de evolução de defeitos em trechos reais monitorados para associação com os parâmetros de laboratório, como explicado na Seção 3.11. Nos sistemas de dimensionamento atuais em desenvolvimento sistemático no país, este parâmetro indicativo da evolução em campo é a %AT.

Dentre as possibilidades de ajustes da Função S calibrada e validada por Santiago (2017) e até então implementada no CAP3D-D, optou-se, na pesquisa desta dissertação, por testar novos parâmetros para associação entre um valor de dano de referência e a área trincada em campo (%AT). Trata-se, portanto, de uma contribuição original do presente estudo e cujos resultados serão apresentados no capítulo seguinte. Como sistema de ensaio para caracterização dos materiais, continuou-se optando pelo uso do $|E^*|$ para rigidez e pelo ensaio de TD para fadiga. Além disso, optou-se por adotar maiores restrições no processo de calibração para que as variações resultantes da Função S não sejam tão acentuadas, dando origem a efeitos adversos, como antes observado (Figura 43). Assim, é objetivado que os valores de S fiquem restritos a

um intervalo que modifique minimamente os valores originais de D_{acm} , tornando o valor de D_{red_s} o mais próximo possível desse parâmetro original.

Quanto a estratégia de teste de outros parâmetros para associação com a Função S, além do valor de $T_{0,35}$, explicado na Seção 3.11 do capítulo de Revisão Bibliográfica, pretendeu-se estudar uma validação com uma Função S calibrada a partir de dados de tráfego inicial (N_{ini}) e, até mesmo, em não considerar a utilização de uma Função S que produza translação (o que equivaleria a um ajuste direto dos dados de simulação aos observados em campo, portanto, com uma etapa empírica a menos). Esta última tem uma grande pretensão, sendo responsável por tentar eliminar boa parte do empirismo do novo método.

Trinta trechos foram disponibilizados pela Rede de Tecnologia em Asfaltos da Petrobras (RTA) para simulações. Os trechos têm dados de observações em campo para %AT, contagens de tráfego, resultados de $|E^*|$ e de ensaios de TD para o revestimento asfáltico e resultados de MR para as demais camadas e subleito. Os dados são de trechos acompanhados desde o momento da execução, à liberação ao tráfego e ao acompanhamento. Dos 30 trechos, 1 apresentou trincamento durante a execução e foi descartado das análises, pois a área trincada medida ao longo do acompanhamento teria influências adversas do trincamento prévio, já existente após a construção. As principais informações sobre os trechos estão dispostas na Tabela 4. Os trechos são abreviados por TE (Trechos Experimentais). O Volume Médio Diário (VMD) é apresentado em termos de eixos padrões.

Após algumas rodadas já no processo de calibração, percebeu-se que a associação entre os parâmetros de D_{acm} e %AT em campo estavam significativamente destoantes para alguns trechos. Em outras palavras, foi observada a existência de resultados com D_{acm} próximo de 0,00, mas com a %AT de campo em valores altos (> 40%), ou situações contrárias, com o D_{acm} em valores altos (> 0,20) e %AT baixos. Dos 29 trechos selecionados para calibração, 6 mostraram-se visivelmente destoantes. Dos 6 trechos considerados destoantes, 4 apresentavam duas camadas asfálticas no topo da estrutura. Como o CAP3D-D em sua versão atual (de maio de 2020) não obtém o dano na camada asfáltica inferior, optou-se por retirar todos os 6 trechos de dupla camada asfáltica. A retirada desses trechos está embasada na hipótese que a quantificação do dano na camada asfáltica inferior pode ser de relevância para a obtenção da área trincada na superfície, o que não foi implementado, ainda, nesta fase do desenvolvimento do CAP3D-D. Os 23 TE escolhidos para calibração estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados dos trechos experimentais e utilizados para calibração.

Trecho Monitorado	VMD	Região do Brasil	Mês da última observação	%AT da observação
TE 1	4082	Sul	66	3,57
TE 2	874	Sul	31	0,36
TE 3	5123	Sul	31	10,71
TE 4	7021	Sudeste	32	9,00
TE 5	7021	Sudeste	32	3,00
TE 6	7021	Sudeste	32	4,80
TE 7	7021	Sudeste	32	4,80
TE 8	7021	Sudeste	32	19,00
TE 9	7021	Sudeste	32	5,90
TE 10	7021	Sudeste	32	10,00
TE 11	7021	Sudeste	32	0,00
TE 12	7021	Sudeste	32	0,00
TE 13	485	Sul	64	0,00
TE 14	485	Sul	64	0,00
TE 15	5041	Centro-Oeste	12	14,00
TE 16	20822	Sul	37	0,00
TE 17	384	Sudeste	108	0,00
TE 18	384	Sudeste	108	0,00
TE 19	21600	Sudeste	21	84,33
TE 20	21600	Sudeste	21	0,00
TE 21	21600	Sudeste	21	0,00
TE 22	21600	Sul	58	59,78
TE 23	21600	Sul	58	44,44

Fonte: Rede de Tecnologia em Asfaltos (2020).

Utilizou-se apenas um ponto [%AT prevista; %AT observada em campo] por trecho para o processo de calibração. Foi escolhido este método pelo fato de os trechos apresentarem uma grande variedade de números de observações, alguns com 8 observações no tempo, enquanto outros com apenas 1. Assim, trechos com maiores números de observações poderiam estar tendo peso maior na soma dos erros obtidos entre a diferença de %AT calculada e de campo do que trechos com menor quantidade de observações. A escolha de um ponto, apenas, se deve ao fato de o trecho com menor número de observações ter apenas uma observação, o que desequilibrava a calibração das etapas empíricas do sistema de dimensionamento, favorecendo o ajuste para trechos com mais pontos medidos ao longo do tempo. A situação ideal seria ter a maior quantidade de pontos possíveis e iguais entre os trechos, o que já é algo a se considerar em acompanhamentos de trechos no futuro.

O método de igualar o número de pontos por trechos também tende a minimizar influências particulares a cada trecho, como um trecho ter tido problemas de execução não detectado no acompanhamento ou ter tido tráfego muito diferente do estimado. Foi escolhido o último mês de observação para cada trecho. Assim, se um trecho apresenta observações nos meses [12; 24; 36; 48], apenas a observação [48] terá dado de área trincada utilizada na calibração. Este método tem a desvantagem de desconsiderar o histórico de evolução de %AT

dos TEs. Entretanto, 10 TEs tinham disponíveis até o presente momento apenas uma observação no tempo. Portanto, considerar mais de um ponto por TE não estava nas opções avaliadas no método deste estudo.

Devido a pequena quantidade de pontos para calibração restantes, com apenas 23 trechos com 1 ponto por trecho, optou-se por restringir os dados de observações para o processo de calibração. Assim, não é realizado o procedimento de validação da FT proposta, sendo este processo sugerido como estudo futuro, o que será facilitado com o controle de maior quantidade de trechos experimentais, o que é uma atividade em continuidade atualmente no Brasil nos projetos da RTA e também em planejamento pela Diretoria de Planejamento e Pesquisa do DNIT.

Para a Função S, optou-se por testar ajustes lineares. Apesar de Santiago (2017) ter obtido um ajuste para uma equação do segundo grau, o baixíssimo valor da primeira derivada da função obtida $[dS/dT_{0,35} = 4E-05(T_{0,35}) + 8,72E-03]$, aliada a um pequeno intervalo da variação de $T_{0,35}$ [1;67], e ao fato de que Nascimento (2015) e Fritzen (2016) também terem utilizado funções lineares, corroboraram com a crença de que o parâmetro S ajusta-se adequadamente a uma função de $T_{0,35}$ linearmente.

O processo de calibração consistiu na minimização do erro quadrático entre a %AT estimada e %AT observada em campo, variando tanto os parâmetros da Função S quanto da FT. O processo de obtenção da melhor Função S e FT se deu pela utilização da ferramenta *Solver* do *Excel*, que permite um processo iterativo para minimização da soma dos erros quadráticos de cada trecho escolhido para análise, com sucessivas tentativas por parte do analista, até que se encontre um conjunto de parâmetros julgado adequado.

4.3 Comparações com outros programas: *FlexPave* e *MeDiNa*

Algumas breves comparações foram realizadas utilizando resultados obtidos por meio dos programas *FlexPave* e *MeDiNa*. Apesar do *CAP3D-D* e do *FlexPave* terem premissas de análises semelhantes, não seria apropriado compará-los diretamente sem ressalvas. Algumas hipóteses nas análises de ambos os programas são distintas, como a utilização de análise elástica-linear (que simula análises viscoelástica-lineares) no *CAP3D-D* e viscoelástica-linear no *FlexPave*. Além disso, os programas apresentam equações que transformam a temperatura do ar em temperatura no interior do revestimento asfáltico diferentes, além de equações distintas também para a conversão de velocidade de tráfego em frequência de carregamento. Além disso,

alguns parâmetros de entrada divergem, como a utilização da Série de Prony de módulo de relaxação no programa FlexPave para dados de rigidez e a utilização dos parâmetros da curva sigmoidal do Módulo Dinâmico no CAP3D-D. Apesar de serem resultados obtidos do mesmo ensaio, o ajuste com diferentes modelos leva a variações na rigidez considerada nas análises.

Para esta análise de comparação entre o FlexPave e CAP3D-D usa-se o nome de *benchmark* parcial. Parcial pois apesar dos dois programas utilizarem níveis de análise semelhantes, como os *inputs* de $|E^*|$ e ensaio por TD para caracterização quanto à fadiga, apresentam premissas ligeiramente distintas. Os resultados no programa FlexPave para os TEs estudados foram disponibilizados por Nascimento (2020). Além disso, ressalta-se que os valores de rigidez do programa FlexPave são introduzidos em termos da Série de Prony, enquanto os valores introduzidos no programa CAP3D-D são em termos dos valores de ajuste da curva sigmoidal da curva mestra do $|E^*|$ (mais informações acerca dos ajustes dos dados experimentais à curva sigmoidal no Apêndice A).

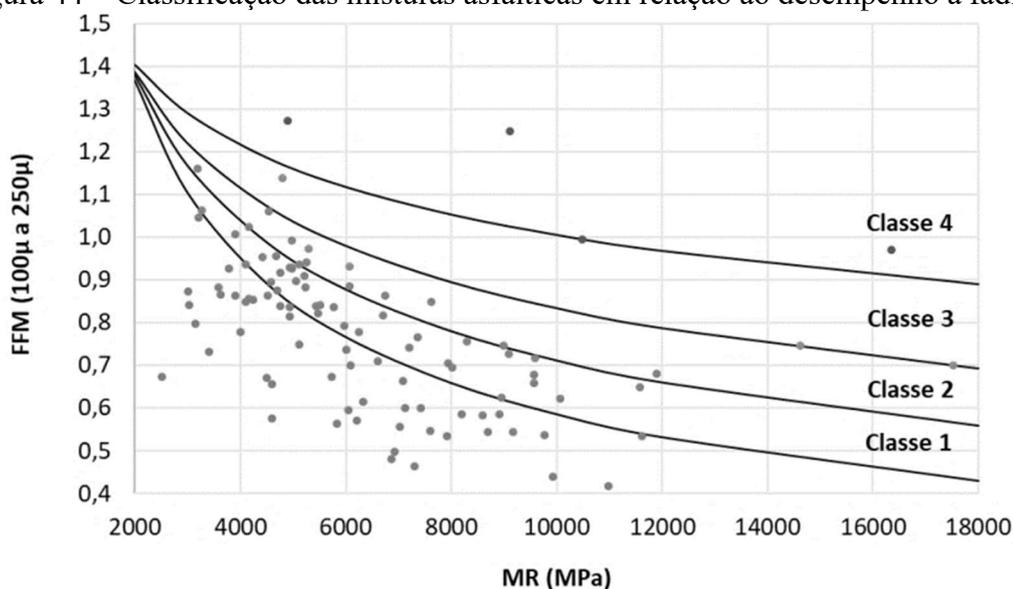
A título de curiosidade, algumas análises também foram realizadas no programa MeDiNa em sua versão de outubro de 2018. Apesar de não servir objetivamente de comparação entre os programas, ou de forma a acrescentar na análise de sensibilidade desses parâmetros no estudo envolvendo dados de entrada como $|E^*|$ e dados de fadiga para TD (o MeDiNa, em sua versão atual, não incorpora tais ensaios viscoelásticos em análises, não permitindo dados de entrada de temperatura nem de velocidade de tráfego), o resultado pode enriquecer a compreensão do leitor quanto à obtenção do parâmetro de %AT em métodos de análise utilizando os diferentes softwares. As análises foram realizadas usando estrutura idêntica nas camadas granulares e subleitos, em termos de espessura e de MR. Para o revestimento, no caso da análise pela MeDiNa, foram usados valores de MR e parâmetros de ensaio de CD. Ressalta-se, todavia, que as misturas utilizadas foram as presentes no *default* do programa. Maiores detalhes dos parâmetros de cada revestimento podem ser encontrados no Apêndice B.

Fez-se uma análise para diferentes níveis de tráfego. Em análises preliminares, observou-se um significativo trincamento já em baixos níveis de tráfego, mesmo em misturas mais resistentes à fadiga (Classe 4, conforme descrito no parágrafo a seguir). Portanto, variou-se apenas os níveis de tráfego iniciais de $1E+06$ a $3E+06$, com crescimento exponencial de 2,0% e horizonte de projeto de 10 anos.

As classes de misturas apresentadas no MeDiNa estão dispostas em 4 níveis, onde 1 representa a classe menos resistente à fadiga, e 4 a mais resistente. Fritzen *et al.* (2019)

apresentam a comparação entre as Classes das misturas em termos de um parâmetro conhecido como Fator de Fadiga da Mistura (FFM). Este fator leva em conta os números de ciclos de carregamento para a falha em ensaio de CD para as deformações específicas de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ e corresponde à área do trapézio à esquerda da curva de Wöhler correspondente a esses valores de deformação específica. Quanto maior o FFM, maior a quantidade de ciclos suportados nesses níveis de deformação, indicando misturas mais resistentes à fadiga. Além disso, os valores de MR também são utilizados na composição e classificação da mistura quando seu desempenho à fadiga (conforme indicado na Figura 44).

Figura 44 – Classificação das misturas asfálticas em relação ao desempenho à fadiga.



Fonte: Fritzen *et al.* (2019).

4.4 Análise de sensibilidade

Com o objetivo de aprofundar o entendimento dos resultados de danificação e de área trincada prevista considerando propriedades viscoelásticas do material asfáltico, são realizadas análises de evolução de Dano Médio no programa CAP3D-D em diferentes cenários de temperatura, velocidade de tráfego e níveis de tráfego para estruturas e demais variáveis fixadas. Para isso, um total de 7 misturas são avaliadas. Além disso, dispõem-se os resultados em termos de %AT, obtidos utilizando a nova FT obtida a partir do processo de calibração executado para a presente pesquisa.

Além da análise de sensibilidade do %AT para variações de velocidade, temperatura, e nível de tráfego (ou intensidade de tráfego) com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre modelos de dano contínuo e de esclarecer algumas questões de teorias

atuais, como a modelagem S-VECD, é realizado também o teste da variação de parâmetros da modelagem de fadiga por S-VECD. Os parâmetros variados são os da curva da lei de potência da $C(S)$, $G^R(N_f)$, α e β . O intuito das análises é proporcionar maior entendimento sobre as funções já calibradas e embutidas no CAP3D-D e programas semelhantes. A interpretação dos resultados ajuda numa maior compreensão e, sobretudo, permite uma sensibilidade mais apurada para os pesquisadores da área, o que pode aperfeiçoar a modelagem e, subsequentemente, o sistema de dimensionamento como um todo. Há esperado impacto também na capacidade de selecionar melhores materiais asfálticos para as estruturas de pavimentos com base nos resultados obtidos nas análises de sensibilidade.

4.5 Tráfego, estrutura do pavimento analisado e misturas investigadas

Os dados estruturais utilizados para as camadas dos pavimentos analisados na presente investigação estão expostos na Tabela 5. Os valores seguem os padrões sugeridos como *default* no programa MeDiNa. Para camada de base, considera-se um material do tipo brita graduada – Gnaisse Classe 5. Para sub-base considera-se um solo fino argiloso LG' e para subleito um material siltoso NS'. Considerou-se valores condizentes com o tráfego inicial de $N = 1E+06$ e crescimento de 2,0% ao ano (exponencial). Os níveis de tráfego inicial (N_i) testados, em termos de eixo padrão (ESALs), foram de $1E+06$ (cenário padrão), $5E+06$ e $1E+07$. Os valores de coeficientes de Poisson (ν) usados foram os valores *default* do programa para os materiais de cada camada, considerados constantes e conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Dados estruturais das camadas investigadas.

Camada/subleito	h (cm)	E (MPa)	Poisson (ν)
Revestimento	8	$ E^* (T,\nu)$	0,30
Base	15	381	0,35
Sub-base	15	250	0,35
Subleito	---	189	0,40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Seis misturas foram selecionadas para as análises, tendo sido ensaiadas pelo Cenpes da Petrobras, fazendo parte do banco de dados da RTA. As misturas foram denominadas para este trabalho M1 a M7, e foram escolhidas de maneira a manterem certas semelhanças – mesma origem dos agregados e teores de ligante e de vazios próximos – e alguma diferença marcante, como o Tamanho Máximo Nominal dos agregados graúdos (DNER-ME 083/98) e a penetração no ligante, em décimos de mm (DNIT 155/2010-ME). Os principais resultados referentes à caracterização dos agregados e ligantes estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados de agregados e ligantes utilizados nas misturas analisadas.

Mistura	Agregados			Ligantes		
	TMN (mm)	VAM (%)	RBV (%)	CAP	Teor (%)	Vv (%)
M1	12,7	14,8	69,6	60/85	4,8	4,5
M2	12,7	14,8	73,0	50/70	5,5	4,0
M3	12,7	14,8	73,0	30/45	5,5	4,0
M4	19,0	13,9	70,8	50/70	5,0	4,0
M5	19,0	13,7	71,0	30/45	5,0	4,0
M6	19,0	14,2	69,0	65/90	5,0	4,0
M7	12,7	14,8	73,0	30/45	5,5	4,0

Fonte: Cenpes (2018).

Os parâmetros de ajuste a , b , d e g da curva sigmoidal, obtidos a partir de ensaios de $|E^*|$, estão dispostos na Tabela 7. No Apêndice A podem ser encontrados os gráficos de ajuste entre os dados experimentais e a sigmoidal modelada para cada mistura. Esse ajuste foi feito nesta pesquisa para uso da ferramenta CAP3D-D, que atualmente utiliza como parâmetros de entrada de rigidez os parâmetros da curva sigmoidal, que representa o Módulo Dinâmico. Aplica-se a Equação 40 para obtenção do valor do módulo, em MPa. Além disso, os coeficientes da equação polinomial de 2º grau usada para descrever o princípio da superposição tempo-temperatura (valores de a_T), a_1 , a_2 e a_3 , demonstrada na Equação 5 e que interfere no valor de fr da referida equação, são também apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados de rigidez por $|E^*|$ das misturas testadas.

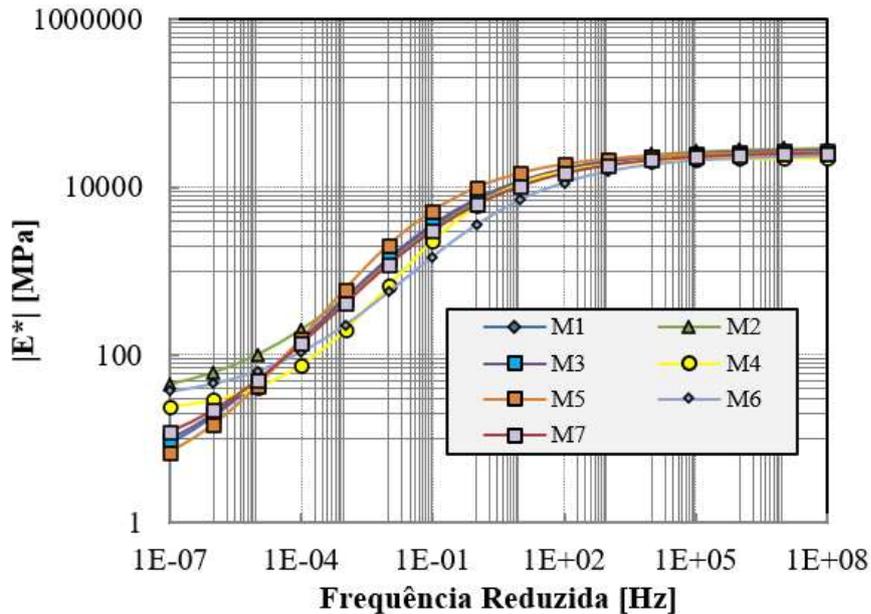
Mistura	Parâmetros curva sigmoidal				Shift Factor t-T		
	a	b	d	g	a1	a2	a3
M1	0,260	4,206	1,341	0,480	8,76E-04	-0,17	2,99
M2	1,549	2,956	0,668	0,563	8,65E-05	-0,18	3,15
M3	0,037	4,506	1,261	0,453	9,17E-04	-0,19	3,51
M4	1,306	3,048	0,878	0,731	9,81E-05	-0,17	3,06
M5	0,320	4,089	1,698	0,584	9,01E-05	-0,18	3,21
M6	1,199	3,327	0,386	0,497	1,21E-03	-0,18	3,11
M7	0,409	4,113	1,077	0,458	7,77E-04	-0,18	3,35

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\log|E^*| = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{e^{d+g \cdot \log(fr)}}} \quad (40)$$

As curvas mestras geradas a partir dos dados apresentados na Tabela 7 constam na Figura 45.

Figura 45 – Curvas mestras para o $|E^*|$ das misturas analisadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.6 Análise de sensibilidade para temperaturas, velocidade e níveis de tráfego variados

As velocidades testadas em simulação foram de 20, 40, 60 e 80km/h. O tráfego de 20km/h visa simular um trecho de rodovia em zona urbana, com possível ocorrência de lentidão. A variação de velocidade até o limite permitido por lei para veículos de carga em rodovias, de 80km/h, visa acrescentar uma sensibilidade entre as transições de velocidade e enriquecer as análises. Apesar do limite de velocidade de 90km/h existir para alguns veículos de carga em rodovias concessionadas, assume-se que a velocidade de 80km/h em análises seja representativa de grande parte de rodovias brasileiras.

Utiliza-se as temperaturas médias compensadas fornecidas pelo INMET para as regiões Nordeste, Sudeste e Sul. Para se entender melhor o valor da média compensada, referencia-se o item 3.3 do capítulo de Revisão Bibliográfica. A série histórica traz dados de temperaturas médias compensadas de 1981 a 2010. Referencia-se, também, a Figura 7 no Capítulo 2, para maiores informações sobre as temperaturas médias compensadas no Brasil.

As regiões do Nordeste, Sudeste e Sul foram escolhidas por representarem uma grande faixa de variação de latitude, o que proporciona uma rica base de dados de temperaturas, dadas as variações de clima encontradas nessas regiões. As temperaturas utilizadas no CAP3D-D são referentes a cada mês do ano, por turnos, conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Temperaturas médias por turno por mês utilizadas nas análises no CAP3D-D.

	Turno	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Nordeste (média de 25,4°C)	0h - 08h	21,2	21,5	21,1	21,3	20,5	19,4	18,8	18,9	19,7	20,9	21,1	21,5
	08h - 16h	31,4	31,0	30,3	30,2	29,8	29,2	29,2	30,3	31,4	32,1	32,1	31,8
	16h - 0h	25,7	25,5	25,3	25,0	24,3	23,5	23,1	23,7	24,8	25,7	25,6	25,9
Sudeste (média de 21,8°C)	0h - 08h	19,2	19,2	19,0	17,0	14,7	13	12,4	13,5	15,4	17,1	17,9	18,5
	08h - 16h	29,7	30,2	29,8	28,1	26,4	25,5	25,2	26,8	27,2	27,9	28,1	28,5
	16h - 0h	23,6	23,8	23,2	21,7	19,5	18,2	17,8	19,3	20,5	21,7	22,4	22,9
Sul (média de 18,8°C)	0h - 08h	18,1	18,3	17,0	13,9	11,2	9,3	9,3	10,0	11,7	13,4	14,9	16,6
	08h - 16h	29,0	28,8	27,5	24,7	22,0	19,7	19,9	20,9	22,3	24,3	25,9	27,5
	16h - 0h	22,8	22,7	21,4	18,4	15,8	13,7	13,8	14,7	16,3	18,2	20,2	21,9

Fonte: INMET (2018).

Ressalta-se que o CAP3D-D tem em seu banco de dados médias históricas para as regiões do Brasil nos turnos utilizados pelo programa. Todavia, as informações podem perfeitamente ser atualizadas ou discretizadas ainda mais, caso disponíveis e caso este nível de detalhe interesse ao usuário.

Os resultados da análise de sensibilidade para esses parâmetros são apresentados, por mistura, por meio das repostas de %AT ora obtida por $S(T_{0,35})$, ora por $S(N_{ini})$. Em conjunto com os resultados de %AT, são apresentados também os valores de D_{acm} obtidos. A apresentação deste outro resultado visa possibilitar a comparação em exclusividade com indicadores mecanicistas, eliminando a passagem por uma FT, de caráter empírico.

4.7 Pequena análise de sensibilidade a variações na estrutura

Ao longo da realização das análises de sensibilidade ao clima e tráfego, foram investigados, também, as variações de repostas de D_{acm} e %AT para diferentes espessuras de camadas. A obtenção desses resultados para estruturas distintas, apesar de não ter sido objetivo específico do presente estudo, fornece informações que complementam o aprofundamento do entendimento a respeito da interferência da estrutura nas repostas de análises mecanístico-empíricas, portanto contribuindo para o objetivo geral. Os resultados são apresentados para análises apenas em um tipo de mistura, um tipo de tráfego inicial e um clima.

Para o revestimento, variou-se de espessura entre 5, 8, 10 e 12,5 cm. Para a Base e Sub-base, variou-se entre 15, 20, 25 e 30 cm. No CAP3D-D, o subleito é considerado um meio semi-infinito (com uso de elementos infinitos, Silva *et al.*, 2013). As estruturas testadas foram as apresentadas na Figura 46. Um total de 64 análises são realizadas. O clima escolhido para análises foi da região Sudeste, por ser intermediário entre o Nordeste e o Sul. M4 foi escolhida

como material do revestimento. Esta mistura foi escolhida por apresentar vida de fadiga intermediária, ou seja, nem máxima nem mínima, entre as demais misturas testadas, como demonstrado nas curvas de Wöhler, na Figura 49.

Figura 46 – Estrutura utilizada na análise de sensibilidade à variação de espessuras.

Revestimento (M4)	➔ [5; 8; 10; 12,5cm]
Base (MR = 381 MPa)	➔ [15; 20; 25; 30cm]
Sub-base (MR = 250 MPa)	➔ [15; 20; 25; 30cm]
Subleito (MR = 189 MPa)	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.8 Análise de sensibilidade de parâmetros S-VECD: $C(S)$, $G^R(N_f)$, α e β

A investigação dos parâmetros do modelo S-VECD é ensejada devido à importância dessas variáveis na lógica de dimensionamento em um nível mais aprofundado de análise, que tenha como base um ensaio de TD para interpretação dos resultados de fadiga. A modelagem do dano contínuo apresenta um grande espectro de parâmetros que possam ser investigados. No presente estudo, é avaliada a sensibilidade de resultados de D_{acm} a variações de parâmetros do material na modelagem S-VECD.

Os parâmetros escolhidos no estudo de sensibilidade são: C_{11} e C_{12} da curva $C(S)$, conforme Equação 10; γ e Δ dos critérios de falha da curva $G^R(N_f)$, que constam na Equação 15; α que representa a taxa de crescimento do dano em relação a liberação de pseudo-energia de deformação, introduzido no item 3.7.3; e β que representa relativamente quanto de tração há nos sinais do histórico de carregamento do material estudado, conforme mencionado no item 3.7.4. Este último parâmetro terá resultados apresentados em termos de vida de fadiga (N_f), uma vez que o programa usado apresenta um valor fixo, de -0,08 (Santiago, 2018), proposto por Nascimento (2015), e que não permite sua variação na interface atual do CAP3D-D, dado que é uma hipótese que, se modificada requereria toda uma nova calibração de FT, tendo sido fixa no *software*. Os resultados serão apresentados nesta ordem: primeiramente para parâmetros de $C(S)$, $G^R(N_f)$ e α , em termos de D_{acm} e, em seguida, para β em termos de N_f .

A função $C(S)$, como demonstrado no item 3.7.3, é uma relação fundamental do material por manter-se constante mesmo após a variação de temperatura de ensaio, amplitude

de deformação e do modo de carregamento (*i.e.* controle do atuador ou tensão controlada). Os parâmetros escolhidos para serem variados dessa relação são o C_{11} e C_{12} . Para a curva do critério de falha, $G^R(N_f)$, varia-se os coeficientes γ e δ . Os valores desses parâmetros, por mistura, além dos valores de α , estão apresentados na Tabela 9.

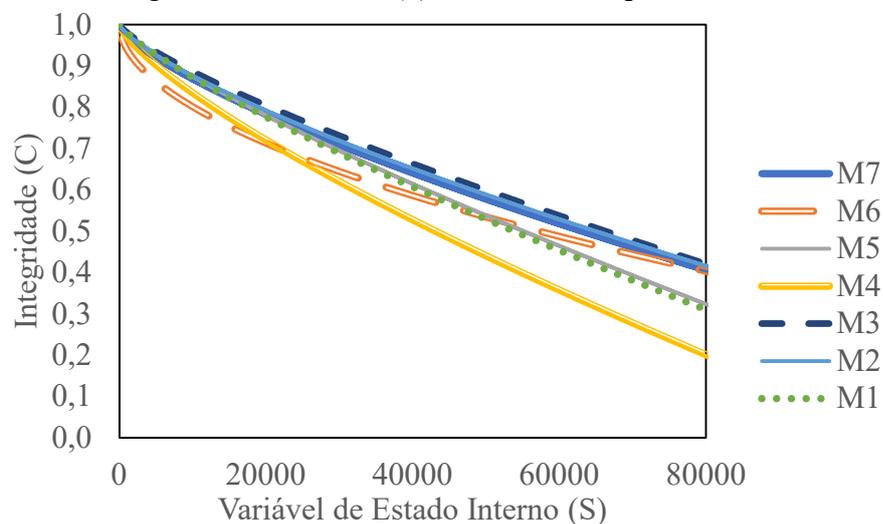
Tabela 9 – Valores dos coeficientes das curvas de $C(S)$ e $G^R(N_f)$ utilizados.

Misturas	$C(S)$			$G^R(N_f)$	
	C_{11}	C_{12}	α	γ	Δ
1	0,00007	0,81241	3,03	3709564	-1,211
2	0,00013	0,74561	3,42	4673062	-1,348
3	0,00008	0,78278	3,03	2988891	-1,288
4	0,00015	0,75769	2,86	6120075	-1,359
5	0,00007	0,81166	2,71	5064581	-1,360
6	0,00153	0,52846	3,43	1587412	-1,214
7	0,00016	0,72799	3,12	2323723	-1,255

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os gráficos representantes das curvas $C(S)$ elaboradas a partir dos dados listados na Tabela 9 estão dispostos na Figura 47.

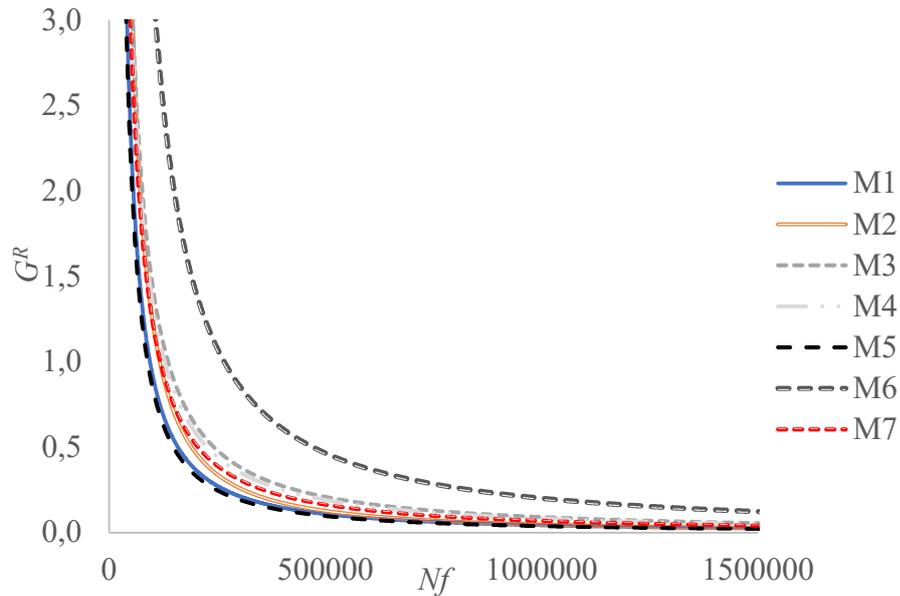
Figura 47 – Curvas $C(S)$ das misturas apresentadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os gráficos representantes das curvas $G^R(N_f)$ elaboradas a partir dos dados listados na Tabela 9 estão dispostos na Figura 48.

Figura 48 – Curvas $G^R(N_f)$ das misturas apresentadas.

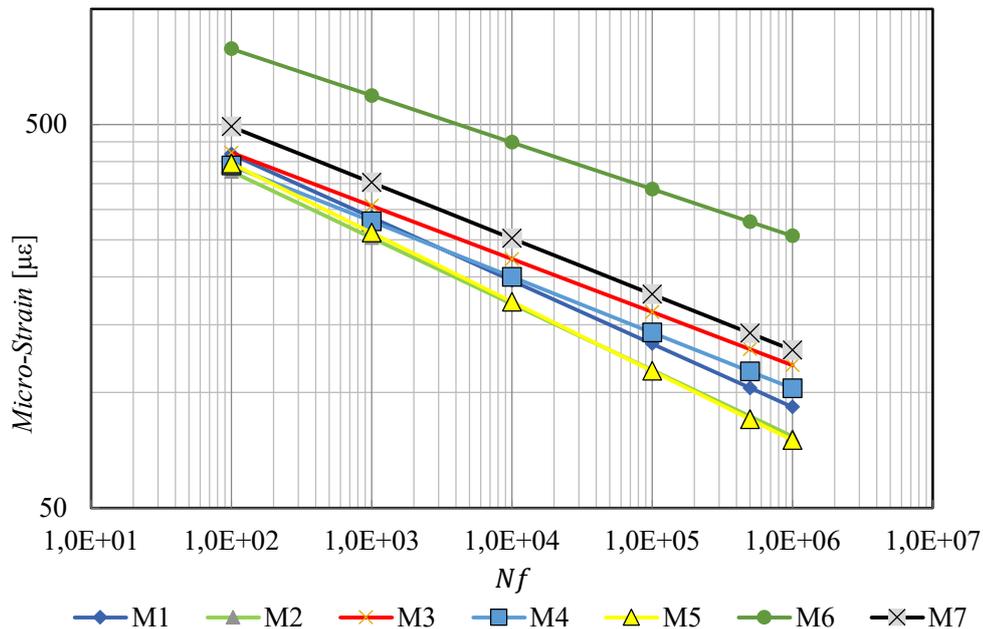


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização da análise de sensibilidade dos parâmetros da modelagem S-VECD, calculou-se o valor mínimo e máximo de cada parâmetro (α , C_{11} , C_{12} , γ e Δ) considerando as misturas apresentadas na Tabela 9, com pequenos arredondamentos para simplicidade de análise. Com os valores mínimos e máximo obtidos, realizou-se uma variação em 10 intervalos entre o valor mínimo e máximo, totalizando 11 análises. Assim, no caso da variável α , por exemplo, de mínimo 2,71 (aproximado para 2,70) e máximo 3,43 (aproximado para 3,40), dividiu-se em 10 intervalos de 0,7 entre o valor de 2,70 e 3,40. Portanto, os valores testados desse parâmetro foram: 2,70; 2,77; 2,84; 2,91; 2,98; 3,05; 3,12; 3,19; 3,26; 3,33; 3,40. Os valores usados para os demais parâmetros S-VECD, seguindo a mesma lógica, constam na Tabela 10. Portanto, para a variação de 11 valores em 5 parâmetros, completam-se 55 análises. A comparação entre cenários é realizada por meios gráficos com a variação dos parâmetros no eixo “x” e resultados de D_{acm} no eixo “y”.

As curvas de Wöhler para os dados apresentados dos parâmetros de fadiga a uma temperatura de 20°C constam na Figura 49. Os mesmos foram obtidos com a Equação 27 e os dados da Tabela 7.

Figura 49 – Curvas de Wöhler (vida de fadiga) das misturas utilizadas em análises em uma temperatura de 20°C.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

De maneira geral, a mistura M6 apresentou a melhor resistência à fadiga. Alguns breves comentários são feitos no parágrafo seguinte a respeito dessa mistura, especificamente. Nas demais, M7 mostrou-se também resistente à fadiga, enquanto M5 apresentou menores valores de N_f . É difícil associar diretamente parâmetros de caracterização da mistura que levem a explicar objetivamente a discrepância. Entretanto, algumas hipóteses podem ser formuladas. M7 e M5 apresentam ligantes asfálticos com viscosidades semelhantes e mesma penetração. Entretanto, apresentam TMN diferentes, de 12,7 e 19mm para M7 e M5, respectivamente. Além disso, M7 apresenta teor de ligante 0,5% maior que M5.

É destacado o resultado obtido para M6. Esta mistura apresentou elevadíssima resistência à fadiga quando comparado às demais. Suspeitou-se, inicialmente, que o ocorrido era resultado do ligante mais mole (CAP 65/90), de relativa grande viscosidade (1258 SSF @135°C) entre as misturas testadas. Entretanto, M1 também apresenta características semelhantes desses parâmetros, com elevada penetração (CAP 60/85) e viscosidade (2300 SSF@135°), mas não apresentou elevada vida de fadiga, estando no segundo pior resultado dentre as misturas testadas. Como mencionado, a associação clara com parâmetros da caracterização é de difícil conclusão. Como explicado mais adiante no capítulo de Análise e Resultados, o elevado parâmetro Δ da $G^R(N_f)$ contribuiu matematicamente para o elevado valor de vida de fadiga em M6. Além disso, a mistura também apresenta baixo valor de C_{12} , em comparação às demais misturas. Esse valor também contribuiu para uma elevada vida de fadiga.

Para análise do parâmetro β , calculou-se a vida de fadiga (N_f) de acordo com a Equação 27, apresentando o resultado por meio de uma curva de Wöhler para cada mistura a uma temperatura de 25°C e frequência de 10Hz. Os valores escolhidos para variação desse parâmetro especificamente foram os seguintes: -0,80; -0,64; -0,32; -0,16; -0,08; 0,08; 0,16; 0,32; 0,64 e 0,80. Lembrando que os valores de β negativos indicam um histórico de carregamento de maior proporção em tração, ao passo que valores positivos indicam maior parcela do histórico de carregamento em compressão, conforme Equação 13.

As análises são realizadas para cada mistura fixando seus parâmetros originais, como rigidez, e variando apenas a variável S-VECD desejada. A estrutura usada é a apresentada na Tabela 5. A temperatura é fixada em 25°C para todos os turnos e meses do ano, e a velocidade fixada em 60km/h. Assim, garante-se que a única variável entre as seguintes 11 análises foi o parâmetro S-VECD escolhido. Os resultados apresentados, em termos de Dano Médio para os parâmetros de $C(S)$, $G^R(N_f)$ e α , ao fim dos 120 meses de análise por meio do programa CAP3D-D, além dos resultados de N_f para variações do parâmetro β , serão apresentados no Capítulo 4. A Tabela 10 apresenta os valores dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.

Tabela 10 – Valores dos parâmetros S-VECD utilizados nas análises de sensibilidade.

α	C_{11}	C_{12}	γ	Δ
2,70	7,09E-05	0,528	1,46E+06	-1,417
2,77	2,17E-04	0,557	2,83E+06	-1,395
2,84	3,63E-04	0,585	4,20E+06	-1,374
2,91	5,09E-04	0,613	5,57E+06	-1,352
2,98	6,55E-04	0,642	6,94E+06	-1,331
3,05	8,00E-04	0,670	8,31E+06	-1,309
3,12	9,46E-04	0,698	9,68E+06	-1,287
3,19	1,09E-03	0,727	1,11E+07	-1,266
3,26	1,24E-03	0,755	1,24E+07	-1,244
3,33	1,38E-03	0,783	1,38E+07	-1,223
3,40	1,53E-03	0,812	1,52E+07	-1,201

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante perceber que o valor de β fixo em -0,08 para obtenção dos valores de fadiga por meio da Equação 21 pode ser passível de críticas, uma vez é assumido que todos os pontos da malha apresentarão parcelas de histórico de carregamento em compressão ou tração iguais. Esse fenômeno não ocorre na prática. Entretanto, conforme já mencionado, o gasto computacional para se calcular e armazenar, em tempo real de simulação, todos os picos de tração e compressão para gerar valores de β dinâmicos seria demasiado. Portanto, neste momento é razoável assumir-se um valor fixo para β . A discussão aqui trazida está relacionada

a suposta importância desse parâmetro para a vida de fadiga, e se seriam necessários estudos mais aprofundados acerca do impacto de sua variação nos resultados, e ainda sobre qual o valor de β que aproximaria mais as simulações da realidade de campo em todo o território nacional. Perceba-se que a presente pesquisa traz uma luz a um parâmetro que até pouco tempo não era propriamente percebido no sistema em questão no nível de detalhe devido, até porque este sistema novo possui um grande número de variáveis não usuais, mesmo para os pesquisadores e certamente para os profissionais da área que não adentram no nível de detalhe aqui exposto. Todavia, é importante para a comunidade de pesquisa e também para os definidores do método de dimensionamento final a ser seguido que estes diversos aspectos estejam bastante claros; um caminho natural para isso é justamente por meio das análises de sensibilidade aqui realizadas e até então não encontradas na literatura.

Ressalta-se, por fim, que a apresentação dos resultados em termos de D_{acm} e vida de fadiga eliminam parcelas de empirismo advindas da lógica atual da FT, trazendo resultados mecanicistas e enriquecendo as comparações e análises. Para melhor explicar esta percepção, ressalta-se a necessidade do cálculo do D_{red_s} no sistema de dimensionamento atual, como explicado em detalhe na Seção 3.11 do Capítulo 2 de Revisão Bibliográfica.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas análises descritas no Capítulo 4, Materiais e Métodos. Os resultados são acompanhados de breves análises à medida que são apresentados, e são então sucintamente resumidos ao fim do capítulo para uma compreensão mais abrangente das contribuições da pesquisa. Foram realizadas um total de 701 simulações no CAP3D-D: 316 com análise de sensibilidade no nível do clima, do tráfego (sensibilidade ambiental) e da estrutura, e 385 no nível do material. Além disso, mais 70 análises foram feitas no nível de material sem o uso do CAP3D-D, por meio de planilhas. As análises a nível de material referem-se às variações dos parâmetros da modelagem S-VECD. Os resultados das análises com o CAP3D-D nos níveis ambiental e de materiais por ventura não apresentados nesta seção explicitamente, para fins de facilitação da compreensão, foram devidamente organizados nos Apêndices C e D, respectivamente.

5.2 Resultados

É apresentado, inicialmente, o resultado da calibração da Função S e da FT com base nos resultados de Dano Médio Acumulado (D_{acm}) obtidos no programa CAP3D-D. Em seguida, um breve comparativo é realizado entre o CAP3D-D e os programas MeDiNa e LVECD, para exemplos de estruturas de pavimentos. Também é demonstrado o desempenho de cada mistura considerada nas análises com relação a sensibilidade no nível ambiental. A ideia é se possa ter em mente como as misturas se comportaram em simulação em termos de D_{acm} e de %AT, criando um cenário de referência para as comparações com os resultados posteriormente apresentados.

Para as variações de clima, velocidade de tráfego e intensidade de tráfego nas simulações de comportamento quanto à fadiga no nível da estrutura do pavimento, os resultados são apresentados em termos de D_{acm} e %AT. Conforme já mencionado, a ideia de mostrar os resultados de D_{acm} é para que seja eliminado, caso necessário, qualquer teor de empirismo proporcionado pela utilização de uma FT. Assim, os resultados são demonstrados tanto considerando apenas aspectos mecanicistas, ou seja, apenas da simulação (D_{acm}), como aspectos tantos mecanísticos quanto empíricos, que envolvem ainda os dados de campo (%AT).

5.2.1 Calibração da FT no CAP3D-D

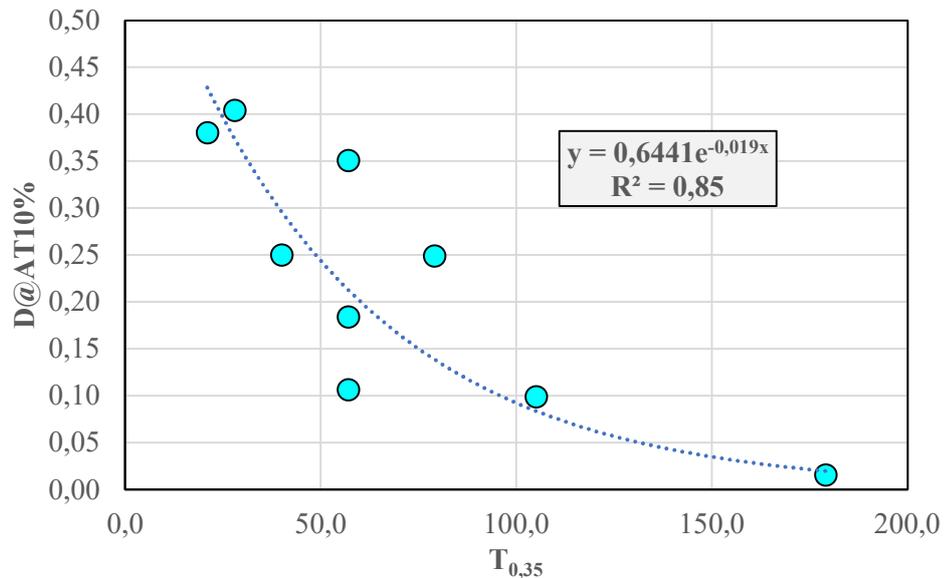
Os parâmetros $T_{0,25}$, $T_{0,35}$ e $T_{0,45}$ foram testados enquanto variáveis para a calibração da Função S (responsável por transformar o D_{acm} em D_{red_s}). Isso foi realizado por meio da associação entre os valores de D_{acm} em %AT = 10 (D@AT10%) e os valores dos meses em que o D_{acm} alcançou 0,25, 0,35 e 0,45 para $T_{0,25}$, $T_{0,35}$ e $T_{0,45}$, respectivamente. Também se testou a associação com os valores de 5% de AT, porém de imediato estes mostraram baixíssima correlação, sendo descartada qualquer investigação neste estudo sobre níveis tão baixos de trincamento para este fim específico.

Nove Trechos Experimentais (TEs) sequer apresentaram trincamento (AT = 0%), e não foram utilizados na análise, já que seria virtualmente impossível alcançar um valor de D@AT10%. Portanto, apenas 14 foram utilizados nessa etapa. Para a obtenção do valor de D@AT10%, algumas adaptações foram necessárias, já que muitos trechos experimentais (TEs) que tiveram AT > 0% não alcançaram o valor maior ou igual a 10%. A projeção, ou extrapolação, de valores menores que 10% de AT foi realizada por interpolação linear. Assim, tomando como exemplo uma situação hipotética: um caso em que se tenha uma observação no mês 10 e outra no mês 20 para trincamentos de 4% e 7%, respectivamente, extrapola-se um valor de AT de 10% no mês 30 (3% a cada 10 meses, segundo as duas últimas observações). O método é uma aproximação, já que a curva de D_{acm} em função do tempo tem diferentes taxas de variação, como observado na Figura 31, atingindo, inclusive, taxas muito pequenas em situações de estabilização do D_{acm} . O procedimento de extrapolação foi realizado em 6 dos 14TEs.

A Figura 50 demonstra a correlação obtida entre o $T_{0,35}$ e o valor de D@AT10%, que apresentou a melhor correlação entre os parâmetros testados ($T_{0,25}$, $T_{0,35}$ e $T_{0,45}$), para os TEs envolvidos na análise. O leitor é referido à Figura 35, na qual é apresentada a mesma relação para a calibração utilizada por Santiago (2017), ou seja, a relação entre D@AT10% e $T_{0,35}$ tende a estabilizar por volta de $T_{0,35} = 67$ meses. Diferentemente do que foi definido pela autora citada, a relação entre D@AT10% e $T_{0,35}$, demonstrado na Figura 50, obtida neste estudo, não apresentou sinal de estabilização. Portanto, para a realização das presentes análises, utilizou-se o valor de 180 como limite do valor de $T_{0,35}$, já que era o último valor de mês das simulações do processo de calibração. A utilização de um valor mais alto de $T_{0,35}$ também contribui para uma menor sensibilidade de $S(T_{0,35})$, ou menor taxa de variação. Em outras palavras, a função $S(T_{0,35})$ calibrada por Santiago (2017) e anteriormente presente nas rotinas do CAP3D-D, apresentava uma variação no eixo “y” de 0,77 a 1,15 para uma variação no eixo

“x” de 67. Mantendo a mesma variação no eixo “y”, porém para uma variação de 180 no eixo “x”, reduz-se a taxa $dS/dT_{0,35}$. Isso contribui para a diminuição de possíveis anomalias, como a demonstrada pela Figura 33 (para informações mais detalhadas, o leitor é direcionado à Seção 4.2).

Figura 50 – Relação entre $T_{0,35}$ e o $D@AT10\%$



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Definido que a Função S dependente do mês em que o D_{acm} se relaciona à $AT = 10\%$, e que terá como entrada o valor de $T_{0,35}$, por melhor ajuste de correlação, prosseguiu-se para a determinação dos seus parâmetros de calibração (A e B). Como comentado na Seção 4.2, além de $S(T_{0,35})$, usou-se, também, $S(N_{ini})$. Esta função tem como entrada o tráfego acumulado em 12 meses de simulação, em número de eixos padrões. Os parâmetros de calibração da FT para cada Função S também são obtidos, por meio da minimização da soma do erro quadrático entre %AT prevista e %AT observada. Os valores dos coeficientes de calibração obtidos constam na Tabela 11.

Quanto à calibração das funções S, tomou-se o cuidado para que os valores obtidos como resultados das calibrações referentes aos *Shift Factors* não ficassem muito sensíveis em relação às suas variáveis ($T_{0,35}$ ou N_{ini}), como mencionado no parágrafo anterior, que tornaria a função novamente passível de alterar significativamente os resultados de D_{acm} (conforme discutido em mais detalhe na Seção 4.2). Caso não realizado este controle, seria acrescentado mais teor de empirismo ao método. Além disso, essa abordagem possibilitou que a observação de redução de resultados de %AT no estudo de sensibilidade, mostrado mais adiante, no item 5.2.4 desta seção, não resultasse nas anomalias que haviam sido observadas inicialmente nos

testes preliminares. Estes testes demonstraram situações em que a %AT diminui para comparação entre cenários onde o D_{acm} aumenta significativamente, como ilustrado na Figura 43.

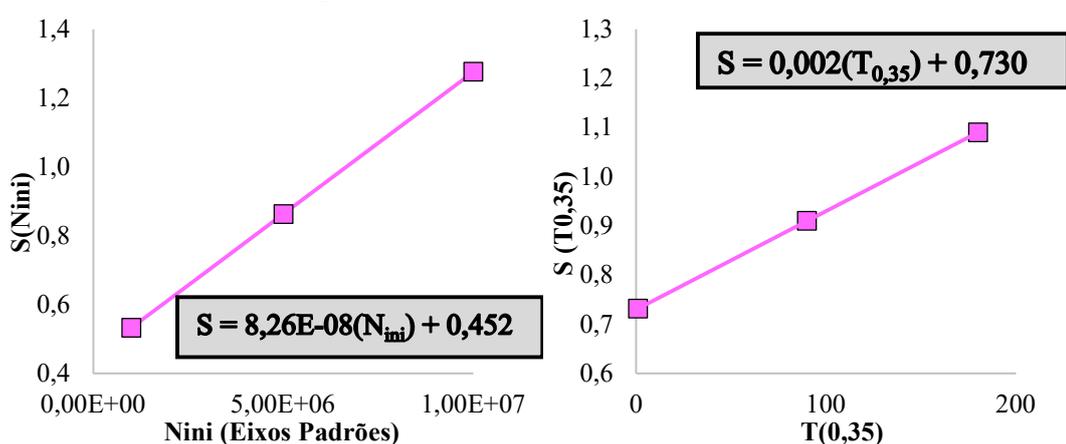
A Figura 51 demonstra $S(T_{0,35})$ e $S(N_{ini})$. Nesta Figura são apresentados os valores de S no eixo “y” e de sua variável independente no eixo “x”. Além disso, são demonstradas as equações que utilizam os parâmetros da Tabela 11

Tabela 11 – Parâmetros da calibração da Função S e da FT por variável da Função S.
Calibração **Função S** **Função de Transferência**

$T_{0,35}$	A	0,002	C1	17506,3
	B	0,730	C2	5,0
N_{ini}	A	8,26E-08	C1	356,1
	B	0,452	C2	1,8
Dano Direto	A	0	C1	1,058E+12
	B	1	C2	26,2

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 51 – S em função de $T_{0,35}$ e N_{ini} .



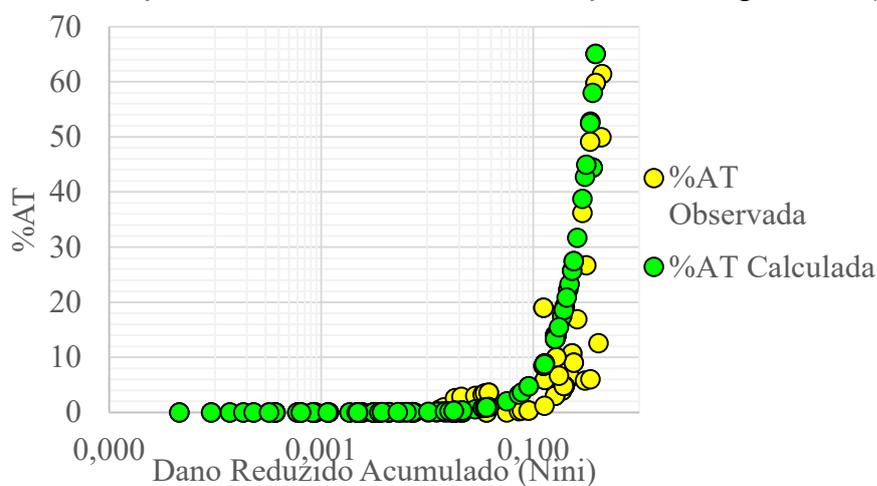
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A relação entre o $Dred_s$ e a %AT calculada e %AT observada demonstra uma importante relação da calibração. Estes valores mostram o quanto os valores previstos relacionam-se aos observados em campo em termos do parâmetro que se associa diretamente à FT, o $Dred_s$. As Figura 52 e

Figura 53 apresentam essa relação para as funções calibradas com o N_{ini} e $T_{0,35}$, respectivamente. A Figura 54 apresenta os resultados de %AT observada em campo em relação direta aos valores de D_{acm} .

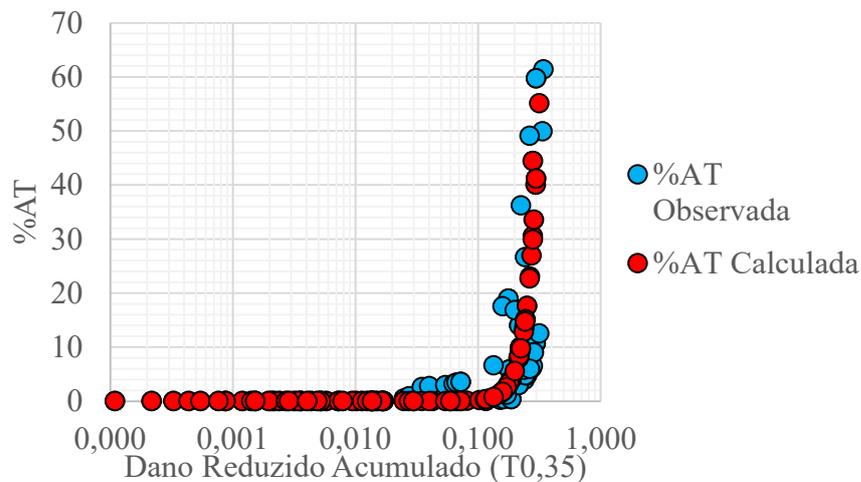
Como explicado na Seção 4.2 do capítulo de Materiais e Métodos, foi selecionado um par [%AT calculado; %AT observado] por Trecho monitorado. Entretanto, para a demonstração das Figuras seguintes, optou-se por manter todas as nuvens de pontos (%AT previstas e observadas). Essa escolha foi feita pelo fato de ser apresentado, em seguida, na Figura 55, os resultados das correlações entre %AT previstas e observadas apenas o último dado de observação para cada trecho. A demonstração de ambos os resultados em todos os pontos observados no trechos (Figuras 53, 54 e 55) e apenas nos pares de observação dos trechos Figura 55, também tem o objetivo de acrescentar uma percepção visual do impacto da consideração de apenas o último dado de observação de cada trecho na calibração. Também é importante perceber que todos os resultados de %AT foram obtidos com uma confiabilidade de 50% (sem função erro, portanto).

Figura 52 – Relação entre o D_{red_s} e a %AT em função do tráfego inicial (N_{ini}).



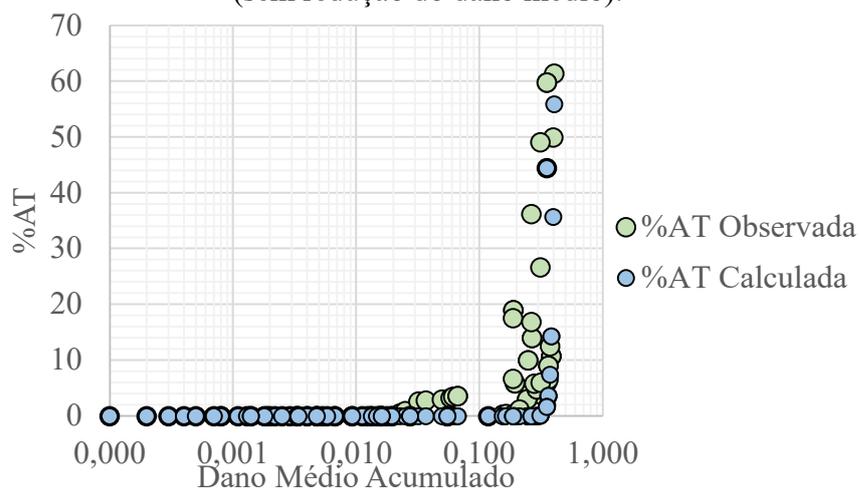
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 53 – Relação entre o D_{red_s} e a %AT em função do tráfego inicial ($T_{0,35}$).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 54 – Relação entre o D_{acm} e a %AT para calibração direta entre dano médio e %AT (sem redução do dano médio).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

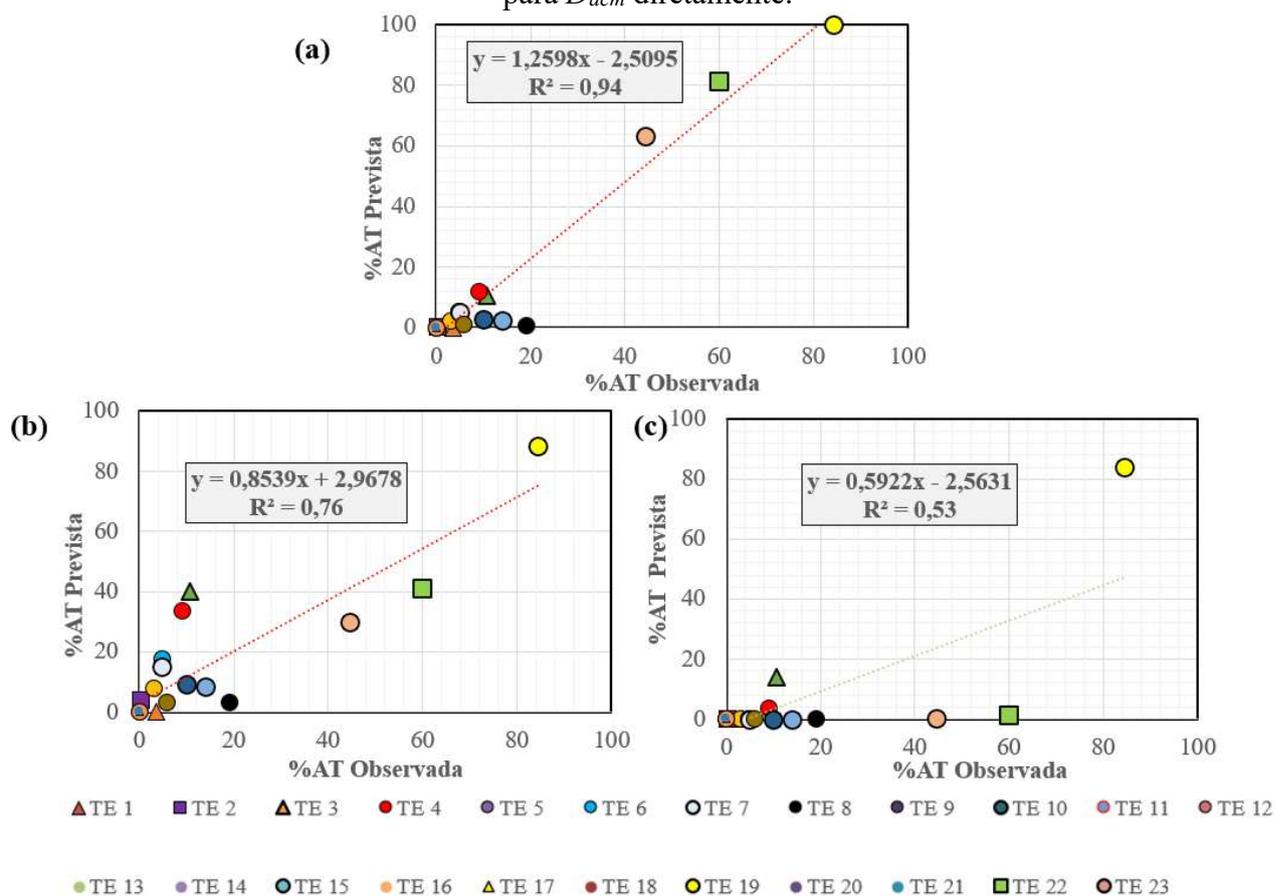
Os gráficos apresentados podem embasar observações relevantes. Primeiramente, é a %AT observada em campo começa a ter taxa de crescimento elevada em torno de valores de D_{red_s} entre 0,20 e 0,30, para as calibrações em funções de N_{ini} e $T_{0,35}$. Além disso, os valores de D_{acm} associam-se a elevadas taxas de crescimento de %AT em torno de 0,15. É considerado taxa elevada de %AT, para esta comparação, quando este valor alcança 10%.

Uma segunda observação é que se percebe uma maior aproximação entre os valores de %AT previstos e observados quando utilizados $S(T_{0,35})$ ou $S(N_{ini})$. Na Figura 54 é possível observar que a nuvem de pontos de %AT_{observada} vs. D_{acm} está visualmente à esquerda dos resultados calculados de %AT. O observado pode acontecer pelo fato de as nuvens de pontos na Figura em questão representarem todos os pontos de observação por trecho, enquanto a FT

é calibrada apenas para a observação final de cada trecho. Além disso, a menor correlação entre os dados de D_{acm} e %AT previstas entre as três calibrações, como demonstrado mais adiante, contribui para uma dispersão mais acentuada em %AT(D_{acm}).

A Figura 55 apresenta a correlação entre %AT prevista e observada em campo, onde (a) apresenta a calibração em função de N_{ini} , (b) a calibração em função de $T_{0,35}$ e (c) a calibração para o D_{acm} diretamente. A melhor correlação, pelo indicador R^2 , foi obtida em (a). Porém, neste caso foi observado que muitos erros tiveram %AT prevista próximo de zero, o que pode “mascarar” a correlação por meio do R^2 . Em (c) foi obtido correlação insatisfatória, com percentuais previstos e observados em erros de mais de 60 vezes.

Figura 55 – (a) calibração da função N_{ini} ; (b) calibração em função do $T_{0,35}$; e (c) calibração para D_{acm} diretamente.



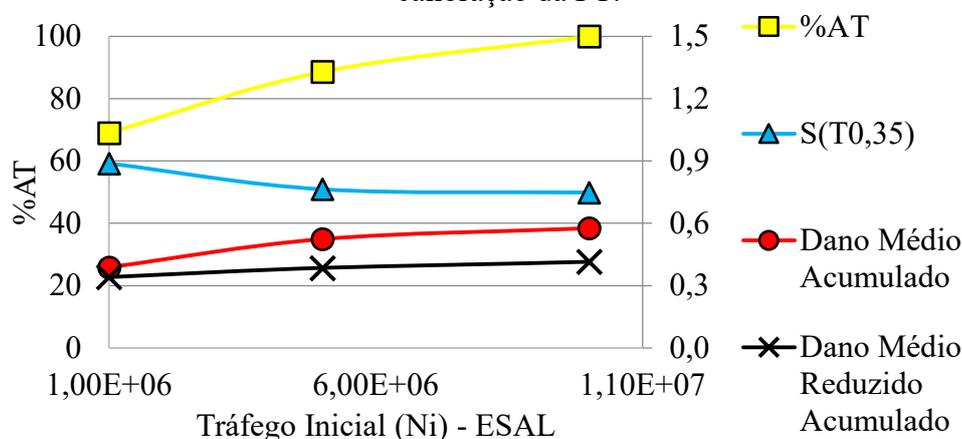
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A correlação obtida e apresentada na Figura 55 (a), em função de N_{ini} , apresentou o melhor resultado, medido por meio do coeficiente R^2 . Também é possível observar que, neste caso, os valores mais altos (maiores que 40%) de %AT_{observada} estão acima dos valores de

$\%AT_{prevista}$ (em torno de 1,3 vez maior), ao passo que alguns valores mais baixos de $\%AT_{observada}$ estão abaixo de $\%AT_{prevista}$ (entre 5 a 7 vezes menores). Isso implica que, de maneira geral, para maiores valores de trincamento em campo o modelo tenderá a prever valores inferiores, subestimando o trincamento, ao passo que em poucos níveis de trincamento, estará superestimando. O fato não é desejável, mas foi o melhor resultado obtido entre o equilíbrio de superestimções e subestimções que a modelagem está suscetível. Na Figura 55 (b) é possível observar que a modelagem em função de $T_{0,35}$ apresentou níveis de subestimções e superestimções diferentes. Em outras palavras, não houve tendência evidente em relação a um patamar de nível de trincamento que implicasse em aumento ou diminuição dos valores de $\%AT_{prevista}$. Além disso, em termos absolutos, esta modelagem apresentou menor erro entre valores de $\%AT_{observado}$ e $\%AT_{previstos}$, errando, no máximo, em 4 vezes nos piores casos, comparados a 7 vezes na calibração de $S(N_{ini})$. A Figura 55 (c) apresenta a calibração de $\%AT(D_{acm})$. Percebe-se a baixa correlação desses parâmetros. Portanto, descartou-se a possibilidade de uso dessa FT neste estudo.

Em comparação à Figura 43, a Figura 56 é apresentada com a correção da anomalia inicialmente observada, onde decréscimos de $\%AT$ eram obtidos com incrementos de D_{acm} na comparação entre cenários de incremento de tráfego. Ressalta-se que a única diferença entre os dados utilizados em ambas as análises, da Figura 43 e da Figura 56, são as funções S e FT. Evidencia-se, portanto, uma importante contribuição deste trabalho, visto que deixa-se de fazer com que os resultados de D_{acm} sejam significativamente alterados pela Função S. A correção deve-se, justamente, pela menor sensibilidade da Função S aplicada neste estudo.

Figura 56 – Representação de anomalia corrigida em incremento de danificação após calibração da FT.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

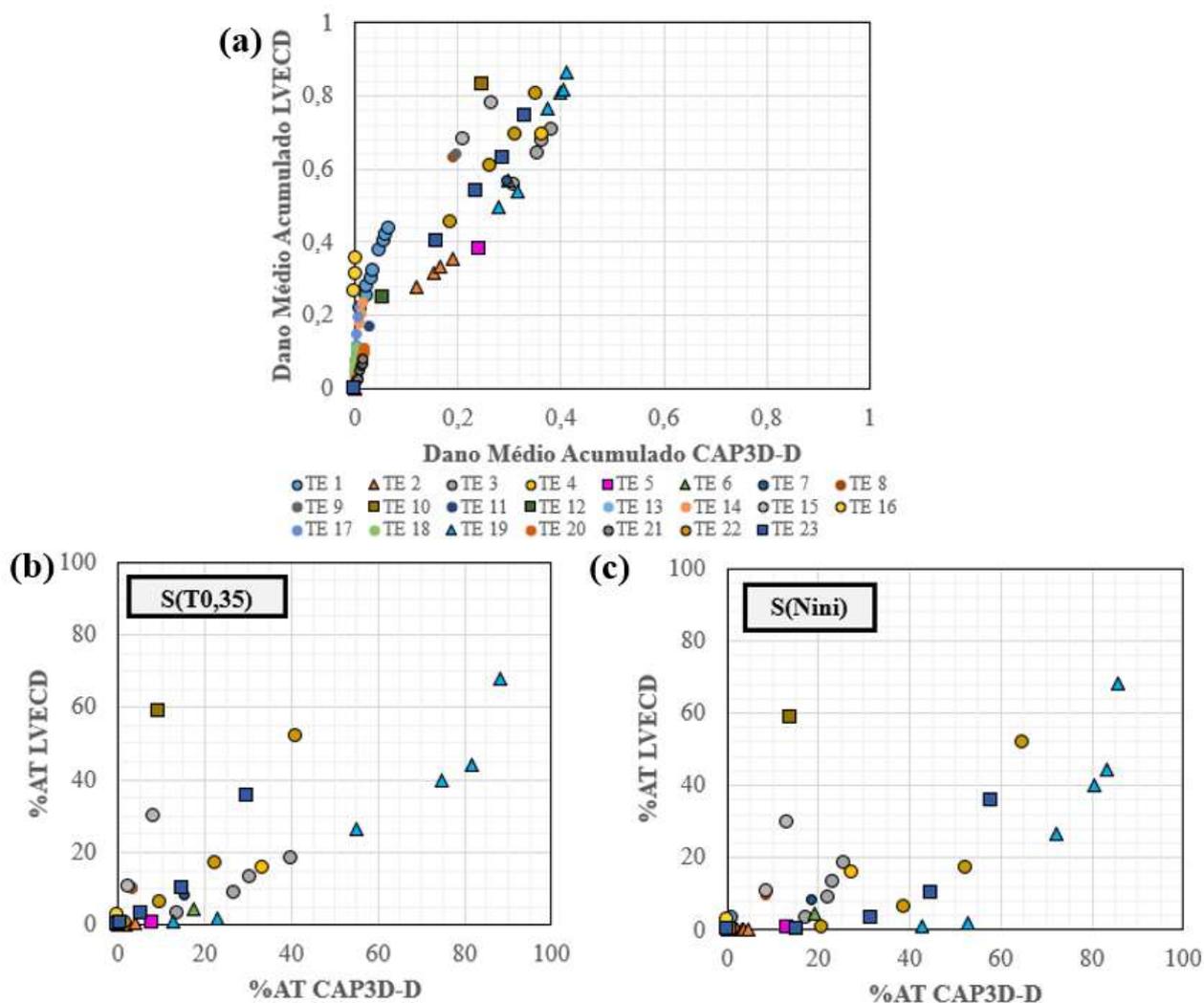
5.2.2 Comparações e Benchmark Parcial: LVECD e MeDiNa.

a) LVECD

Algumas comparações dos resultados no CAP3D-D foram realizadas com o programa LVECD. Como explicado na Seção 4.3, o resultado em termos de D_{acm} para ambos os programas pode ser comparado a um *benchmark* parcial. Considera-se como parcial pelo fato de resultados no LVECD e no MeDiNa servirem neste momento como referência, mas não poderem ser usados como fator de ajuste para o CAP3D-D, pelos programas divergirem quanto a premissas de análises.

A Figura 57 (a) apresenta os resultados de D_{acm} do LVECD e CAP3D-D, enquanto (b) apresenta a comparação entre as %AT em função de $S(T_{0,35})$, e (c) apresenta os resultados de %AT em função de $S(N_{ini})$. No eixo “x” estão apresentados os resultados referentes ao programa CAP3D-D, ao passo que em “y” são dispostos os resultados no LVECD.

Figura 57 – (a) resultados de D_{acm} do LVECD e CAP3D-D; (b) resultados de %AT em função de $S(T_{0,35})$; (c) resultados de %AT em função de $S(N_{ini})$.



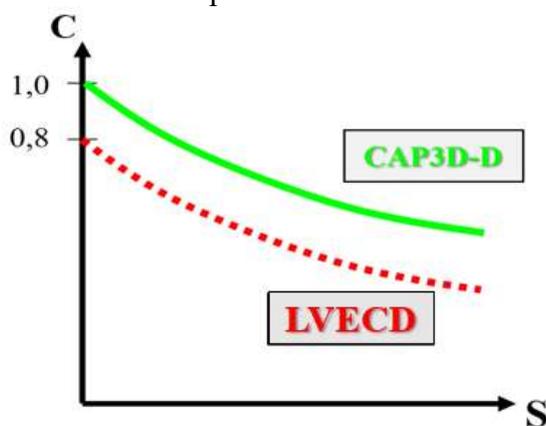
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser observado, para a comparação com os valores de D_{acm} , os programas mostram-se consistentes quanto ao agrupamento dos resultados, mas divergiram em termos de resultados absolutos. Os resultados obtidos de D_{acm} no programa CAP3D-D foram, de maneira geral, menores em relação aos obtidos no LVECD. Vários fatores podem explicar o observado. Como mencionado anteriormente, os programas divergem em algumas premissas, como a quantidade de pontos na análise estrutural, transformação da temperatura do ar em temperatura no interior do revestimento e transformação da velocidade de tráfego em frequência de carregamento, além da maneira como a evolução do dano é calculada em cada ponto no revestimento. As diferenças nas premissas de análise justificam o desagrupamento de alguns resultados, ou seja, as dispersões. Entretanto, não justificam a tendência notória de que os valores de D_{acm} fossem por unanimidade maiores no LVECD.

Suspeita-se que o principal indutor da diferença observada seja a forma como a evolução do dano é calculada. Enquanto o LVECD utiliza a integridade inicial em análises ($C_{initial}$) de 0,8, o CAP3D-D parte do valor de 1,0.

Com a diminuição da integridade inicial para 0,8, um mesmo valor da variável de estado interno [S , em $C(S)$] resulta em menores valores de integridade (C) quando comparado ao cenário com integridade inicial 1,0, e conseqüentemente maiores danos iniciais. O uso do valor de 0,8 na integridade inicial no LVECD é dado pela hipótese de que já há dano inicial no material, mesmo antes da liberação ao tráfego, como, por exemplo, em consequência do transporte e compactação da mistura asfáltica. A Figura 58 demonstra a ilustração desse pensamento. Entretanto, ressalta-se que apesar da integridade ter valores menores e constantes para mesmos valores de S , em 0,2 no LVECD, não há implicação em diferenças constantes nos valores de D_{acm} , já que diferentes valores da variável de estado interno podem ser obtidos em um mesmo instante de cálculo.

Figura 58 – Comparação entre curvas características de dano consideradas na simulação de fadiga do revestimento para diferentes valores de C inicial.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

b) MeDiNa

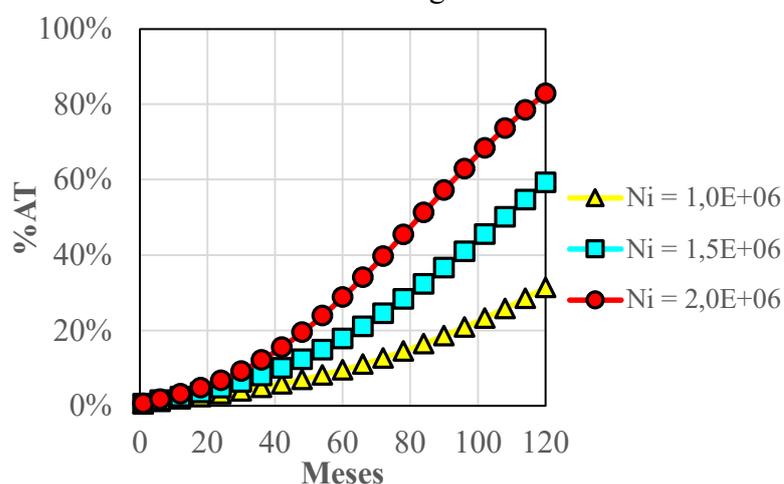
A Tabela 12 apresenta os resultados de %AT obtidos para análises realizadas com o MeDiNa (versão 2018) considerando variações de tráfego inicial para todos os revestimentos analisados. Para maiores referências das premissas e dos materiais utilizados nessas análises, o leitor é referido à Seção 4.3. A Figura 59 apresenta o resultado de %AT para diferentes níveis de tráfego para a mistura de Classe 4, menos sensível ao trincamento.

Tabela 12 – Resultados de %AT em análises no programa MeDiNa.

Tráfego	Mistura							
	Classe				CAP 50/70 #12,5mm	CAP 30/45 #12,5mm	CAP 30/45 #19,1mm	CAP 50/70 #19,1mm
	1	2	3	4				
1,00E+06	88,4	83,7	63,9	31,4	89,6	60,1	97,8	90,3
1,50E+06	99,0	99,0	94,4	59,3	99,0	91,8	99,0	99,0
2,00E+06	99,0	99,0	99,0	82,9	99,0	99,0	99,0	99,0
2,50E+06	99,0	99,0	99,0	97,0	99,0	99,0	99,0	99,0
3,00E+06	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 – Resultados de %AT no MeDiNa para revestimento classe 4 em diferentes níveis de tráfego.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Percebeu-se valores elevados de %AT para o tráfego inicial inserido, mesmo com a mistura classe 4, mais resistente à fadiga. Além disso, constatou-se crescimento acentuado dos resultados de %AT entre pequenas variações de N_i , quando comparados aos resultados de %AT previstos no CAP3D-D (resultados demonstrados a partir do item 5.2.3). As comparações entre os programas, todavia, não podem ser realizadas sem algumas ressalvas. Ambos os programas utilizam sistemas de caracterização quanto à rigidez e fadiga diferenciados: o MeDiNa utiliza o sistema MR e CD, enquanto o CAP3D-D utiliza o sistema $|E^*|$ e TD. Além disso, deve-se deixar claro que os dados da mistura classe 4 não foram testadas no CAP3D-D.

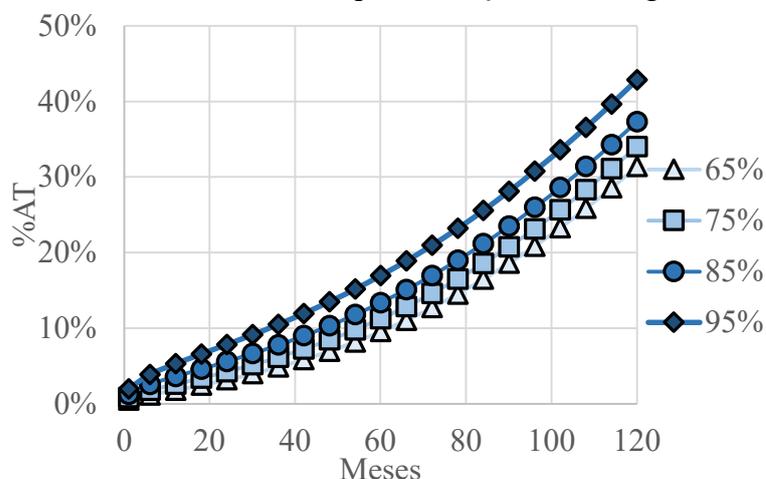
A elevada sensibilidade dos resultados de %AT às pequenas variações no tráfego, entretanto, reflete em sensibilidade de %AT aos valores de D_{acm} . É conhecido que o MeDiNa em sua versão 2018 apresenta elevada sensibilidade aos *inputs* de dano. O fato é comentado por Fritzen *et al.* (2019), que justificam o observado da seguinte forma: o programa, na versão

v.1.1.0.0. (utilizada em análises) apresenta coeficientes elevados da FT, a limitação do dano a 1,0 e a severidade do ensaio de CD para obtenção da curva de fadiga.

Também se fez testes com a confiabilidade das análises, que consiste na aplicação de uma função erro, em função da confiança, após a determinação da %AT – maiores confianças implicam em maiores áreas trincadas. Para avaliar a suspeita, algumas análises foram feitas alterando esse parâmetro. Na versão do MeDiNa utilizada nas análises, o usuário pode alterar os valores de confiabilidade das análises pela mudança do nível de projeto em “tipo de via”. Os tipos de vias são seis: (i) Sistema Arterial Principal (confiança 95%); (ii) Sistema Arterial Primário (confiança 85%); (iii) Sistema Arterial Secundário (confiança 75%); (iv) Sistema Coletor Primário (confiança 85%); (v) Sistema Coletor Secundário (confiança 75%); e (vi) Sistema Local (confiança 65%).

Para confirmar se os resultados estavam sendo significativamente afetados pela confiabilidade, realizou-se o teste para o revestimento com mistura classe 4 (mais resistente à fadiga) em quatro níveis de confiança: 65%, 75%, 85% e 95%.

Figura 60 – Resultados obtidos para variações de tráfego no MeDiNa.



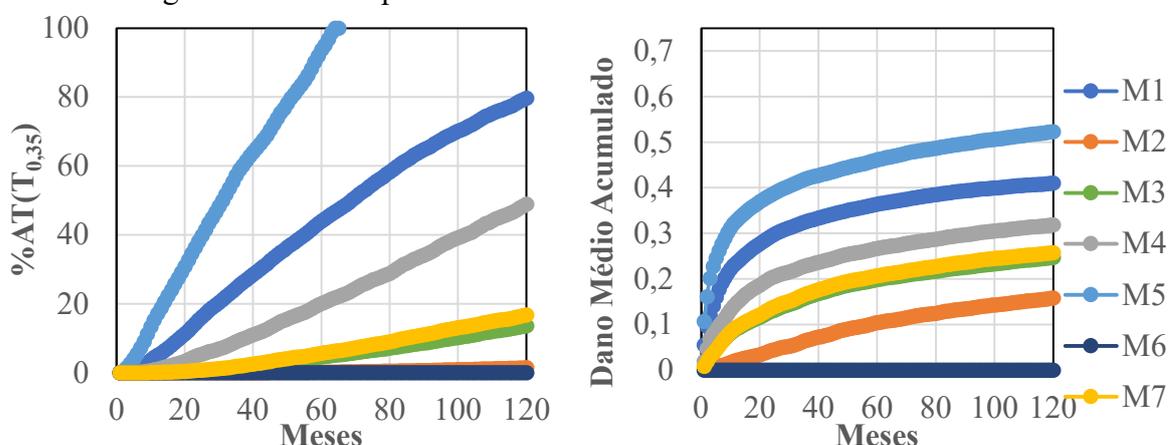
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Apesar de os percentuais de confiança mudarem significativamente os níveis de %AT, conclui-se que o programa foi, de maneira geral, mais sensível à danificação quando comparado a análises semelhantes no programa CAP3D-D. Em outras palavras, os resultados de %AT, demonstrados na Tabela 12 e Figura 59, tiveram maior sensibilidade à variação de tráfego N_i . Deve-se levar em consideração as observações feitas acerca do uso da comparação entre programas, não sendo apropriado compará-los diretamente, pelo motivo de apresentarem *inputs* diferentes de rigidez e fadiga, além de diferentes materiais terem sido utilizados nas análises em ambos os programas.

5.2.3 Desempenho das misturas analisadas no CAP3D-D

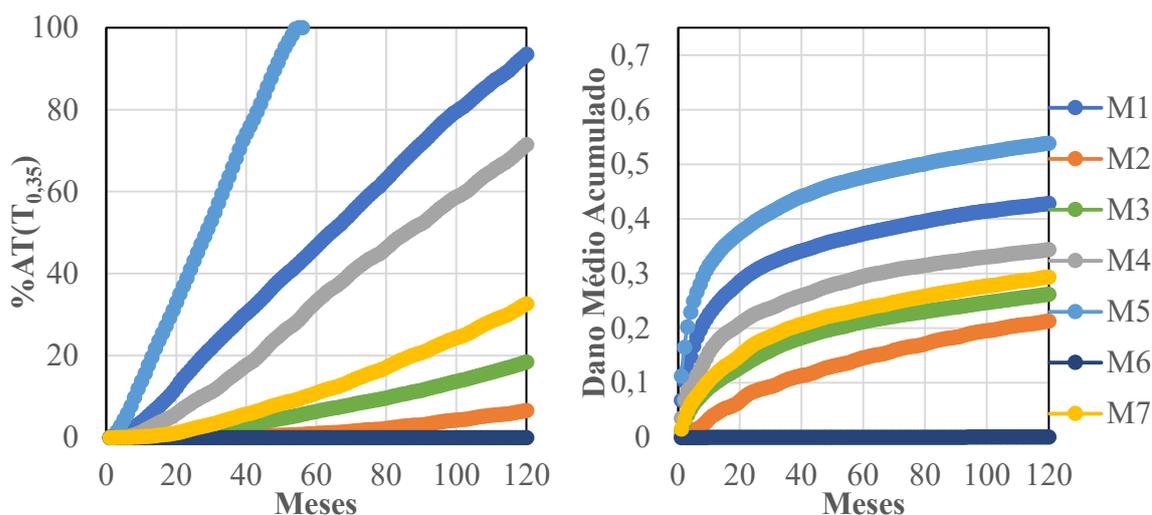
Os resultados apresentados neste item referem-se ao cenário da estrutura de referência (cf. Figura 46, com espessura de 8cm no revestimento), velocidade constante de 60km/h e tráfego inicial de $N = 1E+06$. A Figura 61 refere-se ao clima Nordeste, enquanto as Figuras 62 e 63 aos climas do Sudeste e do Sul, respectivamente. A intenção da apresentação desses resultados é criar uma sensibilidade às características inerentes às misturas, tentando isolar ou minimizar a interferência de outras variáveis, como a velocidade de tráfego e o nível de tráfego. As mesmas escalas são usadas nas figuras de modo a facilitar a análise de sensibilidade.

Figura 61 – Desempenho das misturas testadas no clima NORDESTE.



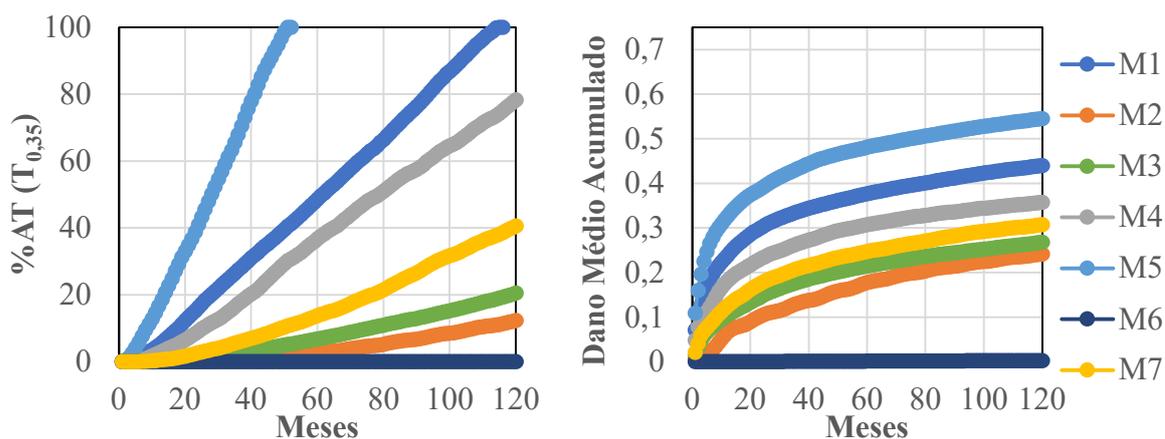
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 – Desempenho das misturas testadas no clima SUDESTE.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 63 – Desempenho das misturas testadas no clima SUL.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira geral, a estrutura utilizada nas análises proporcionou, na maior parte dos cenários, um grande espectro de variações de D_{acm} e de %AT. Algumas misturas apresentaram praticamente zero danificação, ao passo que algumas danificaram demasiadamente. Neste sentido, a mistura M5 mostrou-se a mais sensível em relação à evolução do D_{acm} . O observado pode ser explicado pelo fato de a vida de fadiga da referida mistura ser relativamente baixa quando comparada às demais nas mesmas circunstâncias, isto é, mesmas deformações, temperaturas e frequências de carregamento. Para a análise da observação, referencia-se à Figura 49 do capítulo de Materiais e Métodos, que apresenta as curvas de Wöhler das misturas.

A mistura M6, por outro lado, apresentou elevada resistência ao dano, não apresentando trincamento nem danificações relevantes mesmo em cenários mais extremos (elevados níveis de tráfego, baixas temperaturas e altas velocidades). É referenciada a Figura 26, na qual é apresentada a curva $G^R(N_f)$ das misturas investigadas. A mistura M6 apresenta elevado parâmetro Δ em comparação às demais, o que implica, como visto mais adiante, no item 5.2.6., em maiores valores de vida de fadiga, e, portanto, menores valores de D_{acm} . Visualmente, na Figura 26, o maior valor de Δ é perceptível pelo “afastamento” da curva do critério de falha em comparação às demais. Além disso, o baixo valor de C_{12} (menor dentre as misturas utilizadas nas análises) também contribuiu para o resultado.

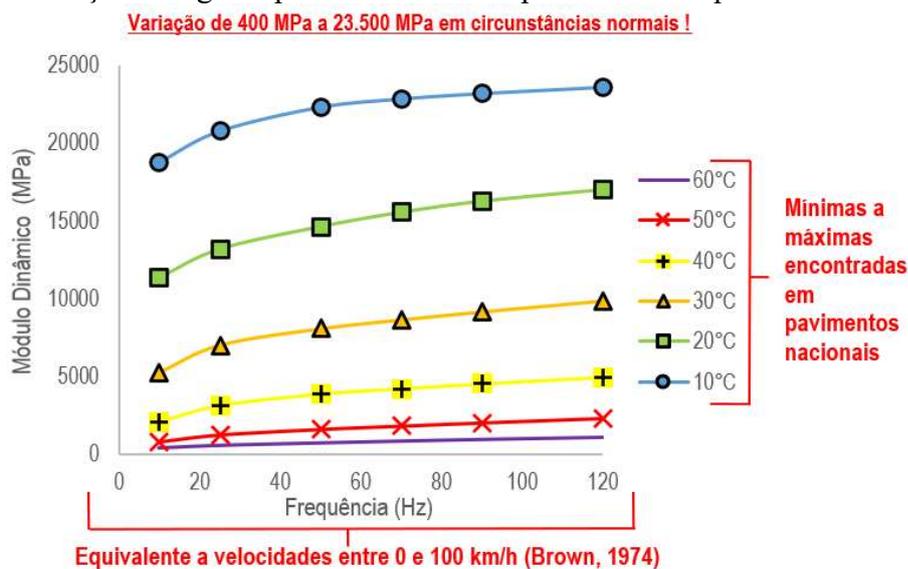
5.2.4 Velocidade de Tráfego, Clima e Intensidade de Tráfego

Antes de prosseguir com a demonstração dos resultados, uma pequena análise pode ser feita para avaliar-se o efeito da temperatura e da frequência de carregamento no $|E^*|$. A Figura 64 ilustra claramente a importância de se considerar parâmetros fundamentais de materiais viscoelásticos nas análises estruturais. As implicações de variações de tais

parâmetros, como pode ser observado, são, para um mesmo material, de mudanças na rigidez da ordem de 400 MPa à 23.500MPa, em cenários comuns para as rodovias brasileiras.

Tratando-se de uma análise de tensões-deformações elástico-linear, a variação esperada para um mesmo carregamento seria de deformações até 20 vezes maiores no caso com menor rigidez. Em uma estrutura convencional, os impactos são potencialmente extraordinários. Sugere-se como exemplo imaginar o efeito de mudanças de deformação da ordem de 20 vezes em elementos estruturais em outros tipos de estruturas, como de concreto Portland ou de aço: essas diferenças provavelmente determinariam o colapso de peças e elementos estruturais. A análise dada como exemplo, apesar de não se aplicar diretamente ao material viscoelástico do revestimento asfáltico numa estrutura de pavimento (inclusive porque a resistência à fadiga também muda drasticamente com a temperatura e a frequência), demonstra a importância de se considerar tais parâmetros em análise.

Figura 64 – Variação de rigidez para diferentes temperaturas e frequências de carregamento.



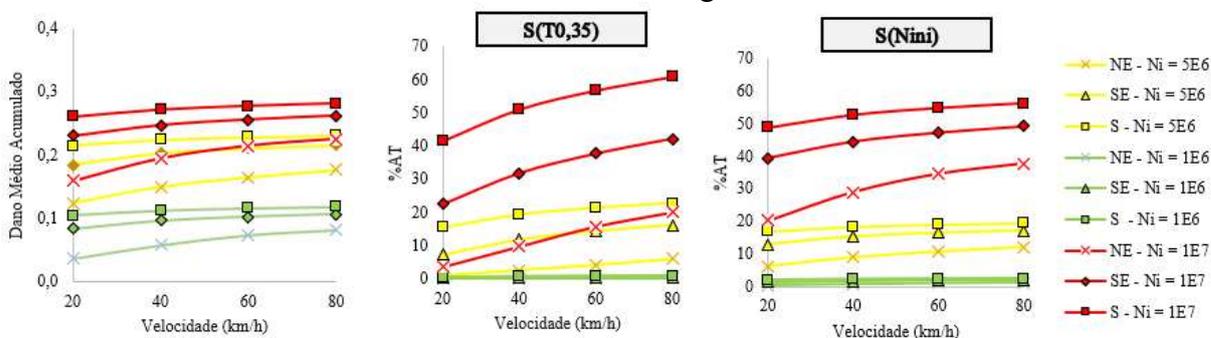
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta seção, optou-se por demonstrar apenas o resultado de uma mistura (M3) para a análise de sensibilidade à temperatura e tráfego. Os resultados para as demais misturas são apresentados no Apêndice C. Estão dispostos em quatro grupos de dados por mistura, cada grupo composto de dois a três gráficos.

O primeiro trio de gráficos (Figura 65) traz os resultados de D_{acm} e %AT, ora calibrado por $T_{0,35}$ ora por N_{ini} , para uma variação de velocidade em diferentes níveis de tráfego e climas. O trio seguinte de gráficos (Figura 66) traz os resultados de D_{acm} e %AT para uma variação de tráfego em diferentes climas. Nestes resultados, a linha contínua entre os climas é

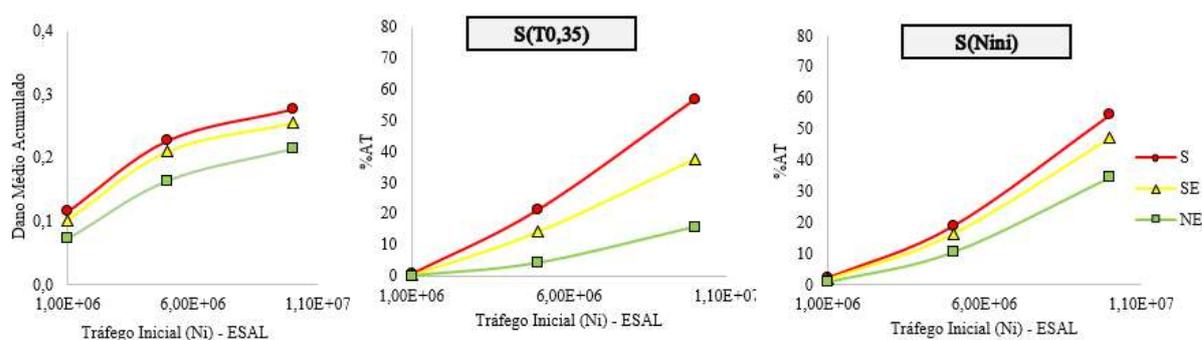
referente à transição entre as temperaturas mais quentes (da região Nordeste, com temperatura média anual de 25,5°C) e mais frias (da região Sul, com temperatura média anual de 18,8°C). Em seguida, é apresentado o trio de gráficos final (Figura 67), com resultados de D_{acm} e %AT para variação do clima em diferentes níveis de tráfego. Por fim, são apresentados os valores de $T_{0,35}$, ou seja, o mês na análise em que o D_{acm} alcançou o valor de 0,35, além do valor de $S(T_{0,35})$ correspondente. Este resultado é apresentado por nível de tráfego e tem o intuito de enriquecer as análises com avaliações de sua influência no comportamento da FT atualmente calibrada no CAP3D-D.

Figura 65 – Resultados de D_{acm} e %AT para variação da velocidade de tráfego em diferentes climas e níveis de tráfego – M3.



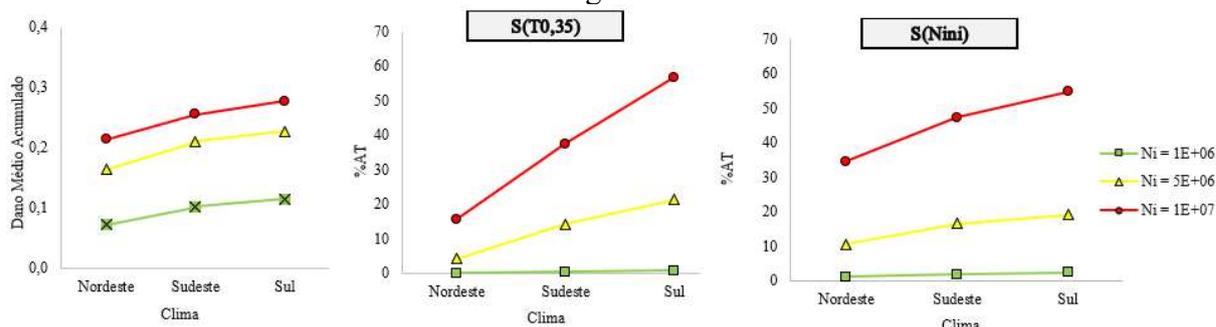
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 66 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para velocidade de 60km/h e variação de tráfego em diferentes climas – M3.



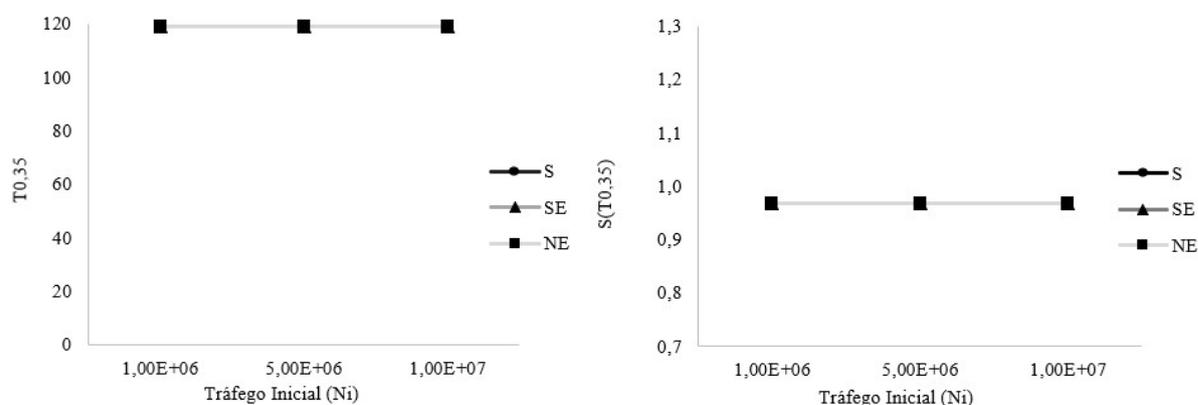
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 67 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 68 – Resultados de $T_{0,35}$ e de $S(T_{0,35})$ para variações de níveis de tráfego a 60km/h em diferentes climas - M3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser percebido na Figura 68, não houve variação nos valores de $T_{0,35}$ e, conseqüentemente, de S , para as variações de tráfego na M3. O resultado é observado devido ao fato dessa mistura apresentar pouca danificação de maneira geral, não atingido o valor de 0,35 após 120 meses nem nos casos mais extremos. Como pode ser visto no Apêndice C, nem sempre as misturas apresentam esse tipo de resultado. As Figuras 65, 66 e 67 também demonstram que, de maneira geral, climas mais frios proporcionaram maiores trincamentos, com variações na ordem de 1,38 vez em termos de D_{acm} e 3,8 vezes em termos de %AT. A Figura 65 indica que a variação de velocidade impactou menos significativamente que as variações de clima e de níveis de tráfego.

É apresentado na Tabela 13, em termos numéricos, o resultado de %AT($T_{0,35}$) final para as análises nos climas e velocidades variados e um tráfego inicial de $1E+06$. A Tabela 14 apresenta os resultados análogos, porém considerando um tráfego inicial mais pesado, de $5E+06$. Por fim, a Tabela 15 apresenta o mesmo tipo de resultados, porém com um tráfego

inicial ainda mais pesado, de $1E+07$. Cores são adicionadas aos resultados de %AT para que seja acrescido um critério de sensibilidade ao leitor. Quanto mais azul, menores os valores previstos, ao passo que quanto mais vermelhos, maiores os resultados.

Tabela 13 – Resultados de %AT final para os climas e velocidades variadas de acordo com o tráfego inicial de $1E+06$.

Misturas	Tráfego	Ni = $1E+06$											
	Clima	Nordeste				Sudeste				Sul			
	Velocidade (km/h)	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
M1	%AT	7,0	12,6	16,1	18,6	16,6	22,4	25,9	28,4	25,7	31,0	34,0	35,7
	D_{acm}	0,22	0,24	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,28	0,29	0,30	0,30
M2	%AT	0,2	0,8	1,5	2,2	2,2	4,7	6,6	7,9	7,1	10,3	12,3	13,8
	D_{acm}	0,11	0,14	0,16	0,17	0,17	0,20	0,21	0,22	0,22	0,23	0,24	0,25
M3	%AT	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,5	0,4	0,6	0,7	0,8
	D_{acm}	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08	0,10	0,10	0,11	0,10	0,11	0,12	0,12
M4	%AT	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,6	0,9	1,3	1,0	2,1	2,7	3,2
	D_{acm}	0,03	0,06	0,09	0,11	0,11	0,13	0,14	0,15	0,15	0,17	0,18	0,18
M5	%AT	45,0	69,0	79,9	79,4	80,4	80,0	81,9	82,0	82,7	83,7	85,4	87,0
	D_{acm}	0,31	0,34	0,35	0,36	0,36	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39
M6	%AT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	D_{acm}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M7	%AT	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,5	0,4	0,7	0,9	1,0
	D_{acm}	0,04	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,12	0,14	0,14	0,15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Resultados de %AT final para os climas e velocidades variadas de acordo com o tráfego inicial de $5E+06$.

Misturas	Tráfego	Ni = $5E+06$											
	Clima	Nordeste				Sudeste				Sul			
	Velocidade (km/h)	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
M1	%AT	63,5	77,4	73,5	73,3	74,0	74,6	75,3	77,3	76,5	80,7	83,8	85,1
	D_{acm}	0,34	0,36	0,37	0,38	0,37	0,39	0,39	0,40	0,39	0,40	0,41	0,41
M2	%AT	8,6	19,7	27,9	35,6	37,3	58,4	70,5	79,4	75,0	81,0	81,5	81,2
	D_{acm}	0,23	0,27	0,28	0,30	0,30	0,33	0,34	0,35	0,35	0,36	0,37	0,38
M3	%AT	1,0	2,6	4,2	5,9	7,2	11,7	14,2	16,0	15,5	19,2	21,2	22,6
	D_{acm}	0,12	0,15	0,16	0,18	0,18	0,20	0,21	0,22	0,21	0,22	0,23	0,23
M4	%AT	0,3	1,6	3,7	6,4	7,1	13,3	17,6	21,2	18,9	27,6	33,8	37,5
	D_{acm}	0,11	0,16	0,19	0,21	0,22	0,25	0,26	0,27	0,26	0,28	0,30	0,30
M5	%AT	65,3	75,6	88,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	D_{acm}	0,40	0,43	0,44	0,46	0,46	0,49	0,50	0,51	0,50	0,52	0,52	0,53
M6	%AT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	D_{acm}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
M7	%AT	0,6	1,6	2,9	4,3	5,3	8,9	11,2	12,8	12,3	16,3	18,8	20,5
	D_{acm}	0,13	0,16	0,18	0,20	0,20	0,23	0,24	0,24	0,24	0,26	0,26	0,27

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Resultados de %AT final para os climas e velocidades variadas de acordo com o tráfego inicial de 1E+07.

Misturas	Tráfego	Ni = 1E+07											
	Clima	Nordeste				Sudeste				Sul			
	Velocidade (km/h)	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
M1	%AT	68,3	65,0	63,9	65,5	67,1	72,4	79,0	85,9	81,4	95,5	100,0	100,0
	D_{acm}	0,37	0,39	0,40	0,40	0,40	0,42	0,43	0,43	0,43	0,45	0,46	0,47
M2	%AT	25,4	48,7	68,9	79,7	78,9	76,8	77,7	79,0	80,9	86,5	89,6	96,5
	D_{acm}	0,28	0,32	0,34	0,35	0,36	0,38	0,39	0,40	0,39	0,41	0,42	0,43
M3	%AT	3,5	9,7	15,7	20,1	22,5	31,8	37,6	42,0	41,4	51,0	56,7	60,9
	D_{acm}	0,16	0,19	0,21	0,22	0,23	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28
M4	%AT	1,3	5,7	11,3	15,8	17,5	30,5	41,4	48,6	44,1	59,3	67,9	73,7
	D_{acm}	0,15	0,21	0,24	0,25	0,26	0,29	0,31	0,32	0,31	0,33	0,34	0,35
M5	%AT	71,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	D_{acm}	0,43	0,47	0,50	0,52	0,52	0,54	0,55	0,56	0,55	0,57	0,58	0,58
M6	%AT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	D_{acm}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
M7	%AT	2,2	6,1	9,8	12,6	14,8	21,9	26,8	30,8	30,4	40,0	45,0	48,1
	D_{acm}	0,17	0,21	0,23	0,24	0,25	0,27	0,28	0,29	0,29	0,31	0,31	0,32

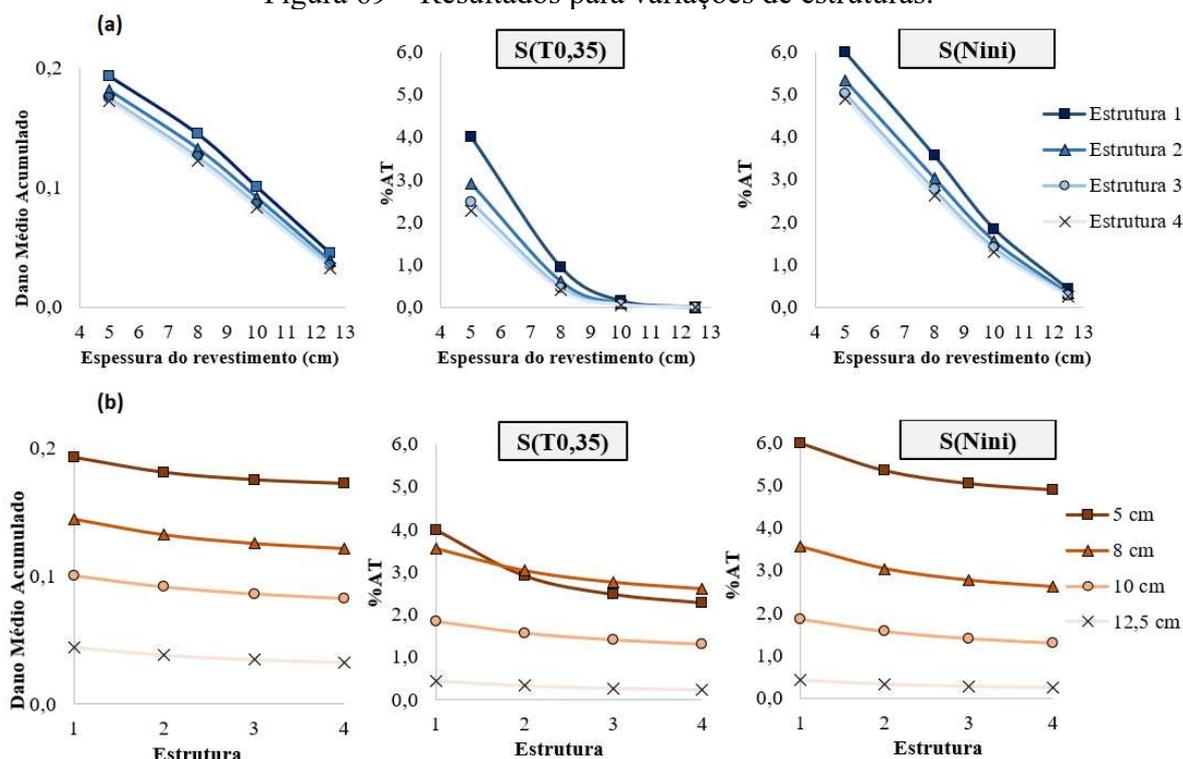
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados de dano mostram uma unanimidade: tráfegos mais intensos, climas mais frios e velocidades maiores resultaram em maiores níveis de danificação nas misturas. A taxa de variação do dano com os meses para cada mistura testada mostra que, de maneira geral, a intensidade de tráfego influenciou mais o D_{acm} , seguido pelo clima e, por fim, pela velocidade de tráfego. Além disso, em níveis de tráfegos maiores, o efeito do clima passou a ser flagrante, e o da velocidade bastante perceptível.

5.2.5 Análise de sensibilidade para variações na estrutura

Os resultados para variação da estrutura, em termos de espessura do revestimento e das camadas granulares, são apresentados em duas etapas. Primeiramente, na Figura 69 (a) são apresentados os resultados de D_{acm} , de %AT em função de $S(T_{0,35})$ e de %AT em função de $S(N_{ini})$, respectivamente, da esquerda para direita. O eixo “x” apresenta a variação de espessura do revestimento em cm. São analisadas as quatro variações de estruturas de camadas granulares. A estrutura 1 representa a espessura de base e sub-base de 15 cm cada, a estrutura 2 de 20cm, a estrutura 3 de 25 cm e a estrutura 4 de 40 cm. Na Figura 69 (b) são demonstrados os mesmos parâmetros, na mesma ordem, porém com a variação de estrutura no eixo “x”, para diferentes espessuras de revestimento. Assim, com maior valor da estrutura no eixo “x”, tem-se o aumento da espessura do conjunto base e sub-base em análises (estrutura de camadas granulares mais robusta).

Figura 69 – Resultados para variações de estruturas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser percebido, a variação de espessura do revestimento impactou mais nos resultados de D_{acm} e %AT que a variação de espessura das estruturas de camadas granulares. O fato é esperado dada a maior capacidade de absorção dos esforços por parte da camada em contato direto com a carga (roda no pavimento). As variações de até 7,5cm na espessura do revestimento proporcionaram até 12 vezes menos %AT(N_{ini}) e 40 vezes menos %AT(T_{0,35}). Além disso, para uma mesma espessura de revestimento foi observada pouca mudança nas respostas para variações das espessuras das camadas granulares, principalmente nos casos de revestimentos mais espessos. As variações das estruturas proporcionaram mudança na %AT(T_{0,35}) em até 1,6 vez e 1,2 vez em %AT (N_{ini}). Deixa-se claro que as variações de espessuras, tanto em revestimento como em camadas granulares, utilizaram rigorosamente os mesmos dados de entrada de rigidez e parâmetros de fadiga, além de tráfego e clima.

Foi observado que a variação da estrutura, mais evidente na Figura 69 (b), foi mais impactante nas repostas de parâmetros de D_{acm} e %AT em revestimentos mais delgados (5cm). Isso pode ser explicado pelo fato de revestimentos mais espessos amortecerem mais as solicitações, o que implica em menos transmissão de esforços às camadas granulares e, conseqüentemente, menos dependência destas para a ocorrência da fadiga.

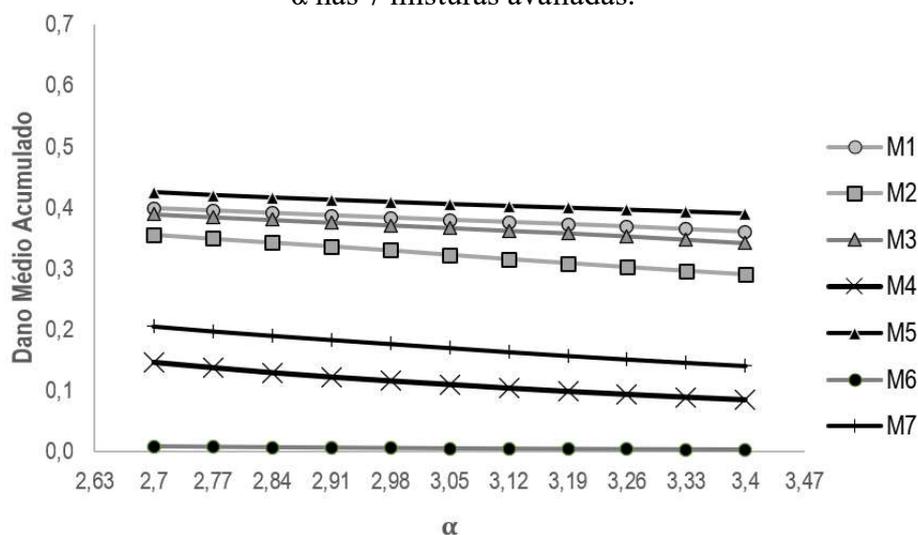
5.2.6 Variações para parâmetros da modelagem S-VECD: C_{11} , C_{12} , γ , Δ e α .

Primeiramente, são apresentados os resultados para as variações nos parâmetros α ; C_{11} e C_{12} ; γ e Δ da curva $G^R(N_f)$ nos itens subsequentes. Comentários sobre a análise de cada parâmetros são descritos por itens apresentados.

a) Variações de α

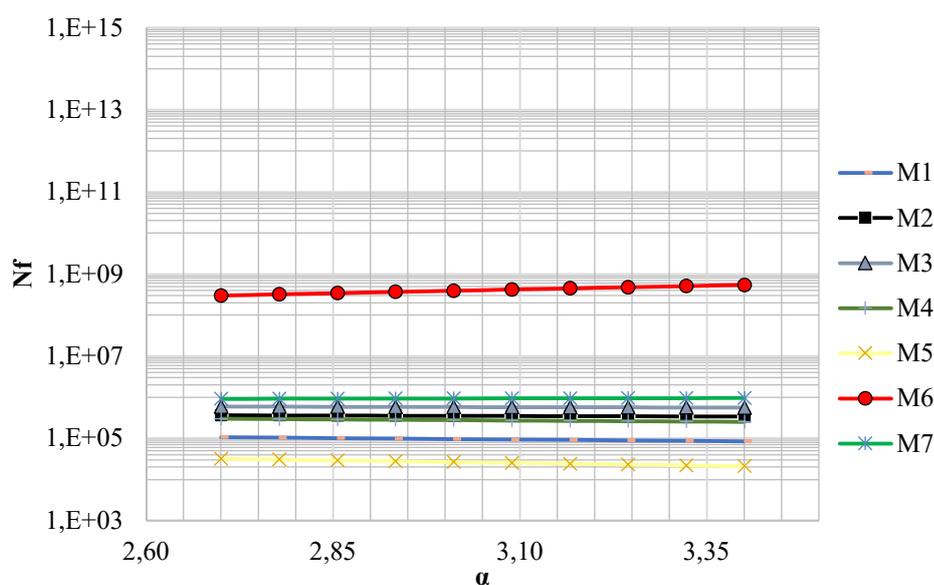
De maneira geral, observa-se, na Figura 70, que o incremento de α implica na diminuição dos valores de D_{acm} obtidos. Entretanto, observa-se pequenas variações dos valores de D_{acm} em comparação com as variações dos demais parâmetros, dentro dos valores testados na análise de sensibilidade. Ou seja, a Equação 19 proposta por Nascimento (2015) para cálculo da vida de fadiga à luz do S-VECD mostrou-se pouco sensível à variação de α , em um espectro de variação entre 2,70 e 3,40 deste parâmetro. O mesmo pode ser observado na Figura 71, em termos de N_f a uma deformação de $150\mu\text{m/m}$ (*micro-strains*), frequência de carregamento de 10Hz e temperatura de 25°C , para todas as misturas. Esta variável indica uma sensibilidade de até 1,81 vez para o espectro de variação escolhido de α . Vale ressaltar que o espectro de variação escolhido para as análises de senilidade neste item foi arbitrado com base nas 7 misturas selecionadas para análises, portanto, demonstrando valores práticos e reais de variações.

Figura 70 – Resultados de Dano Médio Acumulado ao fim de 120 meses para as variações de α nas 7 misturas avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor

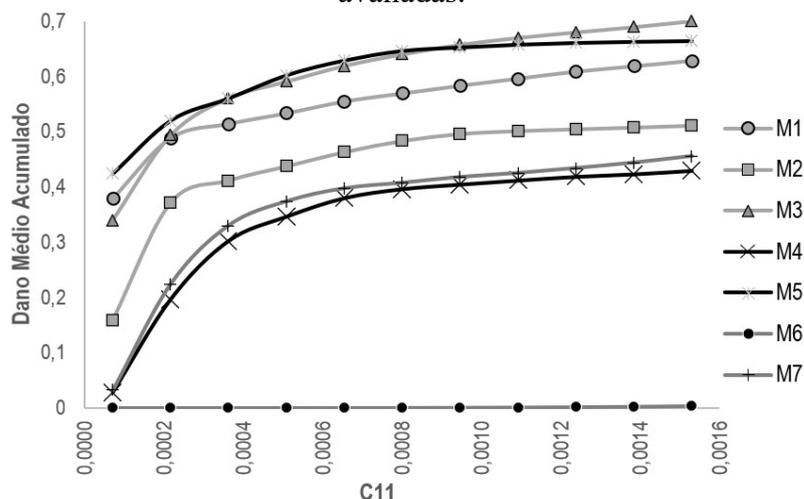
Figura 71 – Variações de N_f em função de α a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m}/\text{m}$.



b) Variações de C_{11} da curva $C(S)$

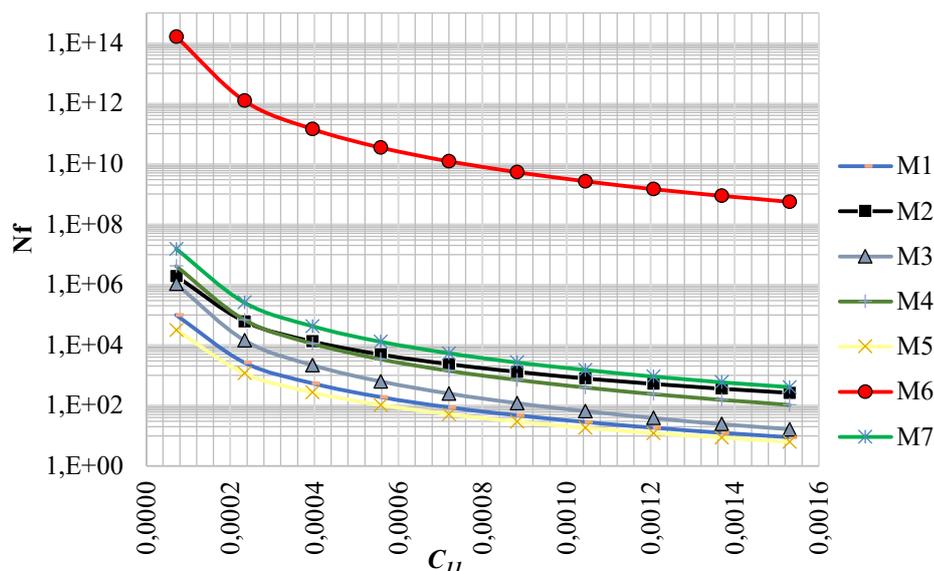
Para variação do parâmetro C_{11} da curva $C(S)$, observa-se, na Figura 72, que, de maneira geral, maiores valores deste parâmetro implicam em maiores valores de D_{acm} . Ainda, para valores menores que 0,0003 de C_{11} , qualquer variação possui grande impacto no resultado de D_{acm} . Isto tende a estabilizar com menores taxas de variação para valores maiores que 0,0003. Observa-se, novamente, que M6 continuou sem apresentar danificação ($D_{acm} = 0$), dada a sua elevada vida de fadiga (como demonstrado nas curvas de Wöhler, na Figura 49). A Figura 73 indica os resultados dessa variação em termos de N_f . É possível observar que há uma variação de até $1\text{E}+06$ vezes em N_f para o espectro de variação escolhido em C_{11} . Entretanto, a variação mais evidente (de até 1000 vezes) está nas variações de 0,0001 a 0,0003 de C_{11} .

Figura 72 – Resultados de D_{acm} ao fim de 120 meses para as variações de C_{11} nas 7 misturas avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 73 – Variações de N_f em função de C_{11} a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m/m}$.

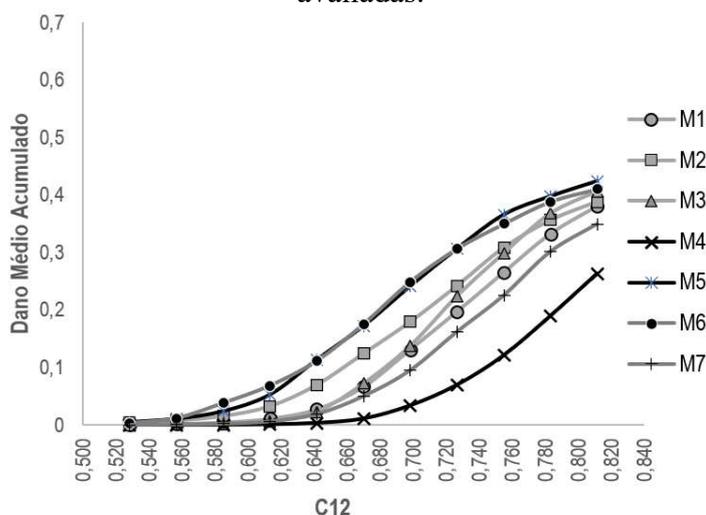


Fonte: Elaborado pelo Autor.

c) Variações de C_{12} da curva $C(S)$

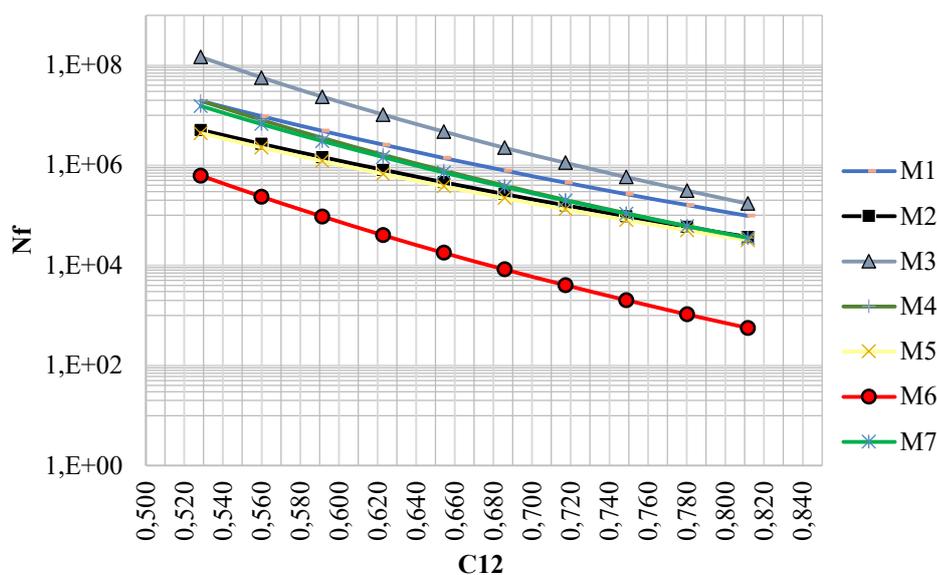
Para variações do parâmetro C_{12} , de maneira geral, quanto maior o valor deste parâmetro, maior o resultado de D_{acm} . É possível identificar que a curva tende a ter maior taxa de variação a partir de valores entre 0,620 e 0,760 de C_{12} . A mistura M6 apresenta danificação no cenário de incremento desse parâmetro. Isso comprova que o baixo valor de C_{12} (M6 apresenta o menor valor dentre as misturas) tem grande influência nos valores de N_f e, conseqüentemente, de D_{acm} . A Figura 75 apresenta os resultados de N_f para o espectro de variações de C_{12} escolhido. Observa-se uma variação de até 1.000 vezes em N_f , em M7.

Figura 74 – Resultados de D_{acm} ao fim de 120 meses para as variações de C_{12} nas 7 misturas avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 75 – Variações de N_f em função de C_{12} a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m/m}$.

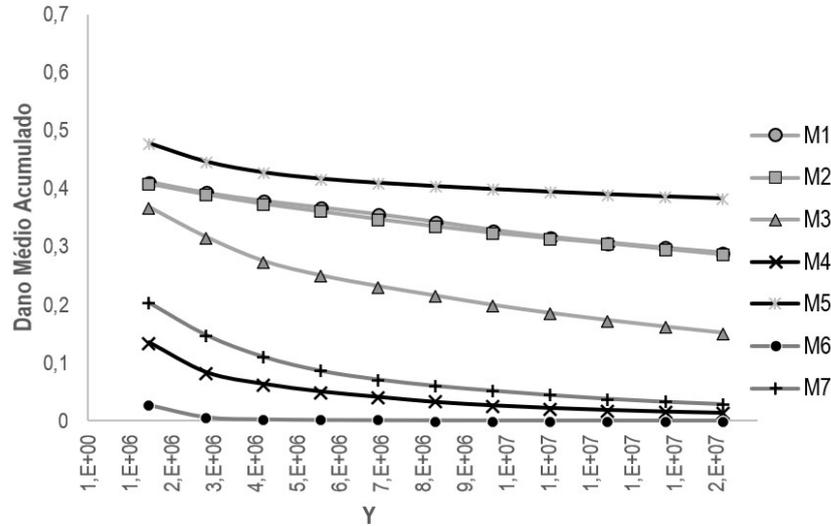


Fonte: Elaborado pelo Autor.

d) Variações de γ da $G^R(N_f)$

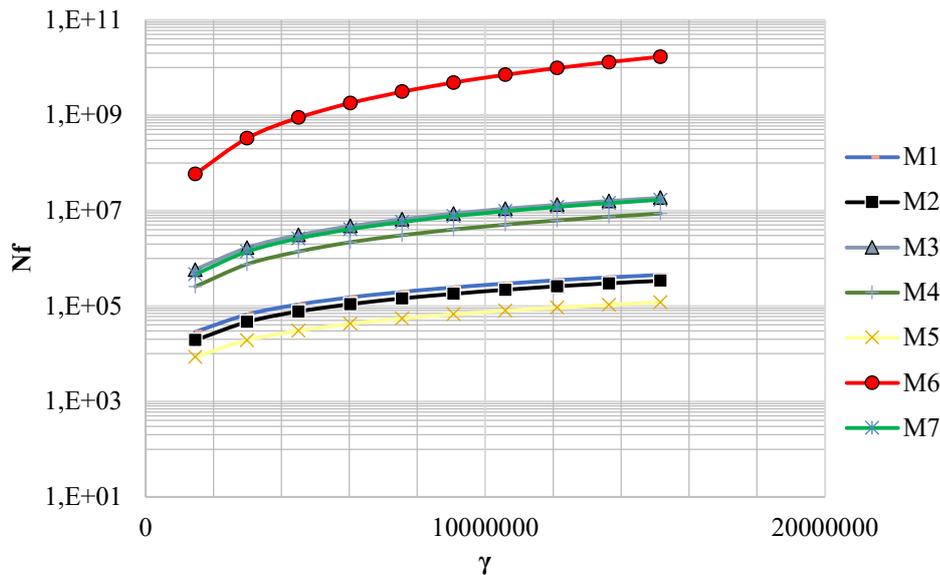
Quanto ao parâmetro γ da $G^R(N_f)$, de acordo com os resultados apresentados na Figura 76, este parâmetro, comparado aos demais, teve menor impacto nos resultados de D_{acm} . Além disso, observa-se menores valores nos resultados com o crescimento dos valores de γ no espectro testado de valores de $1\text{E}+06$ a $2\text{E}+07$ deste parâmetro. A Figura 77 apresenta as variações de γ em termos de N_f . Observa-se uma sensibilidade de até a ordem de 1.000 vezes nesta variável.

Figura 76 – Resultados de D_{acm} ao fim de 120 meses para as variações de γ nas 7 misturas avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 77 – Variações de N_f em função de γ a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m}/\text{m}$.



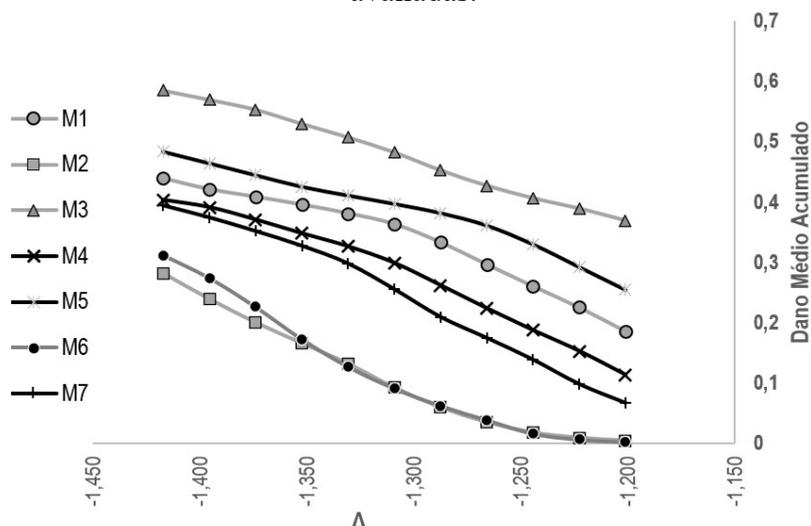
Fonte: Elaborado pelo Autor.

e) *Variações de Δ da $G^R(N_f)$*

As variações de Δ , como observado na Figura 78, demonstram, de maneira geral, que incrementos deste parâmetro tenderam a diminuir os valores de D_{acm} continuamente nos valores testados. Para melhor ilustrar essa situação, o leitor é referido aos resultados das variações de C_{11} , na Figura 72. Nela é possível perceber que apesar dele influenciar significativamente os valores de D_{acm} nas variações iniciais (até valores de 0,0003), depois é percebido uma baixa taxa de variação. A variável também demonstrou afetar bastante os valores

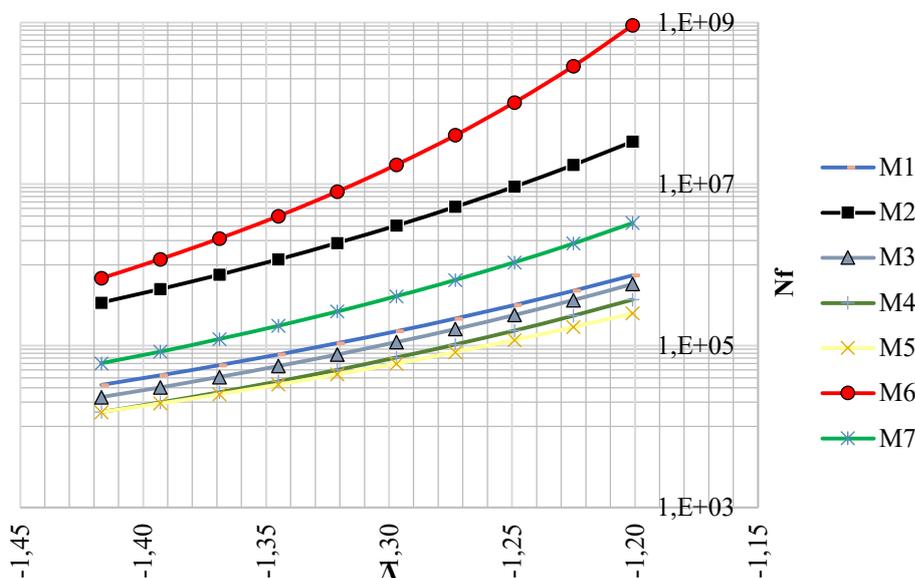
de D_{acm} . A Figura 79 apresenta os resultados de N_f para as variações de Δ utilizadas. Observa-se uma sensibilidade na ordem de até 10.000 vezes em N_f , em M6, neste caso

Figura 78 – Resultados de D_{acm} ao fim de 120 meses para as variações de Δ nas 7 misturas avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 79 – Variações de N_f em função de Δ a 10Hz, 25°C e 150 $\mu\text{m/m}$.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.2.7 Variações para o parâmetro da modelagem do carregamento no S-VECD: β

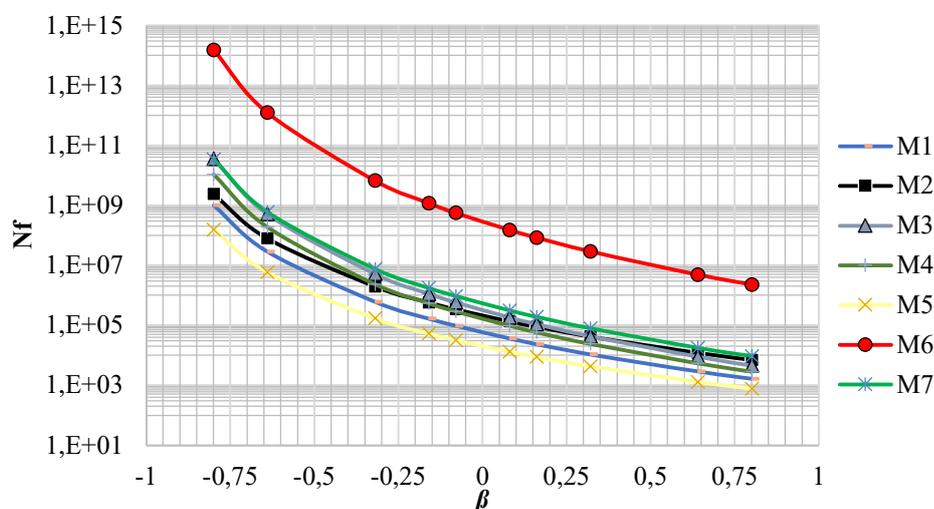
Os resultados para variações do parâmetro β são apresentados em termos de vida de fadiga (N_f), como explicado na Seção 4.8 do capítulo de Materiais e Métodos. Os resultados por mistura para vários níveis de deformação estão apresentados no Apêndice D. A Figura 80 traz os resultados de N_f para uma deformação de 150 $\mu\text{m/m}$ (*micro-strains*), frequência de carregamento de 10Hz e temperatura de 25°C, para todas as misturas. Como observado, valores

positivos maiores de β implicam em menores vidas de fadiga. Isto é de se esperar, visto que valores de positivos de β implicam em maiores parcelas de tração que, em última instância, é responsável por danificar efetivamente o material, segundo o modelo S-VECD.

Algumas análises mais aprofundadas podem ser realizadas a partir dos resultados apresentados. A Equação 21 demonstra o cálculo do parâmetro β , ao passo que a Figura 21 demonstra os picos de carregamento. Por essas referências, é possível identificar que o valor usualmente encontrado em ensaios para este parâmetro, sugerido por Nascimento (2015), de -0,08, implica um pico de compressão 17% maior em comparação ao pico de tração. Para duplicar o valor de β matematicamente, ou seja, para -0,16, o pico de compressão precisa ser 38% maior em relação ao pico de tração, 21% maior que o pico para β de -0,08.

O cálculo do parágrafo anterior é simétrico, ou seja, o incremento de picos de tração em relação aos picos de compressão gera efeitos em mesmas proporções nos valores positivos de β . Tomando como exemplo a comparação da variação de 21% do pico de compressão em relação ao de tração ($\beta = -0,16$ em relação a -0,08), tem-se um aumento da vida de fadiga de 65% para a mistura menos sensível (M5) e de 110% na mistura mais sensível (M6) a esse fator do carregamento. A variação de sensibilidade de misturas é devido ao fato do cálculo de N_f envolver parâmetros inerentes ao material. O parâmetro β é inerente ao carregamento do tráfego, que é uma dos fatores talvez menos considerados com o devido rigor na lógica dos sistemas em construção no Brasil (Soares, 2020). Tomando exemplos em valores positivos de β , como de 0,08 para 0,16, a vida de fadiga cai 32% em M5 e 44% em M6.

Figura 80 – Variação do parâmetro β para as 7 misturas a 10Hz, 25°C e 150 μ sT.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A atenção que a presente pesquisa traz para a importância do parâmetro β deve ir além da sensibilidade de N_f a seus valores. O leitor é referido à Figura 9, que demonstra os diferentes estados de tensão em distintos elementos no pavimento com a passagem da carga. É de se imaginar que, na prática, diversas proporções entre picos de tração e compressão sejam obtidas em diversos pontos do revestimento. Isto implicaria em uma ampla gama de valores de β na análise, quando é considerado cada ponto da malha. Como mencionado no item 3.7.4 do capítulo de Revisão Bibliográfica, essa possibilidade de diversos valores de β em simulação ainda não foi explorada na literatura, assumindo-se normalmente um valor fixo em toda a estrutura.

Acredita-se ser possível que alguma situação intermediária possa ser encontrada, em que este parâmetro seja usado nas simulações como as aqui apresentadas de modo mais consistente com as tensões que de fato são observadas no revestimento em cada situação particular. Já se dispõe das ferramentas e do conhecimento para este tipo de exploração e os resultados apresentados nesta pesquisa da UFC deixam claro que não se pode simplesmente ignorar a relevância da variação deste parâmetro. O maior impedimento para uma exploração mais aprofundada neste momento é o desconhecimento mais preciso das cargas mecânicas do tráfego nos pavimentos nacionais, algo que o país precisa se organizar para obter, pelo menos de forma amostral.

5.2.8 Considerações finais de análises

Em consonância com os objetivos estabelecidos da presente pesquisa, neste item é apresentado um sumário de discussões e observações acerca dos resultados obtidos: (i) análise de sensibilidade ambiental e da estrutura; (ii) análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo S-VECD. São discutidas considerações sobre a análise de variação de %AT para variações na temperatura, velocidade e nível de tráfego; e considerações sobre as variações de D_{acm} e N_f para variações nos parâmetros S-VECD.

5.2.8.1 Análise de sensibilidade ambiental e da estrutura

As temperaturas escolhidas para o estudo de sensibilidade, representantes das regiões Nordeste, Sudeste e Sul, mostraram impactos significativos nos resultados de D_{acm} e de %AT previstas. Como demonstrado nas Tabelas 14, 15 e 16, os valores de D_{acm} variaram de 1,5 a 3 vezes entre os cenários de menores danificações, como clima do Nordeste com velocidade de 20km/h e tráfego inicial de 1E+06, aos de maiores danificações, com clima do Sul, velocidade de 80km/h e tráfego inicial de 1E+07.

As variações de tráfego ensejam conclusões relevantes. Quando os objetivos do presente estudo foram definidos, a pesquisa inicial visava avaliar o efeito da velocidade na previsão de defeitos, como demonstrado por Santos (2019). Com o avanço do conhecimento sobre a lógica do método, incluiu-se a variação de tráfego inicial, definido como nível de tráfego, em termos de eixos padrões. As variações desse parâmetro, entre $1E+06$ e $1E+07$, resultaram em variações de 1,38 a 4,00 vezes nos valores de D_{acm} , e em até 75 vezes em termos de %AT. Além do nível do tráfego, a velocidade também demonstrou interferência significativa nos valores previstos de dano e %AT, entre 1,05 a 1,97 vez os valores de D_{acm} em velocidades mais altas comparadas às mais baixas (80km/h vs. 20km/h). Esta percepção é importante para apontar que, para rodovias projetadas rigorosamente para os mesmos parâmetros de tráfego (número de passagens do eixo padrão) e materiais, pode-se ter projetos destoantes quando em situações diferentes de velocidade, como trechos em vias urbanas ou postos de parada de pesagem, em comparação com trechos de vias livres em pistas duplas.

5.2.8.2 *Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo S-VECD*

O estudo das variações dos parâmetros da modelagem S-VECD contribuíram para o entendimento físico do modelo, isto é, seus efeitos nos resultados de vida de fadiga. A modelagem ainda é bem pouco difundida, mesmo na comunidade científica no Brasil, e carece de mais aprofundamento, até porque o nível de detalhamento na análise aqui conduzida não é encontrado, mesmo na literatura internacional. A viabilidade de utilização da modelagem com ensaios mais avançados, e.g., o TD via protocolo da AAHSTO TP 107 (AASHTO, 2018), possibilita a obtenção de curvas características e critérios de falha fundamentais. Este uso aliado a programas computacionais com as devidas rotinas implementadas para as considerações da modelagem facilitará a difusão do tipo de lógica de dimensionamento como a que foi explorada nesta dissertação. Trata-se, portanto, de um sistema de dimensionamento com lógica viável desde que alguns cuidados sejam tomados, sobretudo na ampliação da base de dados existente e na consolidação das simulações de fato mais adequadas. Estas precisam ainda ser progressivamente validadas por meio de projetos reais, pois apenas estes últimos darão a confiança necessária para o salto que o país almeja em termos de um método de projeto de pavimentos asfálticos.

Em termos de sensibilidade, o parâmetro Δ da curva $G^R(N_f)$ mostrou-se o de maior interferência nos resultados de D_{acm} . Além disso, os valores de α , inicialmente suspeitos de

proporcionarem mudanças significativas nos resultados de danificação, mostraram-se de baixa interferência.

O estudo do parâmetro β enseja importantes discussões quanto a possibilidade de variação de seus valores em simulação, método ainda não implementado na lógica de sistemas avaliados na presente pesquisa. A sensibilidade de N_f aos valores de β , demonstrada na Figura 80, enaltece a carência de aprofundamento da capacidade de simulação deste parâmetro, com variações de mais de 100.000 vezes nos valores de vida de fadiga entre extremos práticos dos valores de β , ou seja, entre valores possíveis de obtenção, a depender do estado de tensão do ponto da análise estrutural no pavimento.

Entre as contribuições que a presente pesquisa possa eventualmente trazer para o avanço do conhecimento, algo que saltou ao autor e ao grupo envolvido foi que na busca da compreensão da totalidade de uma realidade, por meio de ensaios mais sofisticados e de uma modelagem consistente, além de dados possíveis de trincamento em campo, deve-se examinar com uma lupa as diversas variáveis que costumam no modelo. Afinal, um só dos itens pode ter grande impacto no resultado final pretendido. Há ainda um grande número de sub-realidades dentro do problema de pesquisa a serem estudadas. O parâmetro β , entre outros itens para os quais os resultados chamaram atenção, abrirá novas portas para a melhoria contínua da compreensão da complexa evolução de danos nos pavimentos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Principais contribuições desta dissertação

A principal contribuição da pesquisa correspondente a esta dissertação está relacionada ao alcance de seu objetivo geral: aprofundar os conhecimentos sobre os métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos, utilizando parâmetros de ensaios que consideram os modelos de base física hoje mais reconhecidos pela literatura como compatíveis com as propriedades viscoelásticas de materiais asfálticos. A dissertação apresenta dados que conferem ao leitor a sensibilidade do efeito de cada parâmetro de modelo nas previsões de dano (análise mecanística) e de área trincada (análise mecanística-empírica) em pavimentos, levando em conta o tráfego (velocidade e volume) e o clima (temperatura).

Durante a realização das análises de sensibilidade, alterações na rotina do programa CAP3D-D, utilizado como ferramenta de cálculo de análise estrutural e obtenção do valor de Dano Médio no revestimento, foram necessárias. As alterações foram estudadas devido a observação de alterações significativas nos valores de Dano Médio Acumulado (D_{acm}) após transformação em Dano Médio Reduzido ($D_{red,s}$), passo empírico do método. Essas alterações implicavam em grande interferência nas análises mecanísticas, demonstrando que cenários que apresentavam maior danificação não necessariamente apresentavam maior área trincada (%AT). Tais inconsistências foram mitigadas após as modificações na nova versão do CAP3D-D. Essa é outra contribuição importante desta dissertação, visto que não é incomum que analistas misturem equações de calibração que não correspondem ao sistema de dimensionamento adotado (hipóteses simplificadoras), o que é um erro lógico. Melhorias sistemáticas no sistema de dimensionamento requererão novas calibrações, e cada calibração deve corresponder apenas ao conjunto de hipóteses utilizadas. Em outras palavras, a cada versão de um *software* de análise/dimensionamento corresponde um conjunto de equações empíricas (ajuste do dano e Função de Transferência). Espera-se que isso tenha ficado claro com os dados apresentados e que a dissertação tenha contribuído para uma melhoria do uso de sistemas de dimensionamento de pavimentos no estado da prática.

As alterações nas rotinas do programa implicaram na obtenção de uma nova Função de Transferência (FT), visto que a função até então implementada no CAP3D-D havia sido calibrada dentro de outra rotina (Santiago, 2017), sendo outra versão do *software* CAP3D-D. O

trabalho necessário à obtenção de uma nova FT levou a estudos mais detalhados quanto aos fatores para calibração da Função S, responsável por transformar o D_{acm} em D_{red_s} , sendo este último parâmetro utilizado efetivamente como entrada na FT. Ou seja, há dois passos empíricos no sistema de dimensionamento atual: (i) redução do dano (D_{acm}) transformando-o em dano reduzido (D_{red_s}); e (ii) associação do dano reduzido (D_{red_s}) à área trincada (%AT) observada em campo.

A calibração das novas funções utilizou 23 trechos monitorados no âmbito da RTA, escolhidos dentre uma base de 30 trechos, eliminando aqueles com duas camadas asfálticas, ou que apresentaram falhas já durante execução, ou, ainda, que apresentavam base com material fresado. Os parâmetros estudados para a calibração da nova Função S foram: (i) $T_{0,35}$, que é o mês, em simulação, em que o D_{acm} atinge o valor de 0,35; (ii) N_{ini} , que é o tráfego total acumulado após 12 meses de simulação, chamado de tráfego inicial, em termos de número de passagem de eixos padrões; e (iii) remoção do fator S (eliminação do passo i empírico explicado no parágrafo anterior), sendo a %AT obtida diretamente a partir da aplicação da FT sobre os valores de D_{acm} . A maior correlação obtida entre a %AT prevista e %AT observada em campo foi em (ii) ($R^2 = 0,94$), seguido de (i) ($R^2 = 0,76$). Correlações insatisfatórias foram encontradas em (iii) ($R^2 = 0,53$), com erros significativos dentre os valores estimados e observados em campo de %AT.

Apesar de maior correlação obtida em (ii), foi observado que a FT deste caso tendeu a apresentar resultados subestimados em situações de trincamento superior a 40%, ao passo que apresentou resultados superestimados em situações de trincamento inferiores a 40%. Ainda, observou-se, neste caso, uma tendência de erros absolutos grandes (superior a cinco vezes) em níveis baixos de trincamento. Assim, suspeita-se que o indicador de correlação, R^2 , esteja “mascarado” pelo fato de grandes erros em valores baixos de %AT não interferirem tanto no valor deste indicador. Como a nível de projeto a precisão para valores de %AT por volta de 20 ou 30% é mais importante (critério utilizado para o dimensionamento), optou-se pela FT obtida em (i), usando $T_{0,35}$ (mês, em simulação, em que o D_{acm} atinge o valor de 0,35).

O processo de obtenção de uma nova Função S e uma nova FT ensejaram várias análises nos métodos aplicados por Nascimento (2015), Fritzen (2016) e Santiago (2017) para calibração. Dentre as principais adaptações realizadas, a utilização do mesmo número de pontos de observação por Trecho Experimental (TE) foi discutida na Seção 4.2. O método escolhido iguala os pesos dos trechos na calibração, evitando que um trecho com maior número de observações ao longo do tempo, e que eventualmente apresente vícios nas coletas de dados ou

problemas estruturais de execução, interferiram com maior peso na calibração. Como 10 TEs apresentavam apenas 1 ponto de observação de %AT em campo, o número de 1 ponto por trecho foi escolhido. Levantou-se o questionamento que este método, por limitações dos dados disponíveis, ignora o histórico de evolução de %AT por trecho, utilizando apenas o último mês de coleta para calibração da FT. Entretanto, por existirem trechos com distintos meses de observação final, como mês 12, 32, 58, 64 e 108, e variações de 0,00 a 84,33% de AT, os dados continham significativa heterogeneidade.

Decidiu-se por não se proceder a uma análise de validação das FTs calibradas, devido à pequena quantidade de dados de trechos escolhidos (23 trechos) e pontos em cada trecho (resultantes da utilização de apenas 1 ponto por TE no processo de calibração). Apesar de ainda não apresentar validação (algo que requer maior quantidade de dados, reforçando a necessidade de acompanhamento de mais trechos no país), sublinha-se o alto coeficiente de determinação (R^2) dos valores previstos com os dados observados disponíveis. Isso deu confiança às previsões, principalmente para maiores valores de %AT. O leitor é referido ao item 5.2.1 quanto a discussões particulares em relação a possíveis altas correlações com erros grandes em valores baixos de previsão de %AT.

Além das limitações do número de pontos de %AT por TE, a restrição dos valores dos coeficientes da Função S e o uso de também deu origem a importantes conclusões. Foi observado que a Função S até então implementada no CAP3D-D alterava significativamente os valores de D_{acm} . A limitação dos coeficientes tende a minimizar a interferência empírica nos resultados mecanicistas. Apesar de proporcionar maiores valores de correlação R^2 com o uso de coeficientes não limitados, ressalta-se que a não adoção dessa estratégia pode proporcionar algumas anomalias nas análises de %AT finais, conforme demonstrado em detalhe na Seção 4.2, observado na versão anterior do CAP3D-D, algo que deve ser evitado nos *softwares* de dimensionamento. Vale relembrar que as anomalias se referem a diminuições de %AT previstas para situações de aumento do D_{acm} entre cenários, como, por exemplo, com aumento do tráfego inicial, o que se confirmou ser fruto da transformação de D_{acm} em D_{red_s} , sem a adequada limitação de valores dos coeficientes dessa transformação.

O estudo de parâmetros atualmente não considerados no método apoiado pelo DNIT (MeDiNa), como Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e ensaios de fadiga por Tração-compressão Uniaxial Direta (TD), mostrou-se relevante nas respostas de %AT. Tal achado é bastante relevante para decisões sobre a eventual proposição definitiva de um método, pois, como demonstrado nos resultados das análises de sensibilidade para variações de clima (Nordeste,

Sudeste e Sul), há alterações nas %AT finais da ordem de 5 vezes em comparações com climas quentes e frios compatíveis com regiões brasileiras. Mesmo descartando o teor de empirismo das análises e olhando apenas para o parâmetro de D_{acm} , as diferenças obtidas para variações de clima são significantes, em até 43%. Fica claro que, num país como o Brasil, a não inclusão de efeitos de clima compromete a qualidade do dimensionamento. Isso é confirmado pelos dados apresentados nesta pesquisa, mas é um resultado já consagrado na literatura internacional há décadas e deve ser considerado no dimensionamento adotado no nosso país.

A análise de sensibilidade também demonstrou que a variação de temperatura (correspondentes aos climas Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil) impacta mais na danificação que a variação da velocidade de tráfego (de 20 a 80km/h), dados os intervalos adotados nas análises, que foram escolhidos por serem comuns em pavimentos brasileiros. A variação do nível de tráfego, isto é, a quantidade de passagens de carga, em termos de tráfego inicial (1E+06 a 1E+07), todavia, demonstrou levar aos maiores impactos nas danificações dos materiais, em até 48 vezes em termos de %AT e em até 2 vezes em termo de D_{acm} . Este aspecto é particularmente importante pois deve encorajar a comunidade de pavimentação nacional, que segue regras sugeridas pelo DNIT, a continuar incrementando a sua base de dados, mas, sobretudo, a ter um olhar mais cauteloso para os dados de tráfego, incluindo o peso dos eixos. Fica clara a necessidade do controle da quantidade de veículos e das cargas por eixo.

Os aprofundamentos realizados em estudos da modelagem S-VECD também trouxeram à luz questões consideradas bastante importantes. A variação dos principais parâmetros advindos de ensaio de tração-compressão direta (TD), como da curva característica do dano ($C(S)$ e o critério de falha $G^R(N_f)$), o parâmetro de evolução do dano, α (advindo da caracterização viscoelástica linear) além da variação de parâmetro advindo do histórico de carregamento, β , mostraram impactos significativos nos resultados de D_{acm} e N_f . Em termos absolutos, o parâmetro C_{11} da curva $C(S)$ foi o que mais modificou os valores de D_{acm} , em até 48 vezes. Apesar do grande impacto absoluto, percebe-se, pelos resultados apresentados no item 5.2.6 do Capítulo de Resultados e Análises, que a grande influência deste parâmetro é acentuada nas variações entre 0,0001 e 0,0004, que resultaram em mudanças em 34 vezes o valor de D_{acm} . Em variações superiores, de 0,0004 a 0,0016, percebeu-se uma modificação de D_{acm} em apenas 1,16 vez. O parâmetro Δ da curva do critério de falha, $G^R(N_f)$, entretanto, alterou em até 31 vezes os valores de D_{acm} , não apresentando tais “localizações” para intervalos específicos de variação, como em C_{11} . O incremento do parâmetro α mostrou influenciar os

valores de D_{acm} linearmente, em reduções de até 0,58 vez deste parâmetro, apresentando a menor interferência nos valores de D_{acm} dentro da análise de sensibilidade realizada.

Particularmente, a análise do parâmetro β foi esclarecida como uma contribuição inédita deste trabalho. Não se tem conhecimento dessa análise em outras publicações, tendo sido levantados aspectos importantes quanto à limitação de se considerar um valor fixo de β nas previsões de área trincada como é feito atualmente, não apenas no CAP3D-D. Além disso, o parâmetro Δ da curva $G^R(N_f)$ foi o que mais impactou os resultados de D_{acm} . O estudo desses parâmetros proporcionou uma maior compreensão da lógica do dimensionamento considerada neste momento no país, além de dar origem a discussões e propostas para estudos futuros (apresentadas em seguida na Seção 6.2). Afinal, não se deve ter na lógica aqui explorada um ponto de parada, mas sim um passo no movimento contínuo de aperfeiçoamento do conhecimento de dimensionamento de pavimentos. Este foi o propósito maior da presente dissertação e acredita-se ter contribuído para melhorar futuras pesquisas.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

A calibração realizada envolveu 23 TEs. Pode ser considerada uma amostra reduzida para representação dos milhares de km de rodovias no Brasil, apesar de que se deve considerar a grande dificuldade e o custo elevado na geração desses dados, algo que requer um esforço nacional que, por enquanto, contou apenas com o investimento da Petrobras e de centros de pesquisa universitários nacionais.

A utilização de parâmetros de clima mostrou-se essencial, e, neste sentido, as novas Funções S e FT calibradas demonstram incorporar esta variável de modo satisfatório, *i.e.*, pavimentos em diferentes climas têm diferentes áreas trincadas. Entretanto, a utilização de apenas um ponto [%AT prevista vs. %AT observada] por trecho reduziu ainda mais a gama de dados disponíveis para calibração, ainda que tenha sido julgada uma estratégia necessária para evitar distorções no ajuste dos dados em detrimento de trechos com poucas observações e em favor de trechos com muitas observações. Dada a pequena quantidade de pontos experimentais observados em campo, não foi realizado, neste estudo, o processo de validação das funções obtidas. Este processo consiste em utilizar dados de outros TEs, não utilizados na calibração, para avaliar o nível de precisão do modelo calibrado. Recomenda-se, portanto, como estudo futuro, a utilização de mais dados de trechos experimentais para validação das funções aqui propostas. Com o processo de validação é viabilizada, também, a calibração de uma função erro para inclusão de níveis de confiança nas análises com base em distribuição de probabilidade.

Este aumento da base de dados nacional, com TEs adicionais, contendo informações bem completas dos materiais, da estrutura e da evolução dos defeitos, é algo que o Brasil precisa planejar de forma coordenada entre Governo, Academia e Indústria. Afinal, sem uma base de dados robusta e crescente, não há como dispor de métodos mecanístico-empíricos como os reportados na presente dissertação, pelo menos de forma confiável. Sublinha-se ainda a importância de que esse planejamento do levantamento de dados leve em consideração modelos mais modernos que os adotados no estado da prática, senão será impossível no futuro o aperfeiçoamento contínuo do método de dimensionamento nacional.

O programa CAP3D-D, em sua versão v2.1, de maio de 2020, não é capaz de obter o D_{acm} na camada asfáltica subjacente à camada de rolamento, caso haja. Esta limitação implicou na impossibilidade de utilização de mais trechos no processo de obtenção de novas funções, pois não se sabe o quanto (e se) o valor de dano nas camadas inferiores pode impactar no surgimento de trincas na superfície. Entretanto, durante o estudo da calibração foi possível observar, em estruturas que apresentavam duas camadas asfálticas, uma distorção entre resultados de D_{acm} e %AT, como a obtenção de D_{acm} menores que 0,05 e áreas trincadas observadas maiores que 40%. Assim, aumentaram-se as suspeitas de que a utilização deste parâmetro na camada inferior de asfalto é de fundamental importância. Portanto, é recomendado que seja avaliado em estudos futuros a possibilidade de obtenção do D_{acm} na camada asfáltica inferior em caso de estruturas com mais de uma camada asfáltica. Também foi observado semelhante ocorrido quando utilizado um TE com base em material fresado, o que é de certa forma esperado, dado que também é um material betuminoso que deve compartilhar fenômenos de degradação similares aos de misturas asfálticas. Entretanto, pela ausência de maior número de TEs com esse tipo de material na base, não foi possível tirar conclusões sobre a importância dessas características na obtenção do D_{acm} . Portanto, também é recomendado que seja avaliada a possibilidade de se realizar estudos mais profundos acerca desse tipo de material na camada de base e seus reais impactos na obtenção de D_{acm} em simulação e na ocorrência de trincas na superfície do pavimento.

Além disso, também é recomendado que seja estudada a possibilidade de obtenção de parâmetro de dano médio que leve em conta que alguns pontos atingem a perda total de rigidez (o dano é limitado a 1,0). A limitação do dano a 1,0 aliado à utilização do parâmetro de D_{acm} , que usa a média do dano nos pontos do pavimento, pode mascarar o real potencial de danificação no revestimento. Isso é esperado pelo fato de os pontos que atingem o valor de 1,0 deixarem de contribuir para o aumento do D_{acm} , o que pode destoar da realidade. Uma maneira

que poderia ser estudada seria a consideração da perda de rigidez em cada ponto no cálculo do próximo passo de danificação da camada de revestimento. Em outras palavras, poderia ser levada em conta a distribuição heterogênea de rigidez no revestimento, o que perturbaria as tensões e deformações calculadas e conseqüentemente o próximo passo de danificação. Atualmente isso não é feito no CAP3D-D, de maneira a manter o problema analisado com a linearidade necessária para a aplicação da regra de Miner na acumulação do dano, o que precisa ser reavaliado.

Durante os estudos de calibração também foram realizados *benchmarks* do CAP3D-D com a utilização de resultados de D_{acm} no programa LVECD. Os resultados neste programa foram obtidos para os mesmos trechos utilizados no CAP3D-D, com as mesmas propriedades dos materiais (iguais parâmetros básicos de modelos de dano e viscoelásticos lineares). Notou-se um agrupamento significativo dos resultados. Entretanto, observou-se uma divergência nos valores absolutos, com resultados de maior danificação no programa LVECD, de maneira geral. Os valores de D_{acm} no LVECD ficaram entre 2,2 a 3,3 vezes superiores aos resultados no CAP3D-D. Suspeita-se que o principal indutor dessa observação foi o fato do programa calibrado com a base de dados americana ter como integridade (C) inicial o valor de 0,8, diferentemente do valor de 1,0 utilizado no CAP3D-D. Este fato pode induzir a menores valores de N_f e, conseqüentemente, maiores valores de D_{acm} .

Abaixo, são listadas as principais recomendações de trabalhos futuros, dada as considerações feitas anteriormente:

- a) Desenvolver um módulo de análise no programa CAP3D-D, ou qualquer outro programa nacional, para obtenção do parâmetro de D_{acm} em possíveis camadas asfálticas inferiores e subjacentes ao revestimento. Esse parâmetro pode enriquecer a capacidade do programa de análise e viabilizar a obtenção de novas FTs. Ressalte-se, todavia, que a real importância deste parâmetro nos resultados de %AT na superfície ainda precisa ser estudada mais a fundo em qualquer programa. Possivelmente FTs diferentes seriam necessárias para cada tipo de estrutura, o que deve ser considerado nas novas calibrações.
- b) As equações implementadas no CAP3D-D para conversão de velocidade de tráfego em frequência de carregamento (Brown, 1973), além das equações de conversão de temperatura do ar em temperatura no interior do revestimento de acordo com a profundidade (Rodrigues, 1991), não foram foco de avaliação deste estudo. Ressalta-se, todavia, que podem apresentar grande impacto nas

respostas de módulo e , conseqüentemente, de vida de fadiga do material asfáltico. Assim, sugere-se avaliar o aprimoramento dessas equações, como o uso de conversões de temperatura por regiões do Brasil, como apresentado também por Rodrigues (1991), em vez de uma equação geral para todo território nacional, como atualmente presente no CAP3D-D. Além disso, o referido autor também comenta sobre o uso de diferentes equações para diferentes espessuras de revestimento, passível, também, de avaliação e implementação em novas versões do programa.

- c) Ainda como forma de aprimorar a calibração, sugere-se estudar, com uma maior quantidade de trechos, a proposição metodológica de incorporar o mesmo número de quantidade de pontos de observações de %AT por trecho para o processo de calibração. Esta proposição tem como premissa igualar os pesos dos trechos na calibração, eliminando eventuais vícios de trechos que tenham mais ou menos pontos de observação. Algumas metodologias matemáticas podem ser estudadas para igualar os pesos mesmo com números diferentes de observações, o que não foi explorado a fundo neste trabalho e mereceria mais atenção em pesquisas futuras.
- d) A análise de sensibilidade de D_{acm} para variações do parâmetro β , inerente ao carregamento e incorporado na abordagem S-VECD, mostrou-se bastante relevante, dado que este valor era até então considerado constante e igual a -0,08 em todas as análises. Sugere-se que sejam avaliadas possibilidades de incorporação do histórico de carregamento nos diferentes pontos da malha do revestimento, proporcionando diferentes valores de β em cada ponto do revestimento e , conseqüentemente, valores de D_{acm} mais realistas. Com o entendimento do comportamento de picos de tração e compressão em diferentes pontos de malha podem ser sugeridos novos valores de β . Ressalta-se que, atualmente, no CAP3D-D, o valor homogêneo de -0,08 para todos os pontos da malha representa um pico de compressão 17% maior em comparação ao pico de tração. Este número não se aplica realisticamente aos pontos da malha e pode ser uma importante fonte de erro na análise em nível de estrutura de pavimento, conforme foi demonstrado ser importante em simulações em nível de material.
- e) Sugere-se estudar os efeitos da variação de danificação para diferentes estruturas de pavimento em simulação. Diferentes espessuras de revestimento, bem como diferentes interações revestimento-base, subcamadas estabilizadas

quimicamente, nível de aderência entre camadas, etc., poderiam enriquecer a compreensão, em termos mecanicistas, do comportamento das estruturas. Seria um trabalho mais focado em diferentes possíveis estruturas, diferentemente deste, que focou no efeito de parâmetros de materiais em uma pequena quantidade de estruturas (e já resultou em uma grande quantidade de simulações – mais de 700). Isso deve ser feito sempre harmonizando os resultados das simulações com os dados disponíveis em campo, ou seja, é necessário que situações diferentes daquelas que já constam na base de dados nacional sejam incorporadas nos estudos subsequentes.

- f) Com o avanço no processo de calibração e validação no país, sugere-se a possibilidade de estudar FTs calibradas para situações específicas que apresentem maior similaridade entre si, em termos ambientais, estruturais e de materiais. As situações específicas e equivalentes poderiam incluir: revestimentos delgados ou espessos, climas quentes ou frios, rodovias com alto volume de tráfego e baixo volume de tráfego, dentre outros. Com a obtenção de múltiplas FTs, quiçá por estado na federação ou pelo menos por região, possibilitará se chegar numa diminuição da interferência de variáveis ainda não contempladas em plenitude por uma única FT.

REFERÊNCIAS

- ALBANO, J. F. **Efeitos dos Excessos de Carga Sobre a Durabilidade de Pavimentos**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- ALLEN, D. H.; HAISLER, W. E. **Introduction to aerospace structural analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- ALMEIDA, F. J. P. **Modelagem Computacional de Misturas Asfálticas com a Utilização do Método dos Elementos Finitos, da Teoria da Viscoelasticidade Linear e da Mecânica do Dano Contínuo**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- ARAGÃO, F. T. S.; HARTMANN, D. A.; KIM, Y. R.; MOTTA, L. M. G.; HAFTJAVAHERIAN, M. Numerical Experimental Approach to Characterize Fracture Properties of Asphalt Mixtures at Low In-Service Temperatures. **Transportation Research Record**, v. 2447, p. 42-50, 2014.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 342: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)**, Washington: AASHTO, 2011.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 107: Standard method of test for determining the damage characteristic curve and failure criterion using the asphalt mixture performance tester (ampt) cyclic fatigue test**. Washington: AASHTO, 2018.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 206-72: Standard definitions of terms relating to fatigue testing and statistical analysis of fatigue data**. West Conshohocken: ASTM, 1979.
- BASTOS, J. B. S. **Influência da Variação da Umidade no Comportamento de Pavimentos da Região Metropolitana de Fortaleza**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. **Revista Transportes** v. 23, n. 2, p. 85-94. ISSN: 2237-1346, 2015.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; OROZCO, G.; SAUZÉAT, C.; Di BENEDETTO, H. Reversible phenomena and fatigue damage during cyclic loading and rest periods on bitumen. **International Journal of Fatigue**, v. 124, p. 303-314, 2019.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2010.

BOLTZMANN, L. Zur Theorie der Elastischen Nachwirkung. **Annalen der Physik**, v. 241, p. 430-432, 1878.

BROWN, S. Determination of Young's modulus for bituminous materials in pavement design. **Highway Research Record**, v. 431, p. 38-49, 1973.

CARNEIRO, F. L. Um Novo Método para Determinação da Resistência à Tração dos Concretos. Comunicação. In: REUNIÃO ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 5, 1943, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1943.

CENTRO DE PESQUISAS LEOPOLDO AMÉRICO MIGUEZ DE MELLO – CENPES. **Dados laboratoriais de misturas asfálticas fornecidas pelo CENPES ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará**, Rio de Janeiro: CENPES, 2018. Disponibilizados via planilhas.

CHEHAB, G. **Characterization of Asphalt Concrete in Tension Using a ViscoElastoPlastic Model**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, 2002.

CHEHAB, G. R.; KIM, Y. R.; SCHAPERLY, R. A.; WITCZAK, M. W.; BONAQUIST, R. Time-temperature superposition Principle for Asphalt Concrete Mixtures with Growing Damage in Tension State. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**. AAPT: v. 71, p. 559-593, 2002.

CHEHAB, G. R.; KIM, Y. R.; SCHAPERLY, R. A.; WITCZACK, M.; BONAQUIST, R. Characterization of Asphalt Concrete in Uniaxial Tension Using a Viscoelastoplastic Model. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, AAPT: v. 72, p. 315-355, 2003.

CHRISTENSEN, R.M. **Theory of Viscoelasticity**. 2^a ed. New York: Academic Press, 1982.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R.; LEE, H. J. Effects of aging on viscoelastic properties of asphalt-aggregate mixtures. **Transportation Research Record**, n. 1630, p. 21-7, 1998.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, AAPT, v. 71, p. 619-650, 2002.

Di BENEDETTO H.; De La ROCHE C. **State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures. Bituminous binders and mixtures: state of the art and interlaboratory tests on mechanical behavior and mix design**. E. F. Spon, L. Francken: p. 137-180, 1998.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. Fatigue of bituminous mixtures. **Materials and Structures**. v. 37, p 202-216, 2004.

CERATTI, J. A. **Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento Para Utilização em Pavimentos**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Guia para Utilização do Método Mecânico-Empírico de Dimensionamento (versão provisória) Projeto TED nº682/2014, Processo nº 50607.002043/2013-00**. Brasília: DNIT, 2018. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/pesquisa>. Acesso em 18 de jan. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. IPR 723: **Manual de Estudos de Tráfego**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Brasília, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. IPR 719: **Manual de Pavimentação**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Brasília, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ME 135: **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência**. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ME 183: **Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada**. Rio de Janeiro, 2018.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. In: CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 16, 2002, Natal. **Anais [...]**. Natal: Associação Brasileira de Ensino e Pesquisa em Transportes, 2002. v. 1. p. 169-181

FERNANDES Jr., J. L. **Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**, 3. ed. Nova York: John Wiley & Sons 1980.

FRANCO, F. A. C. P. **Um Sistema para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Programa de Engenharia Civil da COPPE/ UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão de Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de

Transportes) – Programa de engenharia civil da COPPE/URFJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

FRITZEN, M. A.; FRANCO, F.A.C.P.; MOTTA, L. M.G.; UBALDO, M.O. Atualização da Função de Transferência do Dano de Fadiga para a Área Trincado do Programa Medina. In:, CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, 9, 2019. **Anais [...]**. Lisboa: Centro Rodoviário Português, 2019.

GOODRICH, J. L. Asphalt Binder Rheology, Asphalt Concrete Rheology and Asphalt Concrete Mix Properties. **Journal o Association of Asphalt Paving Technologists**, AAPT: v.60, p. 80-120, 1991.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Programa de engenharia civil da COPPE/URFJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HOLANDA, A. S.; PARENTE Jr., E.; MELO, T. D. B.; EVANGELISTA Jr., F.; SOARES, J. B. Finite Element of Flexible Pavements. In:, IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 27, 2006, Belém. **Proceeding [...]**, Belém, 2006. p. 1-14.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. Englewood-Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

HVEEM, F. N. Pavement deflection and fatigue failures. **Highway Research Board Bulletin**. v. 114, p 43-87, 1955.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia **Normais climatológicas**, 2018. Disponível em inmet.gov.br, acessado em 28 de out. 2018.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N. One-Dimensional Constitutive Modeling of Asphalt Concrete. **ASCE Journal of Engineering Mechanics**, v. 116, n. 4, p. 751-772, 1990.

KIM, Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete**. American society of Civil Engineers. Ed. Mc Graw Hill Construction. ISBN: 9780-07-146462-8, 2009.

LEE, H. J.; KIM, Y. R. Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 124, n. 1, p. 32–40, 1998.

LEMAITRE, J. **A Course on Damage Mechanics**. 2. Ed. Springer. ISBN-13: 978-3540609803, 1996.

LOVE, A. E. H. **A treatise on the mathematical theory of elasticity**. 4. ed. New York, 1944.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MINER, M. A. Cumulative damage in fatigue. **Journal of Applied Mechanics**, American Society of Mechanical Engineers, p. A-159-164, Nova York: ASME, 1945.

MONISMITH, C. L.; SALAM, Y. M. Distress Characteristics of Asphalt Concrete Mixes. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, AAPT, v. 42, p. 320-350, 1973.

NCHRP. National Cooperative Highway Research Program. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and Rehabilitated Pavement Structures**. Final Report. Part 3: Design Analysis. Chapter 3: Design of new and reconstructed flexible pavement, Illinois, 2004.

NASCIMENTO, L. A. H. Estado da arte no dimensionamento de pavimentos flexíveis e aplicabilidade no cenário nacional. In: ENCONTRO DO ASFALTO, 21., 2014, Rio de Janeiro. **Palestras [...]**, Rio de Janeiro, 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H. **Planilhas de cálculo com resultados compilados em simulações no programa FlexPave**, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

PAPAZIAN, H. S. The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphaltic concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 1962, Ann Arbor. **Proceedings [...]**. Ann Arbor: Transportation Research Board, 1962. v. 203, n. 1, p. 385-394.

PARK, S. W.; KIM, Y. R.; SCHAPERLY, R. A. Viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. **Mechanics of Materials**, v. 24, n. 4, p. 241-255, 1998.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Programa de engenharia civil da COPPE/URFJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

RODRIGUES, R. M. **Estudo de trincamento dos pavimentos**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Programa de engenharia civil da COPPE/URFJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

SABOURI, M. A.; Y. R. KIM. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington: TRB, 2014.

SALAM, Y. M. **Characteristics of Deformation and Fracture of Asphalt Concrete**. 1971. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, 1971.

SANTIAGO, L. S.; TORQUATO, S. A.; SOARES, J. B. Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas. **Revista Transportes**. v. 26, n. 2, p. 31-43, 2018.

SANTIAGO, L. S.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B. Desenvolvimento de função de transferência para previsão de área trincada em pavimentos asfálticos por meio da simulação do dano por fadiga utilizando modelo S-VECD e análises elásticas. **Artigo aceito para publicação na Revista Transportes**, 2019.

SANTOS, A. B. V.; SOARES, J. B.; BABADOPULOS, L. F. A. L. Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada e dimensionamento de pavimentos nacionais. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33, 2019, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Balneário Camboriú: ANPET, 2019

SCHAPERLY, R. A. Viscoelastic Behavior and Analysis of Composite Materials. **Mechanics of Composite Materials**, v. 4, p 86-119, 1972.

SCHAPERLY, R. A. Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. **International Journal of Fracture**, v .25, n .3, p. 195-223. DOI: 10.1007/BF01140837, 1984.

SCHAPERLY, R. A. A Theory of Mechanical Behavior of Elastic Media with Growing Damage and Other Changes in Structure. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 38, n. 2, p. 215-253, 1990.

SHAH, S. P.; SWARTZ, S. E.; OUYANG, C. **Fracture Mechanics of Concrete: Applications of fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials**. Ed. Wiley Interscience. New York. ISBN: 0-471-30311-9, 1995.

SILVA, S. A. T.; VIDAL, P. J. F.; HOLANDA, A. S.; JUNIOR, E. P. Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos utilizando elementos finitos e infinitos. **Revista Transportes**, v. 21, n. 3, p. 5-13, 2013

SOARES, J. B.; FREITAS, F. A. C. Modelagem da formação e propagação de trincas em misturas asfálticas. **Revista Transportes**, Rio de Janeiro, v. 11, n.1, p. 33-41, 2003.

SOARES, J. B. Reflexões sobre um Programa de Pesquisa Científica para a Infraestrutura Viária do Brasil. **Aceito para publicação na Revista Transportes**, 2020.

SOUZA, R. C. **Avaliação do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas Finas Através de Ensaio Dinâmico Uniaxial**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2018.

TURNBULL, W. J.; FOSTER, C. R.; AHLVIN, R. G. Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume. **International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements**, p. 130-134, 1962.

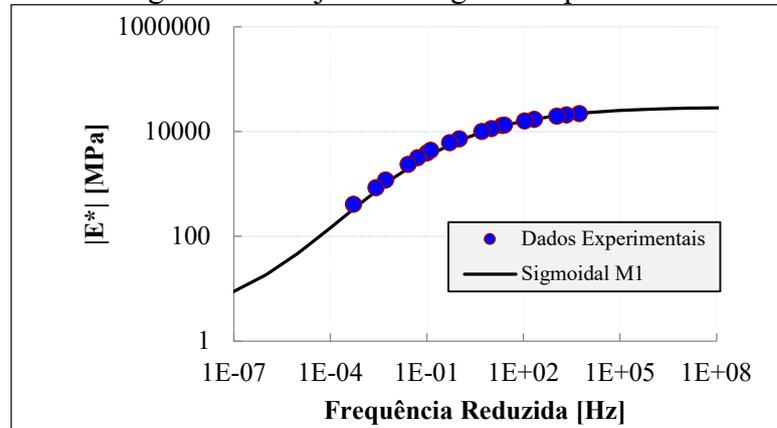
UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R.; GUDDATI, M. N. Characterization and Performance Prediction of ALF Mixtures Using a Viscoelastoplastic Continuum Damage Model. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, AAPT: v. 75, p. 577-636, 2006.

UNDERWOOD, B. H.; HOU, E. T.; KIM, Y. R. Application of Simplified VECD Modeling to the Fatigue Prediction of Asphalt Concrete Mixtures. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON ADVANCED TESTING AND CHARACTERIZATION OF BITUMINOUS MATERIALS, 7, 2009, Rodes, **Proceedings [...]**. Rodes, 2009.

YODER E. J.; WITCZAK M. W. **Principles of Pavement Design**, 2nd ed. ISBN: 9780471977803. Hoboken: John Wiley & Sons, 1975.

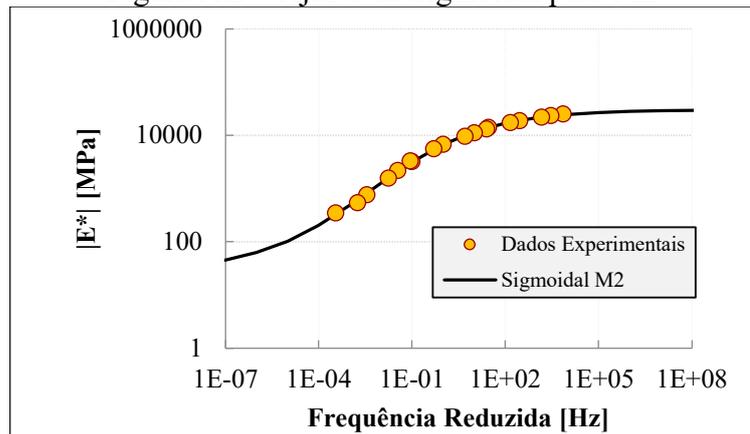
APÊNDICE A – AJUSTES DE DADOS EXPERIMENTAIS À CURVA SIGMOIDAL DO MÓDULO DINÂMICO (E^*)

Figura A.1 – Ajuste da Sigmoial para M1.



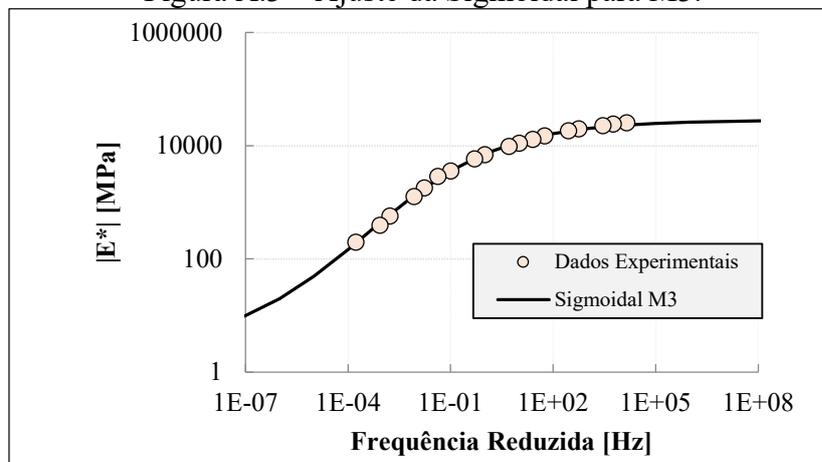
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura A.2 – Ajuste da Sigmoial para M2.



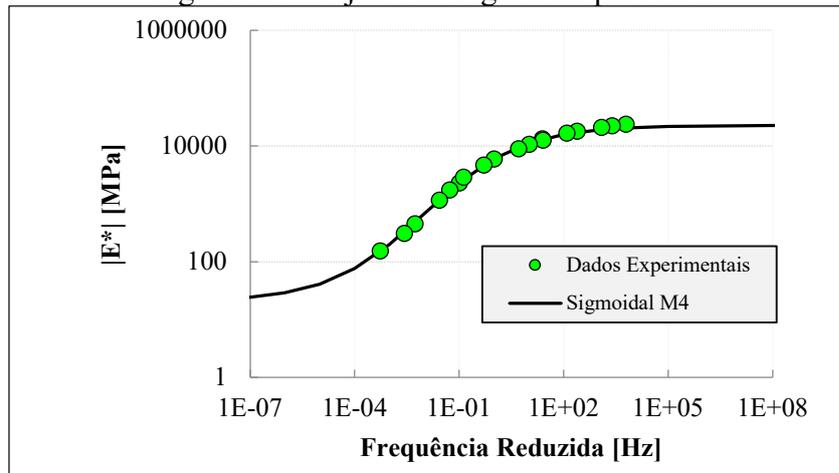
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura A.3 – Ajuste da Sigmoial para M3.



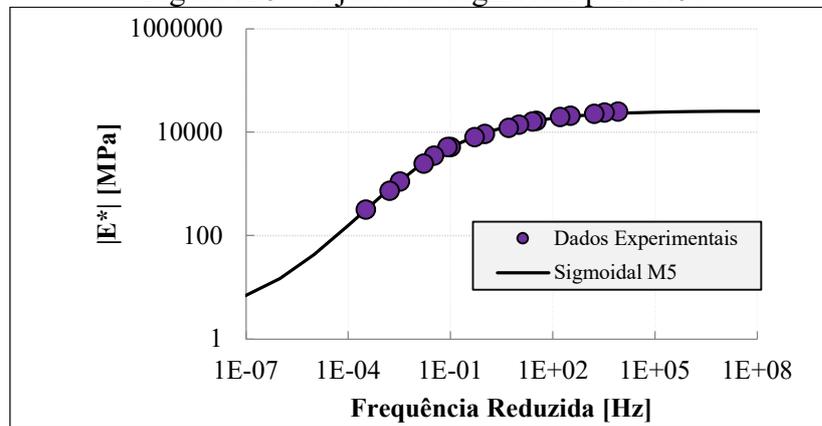
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura A.4 – Ajuste da Sigmoidal para M4.



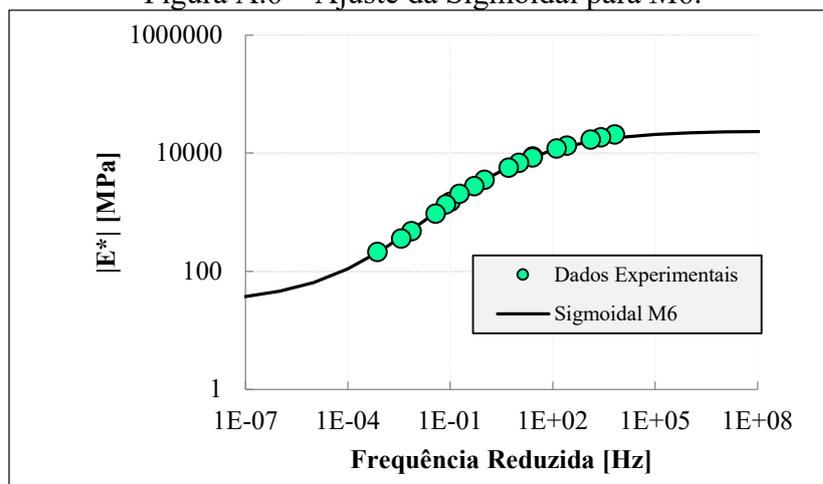
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura A.5 – Ajuste da Sigmoidal para M5.



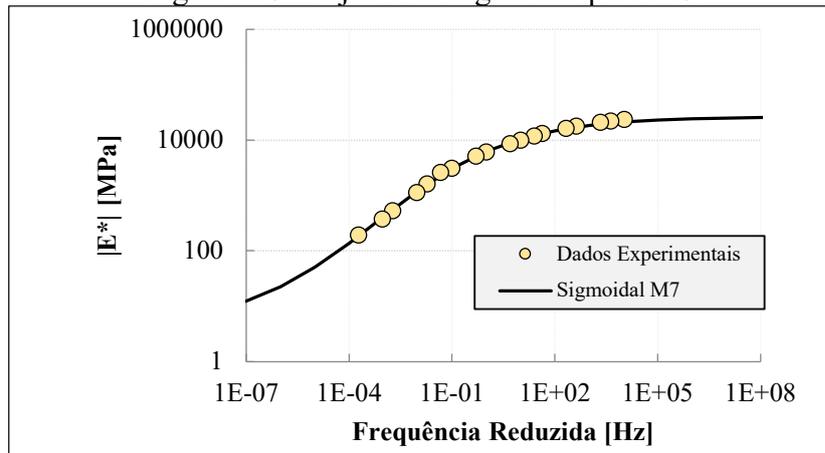
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura A.6 – Ajuste da Sigmoidal para M6.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura A.7 – Ajuste da Sigmoidal para M7.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE B – DADOS DAS MISTURAS *DEFAULT* DO PROGRAMA MeDiNa UTILIZADAS NAS ANÁLISES

Figura B. 1 – Dados da mistura Classe 1 utilizados em análises no programa MeDiNa.

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba
Parâmetros	
Espessura (cm)	8,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	9000
Características	
Tipo de CAP	CAP 30/45 - PG 70-16
Massa específica (g/cm ³)	2,4
Resistência à tração (MPa)	2,08
Teor de asfalto (%)	6,0
Volume de vazios (%)	5,0
Faixa Granulométrica	#12,5mm
Abrasão Los Angeles (%)	40,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Curva de Fadiga	
Modelo:	$k_1 \cdot (et)^{k_2}$
Coefficiente de Regressão (k1):	5,0e-14
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,992
Classe de Fadiga:	2
FFM (100μ a 250μ):	0,75

Fonte: MeDiNa versão de outubro de 2018.

Figura B. 2 – Dados da mistura Classe 2 utilizados em análises no programa MeDiNa.

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	Classe 2
Parâmetros	
Espessura (cm)	8,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	6743
Características	
Tipo de CAP	...
Massa específica (g/cm ³)	2,4
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Comentários	Este material deve ser obtido em laboratório ...
Curva de Fadiga	
Modelo:	$k_1 \cdot (et)^{k_2}$
Coefficiente de Regressão (k1):	1,11e-13
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,979
Classe de Fadiga:	2
FFM (100μ a 250μ):	0,86

Fonte: MeDiNa versão outubro de 2018.

Figura B. 3 – Dados da mistura Classe 3 utilizados em análises no programa MeDiNa.

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	Classe 3
Parâmetros	
Espessura (cm)	8,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	8000
Características	
Tipo de CAP	...
Massa específica (g/cm ³)	2,4
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Comentários	Este material deve ser obtido em laboratório ...
Curva de Fadiga	
Modelo:	$k_1 \cdot (et)^{k_2}$
Coefficiente de Regressão (k1):	1e-12
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,75
Classe de Fadiga:	3
FFM (100μ a 250μ):	0,90

Fonte: MeDiNa versão outubro de 2018.

Figura B. 4 – Dados da mistura Classe 4 utilizados em análises no programa MeDiNa.

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	Classe 4
Parâmetros	
Espessura (cm)	8,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	10492
Características	
Tipo de CAP	...
Massa específica (g/cm ³)	2,4
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Comentários	Este material deve ser obtido em laboratório ...
Curva de Fadiga	
Modelo:	$k_1 \cdot (et)^{k_2}$
Coefficiente de Regressão (k1):	1,91e-5
Coefficiente de Regressão (k2):	-1,9
Classe de Fadiga:	4
FFM (100μ a 250μ):	1,00

Fonte: MeDiNa versão outubro de 2018.

Figura B. 5 – Dados da mistura CAP 50/70 e TMN de 12,5mm utilizados em análises no programa MeDiNa.

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba
Parâmetros	
Espessura (cm)	10,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	8289
Características	
Tipo de CAP	CAP 50/70 - PG 64-16
Massa específica (g/cm ³)	2,4
Resistência à tração (MPa)	1,91
Teor de asfalto (%)	6,0
Volume de vazios (%)	5,0
Faixa Granulométrica	#12,5mm
Abrasão Los Angeles (%)	40,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Curva de Fadiga	
Modelo:	$k_1 \cdot (et \wedge k_2)$
Coefficiente de Regressão (k1):	3,0e-13
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,78
Classe de Fadiga:	1
FFM (100µ a 250µ):	0,73

Fonte: MeDiNa versão outubro de 2018.

Figura B. 6 – Dados da mistura CAP 30/45 e TMN de 12,5mm utilizados em análises no programa MeDiNa.

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba
Parâmetros	
Espessura (cm)	10,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	9000
Características	
Tipo de CAP	CAP 30/45 - PG 70-16
Massa específica (g/cm ³)	2,4
Resistência à tração (MPa)	2,08
Teor de asfalto (%)	6,0
Volume de vazios (%)	5,0
Faixa Granulométrica	#12,5mm
Abrasão Los Angeles (%)	40,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Curva de Fadiga	
Modelo:	$k_1 \cdot (et \wedge k_2)$
Coefficiente de Regressão (k1):	5,0e-14
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,992
Classe de Fadiga:	2
FFM (100µ a 250µ):	0,75

Fonte: MeDiNa versão outubro de 2018.

Figura B. 7 – Dados da mistura CAP 30/45 e TMN de 19,1mm utilizados em análises no programa MeDiNa.

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	RJ CAP 30/45 #19,1mm Sepetiba
Parâmetros	
Espessura (cm)	8,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	11613
Características	
Tipo de CAP	CAP 30/45 - PG 70-16
Massa específica (g/cm ³)	2,4
Resistência à tração (MPa)	2,65
Teor de asfalto (%)	6,0
Volume de vazios (%)	5,0
Faixa Granulométrica	#19,1mm
Abrasão Los Angeles (%)	40,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Curva de Fadiga	
Modelo:	k1 .(et ^ k2)
Coefficiente de Regressão (k1):	9,0e-14
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,785
Classe de Fadiga:	0
FFM (100µ a 250µ):	0,53

Fonte: MeDiNa versão outubro de 2018.

Figura B. 8 – Dados da mistura CAP 50/70 e TMN de 19,1mm utilizados em análises no programa MeDiNa.

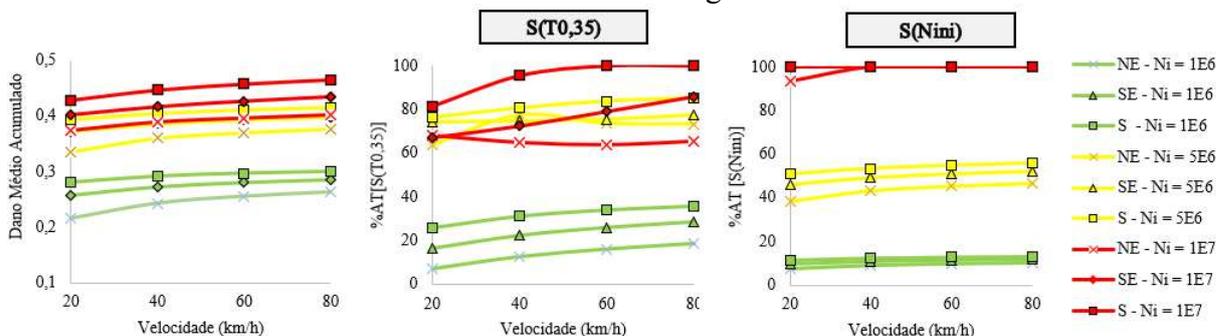
CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba
Parâmetros	
Espessura (cm)	8,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	9588
Características	
Tipo de CAP	CAP 50/70 - PG 64-16
Massa específica (g/cm ³)	2,4
Resistência à tração (MPa)	2,04
Teor de asfalto (%)	6,0
Volume de vazios (%)	5,0
Faixa Granulométrica	#19,1mm
Abrasão Los Angeles (%)	40,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Curva de Fadiga	
Modelo:	k1 .(et ^ k2)
Coefficiente de Regressão (k1):	1,0e-12
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,599
Classe de Fadiga:	1
FFM (100µ a 250µ):	0,67

Fonte: MeDiNa versão outubro de 2018.

APÊNDICE C – RESULTADOS DE D_{acm} E %AT PARA VARIAÇÕES DE CLIMA E TRÁFEGO

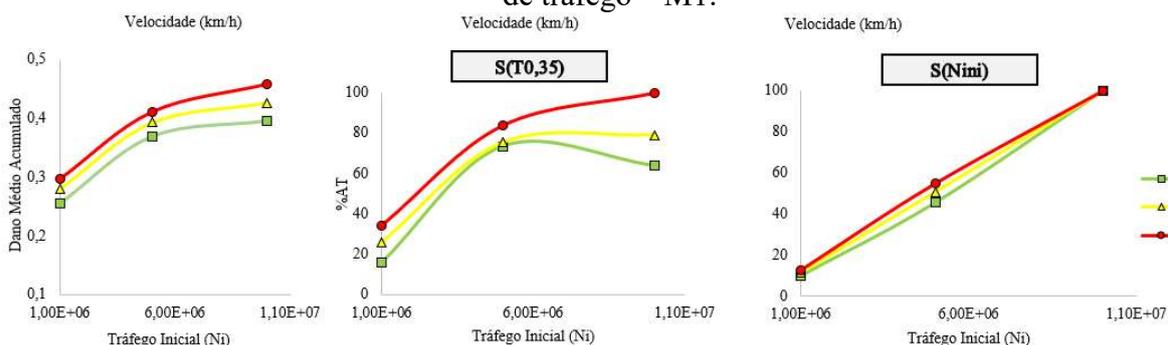
a) M1

Figura C.1 – Resultados de D_{acm} e %AT para variação da velocidade de tráfego em diferentes climas e níveis de tráfego – M1.



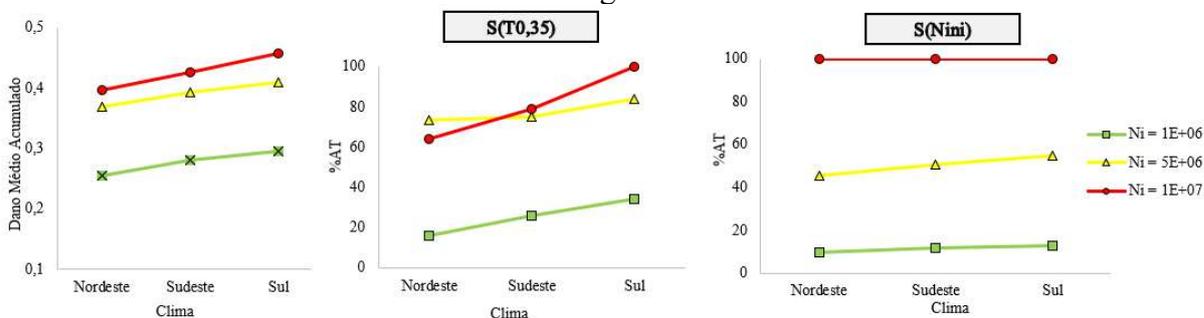
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.2 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M1.



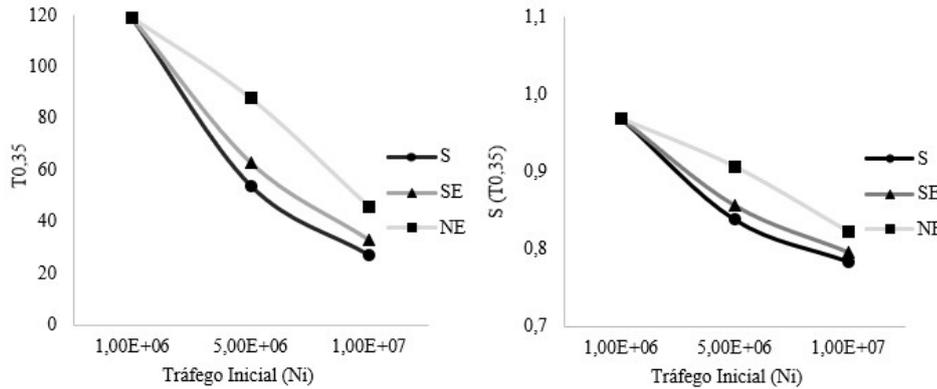
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura C.3 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

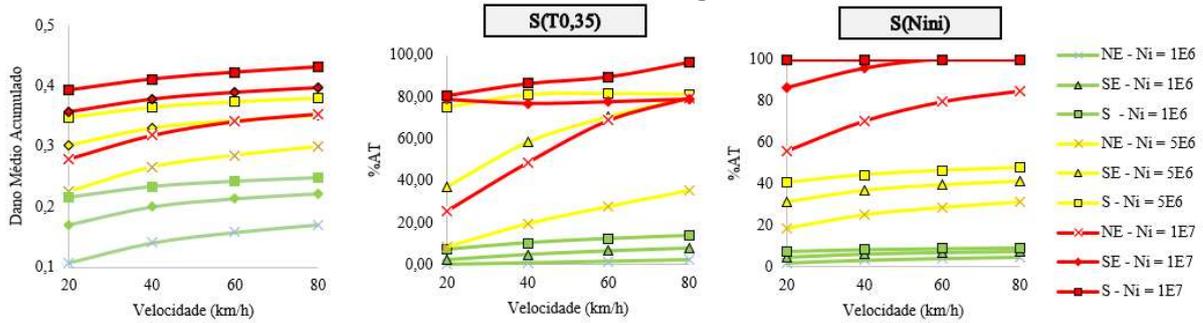
Figura C. 4 – Resultados de $T_{0,35}$ e de $S(T_{0,35})$ para variações de níveis de tráfego a 60km/h em diferentes climas – M1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

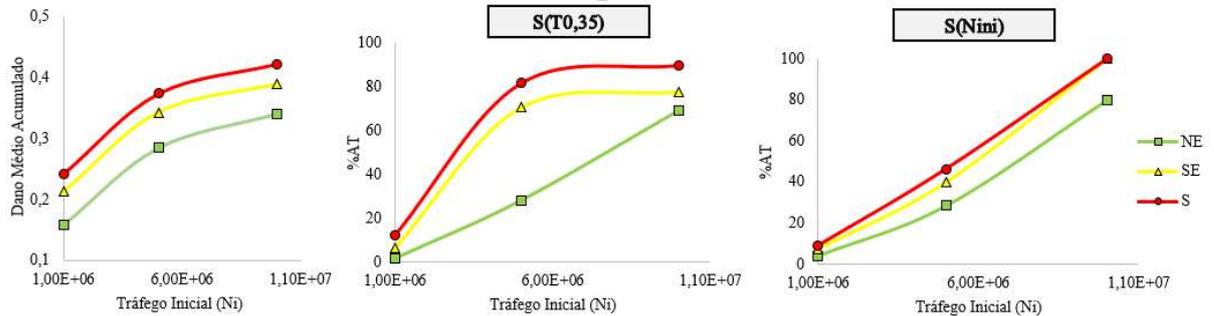
b) M2

Figura C.5 – Resultados de D_{acm} e %AT para variação da velocidade de tráfego em diferentes climas e níveis de tráfego – M2.



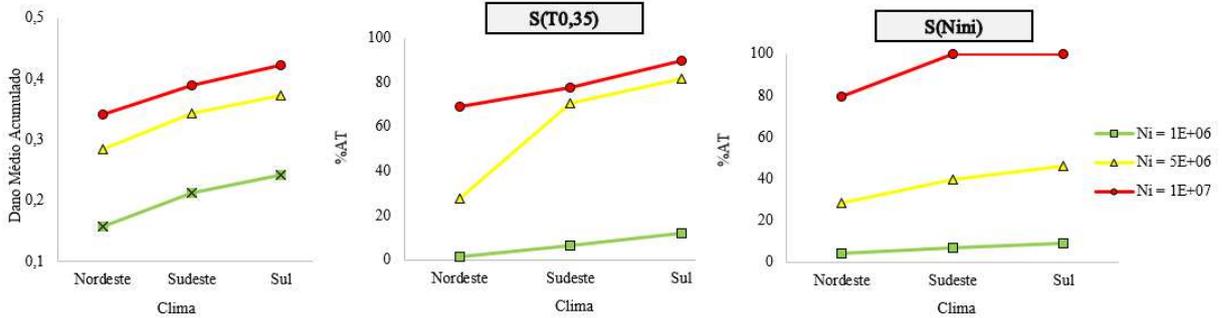
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C. 6 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M2.



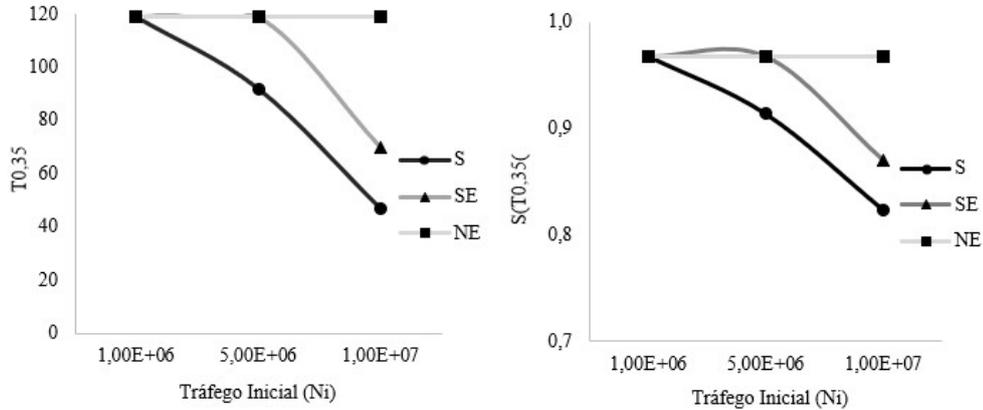
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura C. 7 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

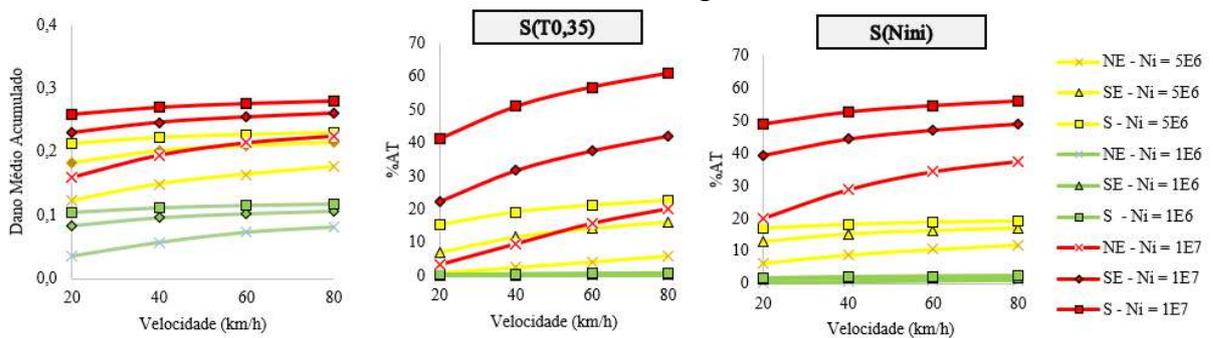
Figura C. 8 – Resultados de $T_{0,35}$ e de $S(T_{0,35})$ para variações de níveis de tráfego a 60km/h em diferentes climas – M2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

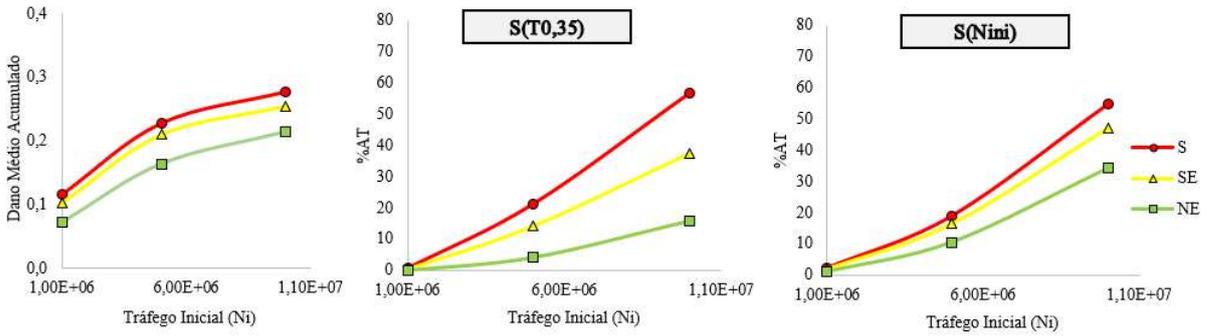
c) M3

Figura C.9 – Resultados de D_{acm} e %AT para variação da velocidade de tráfego em diferentes climas e níveis de tráfego – M3.



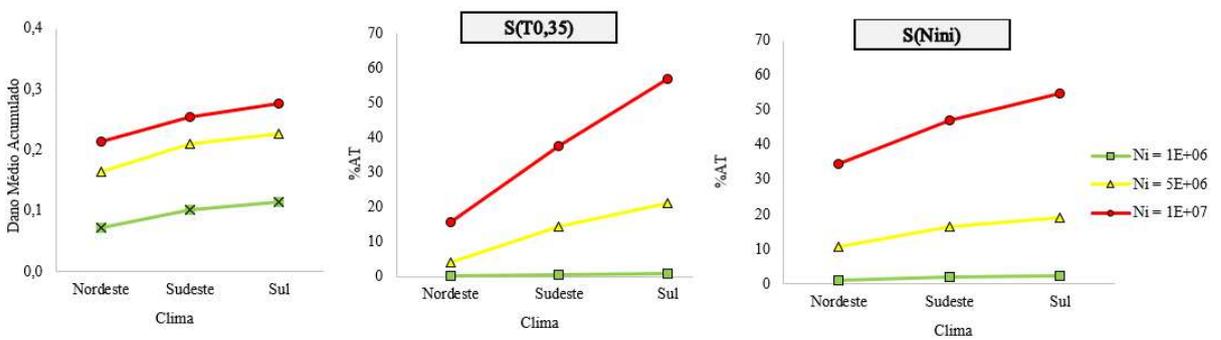
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.10 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M3.



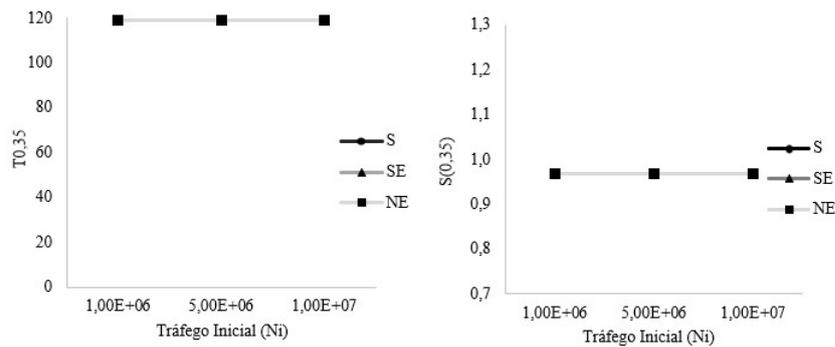
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura C.11 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

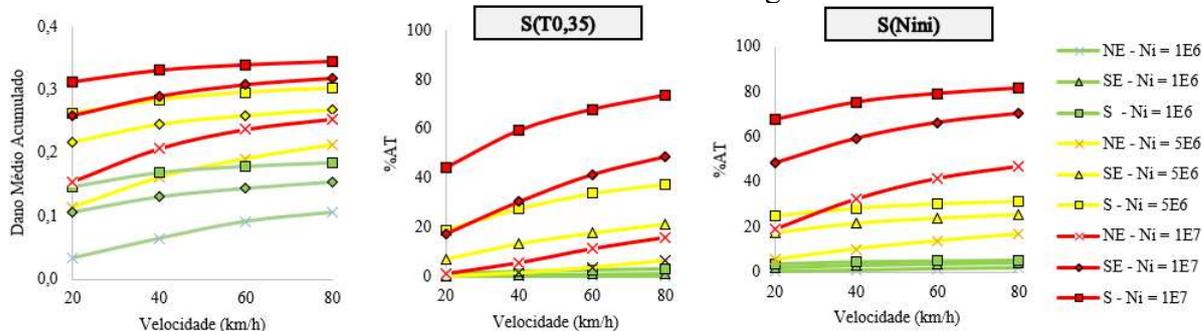
Figura C.12 – Resultados de $T_{0,35}$ e de $S(T_{0,35})$ para variações de níveis de tráfego a 60km/h em diferentes climas – M3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

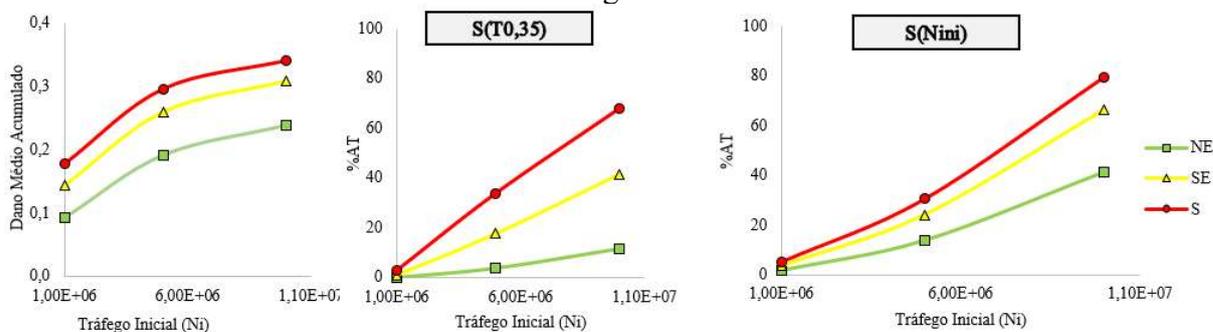
d) M4

Figura C.13 – Resultados de D_{acm} e %AT para variação da velocidade de tráfego em diferentes climas e níveis de tráfego – M4.



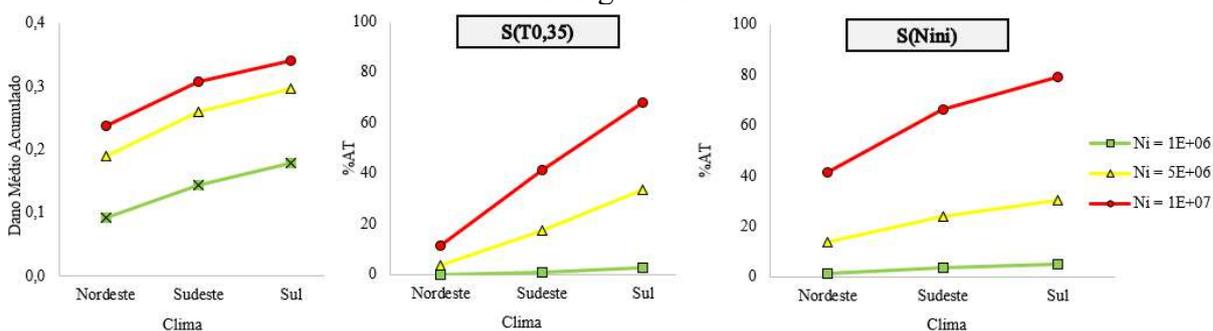
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.14 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M4.



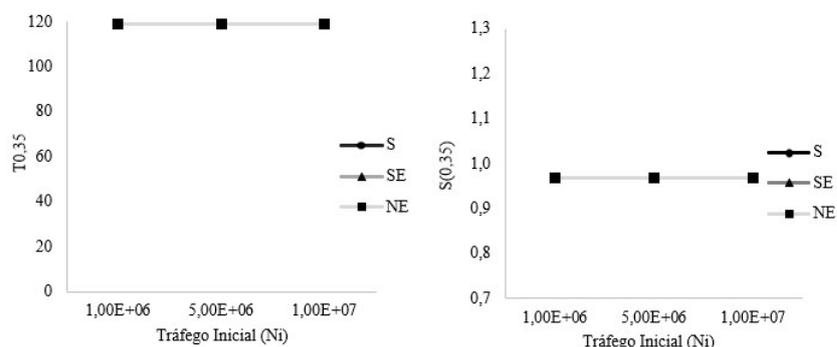
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura C.15 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

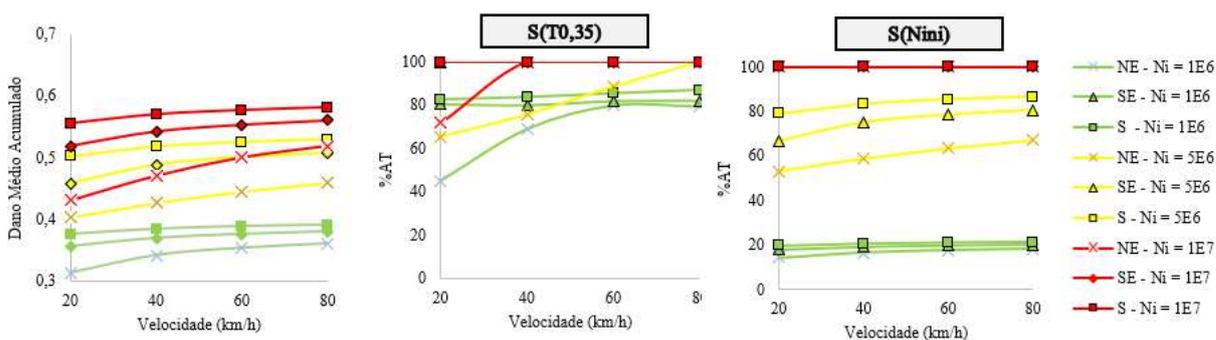
Figura C.16 – Resultados de $T_{0,35}$ e de $S(T_{0,35})$ para variações de níveis de tráfego a 60km/h em diferentes climas – M4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

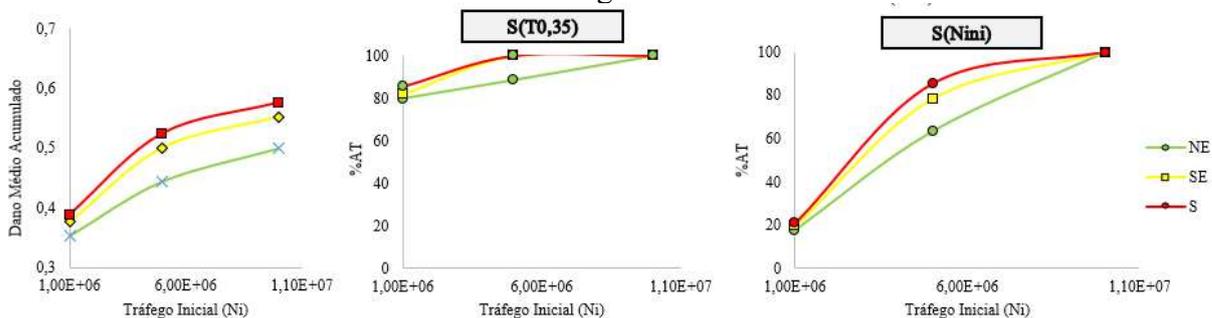
e) M5

Figura C.17 – Resultados de D_{acm} e %AT para variação da velocidade de tráfego em diferentes climas e níveis de tráfego – M5.



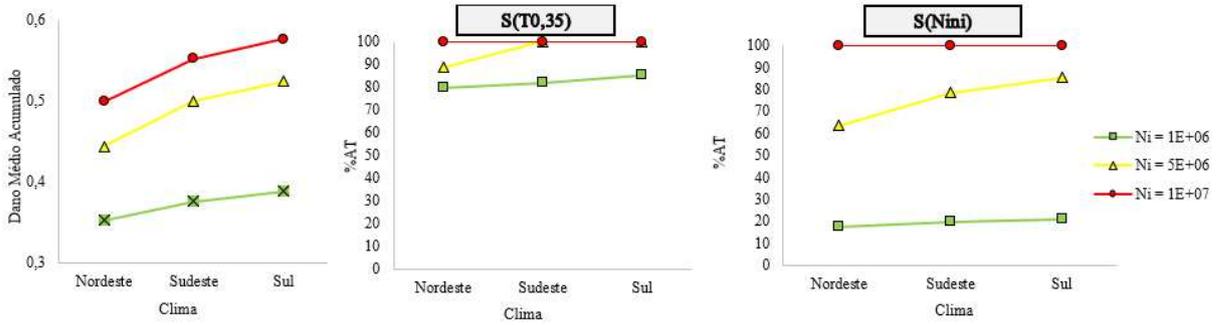
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.18 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M5.



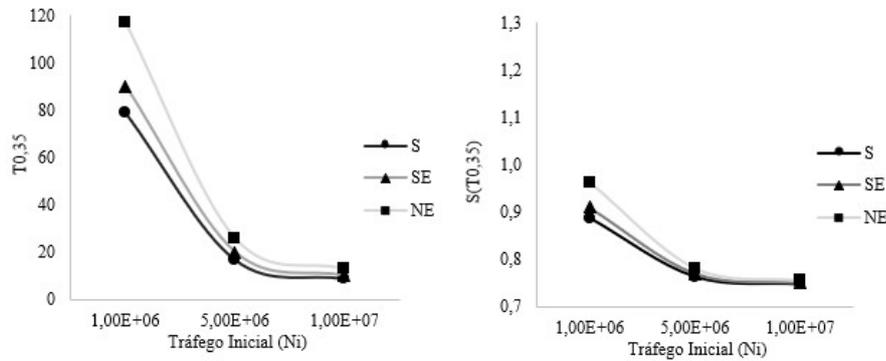
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura C.19 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

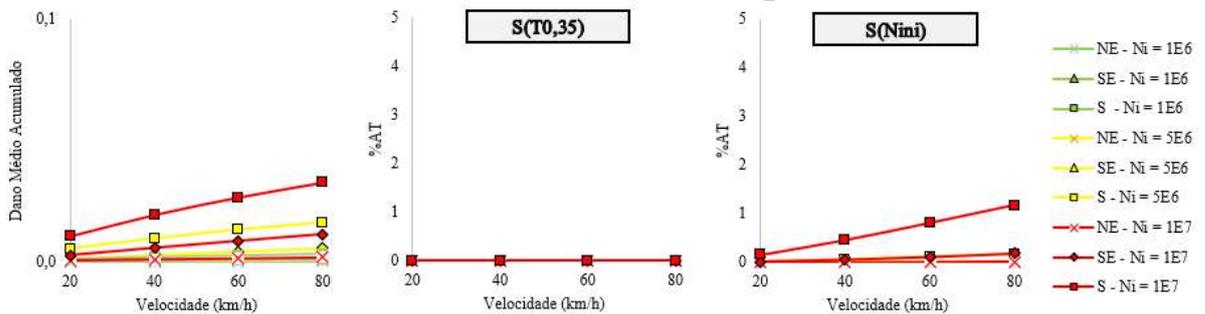
Figura C.20 – Resultados de $T_{0,35}$ e de $S(T_{0,35})$ para variações de níveis de tráfego a 60km/h em diferentes climas – M5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

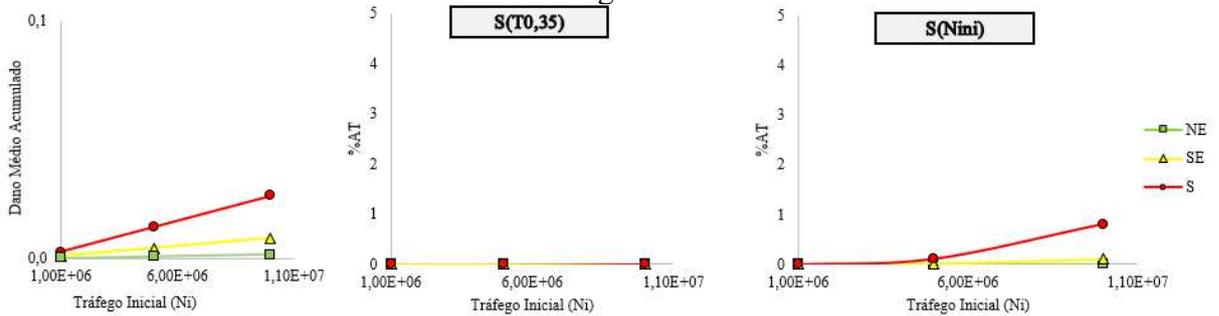
f) M6

Figura C.21 – Resultados de D_{acm} e %AT para variação da velocidade de tráfego em diferentes climas e níveis de tráfego – M6.



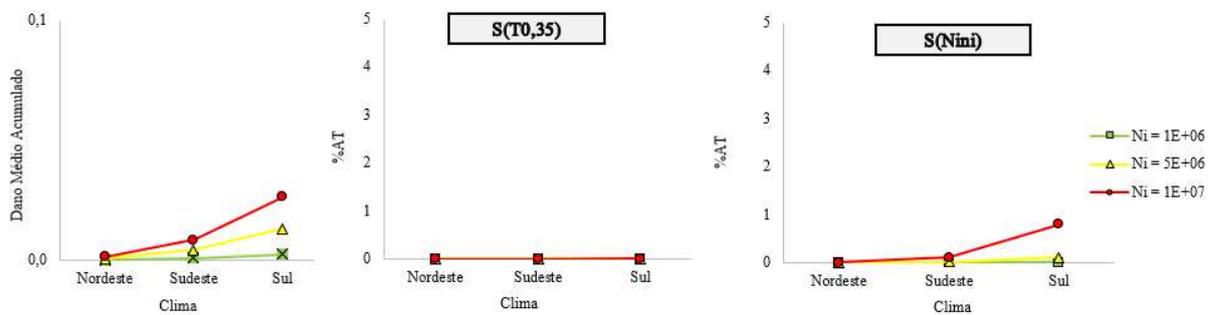
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.22 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M6.



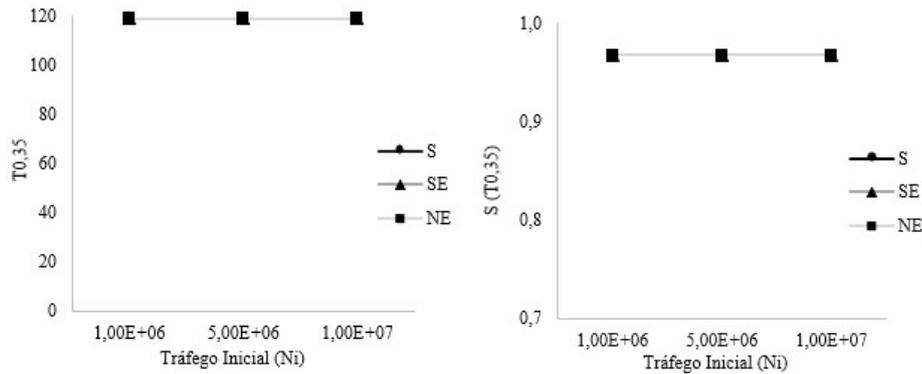
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura C.23 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

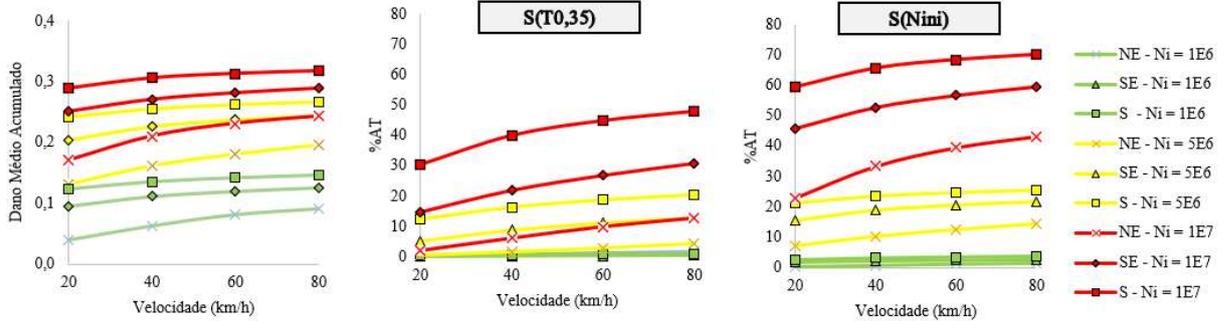
Figura C.24 – Resultados de $T_{0,35}$ e de $S(T_{0,35})$ para variações de níveis de tráfego a 60km/h em diferentes climas – M6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

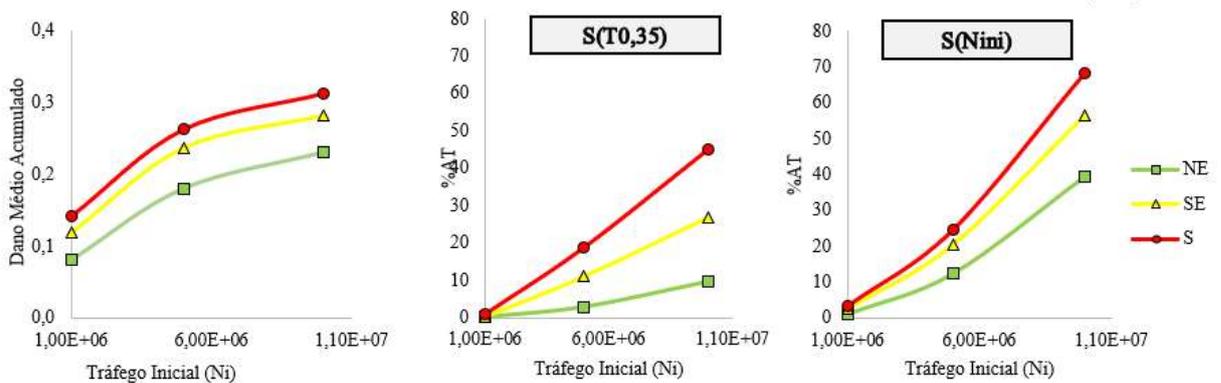
g) M7

Figura C.25 – Resultados de D_{acm} e %AT para variação da velocidade de tráfego em diferentes climas e níveis de tráfego – M7.



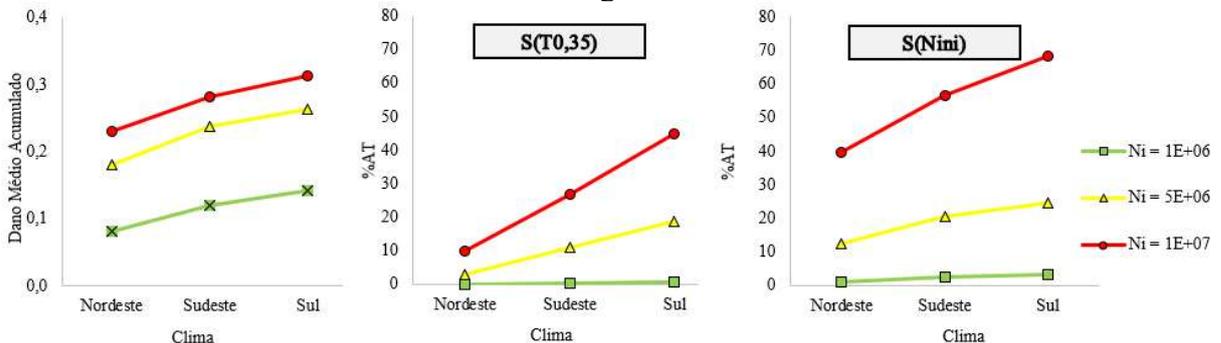
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura C.26 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M7.



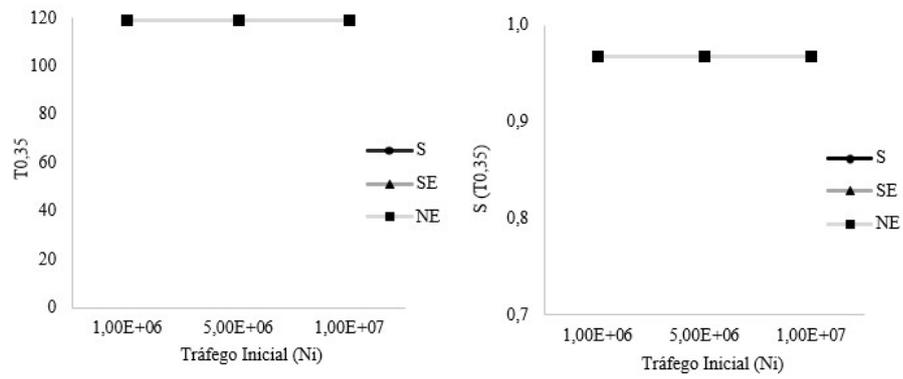
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura C.27 – Resultados de D_{acm} e %AT finais para variação de clima para diferentes níveis de tráfego – M7.



Fonte: Elaborado pelo autor.

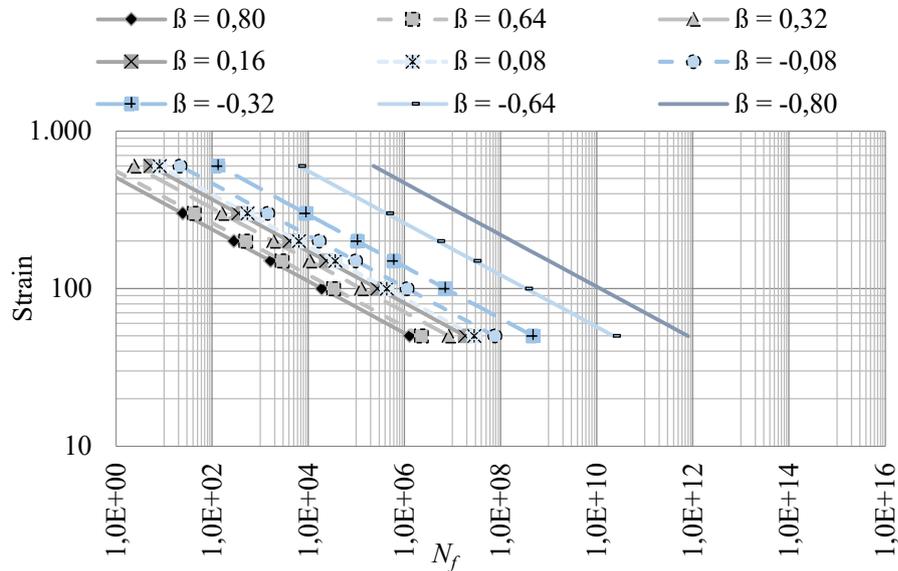
Figura C.28 – Resultados de $T_{0,35}$ e de $S(T_{0,35})$ para variações de níveis de tráfego a 60km/h em diferentes climas – M7.



Fonte: Elaborado pelo autor.

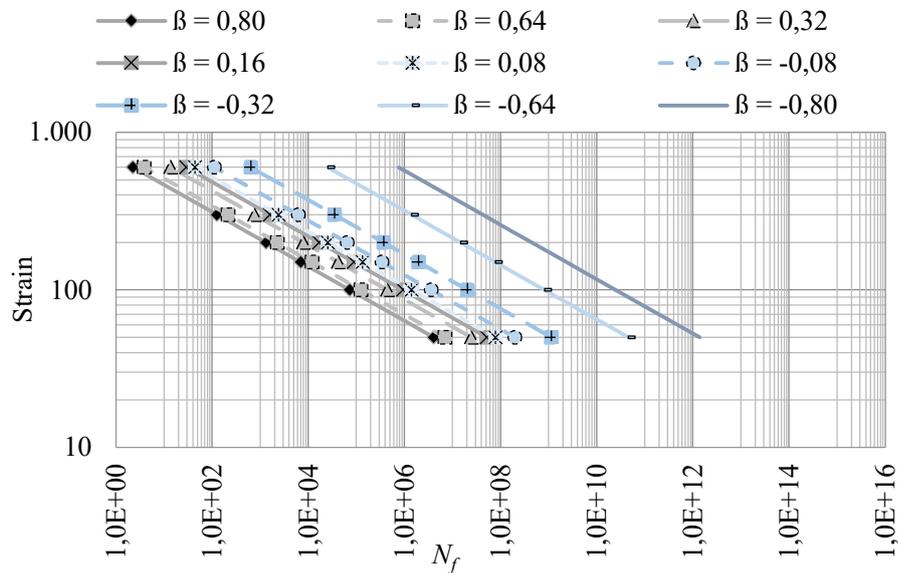
APÊNDICE D – RESULTADOS DE N_f PARA VARIAÇÕES DE β

Figura D.1 – Resultados da Variação de N_f para diferentes valores de β na mistura M1. Resultados de N_f obtidos para uma temperatura de 25°C e 10Hz.



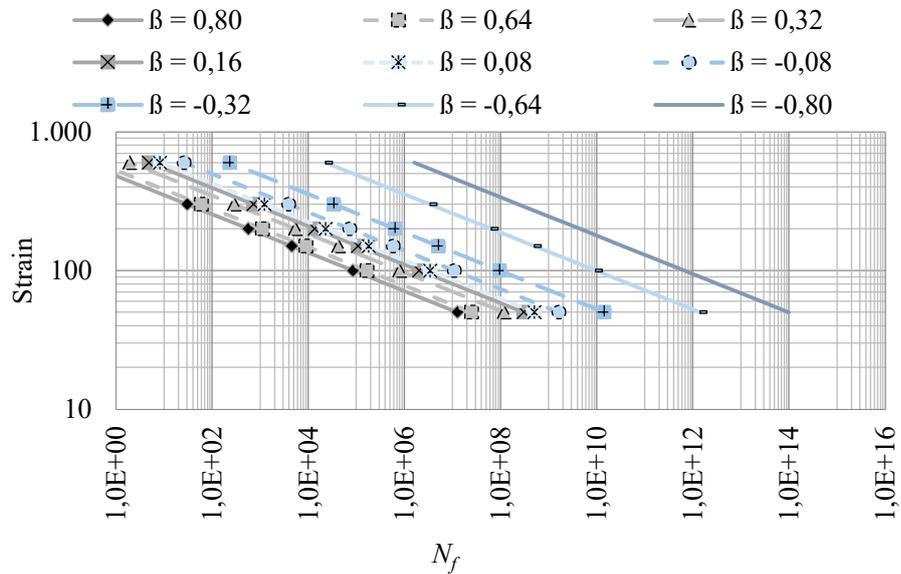
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.2 – Resultados da Variação de N_f para diferentes valores de β na mistura M2. Resultados de N_f obtidos para uma temperatura de 25°C e 10Hz.



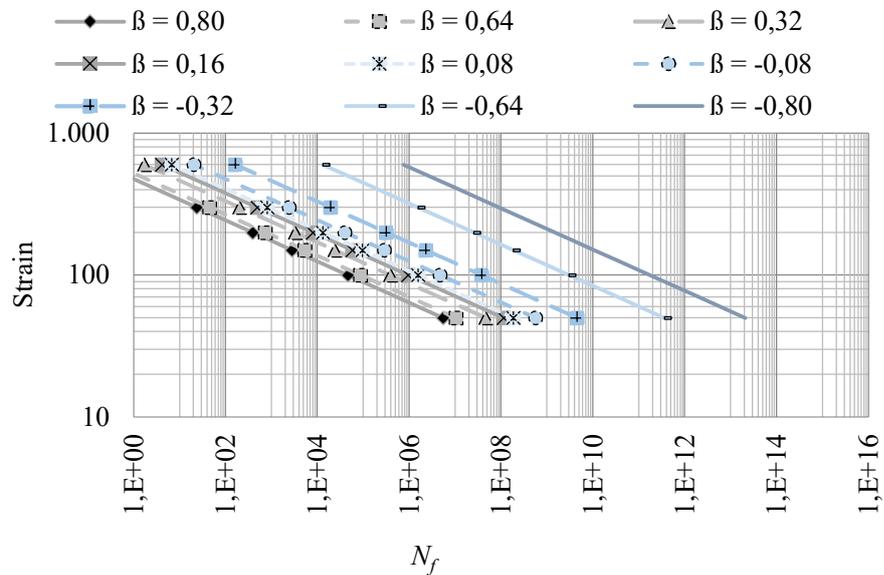
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.3 – Resultados da Variação de N_f para diferentes valores de β na mistura M3. Resultados de N_f obtidos para uma temperatura de 25°C e 10Hz.



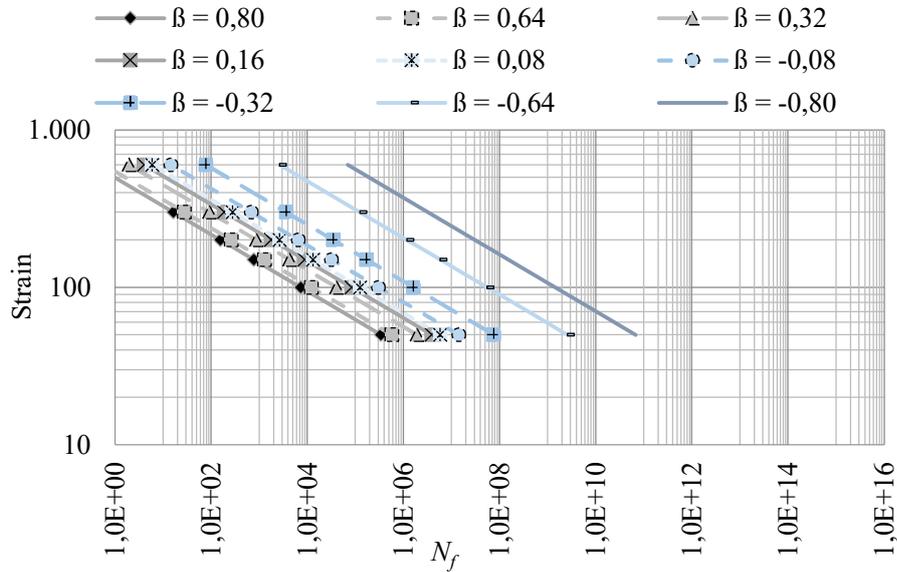
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.4 – Resultados da Variação de N_f para diferentes valores de β na mistura M4. Resultados de N_f obtidos para uma temperatura de 25°C e 10Hz.



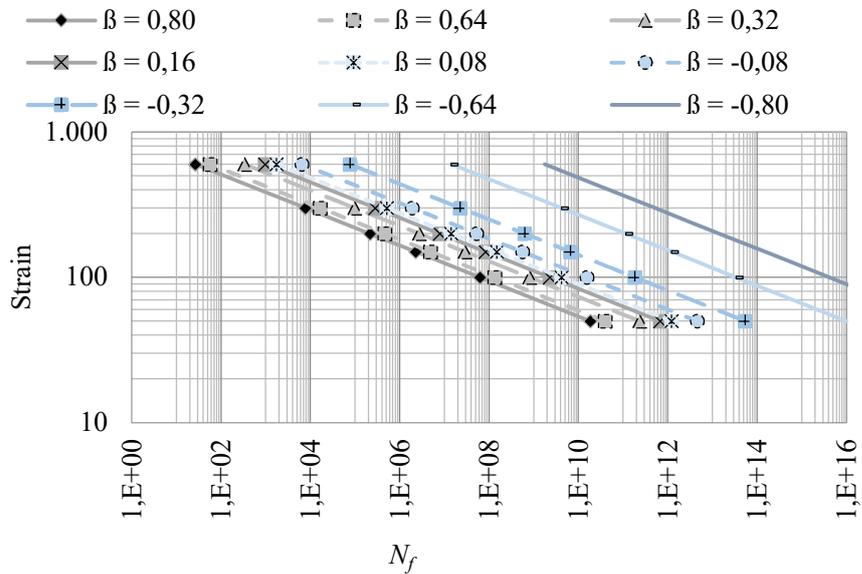
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.5 – Resultados da Variação de N_f para diferentes valores de β na mistura M5. Resultados de N_f obtidos para uma temperatura de 25°C e 10Hz.



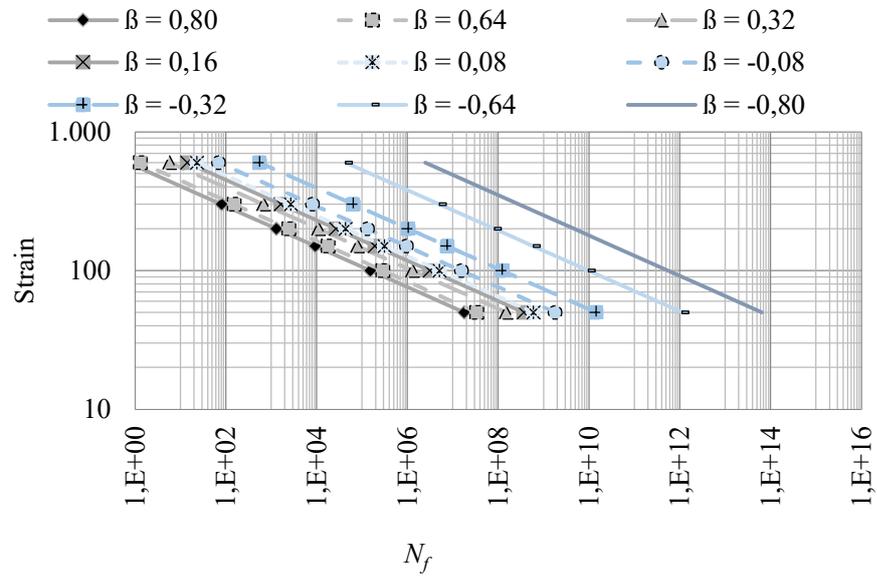
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.6 – Resultados da Variação de N_f para diferentes valores de β na mistura M6. Resultados de N_f obtidos para uma temperatura de 25°C e 10Hz.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura D.7 – Resultados da Variação de N_f para diferentes valores de β na mistura M7.
Resultados de N_f obtidos para uma temperatura de 25°C e 10Hz.



Fonte: Elaborado pelo Autor.