



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

**LUCIMAR DA SILVA SANTIAGO**

**CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO**  
**MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS**  
**ASFÁLTICOS**

**FORTALEZA**

**2017**

LUCIMAR DA SILVA SANTIAGO

CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO MECANÍSTICO-  
EMPÍRICO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Ph.D. Jorge Barbosa Soares

FORTALEZA  
2017

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)

---

- S226c Santiago, Lucimar da Silva.  
Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos / Lucimar da Silva Santiago. – 2017.  
164 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
1. Dimensionamento de pavimentos. 2. Modelo S-VECD. 3. Função de transferência. 4. Área trincada. 5. Programa CAP 3D-D. I. Título.

CDD 388

---

LUCIMAR DA SILVA SANTIAGO

CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO MECANÍSTICO-  
EMPÍRICO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 30/ 08/ 2017.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Ph.D. Jorge Barbosa Soares (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. D.Eng. Suelly Helena de Araújo Barroso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

---

Ph.D. Luis Alberto Herrmann do Nascimento  
Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (Petrobras/Cenpes)

---

Prof. D.Sc. Luciano Pivoto Specht  
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

*A Deus*

*e a todos aqueles que Ele delicadamente colocou na minha estrada da vida, permitindo-me enxergá-la um pouco mais próximo de sua verdadeira proporção e beleza.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

À Maria Santiago, mãe de fibra, que apesar de todas as adversidades, fincou pé firme em garantir minha educação básica.

À Angelina Gabriele (*in memorian*), madrinha no sentido mais completo de ser, proporcionando boa parte da minha educação, formal e não formal.

À Jamille Medeiros, meu oposito complementar, que por sua leveza e alegria de viver fez o meu trafegar pela estrada da vida mais leve e suave.

À minha avó Angélica, Ana Angélica, Sabrina, Gabriel, Mirna, Tia Marice e Tia Cimar, por entenderem minha ausência e respeitarem minhas necessidades de reclusão. À Amora e Amélie, pelos carinhos constantes e companheirismo.

Às amigas queridas e conselheiras Áurea Holanda, Célia Santos, Suelly Helena, Ivone Sales Aleixo, Telma Lima, por toda a força dada e audição paciente.

Ao Professor Jorge Barbosa Soares, pela competência que inspira e pelo incentivo em momentos ímpares.

A Luis Alberto Nascimento, da Petrobras, pela ajuda fundamental à conclusão deste trabalho.

À Annie Nascimento, Rômulo Jácome, Helmer Bóris, Clélia Albuquerque e Zacarias Matias, que facilitaram muitos dos passos dados nesta pesquisa.

A Samuel Torquato, pela ajuda nos aspectos referentes ao programa CAP 3D-D, amplamente utilizado nessa Tese.

Aos colegas Francisco de Almeida, Antônio Ribeiro Júnior e Lilian Gondim, por compartilharem comigo o caminho do doutorado e ótimas análises, técnicas ou não.

A Nelson Wargha e Beatriz Gouveia pelo suporte nas questões relativas ao DNIT.

À UFC/UFCA pelo suporte dado nas inúmeras idas e vindas pelas estradas Juazeiro do Norte-Fortaleza.

À Banca Examinadora desta Tese, pelo tempo dedicado e ricas contribuições.

A todos os entrevistados no âmbito desta pesquisa.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP, pelo suporte financeiro durante parte do curso de doutorado.

Finalmente, a todos aqueles que não foram citados, mas que de alguma forma ajudaram ou incentivaram na conclusão deste trabalho.

## RESUMO

O método de dimensionamento de pavimentos asfálticos oficialmente adotado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e amplamente utilizado no Brasil encontra-se defasado em relação aos avanços alcançados na pavimentação rodoviária mundial. Esse método não considera aspectos relevantes ao desempenho dos pavimentos, dentre os quais, características específicas do tráfego/carregamento atuante sobre a via e a influência do clima no comportamento mecânico dos materiais constituintes. Somado a isso, não considera a previsão de desempenho durante a vida de serviço do pavimento em relação aos defeitos recorrentes no Brasil, tais como a fadiga e a deformação permanente. Destaque-se, contudo, iniciativas em curso no país, para alterar este panorama, por meio do desenvolvimento de um método mecanístico-empírico, com base em dados de campo e avanços técnico-científicos realizados no âmbito da Rede Temática de Asfalto, o qual será desenvolvido em três níveis de análise, básico, intermediário e avançado. O desenvolvimento do nível básico já está em curso. Assim, na presente pesquisa buscou-se contribuir para a construção de uma metodologia de dimensionamento em nível de análise intermediário desse novo método de dimensionamento, ao qual está associado uma equação de previsão de desempenho de percentual de área trincada, que também foi desenvolvida no âmbito da presente pesquisa. Para isso, foram utilizados dados de evolução do dano por fadiga obtidos por meio de resultados de deformações dos materiais asfálticos, através do modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD), associado a uma análise estrutural elástica-linear. Os resultados de dano obtidos foram promissores e permitiram o desenvolvimento de uma função de transferência com bons resultados da correlação entre o percentual de área trincada medida em campo e prevista através do modelo. Considerando as devidas restrições, a função de transferência gerada foi implementada na metodologia de dimensionamento proposta, a qual está formatada em um programa computacional, o CAP 3D-D.

**Palavras-chave:** Dimensionamento de pavimentos. Modelo S-VECD. Função de transferência. Área trincada. Programa CAP 3D-D.

## ABSTRACT

The asphalt pavement design guide officially followed by the Brazilian National Department of Transport Infrastructure – DNIT is obsolete if compared to other advanced pavement design guides around the world. Firstly, that design does not take into account relevant aspects regarding pavement behavior, such as traffic, load-supporting capacity, and weather conditions. In addition, it does not consider the prediction of pavement life performance regarding the recurrent distresses observed in Brazil, such as fatigue and permanent deformation. However, a mechanistic-empirical method based on field data developed by Rede Temática de Asfalto has brought technical and scientific advances in order to change the current scenario. The referred method is meant to be applied in three levels of analysis: basic, intermediate and advanced. The basic level is already in progress. Thus, the present research contributes to the intermediate level by developing a new design method associated with an equation to forecast the percentage of cracked area. To attain such goal, it was assessed the fatigue damage evolution data obtained from the analysis of asphaltic material deformation results by using the Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) model, associated to an elastic-linear structural analysis. The findings were promising and made possible the development of a satisfactory transfer function of the correlation between the percentage of cracked areas measured in the field and the ones predicted through the model. Considering the due limitations, the developed transfer function had been inserted in the proposed method, through the computer program CAP 3D-D.

**Keywords:** Pavement design guide. S-VECD model. Transfer function. Cracked area. CAP 3D-D program.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por país .....	19
Figura 2 - Comparativo entre o percentual territorial das regiões brasileiras e o percentual dos tipos de vias nacionais. ....	19
Figura 3 - Fluxograma da estrutura da Tese .....	24
Figura 4 - Tensões, deformações e deflexões em pontos críticos do pavimento asfáltico .....	29
Figura 5 - Fluxograma básico de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos .....	30
Figura 6 - Representação Esquemática do Processo de Dimensionamento pelo MEPDG .....	34
Figura 7 - Conceito de nível de confiança para o (IRI) segundo o MEPDG.....	42
Figura 8 - Fluxograma do método mecanístico para pavimentos flexíveis do Austroads.....	44
Figura 9 - Modelo esquemático do pavimento no dimensionamento mecanístico pelo Austroads .....	47
Figura 10 - Sistema de coordenadas no LVECD.....	54
Figura 11 - Gráfico de contorno da distribuição espacial das tensões e deformações no pavimento em um dado sub-período de projeto .....	55
Figura 12 - Esquema do método de dimensionamento de pavimentos da COPPE/UFRJ, 1991 .....	65
Figura 13 - Fluxograma da estrutura conceitual do SisPav .....	66
Figura 14 - a) Representação do efeito da VLT no dano acumulado e b) Pontos de análise para consideração da VLT .....	68
Figura 15 - Tela com informações iniciais no SRTA .....	73
Figura 16 – Características dos níveis hierárquicos do método de dimensionamento mecanístico-empírico brasileiro.....	74
Figura 17 - Visão geral da gerência de pavimentos com foco no dimensionamento .....	76
Figura 18 - Coordenadas dos pontos de análise da deformação principal máxima proposta por Nascimento (2015).....	82
Figura 19 - Comparativo entre a função de transferência de Nascimento (2015) e Fritzen (2016).....	83
Figura 20 - a) Grade metálica de 1m × 1m (aberturas de 10cm × 10cm) para mapeamento de trincas e b) Esquema de grade sobre a via em análise .....	84
Figura 21 - Esquema de mapeamento de defeitos nos Trechos da Ilha do Fundão-RJ .....	85
Figura 22 - Quantidade de engenheiros vinculados ao setor de projetos da SR.....	90

Figura 23 - % de SR's que fazem pesquisas de tráfego por intervalo de tempo .....	91
Figura 24 - Conhecimento dos entrevistados quanto ao desenvolvimento de um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional .....	92
Figura 25 - Percentual de pesquisas de doutorado realizadas no Brasil que permeiam a temática dimensionamento de pavimentos .....	95
Figura 26 - Postos de coleta do PNCT .....	99
Figura 27 - Fluxograma da metodologia de dimensionamento proposta na presente pesquisa .....	103
Figura 28 - Tela principal do programa CAP 3D-D (Versão Beta).....	104
Figura 29 - Abas de inserção de dados gerais e de carregamento do CAP 3D-D .....	105
Figura 30 - Tela de inserção da distribuição horária do tráfego e dos fatores de distribuição sazonal .....	106
Figura 31 - Aba de inserção de dados de clima do CAP 3D-D.....	107
Figura 32 - Aba de inserção de dados das camadas do pavimento em análise do CAP 3D-D .....	108
Figura 33 - Aba de inserção dos dados de rigidez dos materiais.....	109
Figura 34 - Aba na qual podem ser inseridos os parâmetros das curvas de fadiga da mistura asfáltica .....	110
Figura 35 - Coordenadas dos pontos de análise da deformação principal máxima utilizada na metodologia apresentada na presente Tese.....	111
Figura 36 - Gráfico de dano médio x mês apresentado na tela principal do CAP 3D-D após realizada a análise de dano .....	114
Figura 37 - Efeito do uso de diferentes parâmetros de rigidez e vida de fadiga no dano médio .....	115
Figura 38 - Dano médio x N com variação da velocidade .....	125
Figura 39 - Dano médio x N com variação da temperatura.....	125
Figura 40 - Dano médio x N com variação dos parâmetros de fadiga .....	126
Figura 41 - Gráfico dos danos médios em função do N, obtidos nas análises realizadas nesta pesquisa para diferentes trechos .....	127
Figura 42 - %AT observado em campo x dano médio correspondente dos trechos da calibração.....	128
Figura 43 - Correlação entre o dano a 10% AT x tempo em que ocorre a taxa inicial de crescimento de dano 0,35 .....	129
Figura 44 - Correlação entre (a) $\Delta$ e $T_{0,35}$ e (b) S e $T_{0,35}$ .....	130

Figura 45 - %AT observada em função do dano reduzido por meio da função S.....	130
Figura 46 - Correlação entre o %AT observado e o %AT previsto .....	131
Figura 47 - %AT observada × dano médio reduzido obtido a partir da função S para os 17 trechos da validação.....	132
Figura 48 - Correlação entre %AT observada e %AT prevista de todos os trechos (Calibração +Validação) .....	133
Figura 49 - Erro de previsão (%AT prevista - %AT observada) em função do dano reduzido .....	133
Figura 50 - Estrutura do pavimento teste.....	135
Figura 51 - Evolução prevista da área trincada em função do tempo com diferentes espessuras para Mistura UFSC 50/70 (a) com 50% de confiabilidade e (b) com 99% de confiabilidade .....	136
Figura 52 - Evolução prevista da área trincada em função do tempo com diferentes espessuras para (a) Mistura UFSM 50/70 com 50% de confiabilidade e (b) Mistura UFSM 50/70 com 99% de confiabilidade .....	136
Figura 53 - (a) Dano médio em função do tempo e (b) dano reduzido em função do tempo para mistura UFSC .....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos níveis hierárquicos do MEPDG.....	35
Tabela 2 - Valores admissíveis de trincamento do tipo couro de jacaré indicados no MEPDG .....	41
Tabela 3 - Níveis de confiança para diferentes classes de rodovias norte americanas.....	42
Tabela 4 - Nível de confiança indicado por tipo de via no Austroads.....	49
Tabela 5 - Valores de RF sugeridos para os materiais asfálticos .....	49
Tabela 6 - Periodicidade das avaliações do pavimento realizadas na Pós-execução .....	72
Tabela 7 - Principais modelos de previsão desenvolvidos no Brasil.....	78
Tabela 8 - Coeficientes da função de %AT determinados por Nascimento (2015) e Fritzen (2016).....	87
Tabela 9 - Estações meteorológicas indicativas das temperaturas dos trechos usados nesta pesquisa.....	117
Tabela 10 - Dados de temperatura média do ar (°C) em Fortaleza e Curitiba .....	124
Tabela 11 - Parâmetros estatísticos do erro de previsão.....	134

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ATR	Afundamento da trilha de roda
CAP 3D-D	CAP 3D-Dimensionamento
CBR	<i>California Bearing Ratio</i> (o mesmo que Índice de Suporte Califórnia)
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DER (CE)	Departamento Estadual de Rodovias do Estado do Ceará
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSL	<i>Design Subgrade Level</i>
Efin3D	Método dos Elementos Finitos Tridimensional
EICM	<i>Enhanced Integrated Climate Model</i>
EMC	<i>Equilibrium Moisture Content</i>
$ E^* $	Módulo dinâmico
FCL	Fator campo <i>versus</i> laboratório
FEC	Fator de equivalência de carga
FEPAVE	<i>Finite Element Analysis of Pavement Structures</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
GPS	<i>General Pavement Studies</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMS	<i>Information Management System</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	<i>International Roughness Index</i>
ISC	Índice de Suporte Califórnia
HRB	<i>Highway Research Board</i>
LMP/UFC	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará
LTPP	<i>Long-Term Pavement Performance</i>
LVECD	<i>Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos

MEPDG	<i>Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide</i>
MR	Módulo de resiliência
NCSU	<i>North Carolina State University</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
PNCT	Plano Nacional de Contagem de Tráfego
RTA	Rede Temática de Asfalto
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SR	Superintendência Regional
S-VECD	<i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage</i>
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VECD	<i>Viscoelastic Continuum Damage Model</i>
VLT	Varição lateral do tráfego
WIN	<i>Weighing-in-motion</i>
WMAPT	<i>Weighted Mean Annual Pavement Temperature</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa detalhada da pesquisa.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2</b>	<b>Problema de pesquisa .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>23</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da Tese .....</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1</b>	<b>Tipos de métodos de dimensionamento .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2</b>	<b>Panorama dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos internacionais .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>MEPDG, 2008</i>.....</b>	<b>32</b>
2.2.1.1	<i>Breve introdução ao método.....</i>	32
2.2.1.2	<i>Dados de entrada.....</i>	35
2.2.1.3	<i>Dados de tráfego.....</i>	36
2.2.1.3.1	Dados de clima .....	36
2.2.1.3.2	Dados dos materiais constituintes.....	37
2.2.1.4	<i>Análise estrutural e de desempenho .....</i>	37
2.2.1.5	<i>Dados de saída .....</i>	40
<b>2.2.2</b>	<b><i>AUSTROADS, 2012</i>.....</b>	<b>42</b>
2.2.2.1	<i>Breve introdução ao método.....</i>	43
2.2.2.2	<i>Dados de entrada.....</i>	44
2.2.2.2.1	Dados de tráfego .....	44
2.2.2.2.2	Dados de clima .....	45
2.2.2.2.3	Dados dos materiais constituintes.....	46
2.2.2.3	<i>Análise estrutural e de desempenho .....</i>	47
2.2.2.4	<i>Dados de saída .....</i>	48
<b>2.2.3</b>	<b><i>FlexPAVETM 1.0</i> .....</b>	<b>49</b>
2.2.3.1	<i>Breve introdução ao método.....</i>	50
2.2.3.2	<i>Dados de entrada.....</i>	50
2.2.3.2.1	Dados de tráfego .....	50
2.2.3.2.2	Dados de clima .....	51
2.2.3.2.3	Dados dos materiais constituintes.....	52
2.2.3.3	<i>Análise estrutural e desempenho .....</i>	53

2.2.3.4	<i>Dados de saída</i> .....	54
2.2.4	<b><i>Outros métodos de Dimensionamento de Pavimentos Internacionais</i></b> .....	<b>55</b>
2.2.4.1	<i>Métodos de dimensionamento de pavimentos europeus</i> .....	55
2.2.4.2	<i>Outros métodos de dimensionamento americanos</i> .....	59
2.2.4.3	<i>Métodos de dimensionamento africanos e chinês</i> .....	61
2.3	<b>Evolução das metodologias de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil</b> .....	<b>62</b>
2.3.1	<i>Considerações sobre o Método do DNER/DNIT, 1966/2006</i> .....	62
2.3.2	<i>Método da COPPE/UFRJ, 1991/2015</i> .....	64
2.3.3	<i>SisPav, 2007</i> .....	66
2.3.4	<b><i>Considerações sobre a Rede Temática de Asfalto</i></b> .....	<b>69</b>
2.3.4.1	<i>Manual de Execução de Trechos Monitorados</i> .....	71
2.3.4.2	<i>SRTA – Sistema da Rede Temática de Asfalto</i> .....	72
2.3.4.3	<i>Escopo geral do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos em desenvolvimento</i> .....	73
2.4	<b>Previsão de desempenho em pavimentos asfálticos</b> .....	<b>75</b>
2.4.1	<i>Modelos de previsão de desempenho</i> .....	75
2.4.2	<i>Breve introdução ao dano por fadiga</i> .....	79
2.4.3	<i>Trabalhos nacionais envolvendo dano por fadiga associado a área trincada</i> ...	81
2.4.4	<i>Trincamento por fadiga em misturas asfálticas</i> .....	83
2.5	<b>Considerações finais sobre este capítulo</b> .....	<b>87</b>
3	<b>BREVE DIAGNÓSTICO DOS RECURSOS TÉCNICOS-CIENTÍFICOS NACIONAL DE SUPORTE A UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS</b> .....	<b>89</b>
3.1	<b>Mapeamento da infraestrutura física e de recursos humanos das Superintendências Regionais (SRs) do DNIT</b> .....	<b>89</b>
3.1.1	<i>Recursos humanos</i> .....	89
3.1.2	<i>Infraestrutura laboratorial disponível</i> .....	90
3.1.3	<i>Projetos atuais de Pavimentação Rodoviária</i> .....	91
3.1.4	<i>Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos</i> .....	92
3.2	<b>Mapeamento da infraestrutura física e de recursos humanos dos Departamentos Rodoviários Estaduais</b> .....	<b>93</b>
3.3	<b>O papel da universidade e as pesquisas desenvolvidas</b> .....	<b>94</b>
3.4	<b>Outras infraestruturas de apoio</b> .....	<b>97</b>

3.4.1	<i>O Plano Nacional de Contagem de Tráfego – PNCT</i> .....	97
3.4.2	<i>Estações Meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET</i> ....	100
3.5	<b>Considerações finais sobre este capítulo</b> .....	101
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	102
4.1	<b>Proposta de uma estrutura metodológica para o nível intermediário de um método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos</b> .....	102
4.1.1	<i>Dados de entrada</i> .....	104
4.1.1.1	<i>Dados gerais e de tráfego</i> .....	104
4.1.1.2	<i>Dados de clima</i> .....	106
4.1.1.3	<i>Dados dos materiais constituintes do pavimento</i> .....	107
4.1.2	<i>Análise estrutural e de desempenho</i> .....	110
4.1.2.1	<i>Determinação das deformações principais</i> .....	110
4.1.2.2	<i>Determinação do Nf</i> .....	112
4.1.2.3	<i>Determinação do dano médio</i> .....	113
4.1.3	<i>Dados de Saída</i> .....	114
4.2	<b>Metodologia de desenvolvimento de uma função de transferência de previsão de percentual de AT</b> .....	114
4.2.1	<i>Aspectos preliminares</i> .....	115
4.2.2	<i>Determinação da função de transferência de percentual de AT</i> .....	116
4.2.2.1	<i>Trechos experimentais utilizados para construção da função de transferência</i> .	116
4.2.2.2	<i>Calibração da função de transferência</i> .....	118
4.2.2.2.1	Determinação do dano médio .....	118
4.2.2.2.2	Determinação de uma taxa inicial de crescimento de dano médio .....	118
4.2.2.2.3	Determinação do dano médio correspondente ao percentual de AT observada em campo e do percentual de AT referente ao crescimento inicial do dano médio ..	119
4.2.2.2.4	Determinação do <i>Shift Factor</i> e do dano reduzido .....	119
4.2.2.2.5	Obtenção da função de transferência de previsão de percentual de AT.....	120
4.2.2.2.6	Validação da função de transferência .....	121
5	<b>DESENVOLVIMENTO DE UMA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE PERCENTUAL DE ÁREA TRINCADA</b> .....	123
5.1	<b>Resultados preliminares das análises de dano médio</b> .....	123
5.2	<b>Resultados e análises referentes à calibração da função de transferência de percentual de AT</b> .....	126

5.2.1	<i>Resultados de dano médio e taxa inicial de crescimento de dano .....</i>	127
5.2.2	<i>Resultados do dano médio correspondente ao percentual de AT observado e percentual de AT correspondente ao crescimento inicial do dano médio .....</i>	128
5.2.3	<i>Dano correspondente a 10% AT .....</i>	129
5.2.4	<i>Equação do shift factor e função de transferência calibrada .....</i>	129
5.3	<b>Resultados e análises referentes à validação da função de transferência de percentual de AT.....</b>	132
5.4	<b>Dimensionamento teste.....</b>	135
5.5	<b>Considerações finais sobre este capítulo.....</b>	137
6	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	139
6.1	<b>Principais contribuições Tese .....</b>	139
6.2	<b>Outras constatações desta Tese .....</b>	140
6.3	<b>Recomendações para trabalhos futuros.....</b>	141
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	143
	<b>APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO APLICADO AS SR's DO DNIT E DER's .....</b>	151
	<b>ANEXO A – TELAS INTERFACE DO PROGRAMA FlexPAVETM 1.0 (LVECD).....</b>	156
	<b>ANEXO B – TEMPERATURAS UTILIZADAS NAS ANÁLISES DE DANO .....</b>	158
	<b>ANEXO C – PROPRIEDADES DE CAMPO E DE LABORATÓRIO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS NESTA PESQUISA .....</b>	160

## 1 INTRODUÇÃO

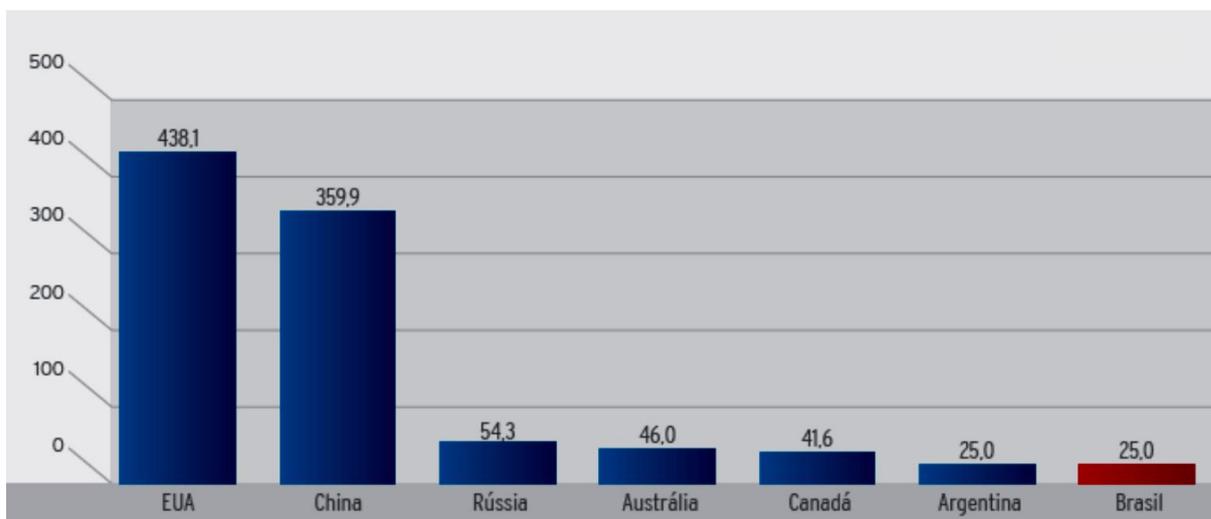
A despeito da crise econômica mundial que se manifestou mais fortemente no Brasil a partir de 2016, na década e meia anterior houve um intenso crescimento econômico, que levou ao aumento da produção agrícola e industrial, além de alavancar o consumo dos produtos nacionais tanto no mercado interno como externo. Isso refletiu diretamente na solicitação de infraestruturas de apoio ao escoamento de produtos, sobretudo no meio rodoviário, que segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2014), é responsável por aproximadamente 61,1% da matriz de transporte de carga do país.

Sendo o processo de suprimento, produção e distribuição de bens e serviços diretamente afetados pela qualidade do sistema de transportes, a quantidade e condição das rodovias compromete a eficiência e a eficácia do setor produtivo nacional como um todo. Esse fato é mais agravado quanto maiores são as distâncias entre os centros de produção e os mercados consumidores cujos custos, tempo e condições de deslocamento precisam ser otimizados, com a intenção de garantir a viabilidade financeira dos processos produtivos (SANTIAGO, 2005).

Assim, a fim de atender a demanda de infraestrutura rodoviária de um país em desenvolvimento, o Brasil precisa avançar no que se refere a quantidade e qualidade das rodovias pavimentadas. No quesito quantidade, uma das razões é a baixa densidade da malha rodoviária pavimentada nacional (25km a cada 1.000km<sup>2</sup>) em comparação a países como os apresentados na Figura 1. Destaca-se a diferença em relação a Austrália, Canadá e Rússia cuja extensão territorial é semelhante e as densidades são bem superiores a do Brasil, mesmo tendo parte de seus territórios em áreas de difícil acesso, como o caso do deserto na Austrália e regiões geladas no Canadá e na Rússia.

A diferença de densidade registrada em relação a outros países é também percebida quando se compara as diferentes regiões do Brasil. Sendo essa outra razão para o necessário aumento da infraestrutura rodoviária nacional. A Figura 2 mostra isso ao comparar o percentual correspondente ao território de cada região do país em relação aos respectivos percentuais de tipos de rodovias (pavimentadas, não pavimentadas e planejadas) nesses territórios. Apesar das regiões sul e sudeste apresentarem um percentual de extensão rodoviária aproximadamente três vezes sua extensão territorial, o mesmo não se registra para as outras regiões do país.

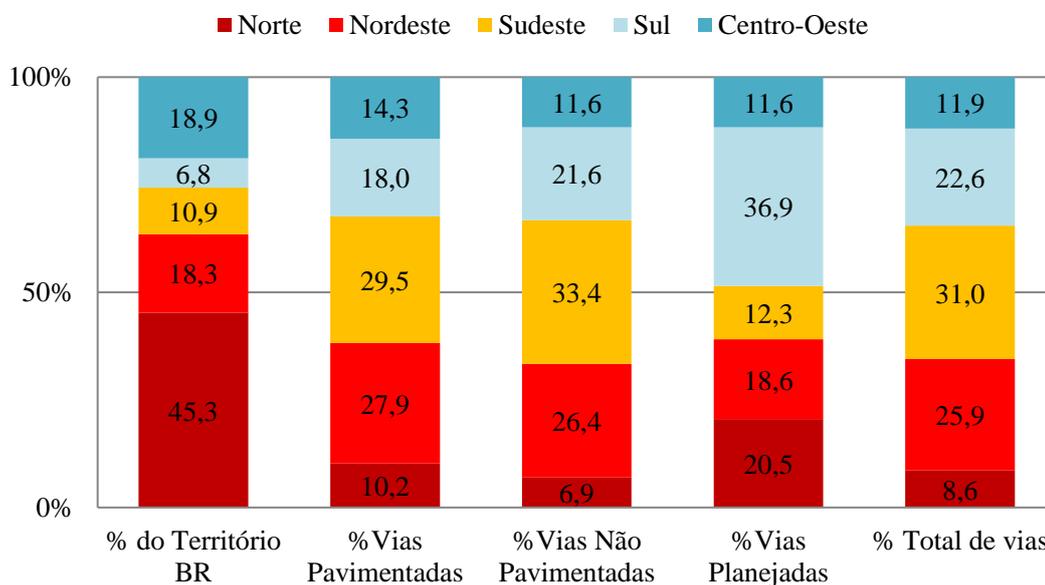
Figura 1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por país



Fonte: Confederação Nacional dos Transportes (2016a).

Legenda: valores em km/1.000 km².

Figura 2 - Comparativo entre o percentual territorial das regiões brasileiras e o percentual dos tipos de vias nacionais.



Fonte: Elaborado pela autora, baseado em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017) e Confederação Nacional dos Transportes (2016b).

No que concerne à conservação das rodovias nacionais, a Pesquisa Rodoviária CNT 2016 (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, 2016a) não apresenta um quadro positivo, dado que 50% dessas vias são classificadas com uma condição de conservação geral de regular a péssimo, as piores dentro da classificação. A situação é mais

agravada quando se analisa de modo particular a Região Norte do país, em que o somatório das rodovias classificadas como regular e péssimo ultrapassam os 65%. Observando-se os dados de versões anteriores dessa mesma pesquisa percebe-se pequenas variações positivas no quadro, o que ainda não representa uma melhoria efetiva e contínua do estado de conservação dos pavimentos nacionais. Isso caracteriza a necessidade real de promover a melhoria efetiva das vias existentes no Brasil, o que em muitos casos pode levar um necessário processo de reconstrução.

Num cenário de necessidade de concepção e reconstrução de rodovias, um aspecto determinante na garantia da qualidade dessa nova infraestrutura é o dimensionamento de pavimentos. Por meio de uma análise estrutural, por exemplo, pode-se obter uma previsão do desempenho do pavimento ao longo do seu período de serviço. Quanto mais acurada for essa previsão na fase de projeto, maiores serão as possibilidades de se obter um pavimento eficiente no que diz respeito à sua vida útil. As consequências serão uma melhor relação custo/benefício dos recursos empregados, uma maior satisfação e um beneficiamento do usuário. Essa é a razão pela qual o dimensionamento de pavimentos é o foco deste trabalho.

## **1.1 Justificativa detalhada da pesquisa**

O “Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis”, oficialmente em uso no Brasil, é datado de 1966, com pequenas alterações subsequentes. Apesar da facilidade de uso, a comunidade rodoviária nacional reconhece que esse método já não mais se adequa às características atuais das rodovias nacionais. Ele apresenta restrições relevantes, como: não levar em consideração o aumento que houve no país das solicitações de carga, volume e magnitude do tráfego; não permitir a inserção de parâmetros que considerem fatores climáticos, como a umidade e temperatura do ar; não permitir a utilização dos diversos tipos de materiais que surgiram ao longo do tempo; não incorporar os avanços científicos e tecnológicos na área (ensaios de laboratório e também nos programas computacionais de análise, além da própria concepção de novos tipos de pavimentos).

Além disso, o método não utiliza uma análise mecânica que faça uso da resposta estrutural por meio da análise de tensões e deformações nos pavimentos (MOTTA, 1991; FRANCO, 2007; SOARES, MORENO e MOTTA, 2009). Franco (2007) reforça essa inadequação, quando reporta que há uma contínua evolução no campo da pavimentação no que se refere à pesquisa, contudo, na prática, as técnicas utilizadas são as tradicionais.

Assim, foi sendo destacado, no meio técnico-científico nacional, a necessidade de concepção de um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos para o Brasil. Para isso, deve ser levado em consideração, tanto quanto possível, aspectos não contemplados no método atual. Permitir atualizações continuadas também é um fator importante, de modo que avanços no campo técnico-científico possam ser facilmente incorporados (MOTTA, 1991; SOARES, MORENO e MOTTA, 2009).

Os métodos em construção ou concebidos (de maneira mais contundente) na última década e meia podem guiar na resolução da atual problemática brasileira. A tendência desses métodos é que realizem a análise estrutural, fazendo uso, de resultados de ensaios laboratoriais relativos ao comportamento mecânico dos materiais a serem empregados.

No âmbito nacional, destacam-se os trabalhos de Motta (1991), Franco (2007), Nascimento (2015) e Fritzen (2016). Dodt, Soares e Barroso (2012) destacam no âmbito internacional, o novo método de dimensionamento de pavimentos norte-americano concebido pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), o *AASHTOWare Project*, antigo *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), que após mais de uma década de trabalho teve sua versão final lançada em 2008. Nove anos após seu lançamento, vem sendo implementado em alguns estados americanos, depois de adaptações regionais. Esse método tem sido referência na concepção de outros métodos no mundo, ainda que a sua aplicação em realidade distinta da norte-americana deva ser ponderada.

Além desse método, está sendo desenvolvido também nos Estados Unidos, na *North Carolina State University* (NCSU), o *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses* (LVECD), atual FlexPAVETM 1.0. Mesmo em desenvolvimento, uma versão com as principais funcionalidades foi liberada em 2014. A principal diferença apresentada em relação ao MEPDG é a introdução da análise viscoelástica de misturas asfálticas, permitindo uma análise de desempenho estrutural mais próxima da realidade em campo.

Países Europeus e a Oceania também desenvolveram, na última década e meia, métodos de dimensionamento de pavimentos específicos para as suas respectivas realidades. Na Nova Zelândia e na Austrália, o método de dimensionamento faz parte de um corpo de metodologias relacionadas à gestão rodoviária, o AUSTROADS. Esse inclui desde o projeto geométrico, passando pelo projeto de misturas e de dimensionamento de pavimentos, dentre outros. Já na Europa, segundo Soares, Moreno e Motta (2009), a tendência é investir na

elaboração de catálogos de dimensionamento, facilitando assim o uso das metodologias analíticas nas quais foram embasados.

Essas novas metodologias, baseadas em princípios mecanístico-empíricos, podem ser tão mais ricas quanto forem a quantidade e a qualidade das informações existentes sobre as infraestruturas rodoviárias construídas. Particularmente, nesse quesito, o Brasil é carente de informações na maioria das regiões, principalmente se coletadas de forma padronizada e sistemática. A exceção é a recente ação da Rede Temática de Asfalto (RTA), projeto patrocinado pela Petrobras, com participação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e várias universidades nacionais. Esse projeto objetiva, em parte, preencher a lacuna da falta de dados, mediante o estímulo financeiro para a observação em campo do comportamento dos pavimentos asfálticos por meio da construção e do acompanhamento de trechos experimentais, em parceria com órgãos rodoviários nacional e estaduais em alguns estados do país (REDE TEMÁTICA DE ASFALTO, 2012).

Os dados resultantes do acompanhamento desses trechos experimentais, até setembro de 2013, geraram dois trabalhos acadêmicos de impacto na construção do novo método brasileiro, as teses de Doutorado de Nascimento (2015) e Fritzen (2016). Conforme Nascimento (2014), o novo método de dimensionamento será desenvolvido em três níveis de análise A (básico), B (intermediário) e C (completo). Em ordem de acurácia, o nível C será o mais completo e ao qual a pesquisa de Nascimento (2015) está intrinsicamente relacionada. Já a pesquisa de Fritzen (2016) contribui com o Nível A. Para construção do Nível A foi firmado um contrato entre o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) e o DNIT.

Pretende-se então, no âmbito da pesquisa ora apresentada, gerar proposições que auxiliem na construção e implementação de um eventual Nível B do novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos asfálticos. O enfoque será o apresentado nos itens subsequentes deste capítulo.

## **1.2 Problema de pesquisa**

Conforme visto nos itens anteriores, um dos maiores desafios da engenharia rodoviária brasileira é a concepção e a conservação das rodovias nacionais, de modo a atender às necessidades de deslocamentos de bens e pessoas com segurança e conforto. No contexto dessa macro problemática, há um problema mais específico a ser resolvido, que é a concepção

de um método de dimensionamento nacional para pavimentos asfálticos, que considere as atuais características do tráfego nacional e os avanços técnicos científicos ocorridos no âmbito da pavimentação rodoviária nacional e mundial. Mesmo com ações da Rede Temática de Asfalto e do DNIT em curso, entende-se que o problema é bastante complexo e requer a contribuições em diversas frentes. Sendo os níveis de análise uma das formas de dividir essas frentes, buscou-se na presente pesquisa contribuir para o preenchimento dessa lacuna no âmbito do nível intermediário do método ao propor uma metodologia simplificada de dimensionamento focada no desempenho do pavimento. Paralelo a isso, procura-se também identificar a infraestrutura nacional de apoio a implantação manutenção do novo método de dimensionamento.

### **1.3 Objetivos**

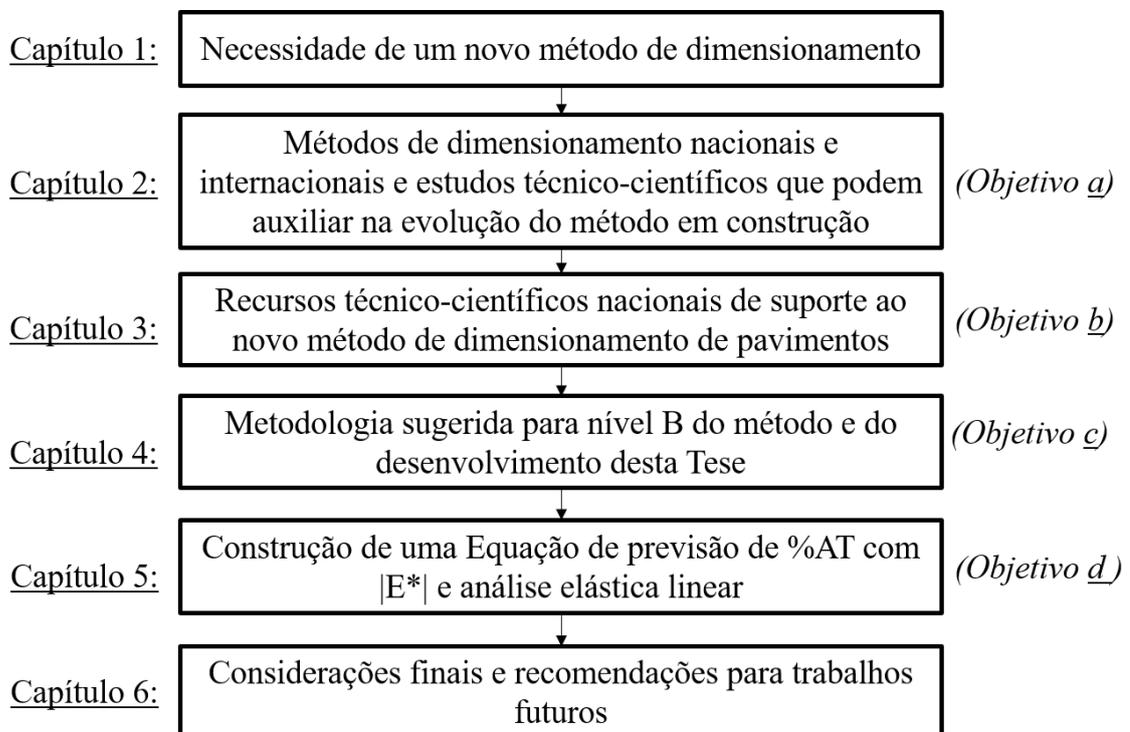
O objetivo geral da presente pesquisa é contribuir para a elaboração de um nível intermediário do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional, bem como identificar a infraestrutura nacional disponível para implementação do novo método de dimensionamento a partir do Nível A. Associados a esse objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) verificar em outras pesquisas técnico-científicas e em outros métodos de dimensionamento de pavimentos – nacionais e internacionais – parâmetros (de tráfego, clima, materiais e análise estrutural) que possam vir a compor um nível intermediário do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos brasileiro;
- b) apresentar um panorama geral dos recursos técnico-científicos de apoio a construção e implementação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional;
- c) apresentar uma estrutura metodológica simplificada para o nível B, intermediário, do novo método de dimensionamento;
- d) desenvolver uma equação de previsão de desempenho de percentual de área trincada, que possa ser incorporada ao nível intermediário de análise do novo método de dimensionamento.

## 1.4 Estrutura da Tese

A presente Tese é dividida em seis capítulos, nos quais buscou-se apresentar as soluções encontradas aos objetivos estabelecidos no âmbito da pesquisa a ela associada e apresentados no item anterior. A Figura 3 apresenta de maneira esquemática a estrutura do trabalho, associando a cada capítulo o objetivo específico a ele mais diretamente vinculado. A descrição mais detalhada do conteúdo dos capítulos encontra-se na sequência.

Figura 3 - Fluxograma da estrutura da Tese



Fonte: Elaborado pela autora.

No Capítulo 1, é discutido a necessidade de um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos para o Brasil. São apresentados também os objetivos e os princípios que norteiam a presente pesquisa de doutorado.

No Capítulo 2, é apresentado o levantamento bibliográfico usado como base teórica para a pesquisa. Os assuntos abordados são: i) o dimensionamento de pavimentos e um panorama geral dos métodos internacionais; ii) a evolução dos métodos de dimensionamento de pavimentos nacionais; e iii) o desempenho de pavimentos com enfoque no dano por fadiga e sua correlação com a área trincada em campo.

No Capítulo 3, apresenta-se um breve diagnóstico dos recursos técnico-científicos existentes no Brasil que possam dar suporte a construção, implementação e até possíveis futuras melhorias no método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional que encontra-se em desenvolvimento.

No Capítulo 4, é apresentada uma estrutura metodológica para um nível intermediário do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos brasileiro, bem como são descritos os passos para o desenvolvimento de uma equação de previsão de percentual de área trincada em campo. Para isso, são utilizados os resultados de comportamento mecânico, especificamente o módulo dinâmico, das misturas utilizadas nos trechos experimentais da RTA, à luz de uma análise elástica-linear.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados das análises realizadas para a construção da equação de previsão de percentual de área trincada em campo, bem como a equação resultante destas análises.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais a respeito da pesquisa, os caminhos considerados inconclusivos nesta Tese, bem como recomendações de pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Incluindo as redes federal, estadual e municipal, o patrimônio viário nacional foi avaliado em 1998 em cerca de 300 bilhões de dólares, sendo considerado pelo então Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER) “o maior investimento público do país” (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM, 1998, pg. 01). Além da sua importância patrimonial, as suas condições estruturais e funcionais afetam economicamente a sociedade, não somente pelo valor das manutenções pelas quais devem passar regularmente, mas principalmente pelos custos operacionais dos veículos, gerados aos seus usuários, quando essas manutenções não ocorrem em períodos adequados.

Esse sistema viário não é isolado e faz parte de um sistema de gestão de pavimentos que vai desde o planejamento, passando por projetos, construção, manutenção e finalizando na avaliação de pavimentos (HAAS, 2001). Havendo falhas em qualquer das suas partes, os custos para a sociedade podem ser vultosos. É nesse sentido que a busca por vias eficientes e eficazes é de importância fundamental para a garantia econômica de todo o sistema. Isso deve perpassar pelo processo de constituição do pavimento, desde os projetos iniciais até a manutenção durante o período de serviço. Dentre esses, muitos aspectos técnico-científicos estão envolvidos, tal como o dimensionamento de pavimentos e suas vertentes, foco do presente trabalho. Assim, neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica utilizada como suporte para esta pesquisa, com os seguintes desdobramentos:

- a) inicialmente, discorre-se sobre os principais tipos de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos;
- b) na sequência é apresentado um panorama geral dos principais métodos de dimensionamento de pavimentos internacionais;
- c) em seguida, apresenta-se o processo evolutivo dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil;
- d) por fim, é dado foco ao processo de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos no Brasil, sobretudo no que diz respeito a previsão do percentual de área trincada associado ao dano por fadiga.

## 2.1 Tipos de métodos de dimensionamento

O dimensionamento de pavimentos é mais popularmente conhecido como o processo de definição de espessuras de camadas das vias, espessuras essas devidamente compatibilizadas com as características dos materiais integrantes das camadas. A finalidade é que o sistema de camadas proporcione suporte estrutural às ações solicitantes de tráfego e clima durante um período de projeto pré-estabelecido. O conforto e a segurança na trafegabilidade também devem ser considerados.

As metodologias utilizadas para obtenção de uma estrutura de pavimento podem ser diversas, a depender dos tipos de materiais, normas, técnicas e experiências locais. Sendo assim, a utilização de diferentes métodos gera estruturas diferentes, as quais podem ou não resistir aos esforços solicitantes durante o período de projeto. Daí a importância de uma metodologia de dimensionamento que possibilite a concepção de um modelo de pavimento que se aproxime do futuro pavimento real, de modo que, por meio de simulações, se chegue a estrutura mais apropriada para as condições específicas.

Huang (2004) classifica os métodos de dimensionamento de pavimentos em cinco tipos:

- a) Método de Resistência ao Cisalhamento: espessuras de camadas são escolhidas para que não ocorra falha por cisalhamento dos materiais das camadas. As principais propriedades dos materiais consideradas são a coesão e o ângulo de fricção interna. Segundo Huang (2004), Joseph Yoder propôs esse método em 1959, no livro *Principles of Pavement Design* (Princípios do Dimensionamento de Pavimentos), contudo não o citou na segunda edição do referido livro em 1975, o qual publicou em parceria com e Matthew Witczak. A justificativa, encontrada por Huang, é que o aumento das velocidades e do tráfego exigiam que os pavimentos fossem projetados para o conforto ao tráfego, não somente para evitar o cisalhamento. Assim, esse método entrou em desuso. Considerando a existência de grande número de rodovias de baixo volume de tráfego (RBVT) no Brasil e no mundo, revisitar esse método pode contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento para esse tipo de rodovia;
- b) Método de Limite de Deflexão: utiliza como princípio as equações de Boussinesq ou Burmister para estabelecer limites nas deflexões verticais dos

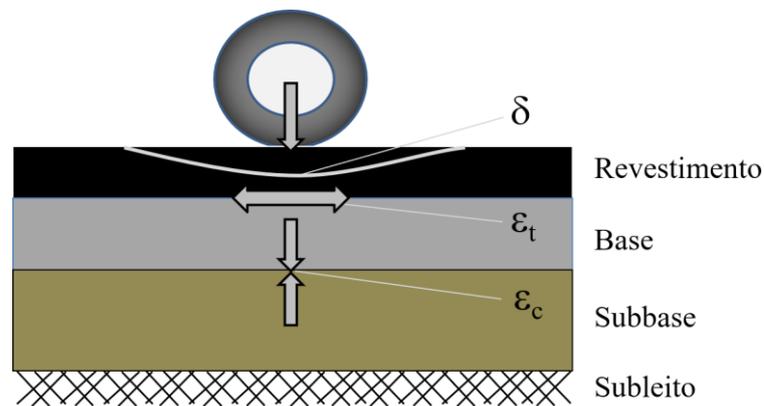
pavimentos. O estado do Kansas e a marinha norte americana utilizaram, respectivamente, 2,54mm e 6,35mm como valores máximos admissíveis de deflexão vertical. Esse método entrou em desuso porque as falhas ocorridas nos pavimentos ocorriam pelas excessivas tensões e deformações, ao invés de excessos nas deflexões;

- c) Método de Regressão: utiliza equações de regressão baseadas nos resultados obtidos em trechos experimentais. A desvantagem desse método é que as equações construídas só devem ser aplicadas para condições similares aquelas para as quais os trechos foram submetidos;
- d) Método Empírico: inicialmente utilizava somente uma classificação de solos para definição das espessuras das camadas dos pavimentos. Essa classificação evoluiu para a do *Transportation Research Board* (TRB), antigo *Highway Research Board* (HRB), que passou a incluir o Índice de Grupo. Pela necessidade de inserção de um parâmetro de rigidez foi criado o CBR. A desvantagem desse método é que deve ser aplicado somente em condições específicas de clima, material e carregamento;
- e) Método Mecânico-Empírico: considera-se o projeto estrutural dos pavimentos, sendo baseado nas propriedades mecânicas dos materiais constituintes. Essas propriedades são os dados de entrada para análise, a qual fornece a resposta estrutural do pavimento, i.e., tensões e deformações. Resultados de ensaios de laboratório e de desempenho em campo associados a essas respostas estruturais são utilizados para prever falhas ao longo do período de projeto. Os dois critérios de falha inicialmente utilizados nestes métodos mecânicos são a tensão de compressão vertical no topo do subleito e a tensão de tração horizontal na fibra inferior do revestimento, respectivamente, procurando reduzir as falhas quanto à deformação permanente e ao trincamento por fadiga. A Figura 4 mostra esquematicamente esses critérios, bem como a deflexão máxima no topo de revestimento.

Vale destacar, que os métodos empíricos são pautados na experimentação em grande escala e devem ser aplicados em condições ambientais, de materiais e de carregamento específicos. Mesmo que ainda hoje o empirismo exerça um importante papel no setor rodoviário, para Huang (2004), o dimensionamento de pavimentos, com o passar dos anos, saiu do campo da arte para o da ciência. Isso pode ser verificado na estrutura básica dos

métodos baseados em princípios mecânicos, que utilizam ensaios laboratoriais (representativos do comportamento dos materiais) como dados de entrada.

Figura 4 - Tensões, deformações e deflexões em pontos críticos do pavimento asfáltico



Fonte: Huang (2004) e Franco (2007), com adaptações.

Os métodos mecanístico-empíricos fazem uso de análises computacionais que possibilitam relacionar o comportamento estrutural dos materiais com o desempenho das potenciais soluções, ao longo do tempo. Há uma similaridade, contudo, com os métodos empíricos, no que diz respeito a necessidade de um conjunto de informações de desempenho dos materiais na estrutura em campo, de modo a serem elaboradas correlações que permitam a previsão do desempenho do pavimento novo ao longo de sua vida útil. Por isso a importância da existência de um banco de dados de apoio ao dimensionamento mecanístico.

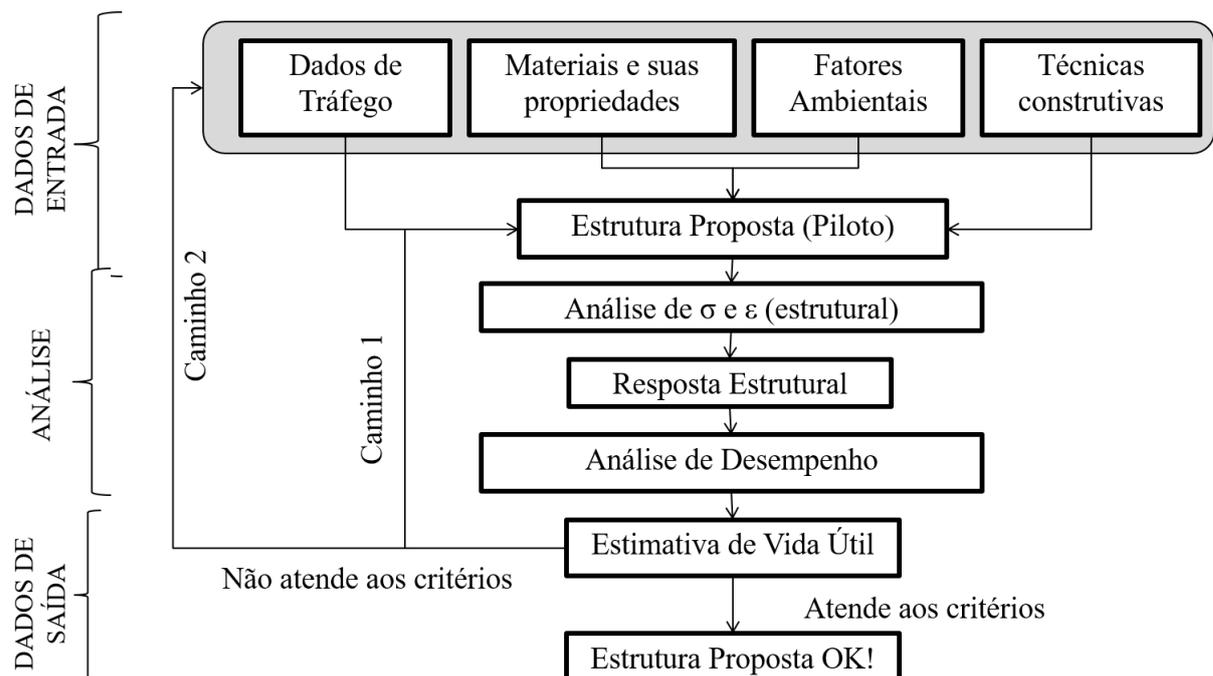
A Figura 5 representa o esqueleto principal da estrutura de um método mecanístico-empírico, que deve ser adaptado às situações e condições específicas de um dado pavimento. Os dados de entrada são: i) a composição do tráfego, tão ou mais elaborada conforme a disponibilidade de informações na região; ii) fatores climáticos, tais como temperatura e pluviometria local; iii) características dos materiais a serem utilizados nas camadas do pavimento; iv) consideração de técnicas construtivas disponíveis; e v) proposição de uma estrutura inicial de pavimento, que vai ser testada.

Em um segundo momento, a estrutura proposta, associada às características específicas dos materiais escolhidos, passa pelo que se chama de análise de tensões e deformações, a partir de um modelo estrutural pré-estabelecido. Os resultados das tensões e deformações são utilizados como *inputs* em equações, chamadas de equações de previsão de desempenho ou funções de transferência, cujo propósito é prever o desempenho do

pavimento, para defeitos pré-determinados, durante o período de projeto. Atendendo a esses critérios, que podem ser % de trincamento na superfície do revestimento ou máxima deformação permanente total, dentre outros, o pavimento cuja a estrutura foi proposta (ou piloto) se torna uma estrutura adequada. Não atendendo, é preciso voltar para os dados de entrada, que devem ser redefinidos a fim de atender aos critérios de desempenho. Franco (2007, pg. 11), resume esse processo da seguinte forma:

O procedimento para o dimensionamento mecanístico-empírico consiste em: reunir os dados referentes aos materiais de pavimentação, ao tráfego e às condições ambientais; correlacionar os dados de resistência dos materiais e tráfego em função das épocas sazonais e o comportamento dos materiais em função do tipo de carregamento; escolher as espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações considerando as diversas correlações obtidas; relacionar os valores críticos de tensões e deformações com os danos que a repetição das cargas podem causar ao pavimento por meio de modelos de previsão; e verificar se as espessuras escolhidas satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

Figura 5 - Fluxograma básico de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos



Fonte: Elaborado pela autora, baseado em MOTTA (1991) e HUANG (2004).

A Figura 5 indica uma estrutura básica utilizada pela maioria dos métodos de dimensionamento baseado em princípios mecanísticos. Apesar disso, cada um dos aspectos desse processo de dimensionamento pode ser tratado de maneira diferenciada, a depender das características regionais e culturais das regiões e/ou países que desenvolveram os métodos (FRANCO, 2007). Acrescenta-se a isso, que a robustez de um método de dimensionamento

mecanístico-empírico depende também em grande parte da quantidade e da qualidade dos dados que o alimentam.

Na presente pesquisa, assim como colocado em Soares, Moreno e Motta (2009) e Barra *et al.* (2010), entende-se a importância da avaliação dos métodos propostos nos diferentes países, para daí serem detectadas experiências que possam contribuir com as definições do método de dimensionamento em construção e que sejam compatíveis com a realidade local. Para isso, nos subitens a seguir serão apresentados alguns dos principais modelos de dimensionamento internacionais.

Ressalta-se, no entanto, que no presente trabalho é dada ênfase aos pavimentos asfálticos. O motivo é simples, no Brasil, dos mais de 210 mil km de malha pavimentada (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, 2016b), mais de 95% é constituída de pavimentos asfálticos. Isso se reflete inclusive no panorama das investigações realizadas pelos grupos de pesquisa em pavimentação nas universidades brasileiras, com um avanço significativo nas pesquisas realizadas com materiais betuminosos, conforme poderá ser verificado no Capítulo 2. Acredita-se que tais estudos devam ser incorporados nas definições do método em construção.

## **2.2 Panorama dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos internacionais**

Neste subitem são abordados os métodos de dimensionamento de pavimentos internacionais, cuja experiência pode ajudar nas definições de um método de dimensionamento brasileiro. Inicialmente é apresentado o MEPDG, atual AASHTO *Ware Project*, método de dimensionamento norte-americano lançado pela AASHTO em 2008, em substituição ao método empírico *AASHTO Guide for Design Pavement Structures*, de 1993. Em seguida é apresentado o AUSTROADS, método lançado em 2012, para Austrália e Nova Zelândia. Na sequência apresenta-se o LVECD, atual FlexPave<sup>TM</sup> 1.0, também desenvolvido nos Estados Unidos, contudo, no âmbito da NCSU. Por fim, são apresentados métodos de dimensionamento europeus e de outros países do mundo.

### 2.2.1 MEPDG, 2008

O MEPDG é um dos métodos de dimensionamento mecanístico-empírico mais importantes na atualidade para o continente americano, dado que, como será visto no item 2.3, serve de guia para a maioria das propostas de metodologias que estão recentemente surgindo na América Central e do Sul. As informações aqui apresentadas foram divididas em quatro partes: uma breve introdução ao método, os dados de entrada utilizados, a análise estrutural e de desempenho e, por fim, os dados de saída.

Destaca-se que as informações a respeito do MEPDG contidas neste subitem, foram retiradas, em sua maioria, do *Manual of Practice* (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 2008) e do NCHRP 1-37 (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004). Assim, para maiores detalhes aconselha-se buscar os documentos originais.

#### 2.2.1.1 Breve introdução ao método

Motta (1991) destaca que a evolução na Mecânica dos Pavimentos aponta que a inserção da caracterização dos materiais das várias camadas por meio de ensaios dinâmicos e análise não linear das camadas dos pavimentos leva a um dimensionamento de pavimentos mais racional, considerando melhores parâmetros de projetos. No entanto, apesar dos avanços teóricos e práticos, a implementação de métodos mecanísticos não é tarefa trivial. Exige um esforço conjunto dos atores do setor rodoviário da região em que se quer implementá-lo. Os vários estados norte-americanos, por exemplo, só estão deixando os métodos puramente empíricos, com a recente concepção do MEPDG, que envolveu o trabalho de mais dez anos dos técnicos e pesquisadores envolvidos.

A motivação para todo o esforço é que o antigo método oficial o *Guide for Design of Pavement Structures* da AASHTO de 1993, apresenta, segundo Kaloush e Rodezno (2011), pontos limitantes (expostos e explicados a seguir) da sua eficiência como base para um projeto estrutural:

- a) há deficiências no carregamento de tráfego considerado: as equações obtidas na época do AASHTO *Road Test* foram para cargas bem inferiores (menos de 2 milhões de passagens do eixo padrão) as atuais (aproximadamente 200 milhões);

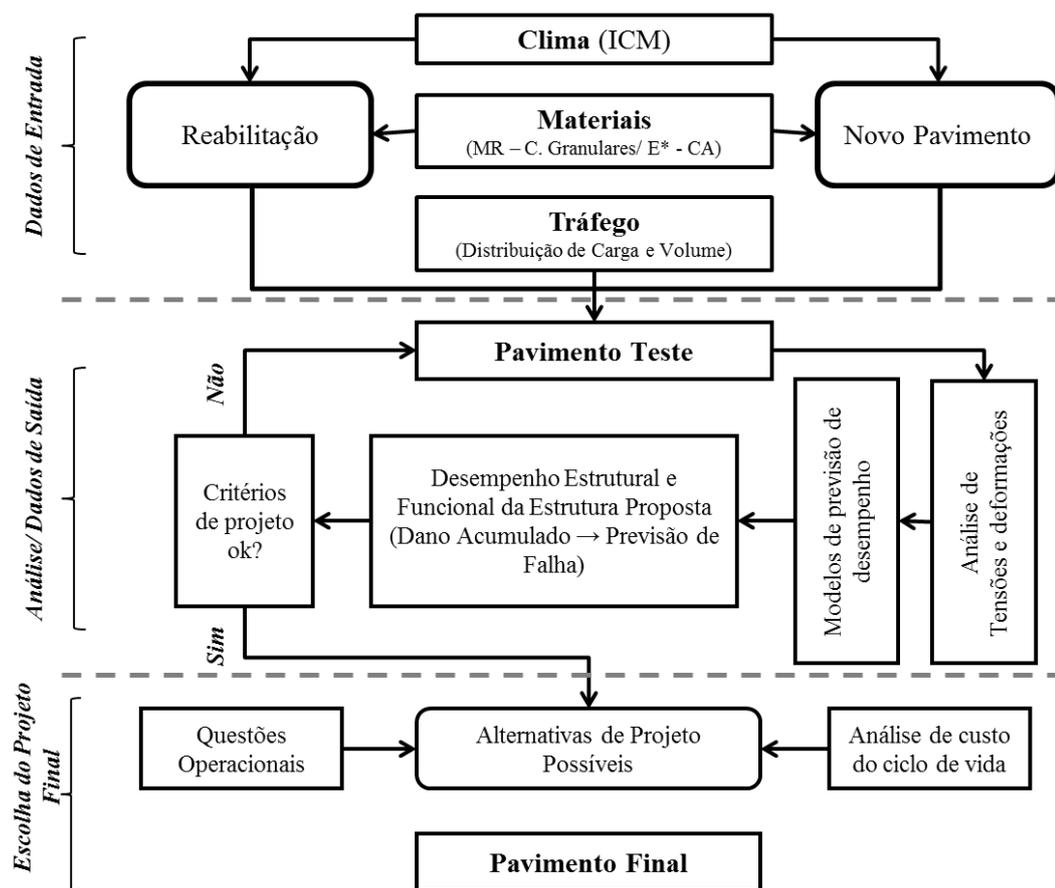
- b) não considera procedimentos de reabilitação de pavimentos: era voltado para a construção de vias novas e não estabelecia procedimentos de cálculo para a reabilitação naquele momento;
- c) não inclui os efeitos de diferentes condições climáticas: as pistas do AASHO *Road Test* estavam localizadas na cidade de Ottawa, estado de Illinois, sujeitas às condições climáticas típicas da região que, dentre outras características específicas, como períodos de neve, tem uma amplitude térmica mediana de 15°C a 30°C (ADVAMEG, 2014);
- d) foi utilizado somente um tipo de subleito, o mesmo nas pistas do AASHO *Road Test*. Assim, não foi possível avaliar o comportamento das outras camadas do pavimento quando colocadas sobre diferentes tipos de materiais constituintes do subleito;
- e) o envelhecimento de materiais foi pouco analisado: o período de avaliação das pistas foi curto (2 anos) para análise dos efeitos do clima e do envelhecimento dos materiais.

Considerando essas condições que se iniciou, no fim dos anos 90, os estudos para construção de um novo método de dimensionamento de pavimentos norte-americano. Além desses pontos, destaca-se também, fatores relevantes, externos ao método em si, e que têm relação direta com a possibilidade de construção de um método de dimensionamento mecanístico:

- a) evolução da Mecânica dos Pavimentos, possibilitando o melhor aproveitamento computacional para cálculos estruturais (tensões e deformações);
- b) amplo banco de dados sobre o comportamento de pavimentos obtidos em programas de avaliação de pavimentos norte-americanos, tais como o *Strategic Highway Research Program* (SHRP) e o *Long-Term Pavement Performance* (LTPP). Sem eles não seria possível a elaboração de modelos de desempenho;
- c) evolução no processo de caracterização de materiais de pavimentação, permitindo maior conhecimento de suas propriedades e possibilidades de utilização;
- d) existência de dados históricos de tráfego e clima, que do ponto de vista do dimensionamento, podem dar melhor contribuição se inseridos em uma metodologia mecanística.

Neste sentido o MEPDG foi desenvolvido com meta de superar as deficiências do *Guide for Design of Pavement Structures* e aproveitando evoluções ocorridas no campo técnico-científico da pavimentação rodoviária. Assim, a sua modelagem segue os princípios básicos de um método mecanístico-empírico, conforme observado na Figura 6. As três grandes etapas de dimensionamento são: (i) entrada de dados (tráfego, clima, características dos materiais); (ii) análise estrutural e análise de desempenho; e (iii) dados de saída e tomada de decisão. Para dar suporte as correlações entre esses diversos aspectos, foi concebido, no âmbito do Projeto NCHRP 1-40, o *software* de apoio, que desde 2002 vem passando por atualizações, sendo a mais recente a *AASHTOWare Project*.

Figura 6 - Representação Esquemática do Processo de Dimensionamento pelo MEPDG



Fonte: Elaborado pela autora, baseado em American Association of State Highway and Transportation Officials (2008).

Apesar das vantagens em relação ao método anterior, a implementação do MEPDG nos departamentos de transportes estaduais norte-americanos (DOT's) não foi feita

de maneira imediata. Esses órgãos são independentes e a adaptação ao novo método requer um esforço de cada estado, ou região, em virtude das realidades diferenciadas, quanto à composição do tráfego, do clima e dos tipos de materiais. El-Badawy (2011) afirma, no entanto, que 80% dos estados norte-americanos tinham intenção em implementar o novo método.

Por fim, Witzak (2011), um dos líderes na concepção do MEPDG, afirmou no Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto, realizado em 2011, no Rio de Janeiro, que o método norte-americano não deve ser diretamente utilizado na América Latina. O referido autor indica ainda que os países latino-americanos devem desenvolver seu próprio método, contudo, para isso devem investir em uma coleta de dados em trechos experimentais padronizada (no MEPDG foram usados mais de 1000).

#### 2.2.1.2 Dados de entrada

No MEPDG, os dados de entrada são divididos em três níveis hierárquicos, os quais são diretamente ligados à qualidade e quantidade dos dados de entrada disponíveis para cada projeto. A Tabela 1 apresenta algumas das principais características de cada nível (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 2008). Uma das grandes vantagens da definição de níveis hierárquicos em uma metodologia mecanístico-empírica de dimensionamento é a flexibilidade na obtenção dos dados de entrada, a depender da disponibilidade dos mesmos e dos recursos disponíveis para cada projeto.

Tabela 1 - Características dos níveis hierárquicos do MEPDG

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

Fonte: American Association of State Highway and Transportation Officials (2008).

### 2.2.1.3 Dados de tráfego

Para coleta de informações de tráfego é utilizado o método *Weighing-in-motion* (WIN), processamento de cargas em movimento. O tráfego é representado através do espectro completo de carga por eixo, para cada tipo de eixo.

A determinação da carga por eixo, do volume de carga e dos seus derivados na metodologia do MEPDG exige bastante detalhamento. Por isso, é utilizado um *software* de análise de tráfego resultado do NCHRP Project 1-39. Esse *software* permite a obtenção da distribuição de carga por eixo, para cada tipo de eixo, e estima o seu crescimento durante o período de projeto. Segundo Kaloush e Rodezno (2011), os principais dados de entrada de tráfego são:

- a) volume de tráfego de caminhões diário inicial;
- b) velocidade operacional dos veículos (caminhões);
- c) direção do tráfego de caminhões e fatores de distribuição por faixa;
- d) tipo de caminhão e fatores de distribuição de carga por eixo;
- e) configurações base do eixo e da roda;
- f) características do pneu e pressão;
- g) fator de distribuição lateral do caminhão;
- h) fatores de crescimento dos caminhões.

Estão inclusos no *software*, para uso no nível hierárquico 3, valores padrão de tráfego, que devem ser selecionados na inexistência de dados confiáveis.

#### 2.2.1.3.1 Dados de clima

Os dados climáticos no MEPDG são utilizados para previsão de temperatura e teor de umidade em cada uma das camadas, bem como são utilizados nos modelos de previsão de desempenho do pavimento (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 2008). A fim de avaliar os efeitos do clima sobre o pavimento foi incorporado uma metodologia anexa chamada de EICM – *Enhanced Integrated Climatic Model*, que simula o comportamento do pavimento diante de certas condições climáticas. Esse modelo é alimentado pelos dados de estações climáticas espalhadas pelos Estados Unidos e algumas no Canadá, geralmente localizadas em áreas aeroportuárias. O número de estações é próximo de 1000 (WITCZAK, 2011).

### 2.2.1.3.2 Dados dos materiais constituintes

As propriedades a serem inseridas com respeito aos materiais constituintes dependerão do nível hierárquico de entrada de dados escolhido. No geral, os dados de materiais necessários são:

- a) materiais asfálticos: são divididos em propriedades volumétricas e propriedades mecânicas. As volumétricas incluem volume de vazios, teor de ligante, granulometria, densidade da mistura, *Performance Grade* (PG) do ligante asfáltico. As mecânicas incluem módulo dinâmico, *creep compliance*, resistência à tração, coeficiente de Poisson;
- b) materiais granulares: são requeridas as propriedades físicas e mecânicas dos materiais. As físicas incluem massa específica seca máxima, teor de umidade e propriedades de classificação dos materiais granulares. A única propriedade mecânica a ser determinada é o Módulo de resiliência.

Além das propriedades dos materiais, também é escolhido ainda nos dados de entrada a estrutura de pavimento que se deseja testar, pois diferente do método empírico, no método mecanístico as estruturas do pavimento não são dados de saída e sim de entrada.

### 2.2.1.4 Análise estrutural e de desempenho

A análise estrutural do pavimento é feita por métodos analíticos e calcula as respostas críticas do pavimento quanto à deflexão, tensões e deformações. Para pavimentos flexíveis é utilizado o programa JULEA (*Jacob Uzan Layered Elastic Analysis*). O método dos elementos finitos só é recomendado para fins de pesquisa científica. Os resultados da análise de tensões, deformações e deflexões, é diretamente usada na previsão de desempenho.

A principal fonte de dados para a calibração desses modelos de desempenho utilizados no MEPDG foi o *Long-Term Pavement Performance* (LTPP). O LTPP consistiu num projeto de coleta de informações de desempenho dos pavimentos em seções rodoviárias distribuídas em todo o país (fossem federais ou estaduais). Para American Association of State Highway and Transportation Officials (2008) esse conjunto de dados é abrangente e sem precedentes. No MEPDG a calibração pode ser em três níveis: global, regional ou local. A calibração global é aquela em que os dados permitiram que as equações de desempenho fossem ajustadas para todo o país e já vem integrada ao *software*. As regionais e locais são

opcionais e dependem de calibrações específicas para determinados estados ou regiões. Existe um conjunto de orientações de como essas calibrações podem ser feitas.

A análise de desempenho é feito por meio de equações de acúmulo de dano, como função do tempo e do tráfego, cujo intervalo padrão de análise é de 1 mês. Nesses subintervalos, são estimados os danos provocados ao pavimento, que vão sendo acumulados ao longo do tempo estimado de projeto.

Caso o pavimento não atenda aos valores admissíveis de desempenho do pavimento, em pelo menos um dos critérios estabelecidos faz-se necessário rever os dados de entrada e a estrutura deve ser reanalisada. Isso deve ser feito até que a proposição passe nos critérios definidos. Os tipos de defeitos analisados são: deformação permanente, trincamento devido a aplicação de carga, trincas de reflexão, trincamento térmico e condições de textura ou IRI. São apresentados a seguir somente os modelos referentes ao trincamento do tipo couro-de-jacaré, foco do presente trabalho. Ressalta-se que as unidades utilizadas nas equações a seguir estão no Sistema Inglês, conforme apresentadas em American Association of State Highway and Transportation Officials (2008).

Para definição da função de transferência de %AT utilizada no MEPDG, o número permitido de aplicações de carga por eixo é determinado pela Equação 1.

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\varepsilon_t)^{k_{f2}}\beta_{f2}(E_{HMA})^{k_{f3}}\beta_{f3} \quad (1)$$

$$C = 10^M \quad (2)$$

$$M = 4,84 \left( \frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0,69 \right) \quad (3)$$

Onde:

- $N_{f-HMA}$  = número de aplicações de carga permitida por eixo para pavimentos flexíveis e camadas de misturas asfálticas;
- $\varepsilon_t$  = deformação de tração nas localizações críticas e calculadas pelo modelo de resposta estrutural, pol/pol;
- $E_{(HMA)}$  = módulo dinâmico da mistura asfáltica medido em compressão, em psi;
- $k_{f1}, k_{f2}, k_{f3}$  = parâmetros de campo da calibração global (de NCHRP 1-40D recalibração;  $k_{f1} = 0,007566$ ,  $k_{f2} = -3,9492$ ,  $k_{f3} = -1,281$ );
- $\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$  = constantes de campo da calibração local (ou da mistura específica) – para a calibração global, é atribuído o valor 1,0 para

essas constantes;

$V_{be}$  = quantidade efetiva de asfalto por volume, %;

$V_a$  = % percentual de vazios na mistura asfáltica (volume de vazios);

$CH$  = termo de correção de espessura, dependendo do tipo de trincamento.

Para o trincamento do tipo Couro de Jacaré o termo de correção de espessura é dado pela Equação 4.

$$C_H = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49H_{HMA})}}} \quad (4)$$

Onde:

$HHMA$  = espessura total da camada asfáltica, em pol.

Para o cálculo da área trincada prevista é preciso antes calcular o incremento de dano acumulado em diferentes pontos do pavimento ao longo do tempo, o que é dado pela Equação 5.

$$DI = \sum(\Delta DI)_{j,m,l,p,T} = \sum \left( \frac{n}{N_{f-HMA}} \right)_{j,m,l,p,T} \quad (5)$$

Onde:

$DI$  = índice de dano acumulado;

$\Delta DI$  = índice de incremento de dano;

$n$  = número atual de aplicações de carga por eixo dentro de período específico de tempo;

$j$  = intervalo de carga por eixo;

$m$  = tipo de carga por eixo (simples, tandem, triplo, quádruplo, ou configurações específicas de eixos);

$l$  = tipo de caminhão usado na classificação de caminhões inclusa no MEPDG;

$p$  = mês;

$T$  = temperatura média para cada um dos 5 intervalos de temperatura ou quintis usados para subdividir cada mês, em °F.

De posse do índice de dano é possível então o cálculo da área trincada. A função de transferência para previsão da área trincada do tipo couro de jacaré é a seguinte:

$$FC_{Bottom} = \left( \frac{1}{60} \right) \left( \frac{C_4}{1 + e^{(C_1 C_1^* + C_2 C_2^* \log(DI_{Bottom} * 100))}} \right) \quad (6)$$

$$C_1^* = -2C_2^* \quad (7)$$

$$C_2^* = -2.40874 - 39.748 (1 + H_{HMA})^{-2.856} \quad (8)$$

Onde:

$FC_{Bottom}$  = área do trincamento do tipo couro de jacaré que se inicia na fibra inferior da camada asfáltica; % da área total da pista;

$DI_{Bottom}$  = índice de dano acumulado na fibra inferior da camada asfáltica;

$C_{1,2,4}$  = constantes de regressão da função de transferência;  $C_1=6,00$ ,  $C_2=1,00$  e  $C_4=6,00$ ;

$H_{HMA}$  = espessura total da camada asfáltica, pol.;

$DI_{Bottom}$  = índice de dano acumulado na fibra inferior da camada asfáltica

$C_{1,2,4}$  = constante das funções de transferência;  $C_1=6,0$ ;  $C_2=1,00$  e  $C_4=6,00$ .

O erro padrão é determinado pela Equação 9:

$$S_{e(Alligator)} = 32.7 + \frac{995.1}{1 + e^{2-2 \log(FC_{Bottom} + 0.0001)}} \quad (9)$$

No *Manual of Practice*, apresenta-se como justificativa para o alto erro registrado, o fato de no esforço de calibração do MEPDG não terem sido feitos ensaios de campo, como a retirada de corpos de prova, que confirmassem onde a trinca tinha sido iniciada, se no topo ou na base do revestimento. Apesar disso, o amplo banco de dados é uma das características mais marcantes desse método, pois quanto maior a quantidade de dados mais fácil é de se aproximar o desempenho previsto daquele que realmente ocorre ao longo do período de projeto. Destaca-se, no entanto, que para a previsão de trincamento do tipo *bottom-up* a correlação entre o percentual de área trincada medido em campo e o percentual de área trincada previsto ficou em 0,27%.

#### 2.2.1.5 Dados de saída

Os dados de saída no MEPDG são apresentados em forma de planilhas eletrônicas com os resultados, discretizados por mês (subperíodo de análise), da evolução do defeito analisado ao longo do tempo ou por meio de gráficos tal como o modelo apresentado na Figura 7. Os resultados através de gráficos possibilitam ao projetista uma visão geral da evolução do defeito ao longo do período de projeto, bem como sua correlação com os valores admissíveis para o defeito em análise. Os valores admissíveis para cada tipo de defeito

previsto é dado em função do grau de importância da via. A Tabela 2 apresenta alguns dos valores indicados para o trincamento por fadiga.

Tabela 2 - Valores admissíveis de trincamento do tipo couro de jacaré indicados no MEPDG

<b>Tipo de Rodovia</b>	<b>Valor Admissível (%)</b>
Rodovia interestadual	10
Rodovia primária	20
Rodovia secundária	35

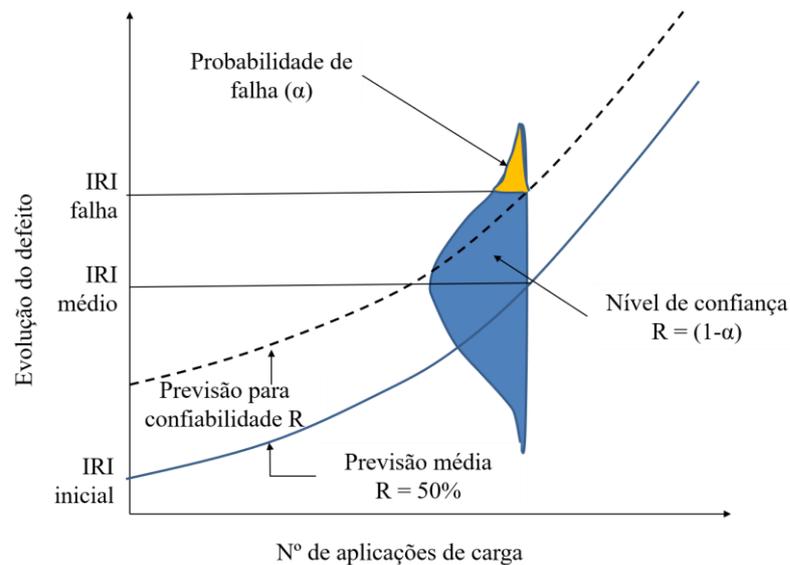
Fonte: American Association of State Highway and Transportation Officials (2008) e Medina e Motta (2015).

Associado a esses valores admissíveis foi incorporado aos resultados o conceito estatístico de nível de confiança (R), o qual é definido, no *Manual of Practice* e no NCHRP 1-37, como a probabilidade (P) do defeito previsto ser menor que os valores admissíveis de desempenho para os diferentes defeitos previstos no período de projeto, o que pode ser representado pela relação  $R = P [\text{Defeito} < \text{Nível crítico de defeito}]$  (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004 e American Association of State Highway and Transportation Officials 2008).

Os resultados de desempenho dos defeitos calculados são considerados em distribuição normal para cada subperíodo de análise. Na Figura 7, é possível perceber a diferença entre os resultados em um nível de confiança padrão de 50% e valores superiores a este. Ela é esquemática para o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI), mas vale para os outros defeitos previstos no MEPDG.

Conforme pode ser visto na Figura 7, o nível de confiança 50% é valor mínimo admitido no MEPDG. Apesar de admitido, na grande maioria dos projetos esse valor deve ser maior para que cumpra o desempenho desejado no período de análise. A linha tracejada representa os valores previstos com o nível de confiança requerido para o projeto. O projeto será aceito nesse quesito, caso essa linha não ultrapasse o valor admissível definido inicialmente. Caso isso ocorra, faz-se necessária a reavaliação do pavimento proposto até que passe no critério.

Figura 7 - Conceito de nível de confiança para o (IRI) segundo o MEPDG



Fonte: National Cooperative Highway Research Program (2004, p. 1.1.25, tradução nossa).

A Tabela 3 contém os valores indicados no *Manual of Practice* dos níveis de confiança mais adequados para cada tipo de via. A intensidade de aplicação de carga na via é o principal critério escolha, ou seja, quanto maior for a utilização da via, maior deve ser o nível de confiança (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 2008).

Tabela 3 - Níveis de confiança para diferentes classes de rodovias norte americanas

Classificação Funcional da Via	Nível de Confiança (%)	
	Urbana	Rural
Interstadual/ <i>Freeway</i>	95	95
Arteriais Principais	90	85
Coletoras	80	75
Locais	75	70

Fonte: American Association of State Highway and Transportation Officials (2008).

### 2.2.2 AUSTROADS, 2012

Assim como no MEPDG, as informações apresentadas neste subtópico foram divididas em quatro partes: uma breve introdução ao método, dados de entrada utilizados, a análise estrutural e de desempenho e, por fim, os dados de saída. Destaca-se que, salvo referências específicas ou citações diretas, as informações do método aqui apresentadas foram retiradas de Austroads (2012).

### 2.2.2.1 Breve introdução ao método

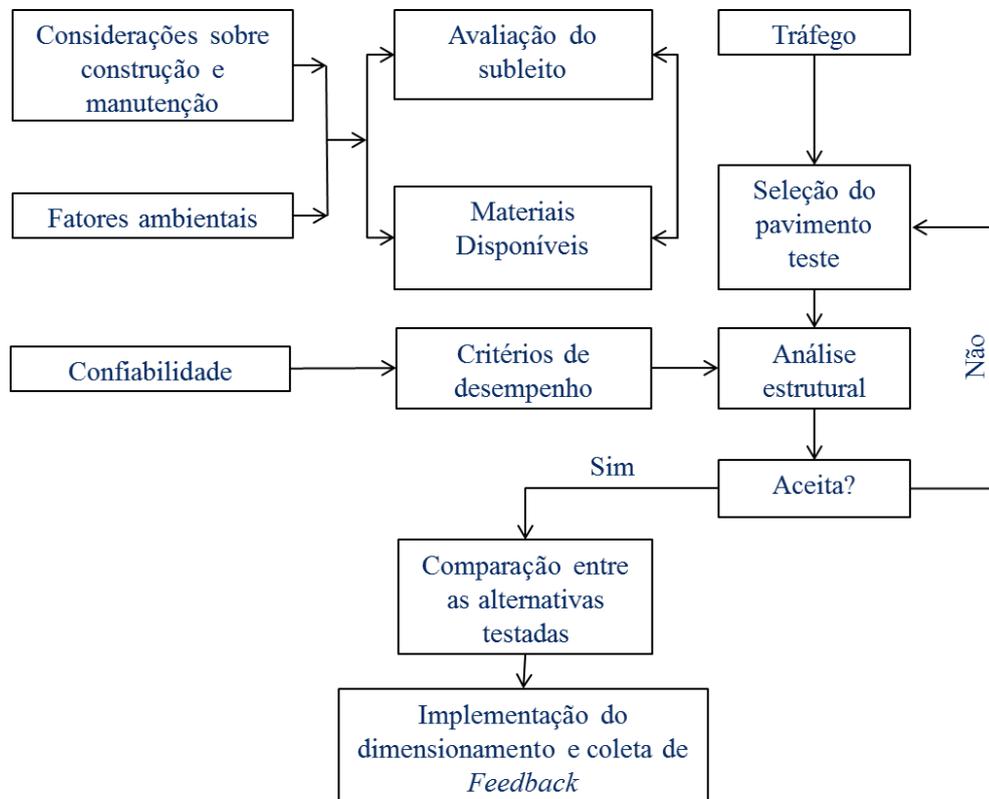
O dimensionamento de pavimentos no âmbito do Austroads é realizado de forma categorizada, considerando-se os tipos de materiais que serão utilizados e as condições de tráfego a que a via será submetida terá um tipo de dimensionamento específico, listado a seguir:

- a) dimensionamento para pavimentos de baixo custo;
- b) dimensionamento estrutural (tráfego de moderado a pesado);
  - dimensionamento de pavimentos flexíveis;
    - método mecanístico;
    - método empírico;
  - dimensionamento de pavimentos rígidos;
- c) dimensionamento para tráfego leve.

Essas diferentes metodologias de dimensionamento permitem adequar o tipo de dimensionamento a ser utilizado ao tipo e função de uma estrutura de pavimento. Pode-se citar, como exemplo, a adoção do método empírico para o dimensionamento de pavimentos constituídos de camadas granulares e revestimento betuminoso esbelto. Segundo o Austroads (2012), esse tipo de estrutura tende a ter comportamento mecânico similar, caso fosse dimensionada por meio do método mecanístico, contudo resultados similares podem ser obtidos com uma metodologia mais simples e barata. No presente trabalho, no entanto, só serão expostos os aspectos referentes ao procedimento mecanístico, voltado para vias de mais alto volume de tráfego. O fluxograma do método mecanístico do Austroads para pavimentos flexíveis é apresentado na Figura 8.

A respeito desse fluxograma, nota-se que antes mesmo de ser iniciado o processo de dimensionamento no âmbito do Austroads é realizada uma análise dos fatores ambientais e das condições do subleito da futura rodovia. Isso influencia diretamente no processo de escolha dos materiais que irão constituir as estruturas de pavimento asfáltico que serão testadas. Outro ponto a se destacar é que após implementada a nova estrutura é realizado um processo de coleta de informações sobre seu comportamento em campo. Essa prática contribui para que seja montado um banco de dados com informações de desempenho de pavimentos para tipos de soluções específicas.

Figura 8 - Fluxograma do método mecanístico para pavimentos flexíveis do Austroads



Fonte: Austroads (2012, p. 100, tradução nossa).

#### 2.2.2.2 Dados de entrada

Os parâmetros de entrada na metodologia mecanística do Austroads (2012) estão relacionados as condições de tráfego, as características climáticas da região, bem como a caracterização física e mecânica do subleito e dos materiais que a constituirão a futura rodovia. A seguir apresenta-se maiores detalhamentos.

##### 2.2.2.2.1 Dados de tráfego

Assim como na América do Norte, os dados de tráfego são obtidos num banco de dados WIN. Os principais dados de entrada de tráfego são: o número de eixos dos veículos, a distribuição da carga, a velocidade empregada e a pressão dos pneus. Como ocorre em outros métodos, também no Austroads só são contabilizados para o dimensionamento os veículos classificados como pesados no Sistema de Classificação Veicular do Austroads. A determinação do tráfego é dado pela Equação 10.

$$N_{DT} = 365 \times AADT \times DF \times \%HV/100 \times LDF \times CGF \times N_{HVAG} \quad (10)$$

Onde:

$N_{DT}$  = tráfego de projeto;

$AADT$  = volume médio diário anual;

$DF$  = fator de direção, que é igual ao % de veículos trafegando na faixa de projeto, em relação ao total da via;

$\% HV$  = percentual médio de veículos pesados;

$LDF$  = fator de distribuição na via, que é igual ao % de veículos pesado na faixa de projeto;

$CGF$  = fator de crescimento acumulado, que corresponde ao % de crescimento do tráfego ao longo do período de projeto. Tem valores tabelados;

$N_{HVAG}$  = número médio de grupos de eixos por veículo pesado.

#### 2.2.2.2.2 Dados de clima

A umidade e a temperatura são consideradas os fatores ambientais que mais afetam o desempenho do pavimento pelo Austroads (2012). Os efeitos do meio ambiente sobre o pavimento dependem do material selecionado e da distribuição temporal do tráfego. A umidade, em particular, tem relevância considerável nesse método, dado que são dedicadas duas outras partes do guia para indicações de construção e manutenção de sistemas de drenagem, além de uma parte exclusiva para o projeto de drenagem.

As alterações no teor de umidade das camadas granulares são consideradas como grande contribuinte para a perda de desempenho do pavimento: “quando o grau de saturação de um material granular exceder 70%, esse material pode perder significativamente sua rigidez/módulo” (Austroads, 2012, pg. 30, tradução nossa).

As estimativas de umidade para projeto de dimensionamento de pavimentos são geralmente baseadas no conceito do *Equilibrium Moisture Content* (EMC), ou seja, Equilíbrio do Teor de Umidade. O ECM representa uma condição de equilíbrio entre a umidade do solo (já consideradas as questões de sucção) e as condições de umidade locais, que geralmente são encontradas próximas a região central do pavimento. Esses valores podem ser obtidos em laboratório através do ensaio de CBR com ou sem imersão.

Já a temperatura, é considerada o fator de maior impacto no desempenho do pavimento tanto em termos de fadiga, quanto de deformação permanente. Para o dimensionamento, a temperatura deve ser estimada por uma média diária (mudanças ao longo do dia) e sazonal (que depende das diferentes manifestações do clima durante o ano). O *Weighted Mean Annual Pavement Temperature* (WMAPT), ou seja, Média Ponderada da Temperatura Anual do Pavimento é a metodologia (baseada no método da Shell de 1978) utilizada para caracterizar a temperatura a ser empregada no projeto de dimensionamento.

#### 2.2.2.2.3 Dados dos materiais constituintes

O guia do Austroads (2012) inclui algumas estruturas de pavimento mais recomendados para as solicitações de tráfego inerentes as suas condições regionais. Assim, a escolha dos materiais a serem empregados depende de fatores como disponibilidade, custo e clima da região. Para o dimensionamento de pavimentos de que serão submetidos a tráfego pesado, é indicado a utilização de pavimentos de concreto, pavimentos flexíveis sobre base estabilizada com cimento, ou pavimentos flexíveis sobre base de grande profundidade (tal como o chamado pavimento perpétuo).

Destaca-se que 90% das estradas no território rural australiano são compostas de camadas granulares com revestimento esbelto, o *Sprayed Seal Surfacing*, que se aproxima do que se chama no Brasil de tratamento superficial. Esse tipo de pavimento é adotado principalmente para tráfego leve a moderado, mas em alguns casos também para tráfego pesado. Sua principal justificativa é o baixo custo inicial.

A determinação dos parâmetros de entrada é realizada em função do tipo de material: materiais granulares, materiais granulares modificados, materiais cimentados e asfálticos. As camadas asfálticas são consideradas isotrópicas e modeladas como elástico-lineares, devendo ter como parâmetros de entrada, para o dimensionamento; o coeficiente de Poisson (geralmente 0,4, valor comum para os pavimentos australianos) e módulo de resiliência.

É indicado que o módulo de resiliência da mistura asfáltica seja obtido por uma das seguintes formas: (i) a partir dos ensaios padrão de tração indireta, ajustada para a temperatura de serviço e para a taxa de carregamento da via; (ii) a partir dos gráficos de correlação entre as características da mistura e o módulo estabelecidos pela Shell em 1978.

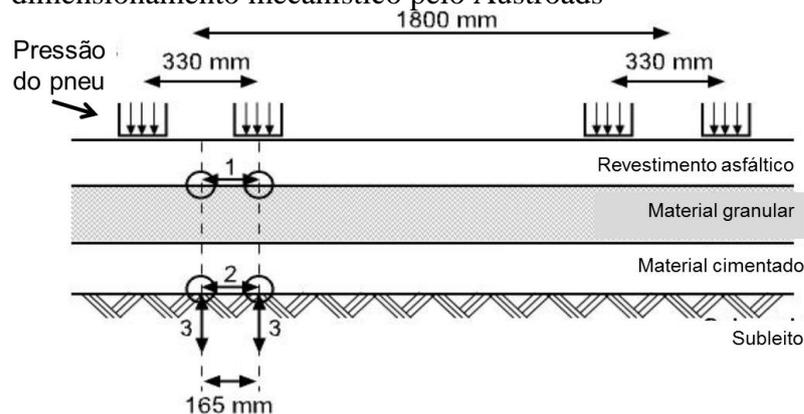
Para caracterização do comportamento dos materiais betuminosos quanto à fadiga, recomenda-se usar valores da literatura ou determinar os valores por meio do ensaio de flexão de vigas, sendo recomendado fazer correlações com dados de campos por conta, principalmente, da recuperação de trincas através do fenômeno que ocorre com os pavimentos flexíveis (*healing*).

### 2.2.2.3 Análise estrutural e de desempenho

Os materiais no dimensionamento pelo Austroads (2012) são considerados homogêneos, elásticos e isotrópicos (com exceção de materiais granulares sem contenção ou subleito). A resposta estrutural do pavimento é calculada usando um modelo elástico linear, cujo programa computacional da Mincad Systems, CIRCLY, é indicado.

Os pontos críticos e as respostas estruturais considerados no dimensionamento pelo Austroads são apresentados esquematicamente na Figura 9. Observa-se por esta figura que a estrutura definida para o pavimentos asfáltico envolve uma sub-base com material cimentício, que tem como objetivo de aumentar eficiência da futura estrutura do pavimento quanto ao dano por fadiga.

Figura 9 - Modelo esquemático do pavimento no dimensionamento mecânico pelo Austroads



Fonte: Austroads (2012, p.101, com adaptações).

Onde:

- a) 1 corresponde a deformação na fibra inferior do revestimento;
- b) 2 corresponde a deformação na fibra inferior das camadas cimentadas;
- c) 3 corresponde a tensão de compressão vertical no topo do subleito.

Os critérios de desempenho para previsão de desgaste de um determinado pavimento, segundo o Austroads (2012), são retirados da relação entre o nível de tensão provocado por uma única aplicação de carga e um número de aplicações que resultaria em atingir um número limite tolerável de condição do material/pavimento. Esse número limite é retirado das estimativas de carregamento tolerável provenientes da Análise Estrutural.

A determinação do nível crítico de desgaste é feita por aquele tipo de desgaste (deformação permanente, fadiga, etc) que primeiro ultrapassar esse valor crítico de carga aplicada sobre o pavimento. Assim, se o primeiro a alcançar for a deformação permanente de uma camada granular, esse será o valor limite aceitável para todo o pavimento.

O critério de desempenho quanto à fadiga para materiais asfálticos é baseado na relação estabelecida pela Shell em 1978 e ajustada para os dados regionais, sendo representado pela Equação 11.

$$N = RF \left[ \frac{6918(0,856 V_b + 1,08)}{E^{0,36} \mu\varepsilon} \right]^5 \quad (11)$$

Onde:

N = número de repetições do eixo padrão;

$\mu\varepsilon$  = deformação na base do material asfáltico, em microstrain;

$V_b$  = teor de ligante asfáltico (%);

E = módulo do material asfáltico, em MPa;

RF = fator de confiabilidade para a fadiga nos materiais asfálticos, os valores sugerido constam na Tabela 4.

#### 2.2.2.4 Dados de saída

Assim, com no MEPDG, também foi inserido no Austroads (2012) o conceito de confiabilidade de um projeto de dimensionamento, ou seja, a probabilidade de um certo pavimento durar mais que o tráfego previsto em projeto e antes de ser necessário uma grande reabilitação. Na Tabela 4 constam os valores típicos de confiabilidade para projetos na região.

Tabela 4 - Nível de confiança indicado por tipo de via no Austroads

<b>Classe da via</b>	<b>Nível de confiança (%)</b>
Freeway	95 a 97,5
Highway: VMDA* >2000 por pista	90 a 97,5
Highway: VMDA <2000 por pista	85 a 95
Via primária: VMDA >500 por pista	85 a 95
Outras rodovias: VMDA <500 por pista	80 a 90

Fonte: Austroads (2012).

\* Volume médio diário anual.

No cálculos referentes ao desempenho de pavimentos é aplicado um fator de confiabilidade, cujos valores sugeridos para materiais asfálticos constam na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de RF sugeridos para os materiais asfálticos

<b>Confiabilidade requerida para o projeto</b>				
80%	85%	90%	95%	97,5%
2,5	2,0	1,5	1,0	0,67

Fonte: Austroads (2012).

Assim, como no MEPDG, os resultados são a relação entre os valores calculados para determinado desgaste ao longo do período estipulado para o projeto. O pavimento será aceito, caso a soma dos desgastes provocados for inferior a sua configuração inicial. Caso não passe por esse limite, o pavimento deve ser modificado com novos materiais ou com ajustes na sua estrutura inicial e, então, reanalisado. A escolha da alternativa de projeto do pavimento leva em consideração estar compatível com os critérios limites, anteriormente explicitados. Questões econômicas ou de outros teores (técnicos, por exemplo) é o que leva a escolha final entre os diferentes projetos analisados.

### 2.2.3 *FlexPAVETM 1.0*

Assim, como apresentados nos dois métodos anteriores, as informações apresentadas neste subtópico foram divididas em quatro partes: uma breve introdução aos método, dados de entrada utilizados, a análise estrutural e de desempenho e por fim os dados de saída. Salvo referências específicas ou citações diretas, as informações do método aqui apresentadas foram retiradas de Eslaminia *et al.* (2012) e North Carolina State University

(2014), respectivamente, um artigo apresentado no RILEM contendo os principais direcionamentos e o Manual do método.

#### 2.2.3.1 Breve introdução ao método

O FlexPAVETM 1.0, antes chamado *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses* (LVECD), também tem seu desenvolvimento realizado na América do Norte, por um grupo de pesquisa da NCSU e tem financiamento da *Federal Highway Administration* (FHWA). Dado que esse é um método recente e que ainda passa por melhoramentos não é possível garantir que todas as informações são as mais atuais, mas buscar-se-á garanti-las tanto quanto possível.

#### 2.2.3.2 Dados de entrada

A entrada de dados no LVECD é classificada em cinco grupos: informações gerais, estrutura do pavimento, dados climáticos, dados de tráfego, opções de análise e dados de saída. Cada um desses grupos de informações pode ser acessado pelo *Navigational Panel* (Painel de Navegação, tradução nossa), cujas informações a serem inseridas estão claramente expostas, o que permite uma interação amigável entre o usuário e o programa. As diferentes abas poderão ser visualizadas em figuras apresentadas no Anexo A, o que permite maior amplitude e clareza das imagens.

##### 2.2.3.2.1 Dados de tráfego

Os dados de tráfego podem ser categorizados em dois tipos: i) quanto ao veículo de projeto ou configuração geométrica da carga; e ii) quanto à configuração do tráfego da via a ser projetada, que só necessita ser inserido no caso da escolha da análise de desempenho do pavimento.

A escolha do veículo de projeto pode ser diretamente do banco de dados do programa, como pode ser inserido pelo usuário quando suas características não fazem parte do banco de dados original. As principais informações a serem inseridas com relação a primeira categoria de informações são:

- a) tipo de eixo: além dos eixos que podem ser configurados, os tipos comuns são eixo simples, eixo tandem, eixo triplo e eixo quádruplo;
- b) tipo de roda: as simulações podem ser com roda simples ou dupla;
- c) distância entre os eixos: o primeiro eixo sempre apresenta distância “zero” e os seguintes são definidos a partir dele;
- d) carga por eixo: é a carga aplicada a cada eixo, como é o caso por exemplo de 80kN, considerado o eixo-padrão;
- e) velocidade de projeto;
- f) largura do eixo do veículo escolhido;
- g) espaço entre os pneus duplos;
- h) pressão do pneu;
- i) área de contato pneu/pavimento. Essa área pode ser considerada como circular ou retangular, sendo que no último caso a altura e a largura do retângulo podem ser definidas pelo projetista (o valor padrão é 11/7).

A segunda categoria de informações está relacionada às características do tráfego da carga estimada para a via. Atualmente as características do tráfego no LVECD são representadas através do eixo padrão. A caracterização por meio do espectro de carga está sendo estudada. Para que a análise possa ser realizada são necessários os seguintes parâmetros de tráfego:

- a) volume médio diário anual de tráfego de caminhões;
- b) taxa de crescimento (%) prevista para o período projeto, que pode ser considerada constante ou apresentar crescimento linear ou potencial;
- c) fator de distribuição espacial: no caso de mais de uma faixa na mesma direção define-se aquela com maior ocupação e para a qual o tráfego deve ser projetado;
- d) fator de ajuste mensal: representa a variação sazonal do tráfego por mês;
- e) percentual de distribuição horária do tráfego: que representa as mudanças hora a hora durante um dia de tráfego.

#### 2.2.3.2.2 Dados de clima

A influência climática nesse método é dada em função da temperatura em diferentes profundidades. A entrada de dados poder ser de quatro fontes: i) direto da base de

dados do EICM; ii) de arquivo texto de dados EICM; iii) como condição isotérmica (a temperatura é considerada constante em toda profundidade do pavimento); iv) ou inserção manual. As duas primeiras formas (dados EICM) também estão inclusas no MEPDG e a inserção manual só é possível para os casos em que o tipo de análise a ser realizada seja somente de resposta estrutural do pavimento.

Atualmente o LVECD tem em sua base de dados informações de 459 estações meteorológicas localizadas nas principais cidades dos vários estados norte-americanos. Assim, basta o usuário escolher a cidade em que o projeto será executado. No LVECD, para cada estação, são considerados dados de temperatura durante um ano, de hora em hora e em diferentes profundidades.

#### 2.2.3.2.3 Dados dos materiais constituintes

Na seção intitulada *Design Structure* (estrutura do projeto, tradução nossa) são inseridas a composição e características dos materiais das camadas da estrutura do pavimento a ser analisado. Não existe limite estabelecido no LVECD para a quantidade de camadas inseridas. É nessa seção que são inclusos as informações a respeito de cada material, tais como: o tipo do material, espessura da camada, peso específico, coeficiente de expansão e dados de rigidez.

A camada de concreto asfáltico pode ser considerada com três tipos possíveis de comportamento: viscoelástico com dano, elástico linear e elástico anisotrópico. A escolha do comportamento viscoelástico demanda a inclusão de dados de módulo dinâmico (de ensaios de módulo dinâmico, da curva mestra ou da série de Prony). O coeficiente de Poisson, a temperatura de referência e as propriedades específicas de cada uma dessas representações de rigidez são também requeridos.

Para análise do comportamento quanto à fadiga no concreto asfáltico é necessária a inclusão dos coeficientes da plataforma de análise de fadiga *Viscoelastic Continuum Damage Model* (VECD), cujas informações mais específicas podem ser obtidas em Underwood, Baek e Kim (2012) e Nascimento (2015). Para análise da deformação permanente é necessária a determinação dos parâmetros do *Shift Model*, cujos aprofundamentos sobre o modelo podem ser obtidos em Choi e Kim (2014) ou nacionalmente em Borges (2014).

Três tipos de base podem ser escolhidos nesse método: base tratada com asfalto, base granular e base tratada com cimento. A base tratada com asfalto é considerada um material viscoelástico e por isso os parâmetros a serem inseridos são os mesmos que no concreto asfáltico. A base granular e a tratada com cimento, assim como o subleito, são consideradas como materiais elástico lineares, cuja única informação necessária é o módulo de resistência e o coeficiente de Poisson ou elástico anisotrópicos, que requerem também o módulo de cisalhamento do material.

### 2.2.3.3 *Análise estrutural e desempenho*

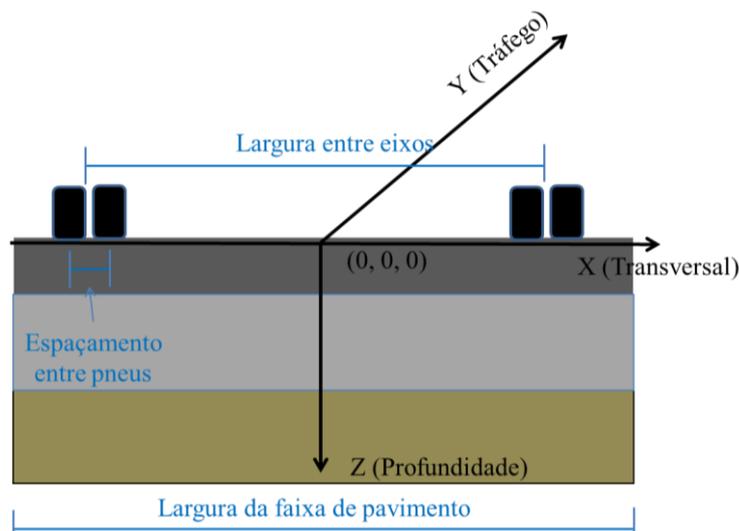
Diferente do MEPDG e do Austroads, o FlexPAVETM 1.0 é uma ferramenta de análise de desempenho do pavimento que combina a análise viscoelástica por camadas e a escala de tempo como base para a plataforma de cálculo. Usando diferenças de escala de tempo nas variações de temperatura, nas variações de frequência no tráfego e na evolução da fadiga e da deformação permanente, este método apresenta uma grande vantagem a redução de milhões de ciclos de análise para a obtenção da resposta estrutural do pavimento para apenas algumas dezenas de análises. O conceito de análise estrutural de múltiplas camadas pela Transformada de Fourier é utilizado para a análise de tensões-deformações. A utilização desse ferramental de cálculo permite detectar os efeitos da viscoelasticidade do material, a temperatura e as características do carregamento do tráfego (ESLAMINIA *et al.*, 2012; NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY, 2014).

A escolha do tipo de análise também figura entre as informações iniciais. O usuário pode escolher entre a análise da resposta estrutural ou a análise de desempenho do pavimento. Na primeira são apresentados os resultados de tensões, deformações e deflexões que o pavimento estará sujeito. Na segunda, além dos mesmos resultados da primeira, são também apresentados os resultados de previsão de desempenho do pavimento. Os defeitos a serem avaliados podem ser quanto à fadiga e quanto à deformação permanente. No que se refere à fadiga podem ser avaliados os seguintes defeitos: trincamento por fadiga, trincamento térmico, *healing* e envelhecimento. No entanto, os dois últimos ainda não estavam disponíveis na versão de 2014. Já a deformação permanente pode ser calculada em função da vida de projeto.

#### 2.2.3.4 Dados de saída

Os dados de saída podem ser classificados em dois grupos: histórico no período de projeto e distribuição espacial. O histórico no período de projeto apresenta a previsão de desempenho do pavimento, quanto a determinado tipo de defeito, ao longo do período de projeto e no ponto de análise previamente escolhido pelo projetista. A escolha dos pontos de análise segue o sistema de coordenadas previamente definidas na metodologia, conforme indicado na Figura 10.

Figura 10 - Sistema de coordenadas no LVECD



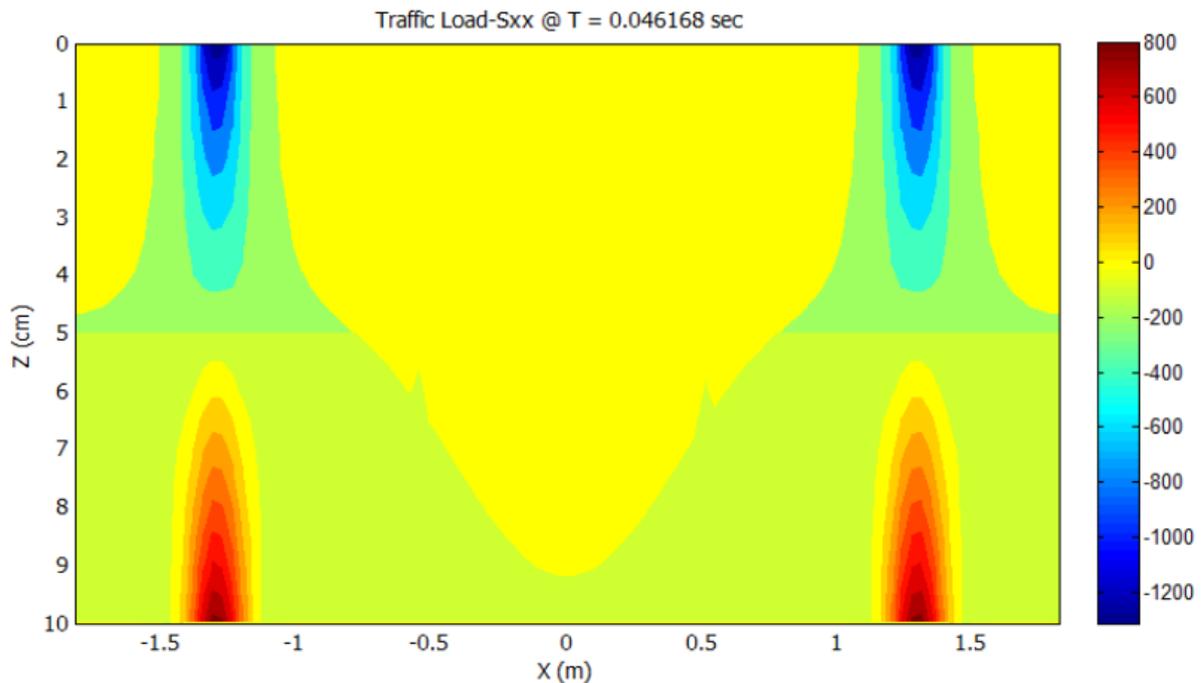
Fonte: North Carolina State University (2014, p. 32, com adaptações e tradução nossa).

A distribuição espacial apresenta os resultados da análise estrutural na seção transversal do pavimento, em qualquer momento do período de projeto, por meio de gráficos de contorno, tal como o exemplo apresentado na Figura 11.

Pelo exposto, percebe-se que a estrutura de análise proposta no LVECD é robusta e racional. O trabalho de Nascimento (2015) objetivou estudar misturas asfálticas brasileiras à luz do VECD *Model*, ou mais especificamente do *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD), e calibrar o método para a análise de desempenho quanto à fadiga por ação da carga, utilizando funções de transferências adequadas aos materiais brasileiros. Trata-se de um trabalho que traz o estado da arte e que contribui para um método de dimensionamento brasileiro num nível mais avançado de análise. Sua implantação demandará infraestrutura

laboratorial para ensaios sofisticados e, sobretudo, capacitação de recursos humanos, aspectos que se espera alcançar no Brasil ao longo dos próximos anos (médio e longo prazos).

Figura 11 - Gráfico de contorno da distribuição espacial das tensões e deformações no pavimento em um dado sub-período de projeto



Fonte: North Carolina State University (2014, p. 45).

#### 2.2.4 Outros métodos de Dimensionamento de Pavimentos Internacionais

A necessidade de evolução no que se refere ao dimensionamento de pavimentos vem estimulando vários países a reverem os seus métodos empíricos e investirem em métodos analíticos, com destaque para os europeus. Assim, a presente seção está dividida em métodos de dimensionamento europeus, métodos americanos e métodos africanos e chinês.

##### 2.2.4.1 Métodos de dimensionamento de pavimentos europeus

A estrutura apresentada pelos métodos de dimensionamento europeus é mais simples do que a apresentada nos métodos americanos e nenhuma com um programa completo como o que acompanha o MEPDG ou o LVECD. A tendência é a utilização de catálogos com várias soluções aplicáveis em campo, sendo o principal dado de entrada o tráfego, que geralmente é representado pelo eixo-padrão (EP). A principal fonte das

informações apresentadas nesse subitem foi Soares, Moreno e Motta (2009). Informações complementares puderam ser obtidas em Barra *et al.* (2010), focado na metodologia francesa, e Mattos (2014). As informações dos métodos apresentadas a seguir estão divididas por país e para cada país são apresentados: ano do método, nome adotado para o método e as principais características:

a) Alemanha

- ano: 2001(atualizado em 2011);
- nome: Diretrizes para normalização de pavimentos em estradas RStO 01;
- usa catálogo com soluções baseadas em experiências e cálculos analíticos;
- dados de entrada: tráfego (EP de 10ton, com 7 categorias de tráfego, calculadas para 30 anos);
- materiais: subleito  $\geq 45\text{MPa}$ .

b) Áustria

- ano: 2001(atualizado em 2011);
- nome: Dimensionamento de pavimentos (Oberbaubemessung RVS 3.63);
- usa catálogo com soluções para pavimentos flexíveis, rígidos e semirrígidos;
- dados de entrada: tráfego (EP com 5 categorias de tráfego) e tipo de pavimento a ser empregado;
- materiais: subleito  $\geq 35\text{MPa}$ ;
- soluções obtidas a partir de análise elástico-linear, considerando variações de temperatura e resistência à fadiga.

c) Bélgica

- ano: 1991;
  - nome: Características de Estradas e Autopistas;
  - usa catálogo com soluções para pavimentos flexíveis e rígidos;
  - dados de entrada: tráfego (EP, com 5 categorias de tráfego, calculado para 10 anos) e tipo de pavimento;
  - materiais: CBR do subleito  $\geq 8\%$  e 15cm de espessura;
- Obs: existem outros métodos em uso nesse país.

d) Espanha

- ano: 2003;
- nome: Norma 6.1-1C Seções de Pavimentos;

- usa catálogo;
- dados de entrada: tráfego (representado por 8 categorias de tráfego) e subleito;
- materiais: existem 3 categorias do subleito, que são representados pelo módulo de compressibilidade;
- as soluções para pavimentos asfálticos foram obtidas através de cálculos analíticos.

e) França

- ano: 2003;
- nome: “Catálogo de estruturas tipo pavimentos novos” e “Guia de Dimensionamento de Pavimentos” (Analítico);
- usa catálogo separando as soluções para rede estruturante e para rede não estruturante;
- dados de entrada: tráfego (representado pelo número de veículos passantes na faixa mais ocupada);
- materiais: existem 3 tipos de subleito e suas respectivas capacidades de suporte, cujos valores mínimos são tabelados;
- deixa aberto a utilização de método analítico para encontrar soluções diferentes das do catálogo, através dos procedimentos existentes no Guia de Dimensionamento de Pavimentos.

f) Itália

- ano: 1995;
- nome: Catálogo de pavimentos de estradas;
- usa catálogo com 8 tabelas com diferentes tipos de pavimento, categorias de tráfego e 4 classes de subleito;
- dados de entrada: tráfego (representado pelo número de veículos passantes na faixa mais ocupada) e subleito;
- materiais: subleito com determinação do módulo de resiliência (MR) ou na impossibilidade deste o CBR. Os valores devem estar entre 30MPa ou 3% e 150MPa ou 15%;
- soluções obtidas a partir de análise elástico-linear.

g) Portugal

- ano: 1995;

- nome: Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional;
- usa catálogo com 8 tipos de pavimento (asfáltico, semirrígido, de concreto com e sem armadura);
- dados de entrada: tráfego (representado por 8 categorias calculadas para 20 anos de serviço de pavimento flexível) e subleito;
- materiais: a capacidade de suporte do subleito é dada pelo Módulo de rigidez em função do valor do CBR;
- as soluções do catálogo foram obtidas utilizando um procedimento mecanístico-empírico incorporando resistência a fadiga do revestimento e deformação permanente das camadas granulares.

#### h) Reino Unido

- ano: 2001;
- nome: Manual de projeto de estradas e pontes;
- nesse método são fornecidos ábacos nos quais podem ser obtidas as espessuras das camadas em função do tráfego;
- dados de entrada: tráfego (representado por milhões de passagens do EP de 8ton na via de maior volume) e subleito;
- materiais: a capacidade de suporte do subleito em função do CBR, contudo indica usar MR ou resistência ao cisalhamento;
- os ábacos foram obtidos a partir de cálculos analíticos.

#### i) Suíça

- ano: 2001;
- nome: “Dimensionamento: superestrutura das estradas” – Normas;
- usa catálogo com soluções para pavimento flexível e rígido;
- dados de entrada: tráfego (representado por 6 categorias calculadas em função do EP em um dia médio) e subleito;
- materiais: o subleito, dividido em 5 categorias, pode ser representado pelo módulo de compressibilidade, CBR ou módulo de reação;
- algumas soluções do catálogo foram obtidas utilizando o método da AASHTO 1993.

#### 2.2.4.2 Outros métodos de dimensionamento americanos

No continente americano (Américas do Norte, Central e do Sul), dos Estados Unidos, já apresentado, ainda se utiliza até hoje o AASHTO 1993 como método de dimensionamento ou adaptação de versão anterior a ele, como é o caso do Brasil. No Canadá, devido à proximidade com os Estados Unidos, semelhanças climáticas e a realização de muitas ações conjuntas com esse país, inclusive na coleta de dados de pavimentos, o passo natural é adoção do MEPDG como próximo método de dimensionamento. Assim, a semelhança da maioria dos estados dos Estados Unidos, estão sendo realizados os procedimentos para adaptação do MEPDG às condições canadenses.

Na América Central e do Sul, existem alguns estudos que citam os métodos mecanísticos como tendência para o futuro (PATILLO B, 1988; GAETE, TENOUX, 1999; LIZCANO, 2003; QUINTANA *et al.*, 2007; NORDCBECK *et al.*, 2013; RIVERA, 2014). A implementação do MEPDG nos Estados Unidos de alguma forma, talvez pela tendência de uso dos métodos norte-americanos, gerou um movimento de alguns países para a adoção do MEPDG como método local. Segundo Albitres *et al.* (2013), países como Argentina, Chile, Colômbia, Costa Rica e Peru têm feito esforços para calibração local dos parâmetros requeridos no MEPDG. Existe inclusive uma comissão internacional para a implementação do MEPDG, o *Comité Internacional para la Implementación de Diseño Mecanístico-Empírico de Pavimentos* (CIDMEP).

No Peru, foram feitas capacitações e foi publicada a tradução, em espanhol, do manual. A Bolívia, mesmo não estando no grupo de países citado por Albitres *et al.* (2013), apresentou no *Congresso Ibero Latino Americano - CILA* de 2013 um trabalho referente a calibração dos modelos de trincamento por fadiga utilizado no MEPDG. Nesse mesmo congresso foram apresentados trabalhos de calibração de parâmetros utilizados no MEPDG: no Chile, com respeito aos ensaios de MR para materiais granulares; na Costa Rica, com a calibração do ensaio de módulo dinâmico por ensaios interlaboratoriais e modelos do MEPDG; e, na Argentina com o estudo da influência do clima na previsão de desempenho pelo MEPDG (TORRICO, TORRICO, 2013; YÁÑEZ *et al.*, 2013; NORDCBECK *et al.*, 2013; TANCO, RICO, BRUFMAN, 2013).

Contudo, no Chile, Costa Rica e Argentina, estudos desenvolvidos em alguns centros de pesquisas universitários indicaram que a adoção desse método às condições locais não é uma ação trivial. Assim, há um esforço no sentido de propor um método de

dimensionamento mecanístico-empírico local. No Chile, por exemplo, encontra-se em desenvolvimento um projeto de adaptação do MEPDG a realidade dos materiais locais, através do projeto INNOVA CORFO 11BPC-10220, conduzido pela *Universidad Técnica Federico Santa María* (YÁÑEZ *et al.*, 2013).

Na Costa Rica, através do Laboratório Nacional de Materiais e Modelos Estruturais da Universidade da Costa Rica (LanammeUCR), encontra-se em desenvolvimento um método de dimensionamento de pavimentos mecanístico, calibrado para as condições desse país, o qual utiliza a filosofia do MEPDG para sua concepção. Salazar (2013) informa que já foram desenvolvidos: modelos de fadiga, deformação permanente e dano por umidade de misturas asfálticas; equações de módulo de resiliência para os materiais granulares; análise de dados de solos estabilizados com cal e cimento; e uma equação alternativa e tropicalizada do modelo de Witczak de determinação do módulo dinâmico das misturas asfálticas.

Estão, ainda sendo desenvolvidos estudos com relação às influências climáticas e de tráfego procurando determinar os espectros de carga típicos do país. Para calibração dos modelos de previsão de desempenho fazem uso de ensaios acelerados em trechos monitorados com o uso de simulador de tráfego móvel do tipo HVS Mark VI. Esse método incorpora 2 níveis hierárquicos, análise: elástico-linear ou viscoelástica (SALAZAR, 2013). O *software* que incorpora a metodologia de dimensionamento para pavimentos flexíveis é o CR-ME, a ele podem ser associados outros *softwares* de apoio como: o PITRA-PAVE de análise estrutural, o IMODIN para o cálculo do módulo dinâmico e o PITRA-BACK de retroanálise.

Na Argentina, por outro lado, foi elaborado pelo *Laboratorio Vial IMAE*, da *Universidad Nacional de Rosario* o Modelo Mecanicista Empírico para Análises de Pavimentos Flexíveis - BackViDe. O BackViDe é constituído de subprogramas acoplados ao programa mãe por meio de uma plataforma Fortran: um programa de retroanálise, para um análise da vida útil do pavimento e um de simulação do desempenho do pavimento. Como dado de entrada de tráfego utiliza-se o número equivalente de eixos padrão, por uma questão de economia computacional. Aponta, no entanto, a possibilidade de em versões futuras serem incorporados os espectros de carga. A influência climática é simulada no programa “Tempe”. Com respeito aos materiais utiliza-se o módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) para misturas asfálticas e o MR para materiais granulares. O comportamento do pavimento analisado é representado em termos de rugosidade superficial, porcentagem de trincas, panelas e afundamento nas trilhas de roda (GIOVANON, PAGOLA, 2013).

### 2.2.4.3 Métodos de dimensionamento africanos e chinês

Relata-se neste subtópico sobre os métodos em uso na África do Sul, na região da África Meridional e, por fim, o método Chinês que promoveu a construção de mais de 50.000 km de rodovias de alto volume de tráfego.

O *South Africa Mechanistic Design Method* - SAMDM é o método de dimensionamento utilizado na África do Sul. Segundo Mattos (2014), o seu desenvolvimento ocorreu entre as décadas de 70 e 80 do século passado e vem passando por adaptações desde então. É um método mecanístico-empírico que tem como dado de entrada o tráfego, traduzido pelo número de eixos padrão. O MR e o coeficiente de Poisson são os dados de entrada para análise estrutural, que é feita por meio de um programa que realiza avaliações estruturais estáticas no regime elástico de múltiplas camadas. As respostas estruturais são as tensões, deformações e deflexões nos pontos críticos da análise. A análise de previsão de desempenho prevê a ruptura do pavimento considerando a fadiga, a ruptura por cisalhamento das camadas granulares e a deformação permanente no topo do subleito. Considera-se um avanço já na década de 70 um país africano empregar metodologia mecanística na concepção de suas rodovias.

O *SATCC Design Methodologies and Standards*, baseado no método sul africano, tem sido empregado na África Meridional, desde o acordo firmado entre alguns países dessa região, dentre eles, Moçambique. O método possibilita duas formas de dimensionamento de pavimentos: uma por meio de catálogo e outra pelo método do CBR. Para usos do catálogo o número de equivalente de eixos padrão é utilizado e o CBR com valores acima de 7%. Os dados de saída são as espessuras das camadas do pavimento (DIOGO, SHUBBER, LIN, 2007).

Por fim, o método chinês, que permitiu a construção de 50.000 km de rodovias expressas, das quais 90% são constituídos de uma camada de concreto asfáltico sobre uma base granular tratada com cimento. Assim, o principal defeito atuante nas rodovias chinesas é o trincamento por reflexão. Para isso o método de dimensionamento utilizado há quase 30 anos, o *Specifications for design of highway asphalt pavement – JTJ014-86*, atualizado em 1997, é baseado em princípios mecanísticos e procura através do cálculo de tensões e deformações minimizar as tensões de tração nas camadas dos pavimentos (ZHANG, 2009).

Os critérios de avaliação utilizado nesse método são: a deflexão no topo do revestimento e a tensão de tração na base das camadas. A estrutura de pavimento típico ou

tipo é constituída de uma camada fina ( $> 18\text{mm}$ ) de revestimento asfáltico sobre uma base granular tratada com cimento, sendo, assim, considerado um pavimento semirrígido.

Zhang (2009) afirma que esse método não leva em consideração elementos importantes, como os efeitos das aplicações de carga sobre o pavimento, e que por isso o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico estava em curso na China. Não foram encontrados relatos mais atuais da construção do método mecanístico-empírico, Zheng (2013), no entanto, apresenta estudo reafirmando a eficácia do método de 1997, após avaliação da deflexão de 50 trechos em que foi utilizado esse método de dimensionamento.

### **2.3 Evolução das metodologias de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil**

Prego (2001) afirma que o reconhecimento da importância do projeto da estrutura da via na concepção de novos pavimentos, no Brasil, surgiu a partir dos anos 50. A presença do engenheiro norte-americano William Heynes Mills foi fundamental para esse processo. Sendo consultor em obras rodoviárias no Espírito Santo, fazia uso de um método de dimensionamento em que as espessuras das camadas eram determinadas através do Índice de Grupo e do *California Bearing Ratio* (CBR))<sup>1</sup>.

Essa era uma época de crescimento do rodoviarismo brasileiro, em que a necessidade de construção de rodovias mais eficientes era cada vez mais evidente. Assim, o então DNER, atual DNIT, criou o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e enviou engenheiros brasileiros para serem capacitados nos Estados Unidos. Dentre eles, o engenheiro Murillo Lopes de Souza, o qual com os contatos e a experiência adquirida junto aos órgãos rodoviários em que estagiou concebeu o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis, ainda no início dos anos 60.

#### **2.3.1 Considerações sobre o Método do DNER/DNIT, 1966/2006**

Esse método é uma adaptação, considerando as condições brasileiras, baseada nos resultados obtidos nos trechos experimentais construídos no estado de Illinois nos Estados Unidos, pela AASHTO e também no método do USA *Army Corps of Engineers* (USACE). Após revisão, em 1966 ele foi adotado pelo DNER como método oficial de dimensionamento

---

<sup>1</sup> O CBR é também conhecido no Brasil como Índice de Suporte Califórnia (ISC), contudo devido à ampla divulgação da sigla CBR no meio rodoviário nacional, esta será utilizada neste documento.

de pavimentos asfálticos no Brasil. Passados meio século, a menos de uma breve revisão em 1981 (como a inclusão de fatores de carga para o eixo tandem triplo), ele ainda é o método oficial e amplamente utilizado pelos órgãos públicos e consultoras do meio rodoviário nacional, justificado principalmente pela sua facilidade de utilização.

Apesar do papel importante que esse método preencheu naquele momento e nos anos que se seguiram, percebe-se a sua inadequabilidade à atual realidade rodoviária nacional. Haja visto não acompanhar os avanços ocorridos na caracterização de materiais e a desconsideração do comportamento do pavimento quanto à deformação permanente e à fadiga, defeitos recorrentes nos pavimentos nacionais (MOTTA, 1991; FRANCO, 2007; SOARES, MORENO, MOTTA, 2009).

No Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006a), é feita, no entanto, uma orientação de uso do método empírico associado a uma análise mecanística, contudo, faz somente a recomendação de uso de definição da fadiga em duas fases do processo de trincamento: i) a primeira que compreende o período entre a abertura ao tráfego (com o material ainda íntegro) até o surgimento na superfície das primeiras trincas; ii) segue-se então a segunda fase, que se começa no início da propagação de trincas (através do interligamento entre as trincas originais) até o fim do período de projeto. A previsão da primeira fase pode ser representada pela Equação 12 e a segunda fase pela Equação 13. Destaca-se que essa orientação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006) é apenas uma orientação e não se tem uma obrigatoriedade de uso.

$$N_0 = K \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n \times F = N_{flab} \times F \quad (12)$$

$$N_{TR} = N_0 \times F \quad (13)$$

Onde:

$N_0$  = número de repetições de carga que produz a deformação máxima de tração  $\varepsilon_t$  para o surgimento das primeiras trincas de fadiga na superfície do pavimento;

$N_{flab}$  = número de repetições de carga para atingir a fadiga em laboratório;

$K, n$  = constantes da equação de fadiga no laboratório;

$F$  = fator campo *versus* laboratório, que faz o ajuste entre os valores observados em laboratório e em campo.

Assim, como ocorreu nos outros países consultados neste trabalho, no Brasil os avanços econômicos alcançados, pelo menos nas duas últimas décadas, também alteraram a configuração de viagens nas rodovias, com aumento do tráfego e das cargas transportadas. Isso contribui para que o método de dimensionamento vigente já não seja mais adequado, pois apresenta limitações iguais ou superiores as do AASHTO 1993, pois foi baseado em versão anterior deste método e diferente dele não passou pelo mesmo número de revisões.

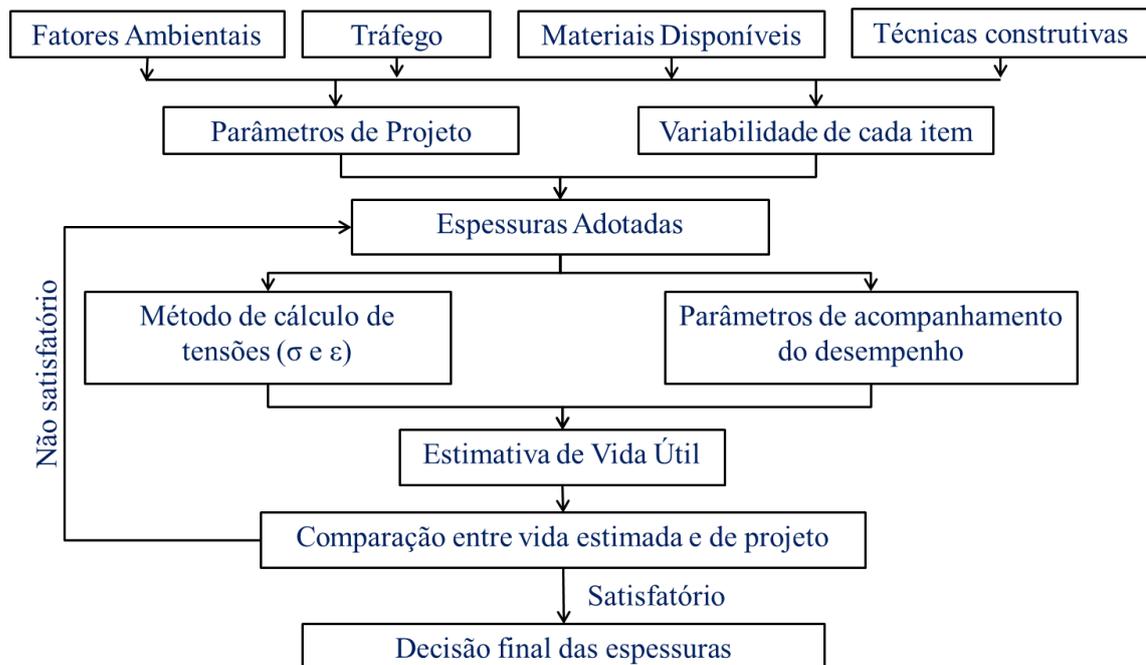
Assim, faz-se imperativo a adoção de um método de dimensionamento mais condizente com a realidade do tráfego nacional e os avanços técnicos-científicos que a engenharia rodoviária nacional e mundial alcançou. Os trabalhos de Motta (1991), com algumas melhorias em 2015, e Franco (2007) caminharam no sentido de preencher essa lacuna no Brasil. As suas sugestões não se tornaram oficiais pelo pelos órgão rodoviários, mas trouxeram importantes contribuições para os trabalhos futuros. Foi então concebida em 2010 a Rede Temática de Asfalto, que se propunha a desenvolver um método de dimensionamento racional para o Brasil, baseado em uma conjunto de dados rodoviários que seriam obtidos através de trechos experimentais monitorados. Fruto desse projeto tem-se inicialmente a pesquisa de Nascimento (2015) que trouxe uma importante contribuição para uma modelagem racional de pavimentos asfálticos, bem como para a previsão de desempenho de pavimentos quanto a fadiga. Em seguida, Fritzen (2016) apresentou um trabalho na mesma linha de Nascimento (2015), contudo numa perspectiva mais simplificada. Descrição mais detalhada destes trabalhos encontram-se nos subtópicos seguintes deste capítulo.

### **2.3.2 Método da COPPE/UFRJ, 1991/2015**

O método da COPPE/UFRJ foi elaborado no âmbito da tese de doutorado de Motta (1991). Nesse método, leva-se em consideração a influência climática, os limites de suporte do pavimento, a deformação permanente em todas as camadas e a fadiga no revestimento para o dimensionamento de pavimentos novos. Ele representou um grande avanço para o Brasil na época em que foi proposto, pois levava em consideração, dentre outros: o valor de Módulo de Resiliência (MR) da camada asfáltica em função da temperatura; a análise estrutural através de programa em Elementos Finitos (MEF), sendo indicado o programa *Finite Element Analysis of Pavement Structures* (FEPAVE); a análise de desempenho em função da fadiga, da deformação permanente total em todas as camadas; e a

tensão vertical no topo do subleito. A Figura 12 representa esquematicamente os passos envolvidos no dimensionamento de pavimentos asfálticos por meio desse método.

Figura 12 - Esquema do método de dimensionamento de pavimentos da COPPE/UFRJ, 1991



Fonte: MOTTA (1991).

Aplicações práticas desse método podem ser encontradas em Benevides (2000), para o dimensionamento de três trechos reais no Estado do Ceará; em Darous (2003) que tem por objetivo avaliar diferentes programas de análises de tensões e deformações; Medina e Motta (2015) citam ainda o trabalho de Bezerra Neto, Parreira e Motta de 2003.

Em Medina e Motta (2015), é rerepresentado o método mecanístico proposto por Motta (1991). A filosofia geral permanece a mesma, contudo com algumas alterações, como passar a considerar a deformabilidade plástica no pavimento asfáltico.

Sobre a deformabilidade elástica no pavimento asfáltico: os autores não mais apresentam catálogo com ábacos, pois os valores de deflexões, deformações específicas de tração, diferenças de tensões na fibra inferior do revestimento e tensão vertical no topo do subleito podem ser facilmente obtidos, por meio de análises em programas de análise estrutural, hoje muito mais difundidos e acessíveis.

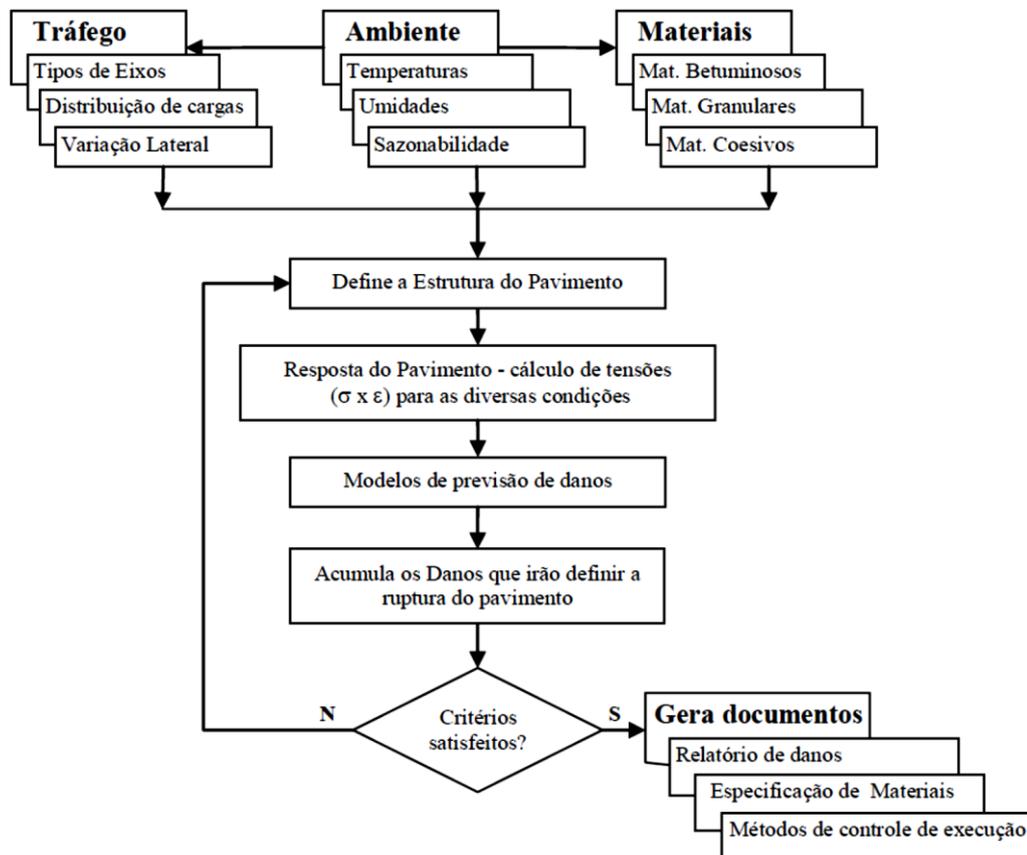
Ainda sobre a deformabilidade plástica no pavimento asfáltico: considera-se que os pavimentos dimensionados pelo método do DNER apresentam pequenas deformações

permanentes. E quando ocorrem é provavelmente por dois motivos principais: i) má execução das vias, sem drenagem e falhas na compactação do material; ou ii) por dosagens das misturas asfálticas que apresentam uma má acomodação dos materiais constituintes que podem contribuir com as deformações em campo.

### 2.3.3 SisPav, 2007

O SisPav, ou método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos, foi desenvolvido no âmbito do doutorado de Franco (2007). O resultado foi a apresentação de um sistema computacional que incorporava os aspectos considerados básicos para um dimensionamento de pavimentos baseado em princípios mecanísticos. O objetivo de Franco (2007), à época, foi inserir em um só programa os vários aspectos do dimensionamento mecanístico, à semelhança do que fez o MEPDG norte-americano. A estrutura geral do método considerava para o dimensionamento os aspectos apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma da estrutura conceitual do SisPav



O fluxograma permite perceber que no âmbito desse métodos também pode-se fazer a divisão entre: i) dados de entrada, que é composto pelo tráfego, pelos dados de clima, pela caracterização dos materiais que farão parte da estrutura de pavimento a ser testada; ii) análise estrutural; e iii) desempenho e dados de saída.

A inserção dos dados de tráfego é feita considerando os diferentes tipos de eixos atuantes na via. Ao serem inseridas no *software* as diferentes configurações de eixos componentes do tráfego, são, então, calculados as tensões e deformações dos pontos críticos da estrutura. A carga da roda é considerada como uniformemente distribuída em área circular, enquanto a pressão de contato pneu-pavimento é considerada como sendo igual a pressão de inflação do pneu.

Seguindo a mesma linha de raciocínio do MEPDG de 2004, a variação lateral dos pneus sobre o pavimento, ou Variação Lateral do Tráfego (VLT), na trilha de roda, é levada em consideração para os cálculos do dimensionamento. Segundo Franco (2007), baseado no National Cooperative Highway Research Program (2004), essa consideração afeta os resultados finais de dano quanto à fadiga e à deformação permanente.

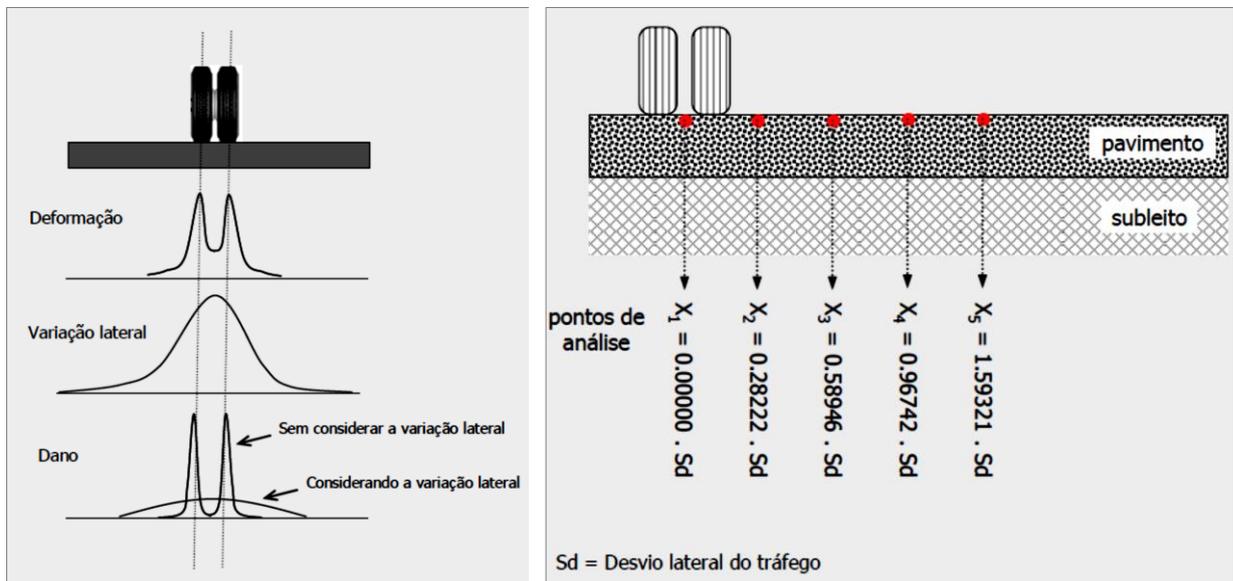
No caso da fadiga ocorre um aumentando do espalhamento e no caso da deformação permanente essa área de atuação reduz. Isso se deve ao aumento da área em que os pneus afetam diretamente o pavimento, aumentando a área trincada e reduzindo as deflexões máximas. A Figura 14a ilustra bem esse aspecto.

Já a Figura 14b apresenta os pontos de análise em torno do eixo aximétrico, cujos efeitos isolados do dano são calculados e somados para obtenção do valor total do dano provocado pela VLT.

No que se refere aos fatores ambientais, somente a temperatura é considerada, influenciando sobre a capacidade de suporte do pavimento. O subperíodo de análise é o referente a uma estação climática, ou seja, três meses, quando os efeitos sobre os materiais mantêm certa uniformidade.

A caracterização de materiais no âmbito do SisPav divide os materiais de pavimentação em: misturas asfálticas, granulares, lateríticos, argilosos ou cimentados quimicamente. Para cada um desses tipos de materiais são definidos os parâmetros a serem determinados e inseridos no método. No que se refere à rigidez, os parâmetros de entrada tanto para a mistura asfáltica quanto para as camadas granulares é o módulo de resiliência.

Figura 14 - a) Representação do efeito da VLT no dano acumulado e b) Pontos de análise para consideração da VLT



Fonte: Franco (2007).

Para os cálculos de tensões e deformações, foram desenvolvidos dois programas: Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) e Método dos Elementos Finitos Tridimensional (Efin3D), utilizando, respectivamente a elasticidade linear de múltiplas camadas e o método dos elementos finitos com enfoque tridimensional. Segundo o autor a solução analítica se comportou melhor, pois apresentou menores tempos de cálculo e mais facilidade na coleta dos resultados gerados. Os resultados de tensões foram utilizados para determinar o dano em cada subperíodo de análise. O dano acumulado em todo o período de projeto é então comparado com os valores admissíveis estabelecidos.

Quanto à análise de desempenho, os critérios utilizados por Franco (2007) estão relacionados à ruptura estrutural do pavimento, não levando em consideração, diretamente, a perda de eficiência funcional. A fadiga do revestimento asfáltico ou das camadas cimentadas é o critério obrigatório de desempenho a ser considerado. A Equação 14 apresenta o modelo utilizado para misturas asfálticas, o qual foi obtido a partir do banco de dados da COPPE de misturas com asfaltos tradicionais.

$$N_{lab} = 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,821} \cdot \left(\frac{1}{MR}\right)^{0,74} \quad \text{com } R^2 = 0,805 \quad (14)$$

Onde:

$N_{lab}$  = vida de fadiga em laboratório;

$\varepsilon_t$  = deformação específica de tração;

MR = módulo de resiliência da mistura asfáltica, em MPa.

Por fim, vale destacar que o SisPav de 2007 foi utilizado como referência nas análises iniciais dos pavimentos da RTA. Além disso, ele foi sendo modificado para atender às demandas desse projeto, sendo atualmente denominado SisPav Br. As premissas desse novo programa não foram ainda publicadas e por isso não serão relatadas nesta Tese.

#### **2.3.4 Considerações sobre a Rede Temática de Asfalto**

A RTA é um projeto financiado pela Petrobras e com participação de universidades e centros de pesquisas no país, tendo a cooperação do DNIT/IPR. O título do projeto principal é “Desenvolvimento de um Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos – SDIMPA”, que vem sendo desenvolvido desde 2010 (REDE TEMÁTICA DE ASFALTO, 2012). O objetivo desse projeto é a construção de um novo método de dimensionamento de pavimentos nacional, considerando os avanços da mecânica dos pavimentos. Para isso fazia-se necessário a existência de informações sistematizadas sobre as vias nacionais e o comportamento dos materiais em campo. Essa é a grande carência nacional para construção de um projeto dessa envergadura.

Assim, a Fase I da RTA trata da constituição de trechos experimentais no país. As universidades âncoras do projeto: UFRJ, USP, UFRGS e UFC ficaram responsáveis por firmar parcerias com os órgãos rodoviários ou empresas nas suas respectivas áreas de influência para que trechos novos pudessem ser escolhidos e monitorados sistematicamente em três etapas: antes (pré-execução), durante (construção) e após a construção da via (pós-execução).

Na UFRJ, foram construídos trechos experimentais (Campus do Fundão), cujas pesquisas geraram resultados para elaboração de modelos de desempenho quanto à fadiga, apresentados por Franco (2007) e Fritzen (2016). Esses trechos foram construídos em um projeto também financiado pela Petrobras a partir de 2006.

A UFRGS acompanha os trechos experimentais no Rio Grande do Sul. Na pesquisa de doutorado de Mattos (2014), podem ser encontrados os primeiros resultados de desempenho da BR-290. Em Bock (2014) são apresentados informações do trecho experimental mais recente, BR-448, e a possibilidade de inclusão de mais duas novas vias, a BR 116 e a BR 386.

A USP, através da Escola Politécnica, construiu dois trechos experimentais na Estrada do Leite, região de Ribeirão Preto entre os municípios de Patrocínio Paulista e Batatais, sob jurisdição do DER-SP. O primeiro trecho, construído em agosto de 2009, consta de três segmentos, onde foi variado o material de base (solo-brita, solo-brita-cimento e solo-cimento) (BERNUCCI *et al.*, 2010). O segundo trecho, construído em abril de 2010, consta de dois segmentos, onde variou-se o ligante asfáltico do revestimento (CAP 30/45 e CAP 50/70) (VASCONCELOS *et al.*, 2011).

No âmbito da UFC, por meio do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), atualmente são acompanhados cinco trechos em vias no estado do Ceará. São dois na BR-222, um na CE 350, um na CE-085 e outro na Av. Jovita Feitosa em Fortaleza.

Destaca-se que, além dessas universidades precursoras, foram também agregadas ao longo do tempo de existência da RTA mais 12 universidades. São elas: Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Universidade Federal de Sergipe (UFS), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Instituto Militar do Exército (IME), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC RJ), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (EESC/SP), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) e Universidade Federal de Goiás (UFG).

Os procedimentos de acompanhamento dos trechos da RTA constam no Manual de Execução de Trechos Monitorados (REDE TEMÁTICA DE ASFALTO, 2010). Os dados obtidos em campo passaram a ser inseridos em uma plataforma na web, hospedada no site da Petrobras, o Sistema da RTA (SRTA). O manual e o SRTA são melhor descritos nos itens 2.3.4.1 e 2.3.4.2.

Por fim, considerando as dimensões continentais do Brasil, a construção de novos trechos pelo país e a continuidade do acompanhamento dos já implantados é fundamental para o conhecimento real do comportamento dos pavimentos nacionais. Somente assim será possível a elaboração de modelos de previsão de desempenho que melhor retratem a realidade de comportamento dos materiais nacionais e que possam ser sistematicamente revisitados para atualizações. É possível que sejam necessários modelos regionalizados, dadas as grandes diferenças de materiais e de clima no país. Esse era um dos principais gargalos para implantação de um método mecanístico, pois apenas recentemente modelos de desempenho

passaram a ter suas calibrações mais confiáveis, embora muito ainda precise ser consolidado nesse sentido no Brasil.

#### *2.3.4.1 Manual de Execução de Trechos Monitorados*

O acompanhamento dos trechos experimentais monitorados no âmbito da RTA segue os passos que constam no Manual de Execução de Trechos Monitorados (REDE TEMÁTICA DE ASFALTO, 2010). Os procedimentos indicados visam a coleta sistematizada e uniforme das informações obtidas nos vários trechos experimentais pelo país, cujas atividades são coordenadas por diferentes instituições. Uma ordenação era necessária para a criação de um banco de dados de materiais e de desempenho de pavimentos que validasse o desenvolvimento do novo método de dimensionamento nacional. As atividades previstas no Manual são divididas em quatro etapas: Etapa 0, Pré-execução, Execução e Pós-execução.

Na Etapa 0, que pode acontecer ainda na fase de projeto da via, são coletadas informações das instituições participantes do projeto e dados preliminares tais como dados de tráfego, características geométricas do projeto e, caso seja uma reabilitação, avaliação das condições do pavimento existente.

A Etapa de Pré-execução é dividida em três partes: amostras, materiais e estrutura. Ela ocorre antes da construção do pavimento e tem por objetivo conhecer os materiais que virão a compor o pavimento, bem como a estrutura que será executada.

A Etapa de Execução é dividida em duas partes: confirmação dos materiais e controle da execução. Essa etapa ocorre no período de construção do pavimento e objetiva confirmar se os materiais efetivamente utilizados na construção são os previamente definidos na Etapa de Pré-Execução, além de verificar como as camadas foram executadas. É também nessa etapa que são realizados os primeiros levantamentos de avaliação da condição estrutural e funcional do pavimento, através de medidas das deflexões e ensaios de avaliação da textura.

A Pós-execução é a última etapa do monitoramento e ocorre por definição após a execução do pavimento. É nessa etapa que são realizadas as avaliações das condições funcional e estrutural dos pavimentos, bem como os levantamentos de tráfego. Esses levantamentos devem ser feitos periodicamente. A Tabela 6 mostra esses períodos e a lista de defeitos que devem ser avaliados.

Tabela 6 - Periodicidade das avaliações do pavimento realizadas na Pós-execução

	<b>Tempo 0 ou uma semana</b>	<b>1 mês</b>	<b>6 meses</b>	<b>Ano 1</b>	<b>Ano 2 e 5</b>
Amostra do revestimento usinado (CPs*)	X		X	X	X
Deflexão	X		X	X	X
IRI	X		X	X	X
Pêndulo e mancha de areia	X	X	X	X	X
Levantamento de defeitos	X	X	X	X	X
Atrito (com equip. contínuos)	**		**	**	**
Permeabilidade	X		X	X	X
LV		X		X	

Fonte: Rede Temática de Tecnologia em Asfalto (2010).

\* Corpos de prova. \*\*opcional.

#### 2.3.4.2 SRTA – Sistema da Rede Temática de Asfalto

O Sistema da Rede Temática de Asfalto, conhecido como SRTA, é o banco de dados projetado pela equipe de Tecnologia da Informação da Petrobras, a fim de dar suporte às ações de coleta de dados dos trechos experimentais monitorados pela RTA. Seguindo as orientações do Manual de Execução de Trechos Monitorados (REDE TEMÁTICA DE ASFALTO, 2010), abordado no item anterior, ele subdivide os dados coletados nas três principais etapas previstas nesse manual: a Pré-execução, a Execução e a Pós-execução.

São dois os grandes objetivos desse banco de dados, o primeiro é concentrar em uma só plataforma todos os dados coletados no âmbito da RTA em todo o território nacional, possibilitando acesso a todas as informações dos trechos monitorados. O segundo objetivo é a utilização desses dados como suporte na elaboração e melhoramento de um método de dimensionamento mecanístico no Brasil.

As informações geradas no monitoramento dos trechos experimentais são armazenadas de forma organizada e no mesmo padrão. O SRTA é alimentado pelas instituições de pesquisa que monitoram os trechos. O banco de dados possibilita a análise dos resultados globais (de todos os trechos), a futura obtenção de fatores campo-laboratório e modelos de previsão de desempenho globais que podem ser inseridos no novo método de dimensionamento (REDE TEMÁTICA DE ASFALTO, 2010).

O sítio <http://srta.petrobras.com.br/SRTAWeb/index.jsf> dá acesso ao SRTA, cuja página contendo as informações iniciais é apresentada na Figura 15. Cada universidade integrante da RTA e que tem trechos experimentais sob sua tutela, possui uma chave e senha para acesso ao sistema e inserção de dados. Esse acesso é restrito aos dados dos trechos por

ela monitorados. Somente o grupo da Petrobras tem acesso irrestrito ao banco de dados, sendo também responsável pelo suporte às universidades nos eventuais problemas surgidos no seu preenchimento.

Figura 15 - Tela com informações iniciais no SRTA

	Identificador	Instituição	Tipo de Projeto	KM inicial	Sentido estaqueamento	Estaca inicial	Estaca final
	UFC-TREC-3-RECA	UFC	Restauração		Crescente	1	1
	UFC-TREC-2-NOVO	UFC	Novo	18.0	Crescente	935	949
	UFC-TREC-1-NOVO	UFC	Novo	0.0	Crescente	1	50

Fonte: Petrobras (2013).

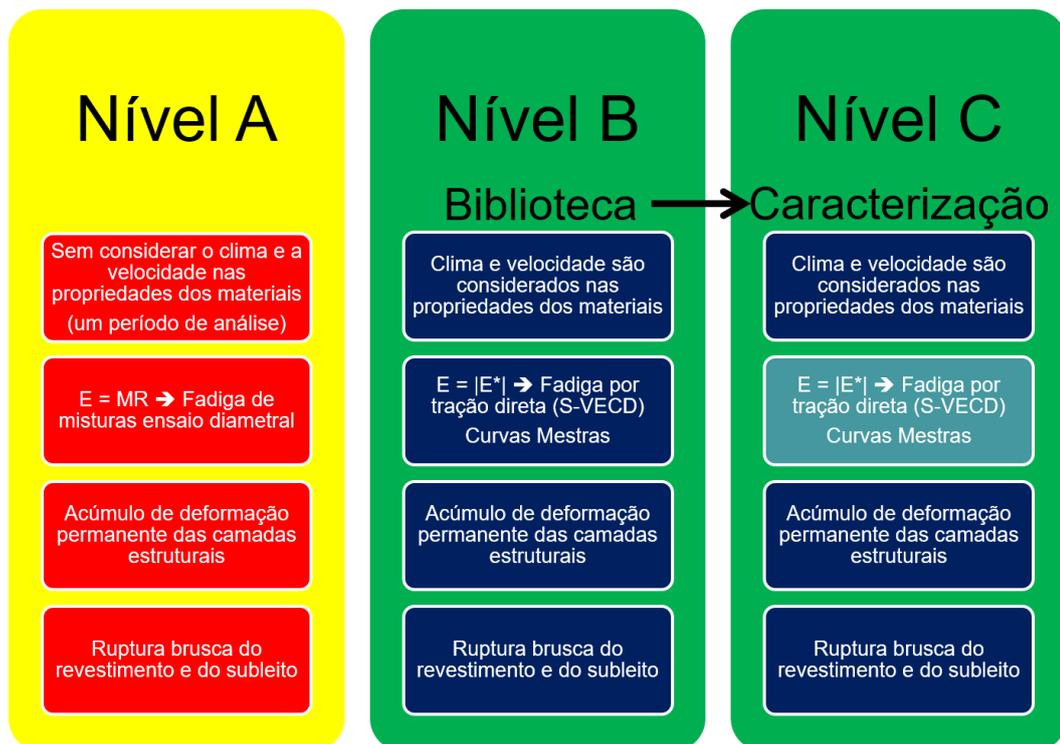
O preenchimento completo dos dados no SRTA é feito conforme o fluxo indicado no Manual de Execução dos Trechos Monitorados. O acesso a etapa seguinte demanda que a etapa anterior esteja 100% preenchida. Essa é uma questão de hierarquia do programa, que acaba por estimular aos grupos de pesquisa a coletar as informações de todos os dados iniciais, que são fundamentalmente os dados de entrada num método de dimensionamento mecânico.

#### 2.3.4.3 Escopo geral do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos em desenvolvimento

Além de promover a construção e monitoramento dos trechos experimentais, as atividades do grupo de pesquisados envolvidos neste projeto envolve o trabalho em paralelo de desenvolvimento de um método de dimensionamento mecânico-empírico brasileiro. A

semelhança do MEPDG, o método brasileiro também será dividido em três níveis hierárquicos de dados de entrada e análise. A Figura 16 apresenta as principais características de cada um desses níveis, sendo o Nível C o de maior acuraria na análise e que demanda ensaios de caracterização mecânica mais sofisticados e o nível A o mais básico entre os três.

Figura 16 – Características dos níveis hierárquicos do método de dimensionamento mecanístico-empírico brasileiro



Fonte: Nascimento (2014).

A principal diferença registrada entre os três níveis é com relação a rigidez e a fadiga da mistura asfáltica. No nível A, os parâmetros são determinados através dos ensaios de compressão diametral em equipamentos de carga repetida. Já no nível C, eles são determinados pela caracterização laboratorial dos materiais por meio dos ensaios de tração direta. No nível B, poderão ser utilizados os mesmos dados do nível C, contudo estes poderão ser oriundos de um banco de dados existente.

Nessa perspectiva de construção de um método com esses três níveis hierárquicos levou a realização de pesquisas que preenchessem as lacunas de conhecimento em cada nível. Assim, são apresentados no item 2.4 os avanços já realizados no que se refere a previsão de desempenho de pavimentos, mais especificamente ao trincamento por fadiga.

## **2.4 Previsão de desempenho em pavimentos asfálticos**

Neste subitem aborda-se sobre os modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos, enfocando-se no dano por fadiga e em recentes trabalhos que contribuem diretamente para o novo método de dimensionamento de pavimentos em construção no Brasil.

### ***2.4.1 Modelos de previsão de desempenho***

Conforme se pôde perceber nos subitens anteriores, a concepção de um novo método de dimensionamento, de cunho mecanicista, pressupõe a utilização, em suas análises de desempenho, de modelos que prevejam o comportamento quanto a determinado defeito (e.g. trincamento por fadiga), em condições específicas de clima e de tráfego, de uma estrutura de pavimento quando aplicada em campo.

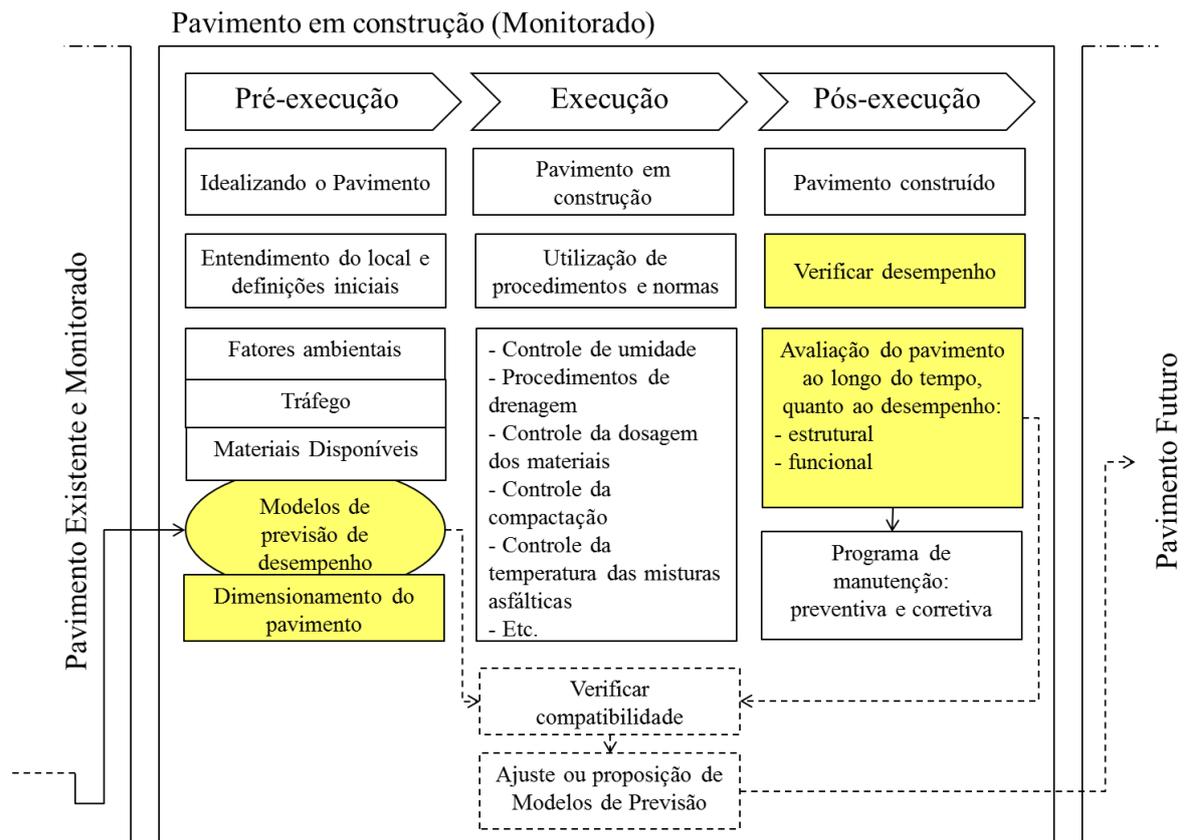
De maneira simplificada, esses modelos, também chamados de equações de previsão de desempenho ou funções de transferências, são funções matemáticas que se faz entre os resultados de ensaios laboratoriais do comportamento dos materiais e os resultados de ensaios de avaliação do comportamento desses materiais quando aplicados em campo. Os modelos são tão mais eficientes quanto mais os resultados deles decorrentes se aproximam do desempenho apresentado em campo pelo pavimento.

Em decorrência disso, quanto mais informações existirem sobre diferentes pavimentos, em diferentes condições ambientais e de tráfego, melhores poderão ser os modelos desenvolvidos. Essas informações são obtidas a partir do monitoramento periódico dos pavimentos, o qual deve partir desde concepção inicial do pavimento, dos métodos e materiais utilizados, até chegar na constituição final da estrutura com as devidas solicitações de tráfego. A adição sistemática de novos pavimentos a um banco de dados tem o potencial de tornar o método cada vez mais robusto, permitindo ainda calibrações regionais específicas. Daí a importância dos projetos de monitoramento de vias, tais como o LTPP e a RTA.

Na Figura 17, é possível perceber as inter-relações entre os vários aspectos envolvidos na concepção de um pavimento, estando em foco os modelos de previsão. Nela existe um pavimento já construído e monitorado, um pavimento em desenvolvimento e um pavimento futuro. É possível detectar que os modelos de desempenho utilizados para o dimensionamento de um pavimento são decorrentes de pavimentos já concebidos e dos quais

já foram obtidos resultados do seu comportamento em campo. O pavimento em desenvolvimento, por sua vez, também será monitorado e após verificada a compatibilidade entre os resultados simulados e os apresentados em campo, os seus próprios dados poderão ser incorporados ao banco de dados para melhoria dos modelos já existentes. Esses novos modelos poderão então ser utilizados para o dimensionamento de pavimentos futuros.

Figura 17 - Visão geral da gerência de pavimentos com foco no dimensionamento



Fonte: Elaborado pela autora.

A previsão da vida de serviço do pavimento é, todavia, um dos maiores desafios da pavimentação rodoviária (Kim, 2009). É essa lacuna que os modelos de previsão de desempenho procuram preencher, utilizando, para isso, parâmetros conhecidos das camadas do pavimento. Segundo Huang (2004), eles são o elo fraco nos métodos mecanístico-empíricos, pois requerem uma extensiva calibração e verificação de dados de campo para estabelecer modelos confiáveis. Isso pode ser obtido por meio do monitoramento contínuo de trechos experimentais, sendo essa a parte empírica do processo de dimensionamento.

Para Bock (2014, p. 34), os “modelos de desempenho devem retratar, da melhor forma possível, as condições locais, uma vez que cada região apresenta características distintas como tráfego, clima, capacidade de suporte do subleito, tipo de materiais empregados na construção, além de diferentes técnicas e controles construtivos”. Por isso,

esse processo é considerado por Haas (2001) uma das maiores dificuldades da engenharia rodoviária. Também é Haas (2001) que classifica os modelos de desempenho em:

- a) empírico: nos quais certas variáveis, como a deflexão ou carregamento de tráfego são relacionadas a perda de serventia ou outra medida de deterioração, geralmente através da análise por regressão;
- b) mecanístico-empírico: nesse são associados parâmetros da resposta estrutural do pavimento (e.g. tensão no subleito) a outras variáveis, e.g., o acúmulo de tráfego, por meio de análises de regressão ou por calibração de modelos, também por análise de regressão;
- c) subjetivo: baseado na experiência do técnico, ao qual são associados certo nível de serventia à idade do pavimento. Usando diferentes combinações de variáveis, através dos modelos de transição Markov, modelos Bayesianos, etc.

Existem, ainda, algumas técnicas para elaboração dos diferentes tipos de modelos de previsão. Destacam-se as seguintes, apresentadas por Shahin (2006), por terem uso mais facilitado e serem as mais comuns na geração de correlações entre variáveis de pavimentação e modelos de previsão:

- a) extrapolação linear: aplicável somente para seções individuais de pavimentos. Essa técnica gera o modelo de previsão mais simples. É baseada na extrapolação linear dos dois últimos pontos de dados, um de condição inicial do pavimento e outro no momento da avaliação. Os métodos gerados não podem ser utilizados em condições diferentes das do pavimento que o originou, também não sendo representativos para avaliações a longo prazo;
- b) regressão (empírica): a análise de regressão estabelece uma relação empírica entre duas ou mais variáveis. Existem diversas formas de análise de regressão, sendo a mais simples a regressão linear entre duas variáveis. A regressão linear também pode ser feita com mais de duas variáveis, passando então a ser chamada de regressão linear múltipla. O coeficiente de regressão  $R^2$ , que mede a proporção da variação total em torno da média, é utilizado para determinar a qualidade do ajuste da regressão;
- c) modelo mecanístico-empírico: desenvolvido utilizando a técnica de regressão, com a resposta estrutural do pavimento sendo a variável dependente. Nesse caso a tensão e a deformação são usadas como dados de entrada (variáveis independentes).

A Tabela 7, desenvolvida por Bock (2014), apresenta alguns dos principais modelos de previsão desenvolvidos no Brasil, desde a década de 80. A grande maioria é para previsão da irregularidade longitudinal, um parâmetro utilizado no nível de rede da gerência de pavimentos. Percebe-se ainda que os modelos gerados são regionalizados, assim, a adoção de cada um deles na avaliação de desempenho deve ser previamente analisada.

Tabela 7 - Principais modelos de previsão desenvolvidos no Brasil

<b>Modelo de</b>	<b>Ano</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>UF</b>
Queiroz	1981	Irregularidade Longitudinal	GO, MG, SP, DF (PICR-GEIPOT)
Peterson	1987	Trincamento, Irregularidade, Afundamento de trilha de roda	GO, MG, SP, DF (PICR-GEIPOT)
Pinto	1981	Desempenho à fadiga	RJ
Marcon	1996	Irregularidade longitudinal, Deflexões máximas médias, Índice de gravidade global, Afundamento de trilha de roda	SC
Basílio	2002	Deflexões, Trincamento, Irregularidade longitudinal e Afundamento de trilha de roda	GO
Lerch	2003	Irregularidade longitudinal	RS
Yshiba	2003	Deflexões e Irregularidade longitudinal	PR
Nakahara	2005	Irregularidade longitudinal, início e evolução de trincamento	SP <sup>1</sup>
Benevides	2006	Irregularidade longitudinal	CE <sup>2</sup>
Albuquerque	2007	Deflexões, Irregularidade longitudinal e Índice de gravidade global	PB, CE
Franco	2007	Tensão de tração na camada asfáltica	RJ <sup>3</sup>
Vitorelo	2008	Irregularidade longitudinal, Afundamento de trilha de roda e Deflexões	RS

Fonte: Bock (2014).

Nota: <sup>1</sup> Via urbana São Paulo; <sup>2</sup> Região Metropolitana de Fortaleza; <sup>3</sup> Banco de Dados UFRJ

Ao longo da exposição realizada nos subitens 2.2 e 2.3 foram apresentados modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos relacionados a fadiga. Foco do

presente trabalho. Em adição, tem-se também os modelos formulados por Nascimento (2015) e Fritzen (2016) de previsão de % de área trincada (%AT) apresentados no item 2.4.3.

#### **2.4.2 Breve introdução ao dano por fadiga**

A fadiga é provocada pelo acúmulo de deformações elásticas (recuperáveis) que com a ação contínua do tráfego gera microfissuras. Com o passar do tempo e o aumento das cargas, elas se intensificam em quantidade e em tamanho. A não intervenção preventiva pode levar a completa falha estrutural. O dano por fadiga é um dos principais defeitos nos pavimentos asfálticos nacionais, sendo abordado neste item a sua correlação com a área trincada em campo.

Dano, segundo Lemaitre (1996), é a deterioração que ocorre no material antes da falha, geralmente não podendo ser visto ou tocado. Para Kim (2009), dano é a perda de resistência de um material provocado por algum mecanismo de falha (trincamento por fadiga ou deformação permanente). Do ponto de vista da mecânica do contínuo, dano, provocado em termos de trincamento, é dado por  $D = SD/S$ , ou seja, densidade efetiva de microdefeitos. Sendo SD a área efetivamente trincada e S a área total analisada (Lemaitre, 1996). Para Shah, Swartz e Ouyang (1995), a mecânica do dano é dirigida para a obtenção de índices que descrevem a redução da capacidade funcional de estruturas, em termos de ciclos de carga, cuja Equação básica é representada por:

$$E_{\text{dan}} = E_{\text{orig}}(1 - D) \quad (15)$$

Onde:

$E_{\text{dan}}$  = rigidez do material danificado;

$E_{\text{orig}}$  = rigidez do material original (não danificado);

D = dano (entre 0 e 1, onde D=0 significa que o material não está danificado e

D=1 que ele está danificado).

Na pavimentação, no entanto, o dano por fadiga é frequentemente expresso como uma taxa que é dada pela relação entre o número de repetições de carga acumulada e o número de repetições de carga admissível (Equação 16). O número admissível de repetições de carga em um dado período e condição de análise ( $N_{fi}$ ) é associado à resposta (tensão ou deformação de tração) do pavimento nesse período e condição. Na Lei do dano acumulado de Miner, consideram-se diferentes períodos “i” (meses ou estações do ano), sendo o dano final

(D) um somatório dos danos ocorridos nesses períodos, como indicado pela Equação 16 (Rodrigues, 1991 e NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004).

$$\sum_{i=1}^T D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (16)$$

Onde:

T = número total de períodos;

$n_i$  = tráfego atual para o período “i”, ou seja, tráfego projetado na via num dado período considerado na análise, podendo ser obtido pela Equação 17;

$N_{fi}$  = valor máximo de solicitações de tráfego que determinado material resiste em campo sem sofrer ruptura, num dado período “i” e condições, indicado por deformações sofridas pelo material asfáltico em ensaios laboratoriais. A partir deste ponto referenciaremos  $N_{fi}$  por  $N_f$ .

$$n_i = \frac{N(1-(1+t/100)^P)}{1-(1+(t/100))} \quad (17)$$

Onde:

N = número de eixos padrões considerado no projeto da via no ano inicial de abertura ao tráfego, por pista considerada na análise;

t = taxa de crescimento anual do tráfego;

P = período correspondente a análise (em meses).

O valor de  $N_f$  pode ser determinado por diferentes funções, sendo atualmente mais utilizada a Equação 18 (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004), do *Asphalt Institute*. O modelo utilizado nos trechos experimentais da Ilha do Fundão-RJ, por exemplo, é uma variação do  $N_f$ , sendo representado pela Equação 19 (Fritzen, 2016). Para Huang (2004), no entanto, o importante não é a função de transferência usada, mas a sua calibração cuidadosa, na qual se aplica um fator campo-laboratório (*shift factor*) adequado (à região), permitindo que a equação de previsão corresponda às observações de campo.

$$N_f = K_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{K_2} E^{K_3} \quad (18)$$

$$N_f = K_1 (\varepsilon_t)^{K_2} \quad (19)$$

Onde:

$\varepsilon_t$  = deformação principal de tração, tradicionalmente considerada na fibra inferior do revestimento;

E = rigidez da mistura asfáltica no revestimento;

$K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  = coeficientes de regressão laboratorial, inerentes a mistura asfáltica.

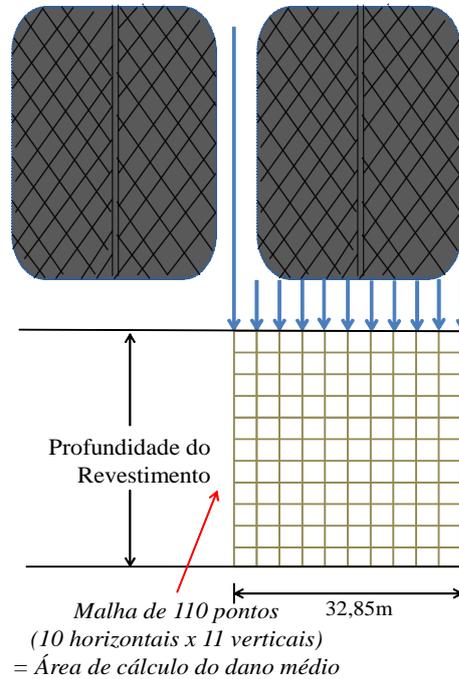
Conforme mencionado, o dano simulado D varia de 0 a 1 (i.e., 100%) e as Funções de Transferência convertem esse parâmetro em área trincada observada em campo (%AT). Em termos práticos, esse índice leva em consideração a extensão total do trecho analisado e a área considerada por técnicos como trincada.

### **2.4.3 Trabalhos nacionais envolvendo dano por fadiga associado a área trincada**

No Brasil, Nascimento (2015) e Fritzen (2016) desenvolveram funções de transferência relacionando dano por fadiga e %AT, diferenciando-se na abordagem (viscoelástica e elástica, respectivamente) e nos ensaios mecânicos. Ambos utilizaram dados de campo e de laboratório de trechos monitorados pela Rede Temática de Asfalto, tanto da Ilha do Fundão, RJ, quanto de outros estados do Brasil.

Nascimento (2015) utilizou o modelo S-VECD, o mesmo do FlexPAVETM 1.0, considerando variações de temperatura, velocidade dos veículos, distribuição horária do tráfego, dados de ensaios de  $|E^*|$  e de fadiga por tração direta (TD), associada a uma análise viscoelástica. O programa para realizar o cálculo estrutural com essas premissas foi o LVECD (*Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distress*), desenvolvido na *North Carolina State University*, cuja primeira versão foi liberada em 2012 (precursor do atual FlexPAVETM 1.0). Os resultados da resposta estrutural foram utilizados para a determinação do dano médio, que corresponde ao somatório dos danos calculados em cada ponto de análise abaixo de um dos pneus do eixo padrão, dividido pelo número total de pontos, sendo essa uma área do revestimento afetada pelo carregamento. Na Figura 18, é possível verificar essa distribuição de pontos abaixo da carga, que correspondem a uma malha de 10 elementos horizontais e 11 verticais, totalizando 110 pontos de análise.

Figura 18 - Coordenadas dos pontos de análise da deformação principal máxima proposta por Nascimento (2015)



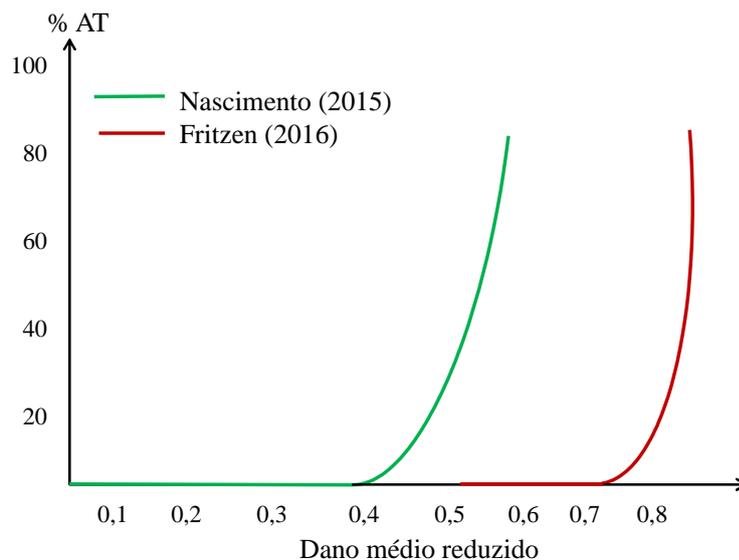
Fonte: Elaborado pela autora.

Em termos gerais, Fritzen (2016) fez uso do mesmo conceito de análise de dano, sendo utilizado o MR e a vida de fadiga por compressão diametral (CD) para caracterizar o revestimento em laboratório. Esses foram associados a uma análise elástica para calibrar e validar, nas suas condições de análise, o modelo proposto por Nascimento. Pelas características da análise, não são consideradas variações de temperatura, de velocidade e distribuição horária do tráfego.

Em ambas as pesquisas se detectou que a melhor forma de determinação do dano era limitando-o entre 0 e 1. Especificamente no que diz respeito à correlação dano por fadiga e %AT, Nascimento (2015) aplicou um fator de deslocamento de dano às curvas de dano médio (que têm um mesmo formato), de modo a correlacioná-lo ao início do trincamento em campo. Esse trincamento começa em níveis de dano diferentes, a depender da taxa de crescimento do dano. Tal fato levou Nascimento (2015) a desenvolver a função de deslocamento de dano, que cria um espaço de dano reduzido no qual todos os pavimentos apresentaram as mesmas correlações entre dano reduzido e área trincada. A mesma estratégia foi usada por Fritzen.

A Figura 19, adaptada de Fritzen (2016), apresenta um gráfico com as curvas simuladas de %AT *versus* dano médio reduzido em cada uma dessas pesquisas. Em Fritzen (2016) a curva está mais próxima do valor de dano máximo (igual a 1) do que no resultado de Nascimento (2015). Dado que as misturas utilizadas nas duas pesquisas são as mesmas, são dignos de nota como possíveis causas da diferença: o método de análise estrutural (elástico-linear x viscoelástico), o tipo de dado de entrada do revestimento, i.e., rigidez (MR versus  $|E^*|$ ) e vida de fadiga (CD x TD). Sobre as diferenças entre esses ensaios podem ser consultados os trabalhos de Babadopulos *et al.* (2013), Babadopulos, Soares e Castelo Branco (2015) e de Nascimento (2015). Percebe-se aqui um ponto importante de investigação.

Figura 19 - Comparativo entre a função de transferência de Nascimento (2015) e Fritzen (2016)



Fonte: Fritzen (2016, com adaptações).

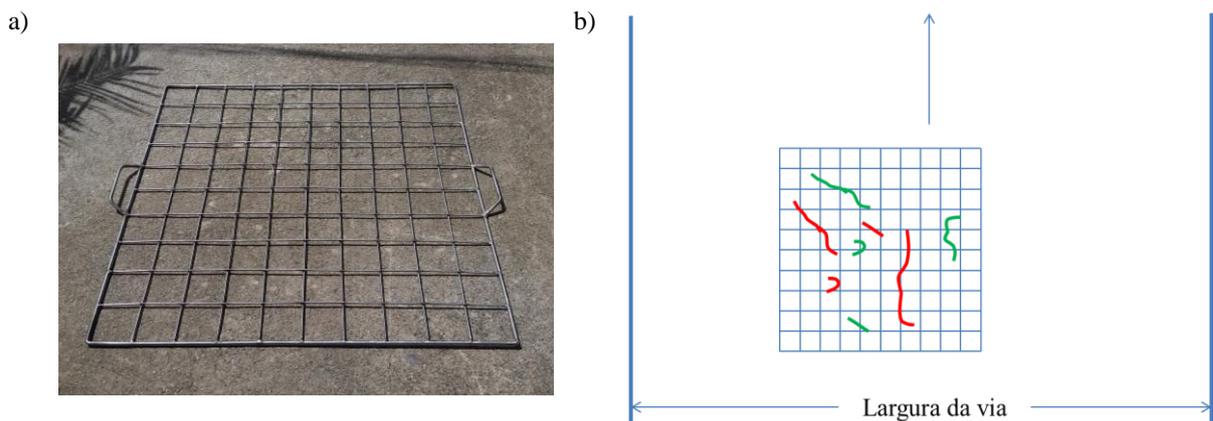
#### 2.4.4 Trincamento por fadiga em misturas asfálticas

O fenômeno de trincamento em campo é traduzido, na pavimentação, como % de área trincada (%AT) do pavimento. Esse índice leva em consideração a extensão total do trecho analisado e a área designada por técnicos como trincada. Para determinação da área trincada pode-se fazer uso de técnicas como o processamento digital de imagem (SCHEFFY;

COETZEE; DIAZ, 1999) e sistemas de fotogrametria de pavimentos (KERTÉSZ *et al.*, 2008), ou mais simples, como grades metálicas (Figura 20a).

O procedimento para o uso da grade é simples: coloca-se a grade ao longo da trilha de roda e registram-se nos espaçamentos da grade os locais onde se percebe a existência de trincas, independente do grau de severidade das mesmas. Pode-se fazer a marcação das trincas percebidas com giz ou tinta, como indicado na Figura 20b. No caso do uso de tinta, é possível utilizar diferentes cores a fim de diferenciar os períodos de medição. O procedimento de coleta se dá na extensão em que se deseja avaliar a existência de trincas. Em trechos em que a quantidade de trincas é pequena só se faz necessário localizar a grade naqueles locais em que se percebe a existência delas.

Figura 20 - a) Grade metálica de  $1\text{m} \times 1\text{m}$  (aberturas de  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ) para mapeamento de trincas e b) Esquema de grade sobre a via em análise



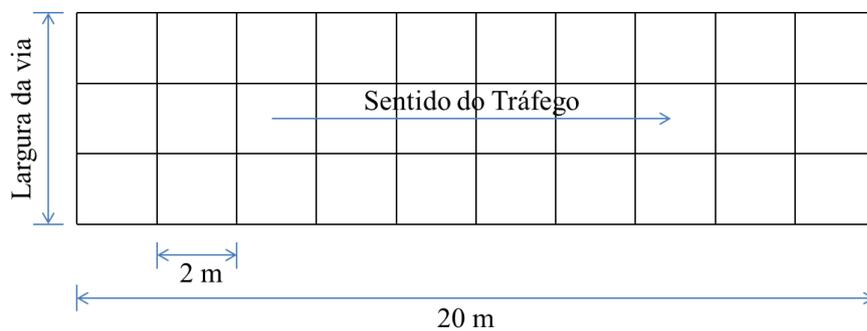
Fonte: Elaborado pela autora.

Outra forma de determinar o %AT em campo é pelo acompanhamento visual. Nesse procedimento, a extensão da via que se deseja avaliar é dividida em mini trechos de 20m de comprimento, os quais são subdivididos em 10 partes longitudinais e em 3 transversais, resultando em 30 células (de  $2\text{m} \times 1/3$  da largura da via) de análise de defeitos.

Essa divisão é feita para facilitar a coleta de defeitos, dado que a inspeção é visual e realizada por dois técnicos que percorrem toda a sua extensão. Os técnicos devem identificar a existência de trinca em uma célula. Caso isso ocorra, considera-se que ela está 100% trincada. Se essa mesma trinca se estende para outras células, cada célula atingida também deve ser contabilizada como trincada.

Esse é um procedimento simples, mas que permite uma avaliação razoável do grau de integridade do pavimento quanto ao trincamento por fadiga. Esse foi o método escolhido para medição de %AT nos trechos monitorados na Ilha do Fundão – RJ por Nascimento (2015), assim como pelo Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2011). A Figura 21 traz uma representação esquemática da divisão em células de análise.

Figura 21 - Esquema de mapeamento de defeitos nos Trechos da Ilha do Fundão-RJ



Fonte: Nascimento (2015, com adaptações).

O %AT nos trechos é dado pela Equação 20.

$$\%AT = \frac{NC_{trincada}}{NC_{total}} \times 100 \quad (20)$$

Onde:

$NC_{trincada}$  = número de células trincadas;

$NC_{total}$  = número total de células inventariadas no trecho.

Os valores obtidos podem ser inseridos em um gráfico de %AT × dano correspondente a data de medição das trincas em campo. A curva resultante pode ser representada por uma sigmoideal, como considerado no MEPDG norte-americano (Equação 21), ou por um modelo de potência, como o proposto por Nascimento (2015a) (Equação 22). Ambas as equações são utilizadas para representar as trincas do tipo *bottom-up*, ou seja, de baixo para cima. A curva proposta por Nascimento (2015) foi a que melhor se relacionou aos dados brasileiros. Destaca-se que não estão inclusas, nem em Nascimento (2015) e nem no presente estudo, as trincas do tipo *top-down*, uma vez que raramente ocorrem no Brasil.

$$\%AT = \frac{6000}{1+e^{(C_1-C_2 \log D)}} \times \frac{1}{60} \quad (21)$$

Onde:

%AT = % de área trincada que se origina no topo do revestimento e desce até sua base;

$C_1$  e  $C_2$  = Coeficientes de regressão da curva;

D = Dano médio calculado por simulação computacional, correspondente ao mês em que foi realizada a medição de área trincada em campo.

$$\%AT = C_1 \left( N/N_f \text{ red}_s \right)^{C_2} \quad (22)$$

Onde:

$N/N_f \text{ red}_s$  = dano médio reduzido;

$C_1$  e  $C_2$  = coeficientes de regressão.

O Dano médio reduzido é o dano médio multiplicado por um fator de deslocamento de dano, o que correlaciona de maneira mais acurada o dano com o início do trincamento em campo. O leitor é incentivado a consultar Nascimento (2015a, 2015b) para maiores detalhes sobre a definição e o propósito do dano reduzido.

A fim de obter os resultados de dano por fadiga necessários ao desenvolvimento da função de transferência, Nascimento (2015a) utilizou o modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD) aplicado em um modelo de análise estrutural viscoelástico, contido no programa *Layered Viscoelastic Continuum Damage* (LVECD). Dentre os modelos estatísticos disponíveis o que melhor se adequou aos dados nacionais da relação %AT prevista × dano por fadiga é representado pela Equação 22. Os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  se encontram na Tabela 8.

Fritzen (2016) utilizou como dados de entrada de rigidez o módulo de resiliência, e de fadiga o ensaio de compressão diametral. A análise estrutural foi elástica linear com suporte do programa SisPav Br, uma versão atualizada do programa proposto por Franco (2007). Assim como em Nascimento, o modelo proposto por Fritzen foi o da Equação 22 cujos coeficientes também se encontram na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes da função de %AT determinados por Nascimento (2015) e Fritzen (2016)

Coeficiente	Nascimento (2015)	Fritzen (2016)
<b>C1</b>	7272,68	1,50 x 10 <sup>5</sup>
<b>C2</b>	8,6629	40,61338
<b>a</b>	0,1557	0,004
<b>b</b>	5,7948	32,834
<b>c</b>	51,4881	115,683
<b>d</b>	30,6332	59,187

Fonte: Elaborado pela autora.

Nas duas pesquisas foi determinado um fator de erro da função de transferência, cujo formato segue o modelo da Equação 23.

$$Erro = a + \frac{b}{\left(1 + e^{c-d \cdot \log(100 \cdot N/N_{f \text{ red}})}\right)} \quad (23)$$

Contudo, também é possível que essa curva seja no formato de uma exponencial, tal como a Equação 24.

$$Erro = a * e^{b \cdot N/N_{f \text{ red}}} \quad (24)$$

Onde:

a, b, c, d = coeficientes de ajuste da equação, conforme apresentado na Tabela 8.

## 2.5 Considerações finais sobre este capítulo

Lista-se a seguir um breve resumo das principais considerações a respeito do assunto abordado neste capítulo:

- a) a observação em campo de defeitos nas vias torna possível desenvolver correlações entre campo e laboratório que permitem a Engenharia Rodoviária fazer previsões do comportamento dos materiais em campo, o que em si possibilita um dimensionamento eficiente e eficaz das estruturas a serem utilizadas;
- b) sendo essas correlações (ou funções de transferência) específicas de cada tipo de defeito percebido em campo, para uma ampliada previsão de desempenho

do pavimento proposto faz-se necessário levantamentos de campo de outros defeitos, tais como deformação permanente;

- c) um dos modelos de previsão mais importantes no caso do Brasil é o que correlaciona fadiga ao %AT em campo, dado que este é um dos defeitos mais recorrentes no Brasil;
- d) nos países onde os métodos são considerados de sucesso, percebe-se um comprometimento governamental em investir de maneira efetiva nos programas de levantamento de dados, tal como ocorre no LTPP norte-americano e australiano. Os levantamentos proporcionados pela RTA coloca o Brasil nesse caminho promissor;
- e) esses levantamentos são realizados sistematicamente, para que o comportamento dos materiais em campo possam ser constantemente atualizados, sobretudo diante das mudanças nas características de tráfego, climática e do surgimento de novos materiais de pavimentação;
- f) por trás do desenvolvimento e utilização desses métodos percebe-se claramente um amplo corpo técnico capacitado e com infraestrutura disponível;
- g) o FlexPAVETM 1.0 e o MEPDG, métodos mais modernos de que se tem conhecimento, utilizam para a previsão de %AT em campo a sua correlação com o dano por fadiga, obtidos através de simulação computacional.

### **3 BREVE DIAGNÓSTICO DOS RECURSOS TÉCNICOS-CIENTÍFICOS NACIONAL DE SUPORTE A UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS**

Neste capítulo é apresentado um quadro geral de recursos técnicos-científicos brasileiros que estão disponíveis e que podem servir de apoio ao desenvolvimento do novo método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos nacional, bem como de melhoramentos futuros.

#### **3.1 Mapeamento da infraestrutura física e de recursos humanos das Superintendências Regionais (SRs) do DNIT**

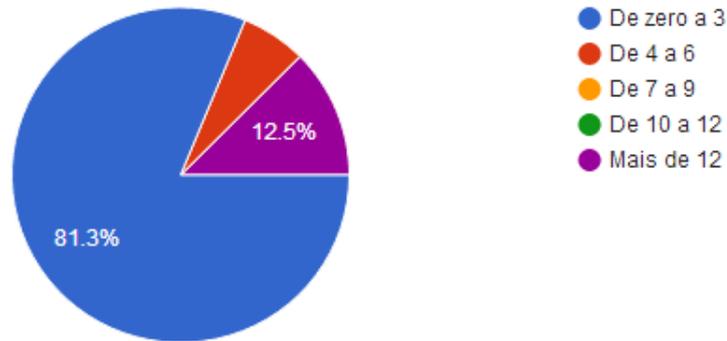
A fim de obter informações referentes ao pessoal e infraestrutura disponível para lidar com um novo método de dimensionamento no âmbito do DNIT foi aplicado um questionário *online*, disponível no Apêndice A, a engenheiros do órgão, de preferência ligados aos respectivos setores de projeto de cada Superintendência Regional do órgão (SR). As 19 perguntas contidas no questionário foram divididas em quatro grupos: i) recursos humanos; ii) infraestrutura disponível; iii) projetos atuais de pavimentação rodoviária; e iv) método de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Os questionários foram enviados no segundo semestre de 2016. Das 24 solicitações feitas as SR's, foram recebidas 14 respostas, cujos resumos são apresentados a seguir.

##### **3.1.1 Recursos humanos**

Do ponto de vista de recursos humanos, objetivou-se identificar em cada uma das SR's a quantidade de engenheiros vinculados ao setor de projetos, bem como de laboratoristas com experiência em ensaios de pavimentação. O objetivo era determinar o quadro técnico disponível no DNIT para trabalhar diretamente com o novo método de dimensionamento de pavimentos nacional, sabendo como demandar das empresas contratadas e também avaliar os projetos recebidos. A Figura 22 apresenta o resumo da quantidade de engenheiros. Mais de 80% das SR's tem de zero a 3 engenheiros no setor de projetos e apenas 12,5% tem 12 ou mais engenheiros. Considerando o atual cenário de mudança do método de dimensionamento, a existência de somente 3 engenheiros por setor de projeto talvez seja insuficiente para as

futuras demandas, bem como das outras atividades vinculadas ao setor. Adicionado a isso, as respostas mostraram que 62,5% das SR's não têm laboratoristas com experiência em ensaios de pavimentação, apenas 37,5% tem de 1 a 3 laboratoristas com esse conhecimento.

Figura 22 - Quantidade de engenheiros vinculados ao setor de projetos da SR



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.1.2 *Infraestrutura laboratorial disponível*

As perguntas nesse subgrupo tiveram por objetivo identificar a existência ou não, na SR, de laboratório de pavimentação e quais ensaios convencionais em solos e misturas asfálticas, bem como quais ensaios de caracterização mecânica avançada e ensaios de campo podem ser realizados. O conjunto das respostas é preocupante uma vez que mais de 80% apontaram para não existência de tais setores em suas SR's. Apenas 12,5% responderam que existia e estava em pleno funcionamento e menos de 10% registraram que existia, mas não funcionava. Essas respostas já antecipam os resultados das perguntas relacionadas aos ensaios laboratoriais, ou seja, menos de 20% das SR's respondentes conseguem realizar algum tipo de ensaio laboratorial.

Com respeito aos ensaios de solos convencionais, somente 12,5% das SR's conseguem realizar ensaios de determinação da umidade de solos e agregados miúdos, compactação de agregados úmidos e preparação de amostras para ensaios de caracterização.

Com relação aos ensaios convencionais em misturas asfálticas, nenhuma das SR's entrevistadas é capaz de fazer extração de betume utilizando o extrator Soxlet ou uma dosagem Superpave. Apenas uma das SR's é capaz de realizar os ensaios Los Angeles, absorção e densidade do agregado graúdo e densidade real de agregados finos. Duas SR's,

somente podem determinar a densidade real de agregados miúdos e fazer o ensaio Marshall. Adicionado a isso, o único ensaio de caracterização avançada mencionado foi o de resistência à tração estática em misturas e apenas em uma única SR. Vale destacar que os ensaios convencionais pesquisados estão todos vinculados à normas de execução de ensaios emitidas pelo próprio DNIT. Um dos entrevistados justificou que quando necessários esses ensaios são hoje realizados por empresas privadas. Provavelmente esse será o caminho adotado para suprir a necessidade de ensaios no âmbito dos projetos de dimensionamento mecanístico-empírico.

Por fim, no que diz respeito aos ensaios de campo, 62,5% das SR's não são capazes de realizar nenhum ensaio, 25% conseguem determinar a AT. Contudo, os ensaios de microtextura e macrotextura não podem ser realizados por nenhuma das SR's respondentes.

### 3.1.3 *Projetos atuais de Pavimentação Rodoviária*

Esse grupo de perguntas buscou identificar, em um primeiro momento como se dá o acompanhamento da evolução do tráfego nas vias monitoradas pela SR, importante dado de entrada em um método de dimensionamento mecanístico-empírico. A Figura 23 apresenta que todas as SR's fazem pelo menos um levantamento de tráfego a cada 5 anos, 50% o fazem anualmente. Isso permite a montagem de um banco de dados com informações de tráfego, do qual podem ser obtidos taxas de crescimento anual e, dependendo da amplitude das pesquisas realizadas, até dados mais específicos como a composição do tráfego mensal e horária.

Figura 23 - % de SR's que fazem pesquisas de tráfego por intervalo de tempo



Fonte: Elaborado pela autora.

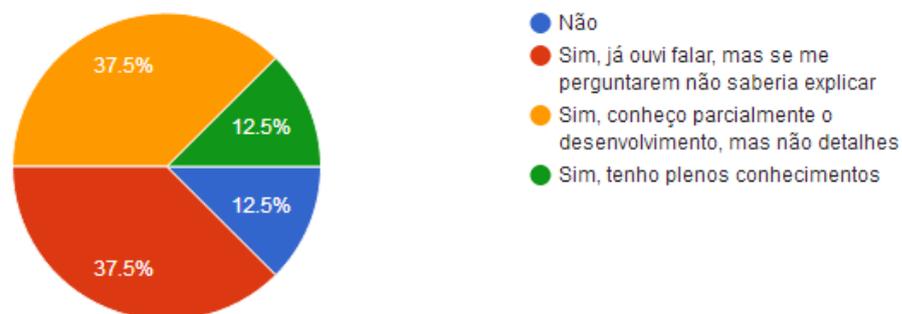
Pelo menos 25% das SR's realiza esses levantamentos com uma técnica WIM, similar a utilizada pelo MEPDG para compor os espectros de carga. Por outro lado, outros 25% utilizam ainda as coletas de tráfego manuais e quase 20% utiliza os postos de pesagem para medida do tráfego.

Quanto aos projetos de implantação/pavimentação, 100% são elaborados por empresas de consultoria privada por meio de projetos de licitação. Também 100% dos entrevistados afirmaram que existe algum tipo de interação com empresa consultora durante a elaboração dos projetos, sendo 25% parcial e 62,5% durante todo o processo, contudo sem prazos pré-estabelecidos.

### 3.1.4 Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

O último grupo de perguntas tem por objetivo identificar o grau de conhecimento do entrevistado quanto a um futuro método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional (lembrando que o respondente é vinculado ao setor de projetos do órgão). A Figura 24 apresenta os resultados das respostas quanto ao questionamento se o entrevistado tinha conhecimento do desenvolvimento desse método. Apenas 12,5% disseram que não tinham conhecimento, tendo a grande maioria (75%) um conhecimento parcial. Esse conhecimento, na maior parte, ocorreu por fontes externas a SR, e.g., palestras, *workshops*, congressos, etc.

Figura 24 - Conhecimento dos entrevistados quanto ao desenvolvimento de um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional



Fonte: Elaborado pela autora.

Quando questionados quanto à diferença entre um método de dimensionamento empírico e mecanístico-empírico, 25% dos entrevistados afirmaram que tinham plenos conhecimentos da diferença e saberiam dimensionar através de um método mecanístico.

Outros 12,5% afirmaram que sabiam a diferença entre os dois métodos. O restante ou tem conhecimento parcial ou nenhum a respeito desse tema. Quase 95% dos entrevistados afirmaram que nunca tinham passado por uma capacitação pelo órgão relacionada aos métodos de dimensionamento de pavimentos mecanístico-empírico e sua utilização, sendo essa, portanto, uma demanda bem clara que resulta desta pesquisa simplificada.

Quando questionados sobre a quantidade de engenheiros que seria necessária para atender as demandas de um novo método de dimensionamento, a maioria dos entrevistados (37,5%) disse que precisariam ser contratados pelo menos mais 2 engenheiros, em torno de 20% que seriam necessários entre 3 e 5 engenheiros e mais de 30% disseram que não sabiam dimensionar essa demanda.

Por fim, os entrevistados foram questionados quanto ao tempo que eles consideravam necessário para que sua SR estivesse preparada para mudança entre o método empírico atual e um novo método mecanístico-empírico. A maioria (quase 40%) disse que não poderia dimensionar, ou por falta de conhecimentos técnicos ou pela complexidade do processo, que envolve muitos aspectos, como a elaboração e aprovação de novas normas técnicas. Ainda, 25% dos entrevistados acreditam que essa preparação pode ocorrer num intervalo inferior a um ano e outros 25% que o intervalo é superior a esse prazo.

### **3.2 Mapeamento da infraestrutura física e de recursos humanos dos Departamentos Rodoviários Estaduais**

Do mesmo modo que se aplicou os questionários nas SR's do DNIT, buscou-se obter o mesmo tipo de informação dos órgãos rodoviários estaduais por todo o Brasil. Diferente das SR's, estabelecer um contato com um engenheiro responsável pelo setor de projetos nos DER's foi mais difícil. Dos 26 estados brasileiros só se efetivou o contato com o órgão rodoviário em 19, sendo que desses, somente 2 responderam ao questionário (apesar dos vários pedidos realizados): Ceará e Espírito Santo. Isso impossibilita um retrato mais amplo da infraestrutura física e de recursos humanos desses órgãos, mas alguns pontos foram inferidos a esse respeito:

- a) em pelo menos 6 estados brasileiros não há um Departamento Estadual de Rodovias, ou similar. Esse setor é controlado por secretarias de infraestrutura estaduais, sem inclusive ter um engenheiro específico para o setor de infraestrutura de transportes;

- b) alguns dos DER's mudaram de nome ou foram fechados e não há órgão que explicitamente assuma suas funções, não sendo possível contato com responsáveis por essa área;
- c) informações gerais, na grande maioria dos órgãos estaduais contatados, não foram claras, sendo considerado muito difícil a interlocução técnica.

### **3.3 O papel da universidade e as pesquisas desenvolvidas**

A Pesquisa Rodoviária da CNT que vem sendo realizada desde 1995 mostra um quadro geral da situação das vias nacionais. Vários podem ser os motivos apontados para o quadro negativo. Um dos problemas enfrentados pela pavimentação nacional foi o desaceleramento dos investimentos federais no DNIT, no início da década de 90. Isso limitou a capacidade de investimento em pesquisa, antes realizada de maneira consistente pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), além de serem prejudicados a manutenção e fiscalização das vias pelo órgão em âmbito nacional.

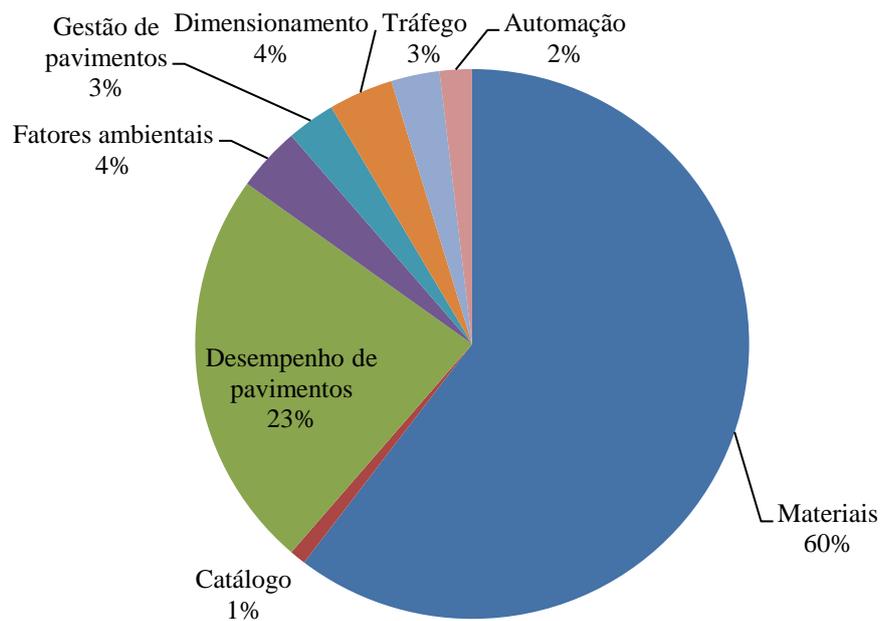
Nesse sentido, as universidades acabaram por se tornar uma das principais fontes de pesquisas na pavimentação rodoviária nacional. Apesar dos diversos e louváveis avanços acadêmicos, esses ainda não tiveram os reflexos compatíveis com sua qualidade e quantidade no dia a dia da prática rodoviária nacional. Essa lacuna entre a crescente produtividade acadêmica e a qualidade prática da pavimentação em nosso país não é o objeto da presente tese, por se tratar de um problema multidimensional do setor público principalmente. Contudo, com vistas a contribuir para eventuais ações de aproximação entre as investigações desenvolvidas academicamente e as respectivas aplicações no curto prazo, realizou-se uma varredura das pesquisas de doutorado em pavimentação realizadas no âmbito de alguns grupos de pesquisa nacionais, dentre as quais os participantes da RTA.

O período de observação foi entre 1990 e 2015, com foco em pesquisas realizadas no tema dimensionamento de pavimentos asfálticos. Considera-se esse tema um guarda-chuva que integra vários elementos da pavimentação, tais como tráfego, clima, materiais, análise estrutural e modelos de previsão de desempenho. Foram contabilizadas para os percentuais apresentados na Figura 25 pesquisas nas universidades nacionais com programas de doutorado com linhas de pesquisa envolvendo a temática de infraestrutura de transportes.

Percebe-se pela referida figura, que o foco da maioria das pesquisas em pavimentação realizadas no Brasil estão relacionadas a caracterização geral de materiais,

apresentando aproximadamente 60% das pesquisas de doutorado nessa área. Vale destacar que, apesar de não se ter desmembrado os números referentes às pesquisas de mestrado, percebeu-se em linhas gerais que ocorre o mesmo que nas pesquisas de doutorado, ou seja, há uma tendência maior de se testar materiais nas diferentes regiões, assim como testar resíduos, avaliar o comportamento pela adição de modificadores, dentre outros. Usa-se, na grande maioria, ensaios convencionalmente aceitos na academia nacional, sendo incomum o teste de novas metodologias de ensaio ou a contestação da relevância de ensaios tradicionais. Não por acaso o Brasil não é propriamente conhecido internacionalmente na área de pavimentação como um país formulador de novas teorias, que poderiam surgir por meio de novos instrumentos de observação (ensaios), incorporação de novas variáveis a modelos existentes, entre outras alterações do corpo de conhecimento estabelecido.

Figura 25 - Percentual de pesquisas de doutorado realizadas no Brasil que permeiam a temática dimensionamento de pavimentos



Fonte: Elaborado pela autora.

Em segundo lugar, com 23%, aparecem as pesquisas em que o foco é a avaliação do desempenho de pavimentos, seja estrutural ou funcional. Predominam trabalhos voltados para a avaliação geral de pavimentos, seguidos da irregularidade longitudinal, da deformação permanente, da fadiga e da aderência pneu-pavimento dos pavimentos. O trabalho de Mattos

(2014) é o primeiro que traz resultados de avaliação de desempenho do pavimento de um trecho monitorado pela RTA, uma BR no Rio Grande do Sul.

Sobre fatores ambientais, os 4% apresentados são referentes a influência da umidade do comportamento dos materiais no pavimento, dois trabalhos sobre lençol freático. Especificamente sobre tráfego figuram 3% do total dos trabalhos verificados. Destaca-se o trabalho de Fontenele (2012), que trata da representação do tráfego através dos espectros de carga. Os outros três trabalhos, nessa linha, orbitam nos efeitos dos excessos de carga no desempenho dos pavimentos, como Fontenele (2012) também o fez.

Sobre dimensionamento de pavimentos, destacam-se os trabalhos de Motta (1991), Franco (2007) e Benevides (2000), que trazem proposições de métodos de dimensionamento de pavimentos, do tipo mecânico-empírico, para pavimentos asfálticos novos. Depois do período em que essa parte da pesquisa foi consolidada, surgiram dois importantes trabalhos nacionais nesta área: Nascimento (2015) e Fritzen (2016), ambos já abordados no Capítulo 2 do presente estudo.

Foram encontrados ainda dois trabalhos que tratam da construção de equipamentos, um para avaliação de agregados e outro para avaliação de desempenho de pavimento sob carregamento cíclico. Por fim, 3% dos trabalhos versam sobre gestão de pavimentos, assunto que permeia o processo de dimensionamento de pavimentos, alguns inclusive apresentando modelos de desempenho.

Percebe-se nesse breve sumário, que poucos são os trabalhos nacionais que discutem o sistema de concepção dos pavimentos em uma perspectiva global. Considerando a importância que o setor acadêmico nacional exerce na constituição de melhores pavimentos, é preciso não perder de vista o olhar macro sobre o dimensionamento de pavimentos e quais aspectos deste tema são relevantes de serem estudados nos anos por virem. Afinal, o que quer que se estabeleça no país num futuro breve deve partir da premissa que é uma necessidade a revisão sistemática à luz do melhor conhecimento disponível no mundo.

Por fim, é também importante destacar o papel fundamental que várias universidades nacionais tem na RTA capitaneada pela Petrobras. A participação em projetos como esse geram três importantes benefícios às universidades envolvidas:

- a) maior capacitação em infraestrutura rodoviária por parte dos professores, técnicos e alunos envolvidos no projeto;

- b) construção ou ampliação de infraestrutura física (laboratórios e equipamentos) que pode servir como espaço de consultoria técnica e de treinamento no processo de implantação e utilização de um novo método de dimensionamento;
- c) aproximam a comunidade acadêmica das práticas diárias da engenharia rodoviária nacional, permitindo inclusive que se apresente de maneira mais objetiva e simplificada a esse setor o resultados obtidos no âmbito das pesquisas realizadas.

### **3.4 Outras infraestruturas de apoio**

Neste subtópico discorre-se sobre fontes de dados de tráfego e de clima que podem ser incorporadas ao novo método de dimensionamento, exemplo do que foi feito no âmbito do MEPDG e FlexPAVETM 1.0. São eles o Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) e o Instituto Nacional de Meteorologia (*INMET*).

#### **3.4.1 O Plano Nacional de Contagem de Tráfego – PNCT**

Como mencionado no Capítulo 2, a ação do tráfego é um dos principais causadores da degradação do pavimento e por isso mesmo um dos principais parâmetros de entrada nos métodos de dimensionamento. Essa ação envolve o peso total dos veículos de carga, o peso de cada eixo, a distância entre os eixos, os tipos de eixo (simples, tandem, triplo e quádruplos), o tipo e pressão dos pneus, a frequência de passagens, a velocidade e a variação lateral dos pneus nas distâncias percorridas.

A modelagem da influência conjunta desses diversos aspectos não é trivial. As diferentes associações desses fatores geram diferentes graus de dano sobre o pavimento, que devem estar inclusos nas análises de previsão de desempenho dos pavimentos. Há tempos, mesmo internacionalmente, a solução adotada tem sido representar o tráfego por meio do número equivalente de operações do eixo-padrão, o número  $N$ , pela simplicidade de obtenção desse valor, ou seja, a transformação dos diferentes tipos de ação das cargas dos eixos atuantes na via, em um número de operações correspondentes a mesma carga do eixo-padrão. A configuração do eixo-padrão varia de país para país, de método para método e depende dos limites legais estabelecidos. No Brasil, o eixo-padrão é correspondente a uma carga de 8,2ton, utilizando os fatores de equivalência de carga da USACE (em um caso particular os fatores da

AASHTO). No Manual de Estudos de Tráfego (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006c), encontra-se a descrição detalhada de como obter o número N.

Há, no entanto, uma tendência de nos métodos mecanicistas mais modernos a representação do tráfego dar-se por meio de espectros de carga. Cita-se os exemplo do métodos americano MEPDG, do argentino BackDeVi e do novo método costa-riquenho. Segundo Timm, Bower e Turochy (2006) *apud* Fontenele (2012), espectros de carga são distribuições de pesos por eixo, consideradas para cada tipo de eixo e para um fluxo de tráfego específico. Essa tem sido considerada a forma mais real de representação do tráfego. Demanda, porém, um método de coleta mais acurado, com pesagem dos veículos, e estrutura de tratamento dos dados mais robusta. Fontenele (2012) concluiu que o dimensionamento utilizando a metodologia empírica levava a estruturas de pavimentos, quando submetidas a análise mecanística, utilizando espectros de carga locais, não passava nos critérios de desempenho estabelecidos.

Uma ação que poderá ser fundamental para adoção de espectros de carga como representativos do tráfego no Brasil é a recente reimplantação do PNCT. Agora com coleta automatizada e com dados medidos em movimento, do tipo *WIN data*. Os equipamentos utilizados na pesquisa são australianos, contudo há dúvidas quanto à adequabilidade a classificação veicular brasileira. Inicialmente estava previsto a implantação de 320 postos de coleta em todo o território nacional.

A Figura 26 mostra a distribuição dos postos, e percebe-se que seu maior adensamento está nas regiões mais ao sul do país. A justificativa é a maior concentração de polos geradores de tráfego de carga nessas regiões. Essa configuração inicial está sendo ajustada com o passar do tempo. Como exemplo, desde outubro de 2014 até maio de 2015, foram implantados 4 postos no Ceará. Inicialmente eram previstos 2 postos e há a previsão de implantação de mais 4 postos. Todos eles devem ser localizados nas principais rodovias do estado: BR 222, BR 116 e BR 020 (informação verbal)<sup>2</sup>.

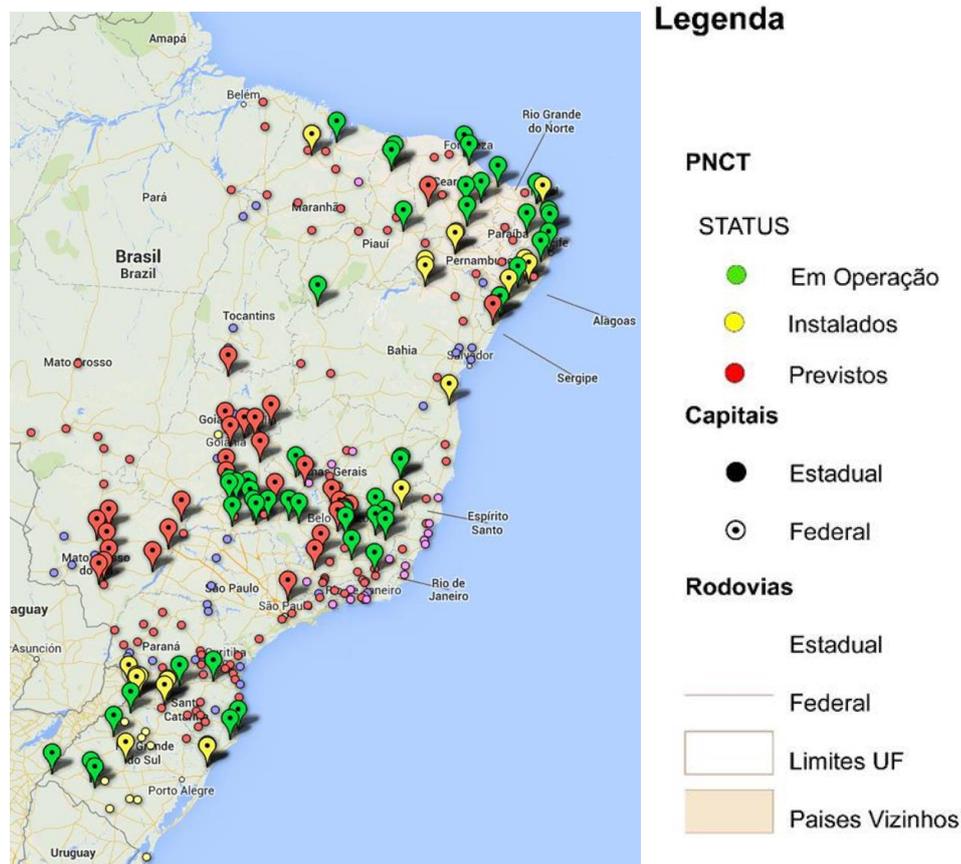
Os dados do PNCT são disponibilizados em planilhas Excel no site do DNIT nacional tão logo tratados. Está sendo construída uma plataforma *web*, chamada SIG-PNCT, que abrigará as informações obtidas em campo, mas ainda não se encontra disponível para uso

---

<sup>2</sup> Informação fornecida pelo Engenheiro José Abner de Oliveira Filho, em reunião realizada na SR do DNIT em Fortaleza, em 01 de março de 2016.

externo. Inicialmente previsto para durar somente 3 anos, essa é uma ação importante, cujos dados podem ser adaptados para um novo método de dimensionamento.

Figura 26 - Postos de coleta do PNCT



Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2014).

Os principais tipos de informação coletados no âmbito do PNCT são os seguintes:

- a) volume de tráfego por: quarto de hora, hora, semana, dia e mês, por sentido e faixa;
- b) peso bruto total do veículo, em kg (mínimo, médio, máximo);
- c) peso e distância por eixo dos veículos passantes;
- d) velocidade instantânea em km/h;
- e) comprimento do veículo em metros (servindo aqui para classificação veicular);
- f) temperatura do pavimento em graus celsius (medida na profundidade do laço magnético, a sua real profundidade não é precisa, apesar de se saber que está na camada de revestimento, a poucos centímetros da superfície).

Percebe-se a magnitude do volume de informações. O Laboratório de Transportes da Universidade Federal de Santa Catarina – LabTrans/UFSC está responsável pelo sistema de controle de qualidade dos dados gerado no PNCT. Informações como as classes de veículos, distribuição horária dos veículos e peso bruto total por hora, estimadas pelos levantamentos, deverão futuramente ser inclusas no Banco de Dados PNCT. A sua utilização para o dimensionamento de pavimentos, através de espectros de carga, provavelmente demandará a formulação de metodologias computacionais que tratem esses dados automaticamente.

### ***3.4.2 Estações Meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET***

O clima é, também, outro fator impactante no desempenho de pavimentos, através da ação dos seus diversos fatores, destacando-se a temperatura e a umidade do ar. A primeira afeta a rigidez das misturas asfáltica e a segunda podendo afetar mais fortemente a capacidade de suporte das camadas granulares e subleito. A inclusão dos fatores climáticos nos métodos mecânicos, tal como ocorre no MEPDG e LEVCD com o EICM, no BackDeVi e no Austroads, faz-se necessária a existência de dados climáticos históricos. Também é necessário tratar esses dados de modo que se tornem representativos na metodologia de dimensionamento. Assim como o tráfego, o clima também pode ser representado de maneira simplificada, através da consideração da temperatura média mensal para determinada localidade.

No Brasil, há dados históricos e existem mais de 400 estações meteorológicas distribuídas em todo o território nacional, coordenadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os estados também possuem suas próprias estações, tais como as 70 estações automáticas de coleta localizadas em território cearense e sob a coordenação da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme). A desvantagem das estações automáticas em relação as estações completas, que por serem estações isoladas podem não contabilizar dados quando apresentarem problema técnico. As estações completas ou automáticas fornecem dados de precipitação hora a hora, temperatura, velocidades dos ventos, umidade relativa, nebulosidade e radiação solar. Para utilização desses dados faz-se necessário acordos cooperativos com esses órgãos para disponibilização completa e continuada dos dados existentes.

Enquanto não é possível a utilização mais acurada dos dados de clima existentes no Brasil, indica-se a utilização dos resultados das últimas Normais Climatológicas nacional, que contém dados de 1961 a 1990. As Normais Climatológicas resumem os dados climatológicos referentes a 30 anos e podem ser encontradas no site do Instituto Nacional de Meteorologia (2017).

### **3.5 Considerações finais sobre este capítulo**

Considerando o exposto neste capítulo, conclui-se que:

- a) em sua grande maioria, as SR's do DNIT não apresentam infraestrutura física (laboratório e equipamentos) e de recursos humanos (engenheiros e técnicos de laboratório) para atender às demandas de implantação de um método de dimensionamento de pavimentos mecanístico-empírico, tais como a realização de ensaios diversos de caracterização física e mecânica dos materiais constituintes do futuro pavimento;
- b) faz-se necessário a capacitação do corpo técnico das SR's do DNIT, a fim de que eles sejam capazes não só de dimensionar um pavimento por meio de um método mecanístico-empírico, mas que também possam ter embasamento técnico para criticar projetos apresentados eventuais empresas contratadas;
- c) as universidades nacionais são fonte de produção técnica-científica de alto padrão e por isso devem estar intrinsecamente ligada ao setor rodoviário nacional. Os benefícios podem ser mútuos: o setor rodoviário tem suas demandas de pesquisa atendidas por pesquisadores altamente capacitados e esses tem financiamento para seus projetos;
- d) por fim, o PNCT e o INMET são importantes fontes de informação de tráfego e clima, que podem ser utilizados no âmbito dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Pesquisas devem ser realizadas, a fim de encontrar método que melhor aproveite os dados existentes.

## 4 METODOLOGIA

Dado o exposto nos Capítulos anteriores, está em construção no Brasil um método de dimensionamento mecanístico-empírico para pavimentos asfálticos. Como apresentado no item 2.3, Nascimento (2014) propõe que esse método seja desenvolvido em três níveis hierárquicos de entrada de dados e análise, os níveis A, B e C, respectivamente em ordem de acurácia. A pesquisa de Nascimento (2015) busca atender as demandas do nível C do método. As pesquisas de Franco (2007) associada a de Fritzen (2016) busca atender as demandas do nível A. E este último, provavelmente, será a primeira versão do método a ser lançado oficialmente pelo DNIT dado que foi objeto de contrato entre o DNIT e a COPPE/UFRJ.

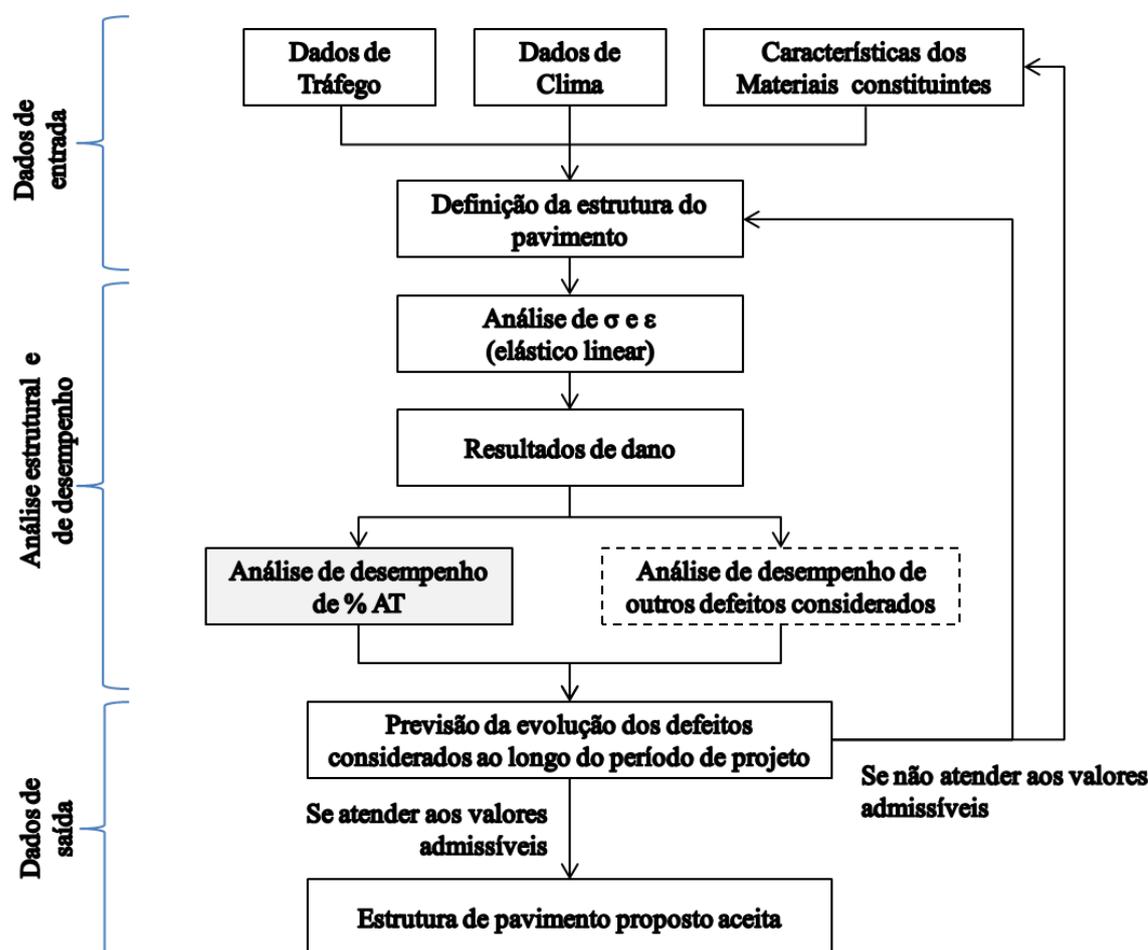
Assim, buscou-se no âmbito da pesquisa ora apresentada contribuir com o eventual desenvolvimento do nível B, intermediário aos outros dois, do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional. As informações apresentadas nos capítulos 2 e 3 embasaram o desenvolvimento da proposta metodológica descrita no item 4.1 deste capítulo. Na sequência, no item 4.2, são delineados os passos para a construção de um modelo de previsão de desempenho de percentual de área trincada, o qual fará parte do método de dimensionamento proposto.

### **4.1 Proposta de uma estrutura metodológica para o nível intermediário de um método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos**

A Figura 27 representa esquematicamente a estrutura metodológica sugerida nesta Tese para um nível B simplificado do novo método de dimensionamento nacional. Ela apresenta a estrutura básica dos métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos apresentadas no Capítulo 1, sendo constituída de dados de entrada, análise estrutural, análise de desempenho e dados de saída, cujas descrições mais detalhadas encontram-se nos subtópicos a seguir.

Destaca-se que a proposta é simplificada pois entende-se que ela pode e deve evoluir com os avanços operados na engenharia rodoviária nacional. Um exemplo de como ela poderá evoluir será através da inclusão na análise de desempenho de outros defeitos, tal como a deformação permanente, também comum nos pavimentos nacionais.

Figura 27 - Fluxograma da metodologia de dimensionamento proposta na presente pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

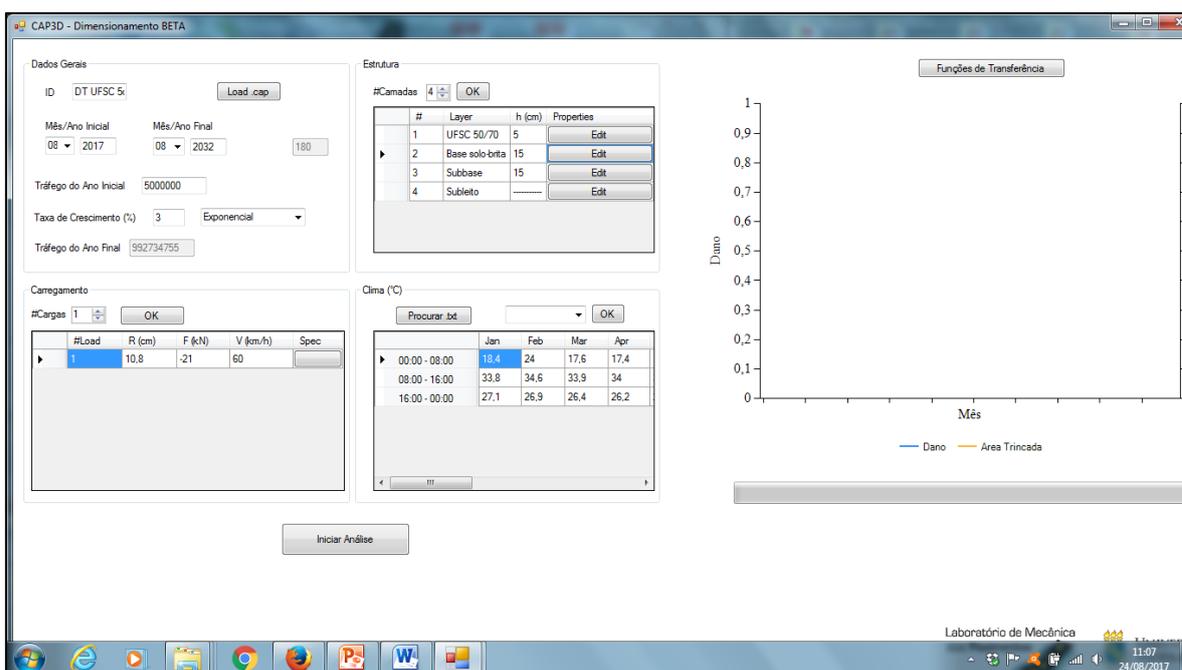
A fim de tornar a proposta operacional foi desenvolvido, no âmbito do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC), em paralelo a esta pesquisa, um programa computacional que comportasse as premissas da metodologia de dimensionamento proposta, o CAP 3D-D.

O CAP 3D-D tem sua origem num programa de análise de elementos finitos para o cálculo de tensões e deformações em pavimentos asfálticos, o CAP 3D, desenvolvido no âmbito do mesmo grupo de pesquisa (HOLANDA *et al.*, 2006). O acréscimo de mais uma letra "D" ao nome original refere-se a função dimensionamento que a nova versão imprime ao programa.

Ao *software* original foram incrementadas as premissas de determinação do dano por fadiga de misturas asfálticas, que possibilitaram as simulações necessárias para a calibração e validação da função de transferência de previsão de %AT, cujo desenvolvimento

será apresentado no item 4.2. Após calibrada e validada, esta função será inserida no CAP 3D-D e permitirá ao usuário a simulação automatizada do %AT prevista para uma determinada estrutura. A medida que as subpartes da metodologia sugerida forem sendo descritas, no subtópicos a seguir, serão apresentadas as telas do CAP 3D-D associadas ao assunto. A tela principal da versão beta do CAP 3D-D é apresentada na Figura 28.

Figura 28 - Tela principal do programa CAP 3D-D (Versão Beta)



Fonte: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (2017).

#### 4.1.1 Dados de entrada

A entrada de informações para que possam ser realizadas as simulações no âmbito da metodologia proposta são descritas a seguir e são divididas em dados gerais da via, dados de tráfego, dados de clima e dados referentes a estrutura do pavimento a ser testada e seus materiais constituintes.

##### 4.1.1.1 Dados gerais e de tráfego

A fim de que sejam feitas as simulações de evolução dos efeitos da carga sobre o pavimento ao longo da sua vida de serviço, considera-se como o tráfego inicial aquele

previsto em projeto, transformado em número N pelos fatores de equivalência do United States Army Corp of Engineers (USACE), tal como feito em Nascimento (2015).

Na metodologia proposta, é possível considerar a variação percentual da carga nas 24 horas do dia e nos 12 meses do ano, ou seja, a distribuição horária do tráfego diária e mensal. Já o crescimento do tráfego ao longo do período de projeto pode ser considerado linear ou exponencial, sendo a taxa de crescimento determinada pelo projetista. Para as simulações do efeito do carregamento sobre o pavimento as cargas podem ser consideradas unitárias ou não. Na versão beta do CAP 3D-D é considerado padrão a carga unitária com raio de aplicação sobre o pavimento de 10,8 cm.

Dado que a evolução do dano sobre o pavimento será calculado mensalmente, chamado por Nascimento (2015) como subperíodos de análise, é necessário que sejam inseridos o mês e o ano de início e fim de operação da via. Além disto, na análise realizada a frequência da carga é considerada, através da velocidade de projeto da via. No CAP 3D-D as duas abas em que podem ser inseridas as informações supracitadas são as de "Dados Gerais" e "Carregamento" conforme pode ser visto na Figura 29, a seguir. No botão "Spec" da aba carregamento, Figura 30, o usuário pode inserir os dados de distribuição horária do tráfego, bem como os fatores de distribuição sazonal desse tráfego durante o ano.

Figura 29 - Abas de inserção de dados gerais e de carregamento do CAP 3D-D

The image shows two side-by-side windows from the CAP 3D-D software. The left window, titled 'Dados Gerais', contains the following fields and controls:

- ID: DT UFSC 5x (with a 'Load .cap' button)
- Mês/Ano Inicial: 08 (dropdown) 2017
- Mês/Ano Final: 08 (dropdown) 2032 (with a '180' button)
- Tráfego do Ano Inicial: 5000000
- Taxa de Crescimento (%): 3 (with a dropdown menu set to 'Exponencial')
- Tráfego do Ano Final: 992734755

The right window, titled 'Carregamento', contains:

- #Cargas: 1 (with a dropdown arrow and an 'OK' button)
- A table with the following data:

#Load	R (cm)	F (kN)	V (km/h)	Spec
1	10,8	-21	60	[Spec button]

Fonte: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (2017).

Figura 30 - Tela de inserção da distribuição horária do tráfego e dos fatores de distribuição sazonal

	N (%tot)
0h - 1h	0,5
1h - 2h	0,5
2h - 3h	0,5
3h - 4h	0,5
4h - 5h	1
5h - 6h	2
6h - 7h	4
7h - 8h	6
8h - 9h	8
9h - 10h	7
10h - 11h	6
11h - 12h	6
12h - 13h	8
13h - 14h	8
14h - 15h	6
15h - 16h	6
16h - 17h	7
17h - 18h	8
18h - 19h	6
19h - 20h	4
20h - 21h	2
21h - 22h	1
22h - 23h	1

	Fator
Janeiro	1
Fevereiro	1
Março	1
Abril	1
Mai	1
Junho	1
Julho	1
Agosto	1
Setembro	1
Outubro	1
Novembro	1
Dezembro	1

Fonte: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (2017).

#### 4.1.1.2 Dados de clima

Na versão beta do CAP 3D-D, os efeitos do clima são considerados somente através da temperatura atuante na camada do revestimento. Para determinação dessa temperatura considerou-se o revestimento dividido em três subpartes, nas quais a temperatura foi calculada em seu centro. Para isso, fez-se uso da Equação 25 de estimativa de temperatura no pavimento (Motta, 1991), com base na Pesquisa de Avaliação Estrutural de Pavimentos (PAEP) do IPR/DNER.

$$T(x) = T_{sup} + (T_{sup} - T_{ar})(1 - e^{(0,06855 - 0,002633x)x}) \quad (25)$$

Onde:

$T(x)$  = Temperatura na profundidade “x” do revestimento;

$T_{sup}$  = Temperatura da superfície do revestimento;

$T_{ar}$  = Temperatura do ar próxima ao pavimento.

A ação dessa temperatura é considerada temporalmente, cuja distribuição pode chegar a níveis de detalhe de 3 turnos em cada dia do ano, ou mais simplificada, 3 turnos em dias padrões que possam ser usados em diferentes estações do ano (esse detalhamento pode ser facilmente estendido). Assim, para cada mês do ano, são considerados para a temperatura 3 subperíodos: 0h – 08h, 08h – 16h e 16h – 0h.

No CAP 3D-D, estão inseridas as temperaturas médias do ar das 5 regiões do Brasil, calculadas a partir das temperaturas médias de todos os municípios de cada região constantes nas Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2017). Caso o projetista deseje utilizar dados de temperatura específicos de uma cidade ou de uma região menor, ele pode fazê-lo inserindo diretamente na aba "Clima - Temperatura do ar" apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Aba de inserção de dados de clima do CAP 3D-D

	Jan	Fev	Mar	Abr
▶ 00:00 - 08:00	20	20	20	20
08:00 - 16:00	20	20	20	20
16:00 - 00:00	20	20	20	20

Fonte: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (2017).

O usuário pode inserir as temperaturas diretamente na tela ou pode carregar um arquivo .txt contendo essas informações. A vantagem de uso do arquivo .txt é que ele pode ser utilizado para diferentes análises.

#### 4.1.1.3 Dados dos materiais constituintes do pavimento

A fim de serem efetuadas as análises no âmbito da metodologia de dimensionamento proposta faz-se necessário a definição da espessuras das camadas do

pavimento asfáltico e a caracterização mecânica dos materiais de cada uma dessas camadas. A tela apresentada na Figura 32 mostra a aba do programa CAP 3D-D em que podem ser inseridos a quantidade de camadas, as suas respectivas denominações e espessuras.

Figura 32 - Aba de inserção de dados das camadas do pavimento em análise do CAP 3D-D

The screenshot shows a dialog box titled 'Estrutura'. At the top, there is a label '#Camadas' followed by a spin box containing the number '4' and an 'OK' button. Below this is a table with the following data:

#	Camada	h (cm)	Propriedades
1	Revestimento	8	Edit
2	Base	15	Edit
3	Subbase	15	Edit
4	Subleito	---	Edit

Fonte: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (2017).

Para as camadas granulares, subleito, sub-base e base deve-se inserir a rigidez dos materiais constituintes, em termos dos respectivos módulos de resiliência (obtidos de ensaios ou por retroanálise) e coeficientes de Poisson.

Para as misturas asfálticas os dados de entrada dependem do tipo de análise estrutural escolhida: elástico linear ou viscoelástico linear. Na análise elástico-linear os parâmetros são os mesmos das camadas granulares, módulo de resiliência (MR) e coeficiente de Poisson. Já na análise viscoelástica linear devem ser inseridos os parâmetros da curva mestra (sigmoïdal) do módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) do revestimento asfáltico, em substituição do MR. Assim, as variações de temperatura e velocidade da via possam ser consideradas nas análises. As Equações 26, 27 e 28, que constam em Nascimento (2015), foram os modelos utilizados no âmbito do CAP 3D-D.

$$\log|E^*| = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{e^{d+g \cdot \log(f_R)}}} \quad (26)$$

$$\log(a_T) = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 T \quad (27)$$

$$f_R = f \times a_T \quad (28)$$

Onde:

a, b, d, g,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  = coeficientes de regressão das curvas;

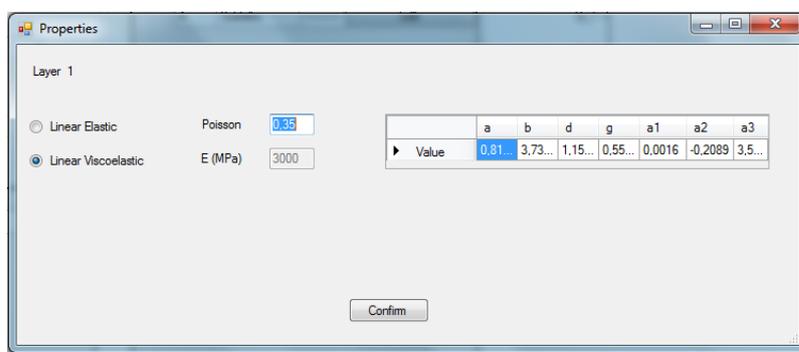
T = temperatura em °C;

$f_R$  = frequência reduzida;

$a_T$  = coeficiente de ajuste da relação tempo-temperatura;

Esses dados podem ser obtidos de bancos de dados já existentes ou através da realização de ensaios específicos. Para maiores esclarecimentos sobre esta temática recomenda-se consultar Gouveia (2016). Na aba “Edit” do CAP 3D-D, tem-se acesso a tela apresentada na Figura 33, na qual podem ser inseridos os dados de caracterização mecânica de cada um dos materiais, por tipo de análise estrutural que se quer fazer.

Figura 33 - Aba de inserção dos dados de rigidez dos materiais



Fonte: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (2017).

Também para as misturas asfálticas devem ser inseridos os parâmetros da curva de fadiga, utilizando os resultados de resistência a fadiga pelo ensaio de compressão diametral ou de tração direta. Assim como o ensaio de módulo dinâmico, o ensaio de fadiga por tração direta não tem normas brasileiras. Então, recomenda-se as orientações da TP 107 da American Association of State Highway and Transportation Officials (2014).

A aba do CAP 3D-D em que esses parâmetros de fadiga podem ser inseridos é apresentada na Figura 34. Nela existe a opção de inserção dos K's do modelo do Asphalt

Institute (ou seus derivados) obtidos por meio de ensaios de compressão diametral ou de inserção dos parâmetros da curva de fadiga por tração direta.

Figura 34 - Aba na qual podem ser inseridos os parâmetros das curvas de fadiga da mistura asfáltica

Parâmetro	Valor
K1	265788,49
K2	-5,3581424
K3	-2,95
Y	19603064
Delta	-1,39
beta	-0,3
alfa	3,01
C11	0,000829
C12	0,601

Fonte: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (2017).

#### 4.1.2 Análise estrutural e de desempenho

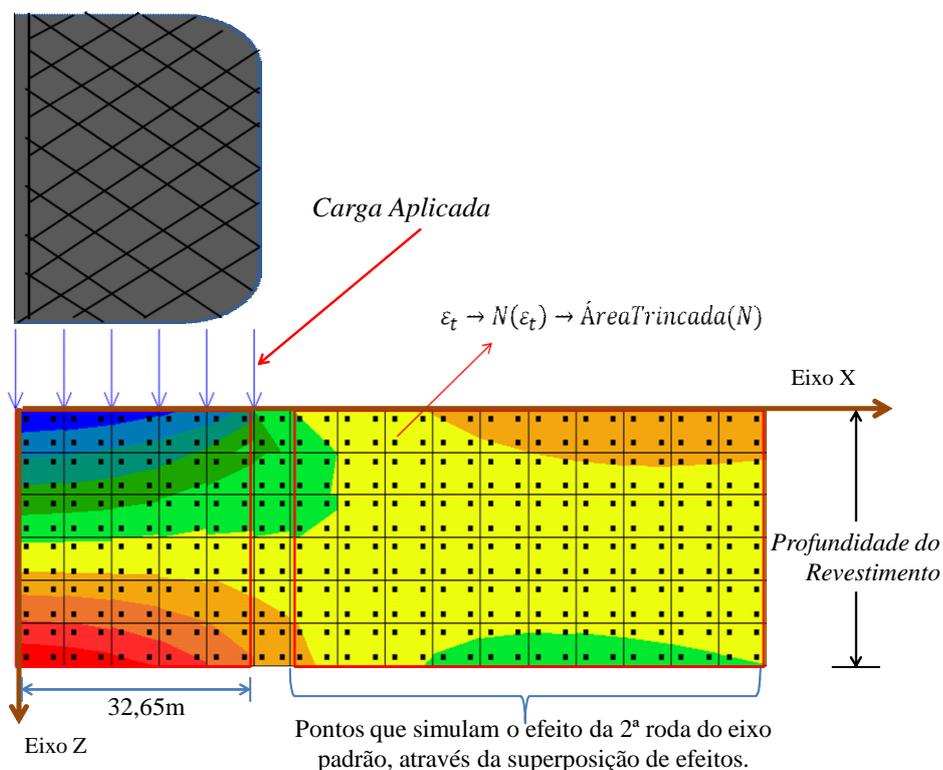
São apresentadas neste subtópico as premissas adotadas para realização da análise estrutural e de desempenho no âmbito da metodologia proposta. A análise estrutural é elástico-linear, em elementos finitos, e foi aproveitada do CAP 3D original, conforme apresentado por Holanda *et al.* (2006). A análise de desempenho considerará, na versão inicial do método proposto, somente o desempenho do pavimento quanto ao dano por fadiga, correlacionado com o percentual de área trincada prevista em campo.

##### 4.1.2.1 Determinação das deformações principais

Inicialmente, deve-se realizar os cálculos das deformações principais máximas de tração para inclusão na equação de  $N_f$ , que será apresentada no item 4.1.2.2. Para tal fez-se uso de uma análise elástica-linear. Diferentemente de métodos nos quais a determinação da

deformação é calculada na fibra inferior do revestimento, nesse método, similarmente a Nascimento (2015) e a Fritzen (2016), ela é discretizada num espaço no revestimento que se situa horizontalmente entre as duas rodas do eixo simples de roda dupla. Contudo, como se faz uso do método dos elementos finitos na análise, consideram-se 240 pontos de Gauss, contidos em 60 elementos, sendo 30 logo abaixo da carga, conforme Figura 35. Apesar da axissimetria assumida, é possível considerar a roda dupla por meio da superposição de efeitos, pois se trata de um modelo linear.

Figura 35 - Coordenadas dos pontos de análise da deformação principal máxima utilizada na metodologia apresentada na presente Tese



Fonte: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (2017, com adaptações).

Após análise estrutural, segue-se com a determinação da deformação principal máxima em cada um dos 240 pontos de Gauss. Apesar da análise não ser viscoelástica, se inseriu nessa metodologia a influência de diferentes temperaturas e a velocidade do carregamento para o cálculo das deformações. É digno de nota que se  $\varepsilon_t \leq 0$  não ocorreu dano no ponto, pois  $D = 0$ .

#### 4.1.2.2 Determinação do $N_f$

Nascimento (2016) formulou um conjunto de equações que, a partir do modelo S-VECD e do critério de ruptura baseado em  $G^R$ , permite prever a vida de fadiga ( $N_f$ ) de misturas asfálticas em função da deformação, da frequência, da parcela do ciclo em tração e da temperatura (Equação 29). Esses parâmetros não dependem de determinações empíricas. O parâmetro de dano é determinado pela perda de energia dissipada devido à perda de rigidez do material durante o ensaio de vida de fadiga sob tração direta uniaxial (TD) e aplicando-se o modelo S-VECD. A Equação 29 é mecanisticamente fechada, pois todos os dados são obtidos de ensaios mecânicos realizados na mistura asfáltica, por isso foi escolhida para a metodologia aqui proposta.

$$N_f = \left( \frac{\delta}{Y \left( \frac{C_{12}}{p} \right) + 1} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \frac{C_{12}}{p}}} \quad (29)$$

Onde:

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

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

$$G^R = Y(N_f)^\Delta$$

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

$$\varepsilon^R_{TA} = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \left( (\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right)$$

Onde:

$\varepsilon^R_{TA}$  = amplitude da pseudo-deformação;

$\alpha$  = taxa de evolução do dano;

$C_{11}$  e  $C_{12}$  = coeficientes da curva  $C \times S$ ;

$f_{red}$  = frequência reduzida;

$G^R$  = taxa de variação média da energia de pseudo-deformação liberada (por ciclo) durante todo o ensaio;

$N_f$  = número de ciclos até a falha;

$Y$  = coeficientes do critério de ruptura  $G^R$  vs.  $N_f$ ;

$\Delta$  = expoente da equação  $Y$ ;

$C(S)$  = integridade do material;

$S$  = parâmetro de dano;

$\varepsilon_{0,pp}$  = Amplitude de deformação pico a pico;

$\beta$  = parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração (um valor usual é de -0,08, que na prática significa que ocorre compressão em 80% do ciclo);

$|E^*|_{LVE}$  = módulo dinâmico viscoelástico linear nas condições de temperatura e frequência em questão.

Destaca-se que o  $\beta$  é um parâmetro que depende da condição de tração (+) ou compressão (-) em que o material se encontra, ou seja, as condições laboratoriais ( $\beta = -0,08$ ) não são necessariamente iguais as de campo. A Equação 30 é a representação matemática do  $\beta$ .

$$\beta_i = \frac{(\sigma_{pico})_i + (\sigma_{vale})_i}{|\sigma_{pico}|_i + |\sigma_{vale}|_i} \quad (30)$$

Onde:

$\sigma_{pico}$  = tensão no pico do pulso de carga;

$\sigma_{vale}$  = tensão no vale do pulso de carga.

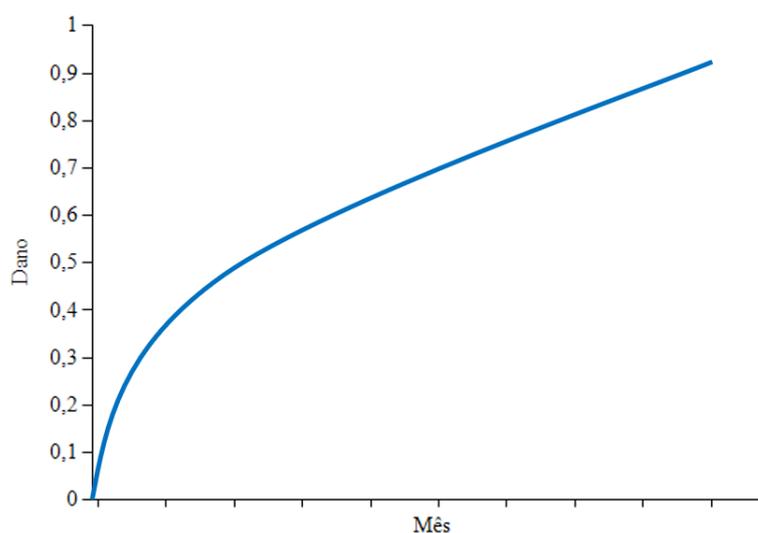
#### 4.1.2.3 Determinação do dano médio

A determinação do dano é realizada aplicando-se a Lei de Miner (Equação 16, item 2.4.2) nos 240 pontos de Gauss, nos quais é calculada a média para cada subperíodo de análise. As análises são divididas em meses e em turnos (manhã, tarde e noite). Dessa forma, para cada temperatura ou frequência diferente inserida há uma análise realizada. Tal procedimento fornece uma curva Dano médio  $\times$  tempo (em meses). Destaca-se que não é necessário para a aplicação da metodologia o uso de um programa computacional específico, cabendo ao projetista escolher aquele que melhor se adequa a situação, contudo é provável que em breve o CAP 3D-D esteja disponível para a comunidade rodoviária nacional, passando a ser uma opção de utilização.

### 4.1.3 Dados de Saída

Os dados de saída deverão ser gráficos de evolução do dano médio ao longo do período de projeto (em meses ou em N), conforme pode ser visualizado na Figura 36, bem como de evolução do percentual de área trincada neste mesmo período. Esses dados também podem ser acessados através de um documento em "txt" (com extensão .report) com todos os resultados, mês a mês, de cada análise realizada.

Figura 36 - Gráfico de dano médio x mês apresentado na tela principal do CAP 3D-D após realizada a análise de dano



Fonte: Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (2017).

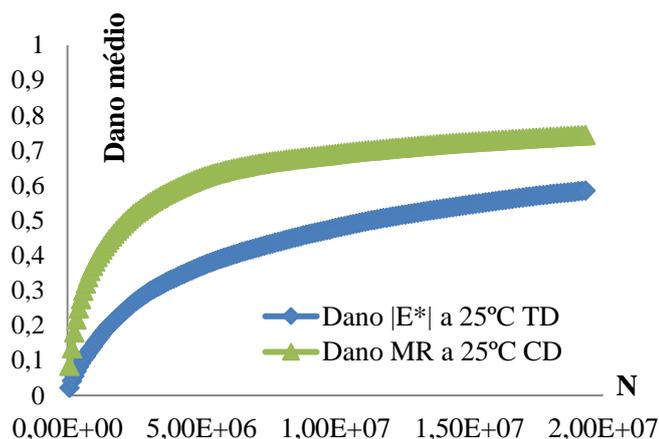
## 4.2 Metodologia de desenvolvimento de uma função de transferência de previsão de percentual de AT

São apresentados a seguir os procedimentos adotados para o desenvolvimento de uma função de transferência de previsão de percentual de área trincada em pavimentos asfálticos. A função de transferência gerada foi inserida no CAP 3D-D, habilitando-o para análises de desempenho quanto ao dano por fadiga.

#### 4.2.1 Aspectos preliminares

A fim de testar, preliminarmente, a influência do tipo de parâmetro de rigidez e do ensaio de vida de fadiga nos resultados de dano, fez-se, para uma mesma mistura e temperatura, sob uma análise elástico-linear, simulações computacionais, ora utilizando-se como dados de entrada o par MR e CD, ora o par  $|E^*|$  e TD. A Figura 37 apresenta os resultados desta simulação e mostra a diferença de comportamento em relação ao dano médio quando se utiliza cada par referido. Investigar essa diferença é uma das motivações da presente pesquisa, que traz uma contribuição efetiva ao adaptar a metodologia utilizada por Nascimento (2015), para a determinação do dano por fadiga em misturas asfálticas.

Figura 37 - Efeito do uso de diferentes parâmetros de rigidez e vida de fadiga no dano médio



Fonte: Elaborado pela autora.

As premissas consideradas para as análises nesse estudo estão delineadas a seguir:

- aplicando-se a teoria da elasticidade, o parâmetro de rigidez das misturas asfálticas adotado será o  $|E^*|$ , obtido da curva mestra do material, conforme temperatura e frequência determinadas a partir da espessura do revestimento, da temperatura do ar e da velocidade de projeto da via;
- por meio do ensaio de TD, aplicando-se o modelo S-VECD acoplado ao critério de ruptura  $G^R$ , baseado na energia dissipada pelo material, realiza-se a caracterização da vida de fadiga da mistura em laboratório;

- c) assume-se análise elástico-linear, todavia fazendo uso de um programa de elementos finitos, no caso o CAP 3D-D. Torquato e Silva *et al.* (2013) mostram que é possível chegar a resultados semelhantes em análises elásticas e viscoelásticas, desde que se considere o valor da rigidez do revestimento devidamente influenciado pela temperatura e frequência de carregamento, por meio dos dados de Módulo de Relaxação ou Dinâmico ( $|E^*|$ ), sendo o segundo adotado no presente artigo;
- d) realiza-se a análise do dano em três temperaturas diárias (manhã, tarde e noite) em cada mês do ano. Essa estratégia permite incluir o efeito da temperatura e da velocidade na rigidez das misturas asfálticas na análise elástico-linear. A inclusão dessa variável possibilita considerar variações climáticas.

Os detalhes do processo de desenvolvimento da metodologia proposta, encontram-se nos subitens a seguir.

#### ***4.2.2 Determinação da função de transferência de percentual de AT***

A função de transferência desenvolvida no âmbito da presente pesquisa seguiu os principais passos metodológicos propostos em Nascimento (2015). Figuram como principais diferenças a forma de obtenção do dano por fadiga, já apresentado nos subtópicos anteriores e em algumas adaptações nos procedimentos de cálculo realizados.

##### ***4.2.2.1 Trechos experimentais utilizados para construção da função de transferência***

Os dados necessários para a realização desse procedimento foram retirados de 44 trechos experimentais monitorados, entre dezembro de 2007 e setembro de 2013, no âmbito da Rede Temática de Asfalto. Esses foram os mesmo trechos experimentais utilizados por Nascimento (2015) em sua pesquisa e são divididos em dois grupos:

- a) grupo 1 - 27 trechos construídos na Ilha do Fundão – RJ, monitorados pela COPPE/UFRJ e Cenpes/Petrobras. São nomeados de TE (trecho experimental): 1, 4, 11, 19, 34, 37, 40, 43, 45, 46, 47, 48, 50, 55, 58, 60, 63, 65, 67, 70, 73, 75, 86, 88, 89 e 93;

b) grupo 2 - 17 trechos monitorados por outras universidades participantes do projeto: 2 da USP, 2 da UFSC, 1 da UFRGS, 2 da UFSM, além de 10 da Rodovia Nova Dutra.

Os dados do Grupo 1 foram utilizados na calibração da Função de Transferência. Dos 44 trechos usados nesta pesquisa, esses são os que apresentam maior quantidade de levantamentos de %AT em campo (pelo menos 4 para cada trecho). Como será visto adiante, isso permitirá construir curvas da relação %AT observada  $\times$  Dano que melhor simulam a realidade e, portanto, mais adequadas à calibração de uma função de transferência.

Já as temperaturas consideradas para as análises de dano, em cada um dos trechos, foram retiradas das Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2017). Foram escolhidos os dados de temperatura coletados nas estações meteorológicas mais próximas dos trechos, conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9 - Estações meteorológicas indicativas das temperaturas dos trechos usados nesta pesquisa

<b>Estação</b>	<b>Trechos/Quantidade</b>
São Bento (Duque de Caxias – RJ)	Ilha do Fundão / 27
Taubaté - SP	Nova Dutra / 10
Franca - SP	USP / 2
Araranguá - SC	UFSC / 2
Porto Alegre - RS	UFRGS / 1
Santa Maria - RS	UFSM / 2

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (2017).

As temperaturas mínimas foram consideradas para o horário de análise de 0h às 08h, as máximas para o horário de 8h às 16h e as médias para o horário de 16h às 0h. As tabelas contendo todas essas temperaturas constam no Anexo B.

O tráfego, as propriedades das misturas desses trechos (e.g. valores dos parâmetros da curva sigmoidal do módulo dinâmico da mistura asfáltica e de fadiga por tração direta) e os dados de %AT observada em campo, respectivamente utilizados para a simulação de dano e posterior correlação com o trincamento por fadiga medida em campo, foram obtidas em Nascimento (2015) e constam no Anexo C.

#### 4.2.2.2 Calibração da função de transferência

O processo de calibração segue os passos descritos nos subtópicos a seguir.

##### 4.2.2.2.1 Determinação do dano médio

O dano médio deve ser determinado para todos os trechos experimentais indicados para a calibração do modelo, ou seja, do Grupo 1. Para isso, faz-se uso do Programa CAP 3D-D, no qual estão incorporadas as premissas da análise de dano descritas nos subtópicos anteriores desta etapa da metodologia.

Estando os dados de entrada inseridos, inicia-se a análise, que no CAP 3D-D, a depender do processador do computador utilizado, consome de 3min a 10min. Obtêm-se, como dados de saída, um relatório (.txt) no qual estão associados os valores de N estimados para cada mês do período de projeto, de N acumulado ao longo do período de projeto e de dano médio. O período de projeto utilizado nas análises da função de transferência desenvolvida nesta pesquisa foi de 15 anos (180 meses).

##### 4.2.2.2.2 Determinação de uma taxa inicial de crescimento de dano médio

De posse dos dados obtidos na etapa anterior, constrói-se um gráfico contendo as curvas de dano médio  $\times$  período de projeto de todos os trechos experimentais utilizados para a calibração da função de transferência. Um exemplo desse tipo de gráfico pode ser visualizado na Figura 37.

No gráfico obtido é possível identificar, em todas as curvas do conjunto de dados, uma inflexão mais acentuada para a direita, a partir de determinado valor de dano. Chama-se de crescimento inicial de dano o dano correspondente a primeira etapa (antes da inflexão) dessa curva. Ao valor de crescimento de dano inicial designado para representar um conjunto de trechos dá-se o nome de taxa inicial de crescimento de dano ( $I_{"A"}$ ). Em Nascimento (2015) esse valor foi de 0,35.

Na prática, para um bom ajuste dos coeficientes da função de transferência várias taxas devem ser testadas, pois ela não é fixa, depende do conjunto de dados e dos danos médios obtidos na simulação. Por isso, outras formas de obtenção dessa taxa inicial de dano

devem ser testadas, como a taxa R que correspondente a uma relação entre o dano médio e o mês a ele correspondente.

Se a taxa em teste for do tipo I, deve-se buscar nos resultados de dano de cada trecho experimental o mês (T) correspondente ao início do dano “A”. Já se for a taxa do tipo R, deve-se buscar em cada trecho o dano correspondente a uma determinada quantidade de meses e depois dividir o primeiro pelo segundo. Por exemplo, o dano a 12 meses em um determinado trecho é 0,6, então a taxa  $R_{12-1}$  é igual a  $0,6/12=0,05$ .

#### 4.2.2.2.3 Determinação do dano médio correspondente ao percentual de AT observada em campo e do percentual de AT referente ao crescimento inicial do dano médio

Nesta esta etapa faz-se a correlação dos resultados de dano médio simulados (ver item 4.2.2.2.1) com os dados de % AT observada nas medições periódicas do monitoramento dos trechos experimentais. Destaca-se que, o %AT observada em campo foi determinado através de acompanhamento visual, tal como descrito no item 2.4.

Assim, buscam-se nos relatórios de dano médio os valores de dano médio correspondentes às datas de coleta do %AT observada em campo para cada um dos trechos experimentais. De posse desses dados, é possível construir um gráfico geral de %AT observada  $\times$  dano médio de todos os trechos experimentais utilizados na calibração.

Nesse gráfico é possível observar a partir de que valor de “Y”%AT a área trincada começa a crescer com o dano. Considera-se esse valor como sendo o correspondente a taxa inicial de crescimento de dano médio. Em Nascimento (2015) esse valor foi de 10%.

São, então, construídos gráficos individuais, para cada trecho experimental, do %AT observado  $\times$  dano médio correspondente. Neles, por regressão, buscam-se os valores de dano médio correspondentes a 10%AT. Associa-se, então, esses valores de dano ao mês T obtido na etapa anterior.

#### 4.2.2.2.4 Determinação do *Shift Factor* e do dano reduzido

É natural que o gráfico geral de %AT observada  $\times$  Dano médio apresente pontos dispersos entre si. Isso dificulta estabelecer uma correlação adequada entre os resultados obtidos. Para resolver essa questão, Nascimento (2015) sugeriu utilizar um valor de ajuste horizontal que aproximasse esses pontos. Após a aplicação do fator de ajuste obtêm-se novos

valores de dano, trata-se do chamado dano reduzido, que pode ser obtido por meio das Equações 31 e 32.

$$N/N_f \text{ red}_\Delta = N/N_f + \Delta \quad (31)$$

$$N/N_f \text{ red}_S = N/N_f \times S \quad (32)$$

Onde:

$N/N_f \text{ red}_{\Delta \text{ ou } S}$  = dano reduzido;

$N/N_f$  = dano médio;

$\Delta, S$  = *shift factor*.

Antes de determinar o dano reduzido é necessário estabelecer os valores dos *shift factors*  $\Delta$  e  $S$ . Para isso, inicialmente estabelece-se um valor central de dano reduzido, que pode ser um valor já utilizado, como 0,5 em Nascimento (2015) e 0,8 em Fritzen (2016), ou um valor tal como as médias dos danos determinados a “Y” %AT. Aplica-se esse valor nas Equações 30 e 31 para todos os trechos experimentais. Elabora-se um gráfico dos valores do *shift factor* calculado pela taxa de crescimento inicial de dano. Do melhor tipo de correlação obtida no gráfico gerado, tem-se a equação do *shift factor*  $\Delta$  e/ou  $S$  a ser utilizada para determinar o dano reduzido de cada um dos pontos em quem foram medidas %AT em campo.

#### 4.2.2.2.5 Obtenção da função de transferência de previsão de percentual de AT

De posse dos danos reduzidos, utiliza-se as equações 21 ou 22 (apresentadas no item 2.4.4) para calcular o %AT previsto. A equação escolhida é aquela que mais se adéqua ao conjunto de dados gerados. No caso de Nascimento (2015) e Fritzen (2016), o modelo escolhido foi o de potência.

Depois de calculados todos %AT previstos, faz-se a diferença dos mínimos quadrados entre os valores de %AT previsto e %AT observado. Ao final, soma-se todas as diferenças dos mínimos quadrados. Utiliza-se então a ferramenta Solver (do Programa Excel) para minimizar esse somatório, determinando os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  (Equação 22) como as células a serem alteradas. Um ajuste mais fino pode ser feito ao se utilizar a mesma técnica, mas alterando-se também os coeficientes da função do *shift factor*.

Depois de realizados esses cálculos é importante observar a adequação da função de transferência gerada ao conjunto de dados. Isso deve ser feito tanto graficamente quanto pela análise dos %AT previstos e sua comparação com o observado em campo. Funções de

transferência que gerarem valores muito díspares devem ser descartadas e um novo procedimento deve então ser realizado. Para isso, os valores das taxas iniciais de crescimento de dano e de ajuste do *shift factor* devem ser modificados e novamente testados até que se encontre uma função de transferência adequada ao conjunto de dados que a originou.

#### 4.2.2.2.6 Validação da função de transferência

De posse de uma função de transferência adequada ao conjunto de dados, do ponto de vista da calibração, parte-se para a sua validação. O processo de validação tem por objetivo verificar a aplicabilidade do modelo de previsão gerado, utilizando para isso dados de entrada de trechos experimentais diferentes dos utilizados na calibração. Assim, serão usados na validação os dados dos trechos experimentais pertencentes ao Grupo 2, conforme descrito no item 4.2.2.1.

O primeiro passo consiste em calcular o dano médio para todos os trechos, conforme apresentado no item 4.2.2.2.1. Em seguida, procede-se da mesma forma que o indicado no item 4.2.2.2.3 para se obter o dano correspondente ao %AT observado em campo. De posse desses valores, utiliza-se as equações do *shift factor* e da função de transferência, obtidas na calibração, para calcular o %AT previsto para todos os trechos da validação, conforme indicado nos itens 4.2.2.2.4 e 4.2.2.2.5. Se os resultados obtidos forem coerentes com %AT obtidos em campo, deduz-se que a função de transferência de %AT é adequada. Caso não, deve-se voltar aos passos apontados nos itens 4.2.2.2.2, 4.2.2.2.4 e 4.2.2.2.5 para a definição de uma nova função de transferência.

Passando a validação propriamente dita, utiliza-se o conjunto de dados de %AT observada, de dano reduzido e de %AT prevista para estabelecer uma função de erro de previsão. Os procedimentos adotados foram os mesmos utilizados no MEPSG (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004), Nascimento (2015) e Fritzen (2016). Essa função erro, associada ao conceito estatístico de confiabilidade, permite que a função de transferência desenvolvida possa ser utilizada em um método de dimensionamento. O formato genérico da função de transferência, incorporado do erro padrão e da confiabilidade, é dado pela Equação 33.

$$\%AT_{conf} = \%AT + Se_{(N/N_{f\ red\ S})} \times Z_p \quad (33)$$

Onde:

$\%AT_{\text{conf}}$  = área trincada prevista a determinado nível de confiança P, em %;

$\%AT$  = área trincada prevista através da calibração, em %;

Se  $(N/N_f \text{ red } S)$  = erro obtido a partir do conjunto de dados finais da calibração, em %;

$Z_p$  = desvio da função normal, que varia de acordo com o nível de confiabilidade.

Inicialmente, deve ser elaborado um gráfico contendo o erro de previsão entre a  $\%AT$  prevista e o  $\%AT$  observado em campo em função do dano reduzido. Esse gráfico permite visualizar os diferentes comportamentos desse erro em função do histórico de dano. A partir dessa observação, separa-se os dados em grupos de intervalos de dano. Para cada intervalo devem ser calculados: a média dos danos reduzidos e o desvio padrão. Constrói-se um gráfico com esses resultados e a equação que melhor ajusta esses valores é a função erro da função de transferência. As funções erro podem ser um modelo sigmoidal (Equação 23) ou exponencial (Equação 24), apresentados no item 2.4.4, a depender do comportamento dos dados.

A confiabilidade, representada pelo  $Z_p$  na Equação 32, deve ser aplicada ao se utilizar a função de transferência para dimensionar uma estrutura de pavimento. Em trechos de menor tráfego e menor importância econômica aplica-se um percentual de confiabilidade menor (e.g. 50%), em caso contrário utiliza-se maiores valores de confiabilidade (95% ou 99%).

## 5 DESENVOLVIMENTO DE UMA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE PERCENTUAL DE ÁREA TRINCADA

Neste capítulo apresenta-se os principais resultados decorrentes do processo de desenvolvimento de uma função de transferência de previsão de %AT por meio de resultados de simulações de dano. Para isso foram utilizados os procedimentos apresentados no item 4.2 do capítulo de Metodologia e os dados de 44 trechos experimentais monitorados no âmbito da Rede Temática e cujas propriedades das misturas e de seu comportamento medido em campo encontram-se no Anexo C. Antes, no entanto, são apresentados alguns resultados preliminares de análises do dano médio em diferentes condições de clima, velocidade da via e propriedades mecânicas das misturas analisadas.

### 5.1 Resultados preliminares das análises de dano médio

Apresenta-se, neste subtópico, os resultados da simulação do dano por fadiga, no CAP 3D-D, ao longo de um período de projeto pré-estabelecido. O objetivo é apresentar as diferenças entre os resultados de dano com a variação de velocidades, de temperatura e de parâmetros de fadiga, que são associados a rigidezes específicas (fadiga por CD associado à MR e fadiga por TD associada à  $|E^*|$ ). Os dados de entrada para as simulações foram os seguintes:

- a) data de início de operação da via: Jan/2007;
- b) tráfego inicial (N): 1,04E+06;
- c) velocidade (km/h): 60 (não sendo esse o parâmetro em análise);
- d) taxa de crescimento anual do tráfego (%): 3,0;
- e) estrutura composta por 4 camadas, todas com coeficiente de Poisson assumido como 0,35, e espessuras e rigidezes relacionadas a seguir:
  - Revestimento: 5,1cm e 3184MPa (para análise que utiliza MR);
  - Base: 38cm e 443MPa;
  - Sub-base: 24cm e 166MPa;
  - Subleito: infinita e 160MPa;
- f) temperatura (°C): 25. Quando a temperatura for o parâmetro em análise, serão consideradas as temperaturas médias de Fortaleza-CE, localizada na região nordeste, e de Curitiba-SC, localizada na região sul. O objetivo dessa variação

é demonstrar a variação do dano com a variação de temperatura Os valores adotados encontram-se na Tabela 10;

- g) dados da curva mestra da mistura:  $a = 1,19$ ;  $b = 3,29$ ;  $d = 0,9130$ ;  $g = 0,51$ ;  $\alpha_1 = 0,00121$ ;  $\alpha_2 = -0,1780$ ;  $\alpha_3 = 3,0800$ ;
- h) dados da curva de vida de fadiga por compressão diametral (CD):  $K_1 = 3 \times 10^{-11}$ ;  $K_2 = -3,535$ ;
- i) dados da curva de vida de fadiga por TD da mistura com CAP 65/85 e Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,1mm:  $\alpha = 3,43$ ;  $C11 = 0,001530$ ;  $C12 = 0,528$ ;  $\Delta = -1,211$ ;  $Y = 3709564$ ;  $\beta = -0,08$ .

Tabela 10 - Dados de temperatura média do ar (°C) em Fortaleza e Curitiba

Fortaleza-CE												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
00:00 as 08:00h	23,6	22,6	22,5	22,6	21,9	21,5	21,2	21,4	22,4	22,8	22,9	23,3
08:00 as 16:00h	33,8	32,3	31,4	31,1	31,2	31,6	33	34,8	35,8	35,9	35,6	35,5
16:00 as 24:00h	27,5	26,7	26,1	26	26	26	25,9	26,8	27,5	27,8	28,1	28,1
Curitiba-SC												
00:00 as 08:00h	16,4	16,3	15,4	12,8	10,2	8,4	8,1	9,2	10,8	12,5	14	15,4
08:00 as 16:00h	20,4	20,6	19,6	17,2	14,5	13,1	12,9	14,1	15	16,5	18,2	19,3
16:00 as 24:00h	26,6	26,7	25,7	23,1	21,1	19,6	19,4	20,9	21,3	22,6	24,5	25,4

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017, com adaptações).

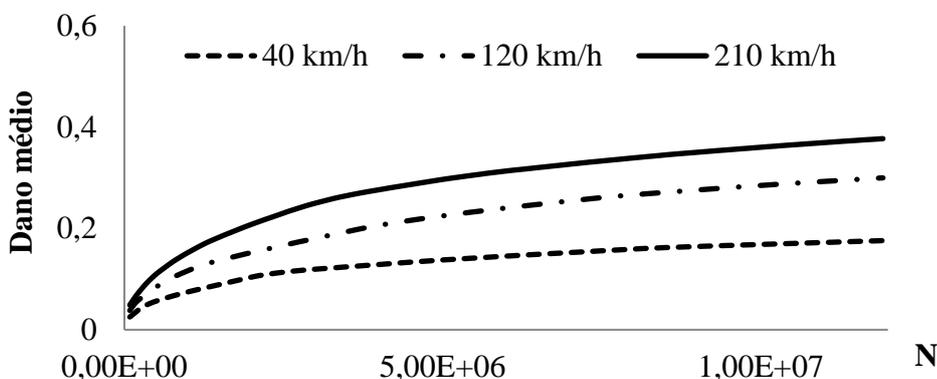
De posse desses dados de entrada, foram realizadas as análises no CAP 3D-D, obtendo-se as curvas de Dano médio x N, exibidas nas Figuras 38, 39 e 40, nas quais buscou-se verificar:

- o efeito da velocidade (Figura 38), considerando iguais para todas as análises os dados de temperatura (25°C),  $|E^*|$  e TD;
- o efeito da temperatura (Figura 39), sendo, para isso, iguais para todas as análises os dados de velocidade (60km/h),  $|E^*|$  e TD;
- o efeito do parâmetro de fadiga (Figura 40), considerando iguais para todas as análises os dados de velocidade (60km/h), temperatura (25°C) e  $|E^*|$ .

A partir do gráfico apresentado na Figura 38, percebe-se que, em uma mesma condição de análise estrutural e temperatura, são diferentes os resultados de dano quando se

utiliza diferentes velocidades. Ou seja, quanto menor a velocidade, menor é o dano por fadiga ao longo do tempo.

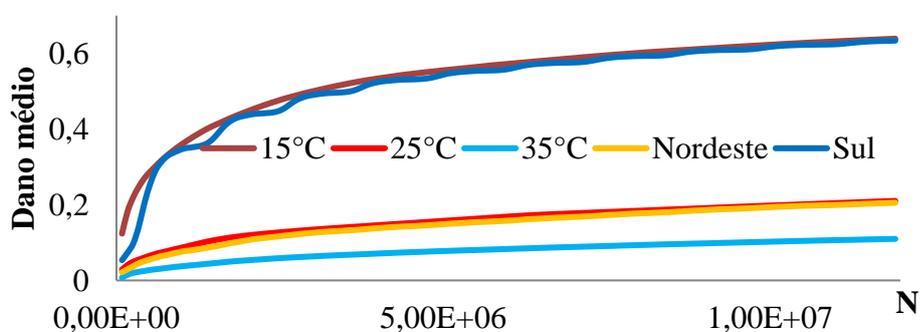
Figura 38 - Dano médio x N com variação da velocidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Quando se considera uma mesma condição de análise estrutural e velocidade, são diferentes os resultados de dano quando em diferentes temperaturas, ou seja, quanto menor a temperatura, maior é o dano ao longo do tempo. Isso pode ser atestado pela tendência das curvas apresentadas no gráfico da Figura 39. Ainda sobre esse gráfico pode-se inferir que ao se analisar pavimentos em diferentes climas (e.g., Nordeste e Sul) há variação nos resultados de dano. A não inclusão da variação de temperatura levaria o projetista a considerar que uma mistura aplicada no Sul do país teria o mesmo comportamento que no Nordeste, o que percebe-se não ser verdade.

Figura 39 - Dano médio x N com variação da temperatura

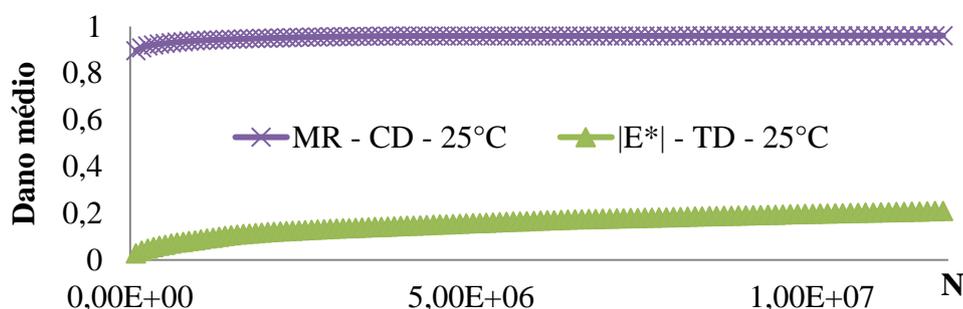


Fonte: Elaborado pela autora.

Já o gráfico da Figura 40 mostra que, em uma mesma condição de análise estrutural, velocidade e temperatura, são diferentes os resultados de dano quando se utiliza parâmetros de fadiga obtidos dos ensaios de CD ou TD. O dano provocado pelo CD é mais severo que o provocado pelo TD.

Ainda através do gráfico da Figura 40, verifica-se, indiretamente, a importância de se utilizar o  $|E^*|$ , pois ele leva em consideração a variação da rigidez por conta da mudança de temperatura.

Figura 40 - Dano médio x N com variação dos parâmetros de fadiga



Fonte: Elaborado pela autora.

Ressalta-se, ainda, que o comportamento quanto ao dano por fadiga, apresentado neste subtópico, pode ser variável e depende do tipo de mistura asfáltica analisada. Aqui foi utilizada somente uma.

Por fim, realizada a análise prévia quanto a simulação de dano realizada no âmbito do CAP 3D-D, o programa apresentou-se habilitado para as análises necessárias no processo de construção da equação de percentual de área trincada apresentada no item subsequente.

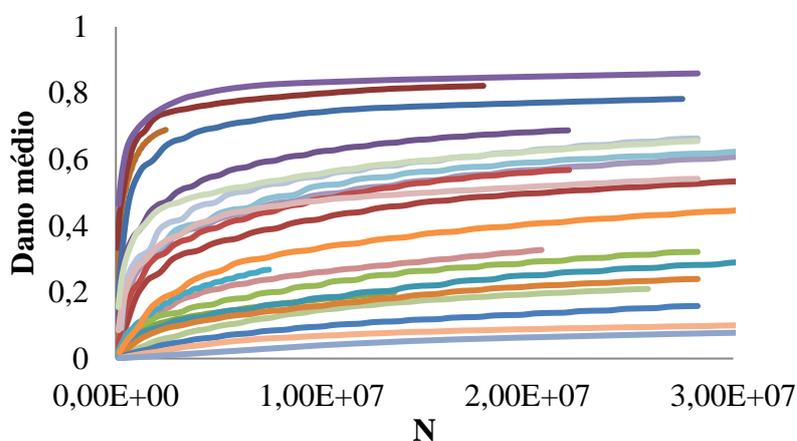
## 5.2 Resultados e análises referentes à calibração da função de transferência de percentual de AT

Nos subtópicos a seguir são apresentados os resultados obtidos na etapa de calibração e validação da função de transferência de percentual de área trincada desenvolvida no âmbito desta pesquisa e que posteriormente será inserida no programa CAP 3D-D para compor a análise de desempenho da metodologia de dimensionamento proposta nesta Tese.

### 5.2.1 Resultados de dano médio e taxa inicial de crescimento de dano

Seguindo as orientações apresentadas no item 4.2, inicialmente determinou-se o dano médio ao longo do período de serviço em cada um dos 27 trechos experimentais utilizados na calibração. Os resultados obtidos a partir dessas análises estão resumidos na Figura 41, onde cada curva representa um trecho analisado.

Figura 41 - Gráfico dos danos médios em função do N, obtidos nas análises realizadas nesta pesquisa para diferentes trechos



Fonte: Elaborado pela autora.

Por essa figura é possível observar que o conjunto de trechos experimentais apresentam comportamento quanto ao dano por fadiga bem diferentes entre si. Alguns apresentando valores de dano, até o final da sua vida útil, bem próximos do limite máximo (dano = 1) e outros bem próximos do limite mínimo (dano=zero). Para esse comportamento diverso, contaram as diferenças: na constituição das misturas analisadas, na ação do tráfego e do clima.

Ainda através da Figura 41, é possível determinar o valor da taxa inicial de crescimento de dano. A fim de encontrar os valores mais adequados para essa taxa inicial de crescimento de dano, foram testados diversos valores e seus efeitos na composição do *shift factor* da função de transferência.

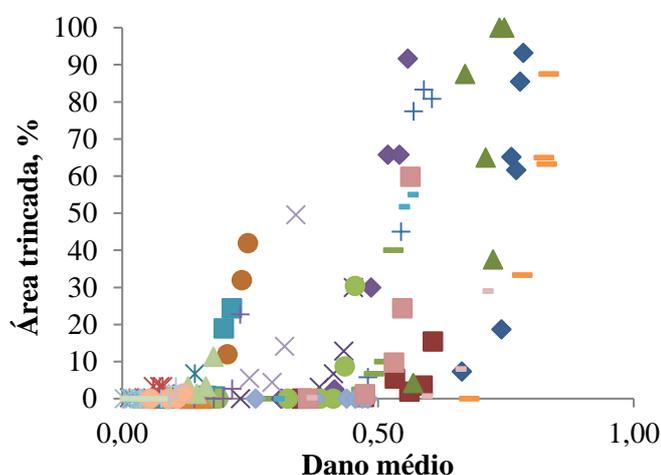
Foram testadas taxas do tipo I cujos valores 0,25, 0,35 e 0,45 apresentaram bons efeitos nos resultados de %AT calculado. No entanto, o maior valor de  $R^2$  (apresentados na Figura 46) e a melhor aderência com um curva de potência, foram obtidos com as análises

feitas com a taxa inicial de crescimento de 0,35, por isso, essa foi a taxa escolhida para a presente pesquisa.

### 5.2.2 *Resultados do dano médio correspondente ao percentual de AT observado e percentual de AT correspondente ao crescimento inicial do dano médio*

Nos relatórios de dano médio, buscou-se os valores de dano médio correspondentes às datas de coleta do %AT observado em campo. A Figura 42 apresenta o conjunto dos resultados para todos os trechos. Cada ponto do gráfico corresponde ao dano simulado em relação a uma observação da área trincada em campo. Por essa figura é possível observar que aproximadamente a partir dos 10% de AT é que os dados de %AT tendem a crescer de maneira mais acentuada com o aumento do dano. Por isso, o dano médio a 10% de AT será o valor usado para correlacionar com uma taxa inicial de crescimento de dano que será determinada a seguir.

Figura 42 - %AT observado em campo x dano médio correspondente dos trechos da calibração



Fonte: Elaborado pela autora.

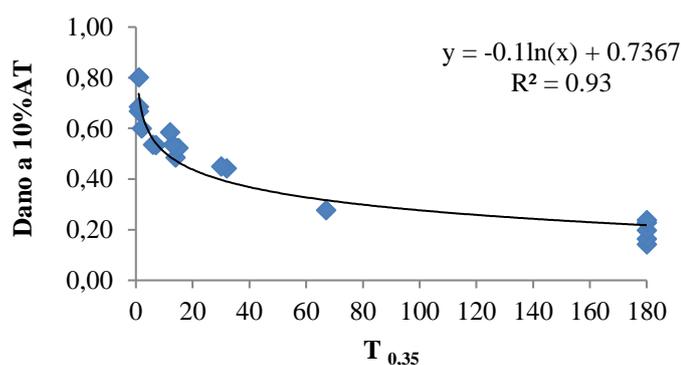
Em seguida, sabendo que 10% de AT é o valor médio em que se inicia o crescimento do dano, determina-se em qual valor de dano, em cada trecho experimental, esse percentual de área trincada é alcançado. Para obter-se esses valores foram construídos gráficos individuais para cada trecho, correlacionando o %AT observado em campo x dano médio correspondente, dos quais, por regressão foram obtidos os valores de dano a 10% de

AT. Esses resultados serão utilizados no desenvolvimento da equação do *shift factor* cujos resultados são apresentados a seguir.

### 5.2.3 Dano correspondente a 10% AT

Estando definido o valor da taxa inicial de crescimento de dano (0,35), buscou-se em que tempo (T, em mês) essa taxa de crescimento de dano ocorria em cada trecho. Fez-se a correlação desses tempos com os valores de dano a 10%AT, para todos os trechos considerados, resultando no gráfico da Figura 43.

Figura 43 - Correlação entre o dano a 10% AT x tempo em que ocorre a taxa inicial de crescimento de dano 0,35



Fonte: Elaborado pela autora.

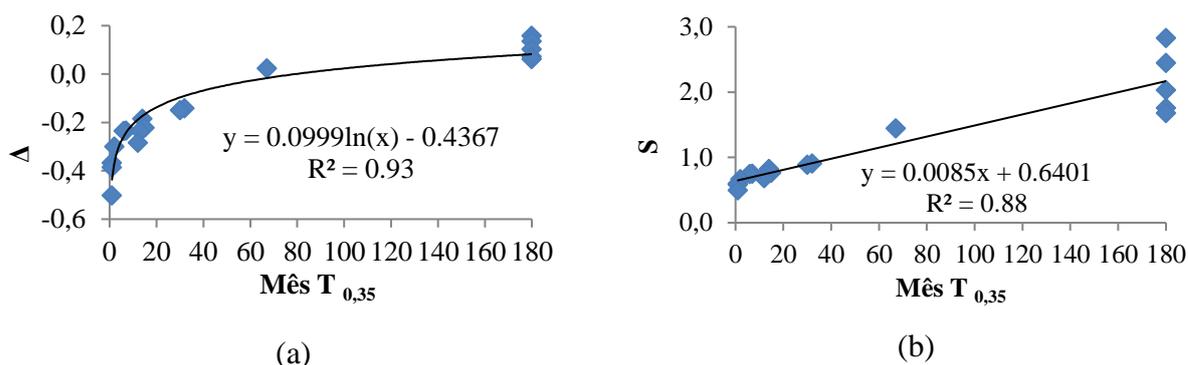
O gráfico da Figura 43 apresenta uma ótima correlação (93%) entre os resultados de dano a 10%AT e o tempo encontrado para a taxa inicial de crescimento de dano. Além disso, é também possível inferir, através desse gráfico, que a partir de um determinado tempo a curva não apresenta mudança de inclinação expressiva. Nesse sentido, resolveu-se escolher o mês correspondente (67), como o máximo valor de tempo para as análises de dano que serão realizadas pelas equações do *shift factor*, apresentadas a seguir.

### 5.2.4 Equação do *shift factor* e função de transferência calibrada

Partiu-se, em seguida, para a determinação dos valores dos *shift factors*  $\Delta$  e  $S$ . Como explicado anteriormente, a fim de obter a melhor correlação entre os dados, podem ser testados diferentes valores de ajuste. Como a média dos valores de dano a 10%AT foi de

aproximadamente 0,5, esse foi o primeiro valor a ser testado. Testou-se também os valores de 0,3, 0,4, 0,6 e 0,7. Desses o que apresentou melhor resultado da função de transferência decorrente foi o 0,4. A Figura 44 apresenta as equações de *shift factors* obtidas e suas respectivas correlações.

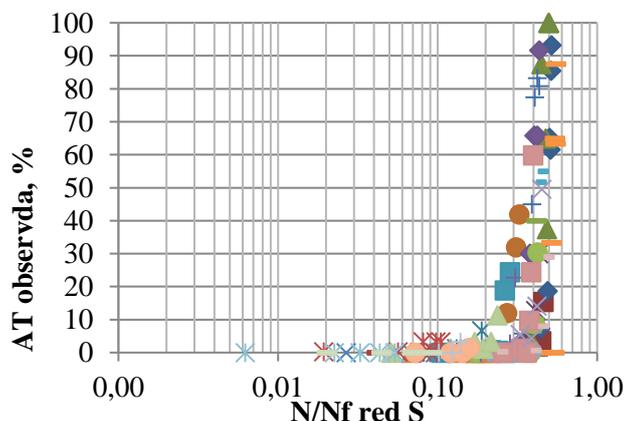
Figura 44 - Correlação entre (a)  $\Delta$  e  $T_{0,35}$  e (b)  $S$  e  $T_{0,35}$



Fonte: Elaborado pela autora.

Procedeu-se, então, com os cálculos dos danos reduzidos utilizando os *shift factors*  $\Delta$  e  $S$ . Apesar da função  $S$  (Figura 44b) ter um  $R^2$  menor que a função  $\Delta$  (Figura 44a), ela apresentou uma melhor aderência à previsão de área trincada do conjunto de dados, por isso foi utilizada nos passos a seguir. A Figura 45 mostra a curva de %AT observada em função do dano reduzido obtido através da Equação 32, que relaciona o dano reduzido a função  $S$ . Tal como em Nascimento (2015), os dados comportam-se como um modelo de potência.

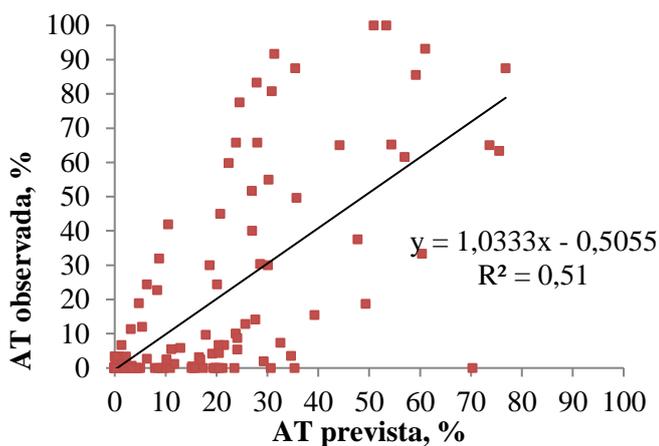
Figura 45 - %AT observada em função do dano reduzido por meio da função  $S$



Fonte: Elaborado pela autora.

A correlação entre o %AT observado em campo e o %AT calculado apresenta um valor de 51%, como mostrado na Figura 46. A literatura aponta que no MEPDG norte-americano este valor é de 27%.

Figura 46 - Correlação entre o %AT observado e o %AT previsto



Fonte: Elaborado pela autora.

Os coeficientes da função de potência que representa o conjunto de dados analisados, mostrados na Figura 45, foram os escolhidos para compor a função de transferência de %AT. As Equações 34 e 35, a seguir, apresentam a função *shift fator* e a função de transferência após ajustadas pela ferramenta Solver.

$$SF = 0,00002 (T_{0,35})^2 + 0,00872 (T_{0,35}) + 0,65294 \quad (34)$$

Onde:

$T_{0,35}$  = tempo em meses em que o dano atinge o valor de 0,35 para cada trecho analisado, cujo maior valor admissível é 67.

$$\%AT = 721,96589 \left( \frac{N}{N_f red_s} \right)^{3,76808} \quad (35)$$

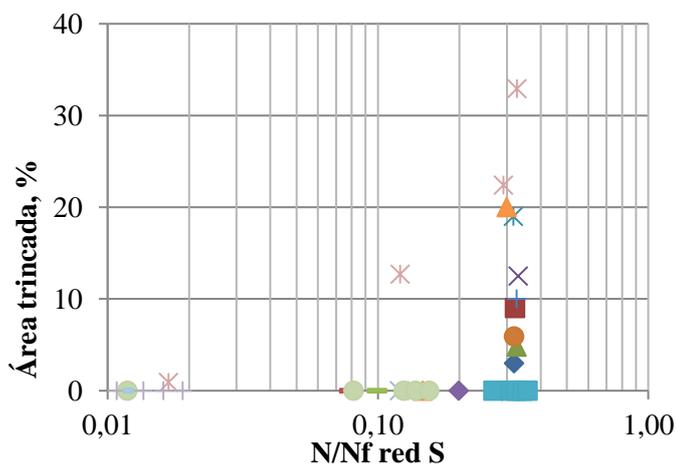
Onde:

$N/N_f red_s$  = dano médio reduzido calculado para o mês analisado.

### 5.3 Resultados e análises referentes à validação da função de transferência de percentual de AT

Após calibrada a função de transferência de %AT, o passo seguinte é a realização da validação dessa função. Nesta pesquisa foram utilizados os dados de 17 trechos experimentais, cujos dados encontram-se no Anexo C. A Figura 47 apresenta o conjunto de dados de %AT observada em função do dano reduzido, calculado com a função S (Equação 34). É possível observar que eles seguem a mesma tendência de comportamento visto no conjunto de dados da calibração (Figura 45), apresentando também formato de potência.

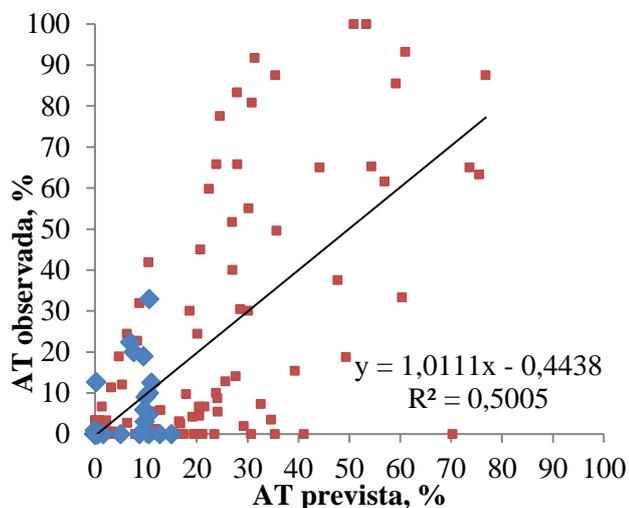
Figura 47 - %AT observada  $\times$  dano médio reduzido obtido a partir da função S para os 17 trechos da validação



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 48 apresenta a correlação entre %AT observada e %AT prevista, de todos os trechos, ou seja, os 27 trechos utilizados na calibração + 17 utilizados na validação. O coeficiente de correlação permaneceu praticamente o mesmo (0,50), o que indica que a calibração representou bem os trechos da validação.

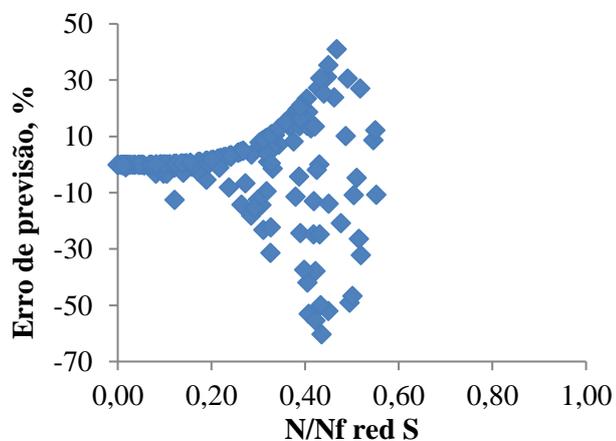
Figura 48 - Correlação entre %AT observada e %AT prevista de todos os trechos (Calibração +Validação)



Fonte: Elaborado pela autora.

Estando a função de transferência devidamente validada parte-se, então, para a determinação da função de erro de previsão. A Figura 49 apresenta o erro médio de cada ponto da análise em função do dano reduzido. Percebe-se que a partir do dano reduzido de valor 0,20, os pontos estão cada vez mais dispersos. Por conta disso, a determinação do erro é realizada dividindo-se esse conjunto de dados em intervalos de dano reduzido para então calcular os coeficientes da função erro, conforme Tabela 11.

Figura 49 - Erro de previsão (%AT prevista - %AT observada) em função do dano reduzido



Fonte: Elaborado pela autora.

Importante destacar que o erro médio apresentado pelo conjunto de dados é 1,07%, o qual é considerado satisfatório se comparado aos resultados apresentados no MEPDG norte-americano (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004), cujo o valor foi de 5,01%. O erro padrão também apresenta uma boa correlação de 0,95. Os resultados do erro médio e do erro padrão de Nascimento (2015) foram, respectivamente, 0,07 e 0,97.

Tabela 11 - Parâmetros estatísticos do erro de previsão

<b>Intervalos de Dano reduzido</b>	<b>Média dos danos reduzidos</b>	<b>Nº Amostras</b>	<b>Erro médio (média dos erros de previsão)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Erro padrão</b>
<b>&lt;0,10</b>	0,04	40	-0,18	0,72	0,11
<b>0,10-0,20</b>	0,15	38	-0,37	2,47	0,40
<b>0,20-0,30</b>	0,25	25	-0,73	7,13	1,43
<b>0,30-0,40</b>	0,35	45	5,31	14,43	2,15
<b>0,40-0,50</b>	0,44	30,00	-4,82	32,78	5,99
<b>&lt;0,60</b>	0,53	10,00	-1,28	33,40	10,56
		188	3,3	14,7	1,07

Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, foi gerado a função de erro que pode ser aplicada a cada trecho. Diferentemente do MEPDG norte-americano e de Nascimento (2015), a função erro (erro-padrão, EP) obtida neste trabalho tem um formato de curva exponencial (Equação 36).

$$Erro = 0,7007 \cdot e^{\left(\frac{N}{N_f red_s}\right) \cdot 8,2056} \quad (36)$$

Essa equação permitirá utilizar o conceito de confiabilidade no âmbito do dimensionamento proposto nesta pesquisa. Assim, para previsão de % AT com determinado nível de confiança deve-se utilizar a Equação 37.

$$\%AT = 721,96589 \left(\frac{N}{N_f red_s}\right)^{3,76808} + 0,7007 \cdot e^{\left(\frac{N}{N_f red_s}\right) \cdot 8,2056} \cdot Z_p \quad (37)$$

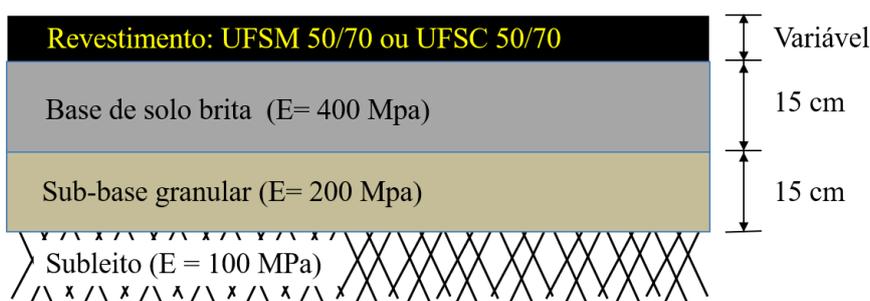
Onde:

$Z_p$  = desvio normal padrão, varia conforme o nível de confiabilidade estabelecido para cada análise (por exemplo, para 50% = 0, para 99% = 2,33) .

## 5.4 Dimensionamento teste

No intuito de testar a metodologia de dimensionamento proposta nesta Tese será apresentado neste item um procedimento de dimensionamento de pavimento. Para isso, foram escolhidas duas misturas asfálticas de dois trechos experimentais da validação e que utilizam um ligante asfáltico 50/70, comum na pavimentação rodoviária nacional: UFSC 50/70 e UFSM 50/70 3. A Figura 50 apresenta a estrutura do pavimento teste, que será a mesma em todas as análises, apenas com alterações nas espessuras da camada asfáltica (5cm, 10cm, 15cm e 20cm). O tráfego inicial assumido será de  $5,0E+06$ , com abertura da via em 2017 e uma taxa de crescimento anual de 3%. As camadas são consideradas aderidas entre si.

Figura 50 - Estrutura do pavimento teste

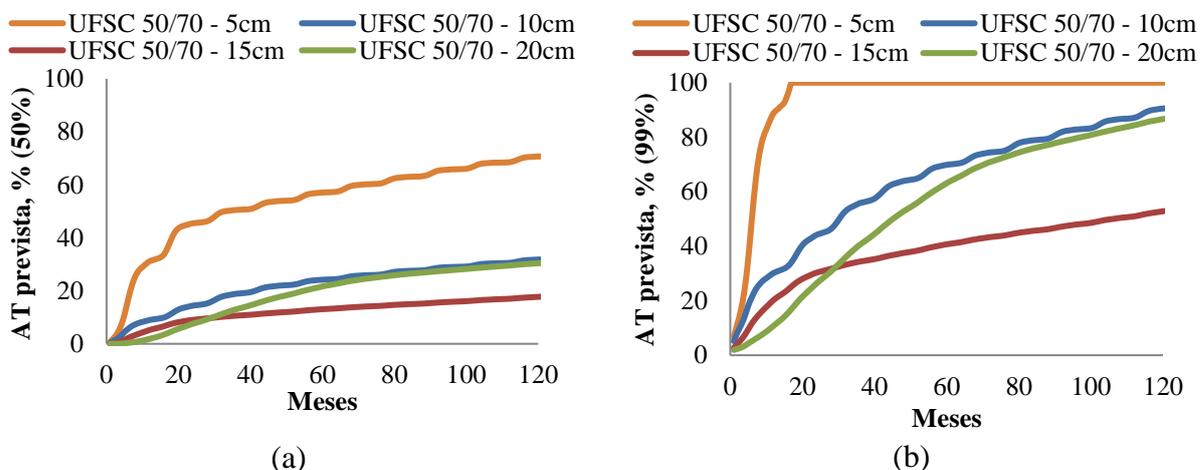


Fonte: Elaborado pela autora.

Definidos os dados de entrada, são calculados os danos médios para cada espessura e mistura asfáltica proposta. Utilizou-se os resultados dessas análises para determinar o %AT previsto para cada situação, em duas condições de confiabilidade: 50% ( $Z_p = 0,00$ ) e 99% ( $Z_p = 2,33$ ). O %AT previsto em função do número N (número de eixos padrão), em um período de projeto de 120 meses, são apresentados nas Figuras 51 e 52.

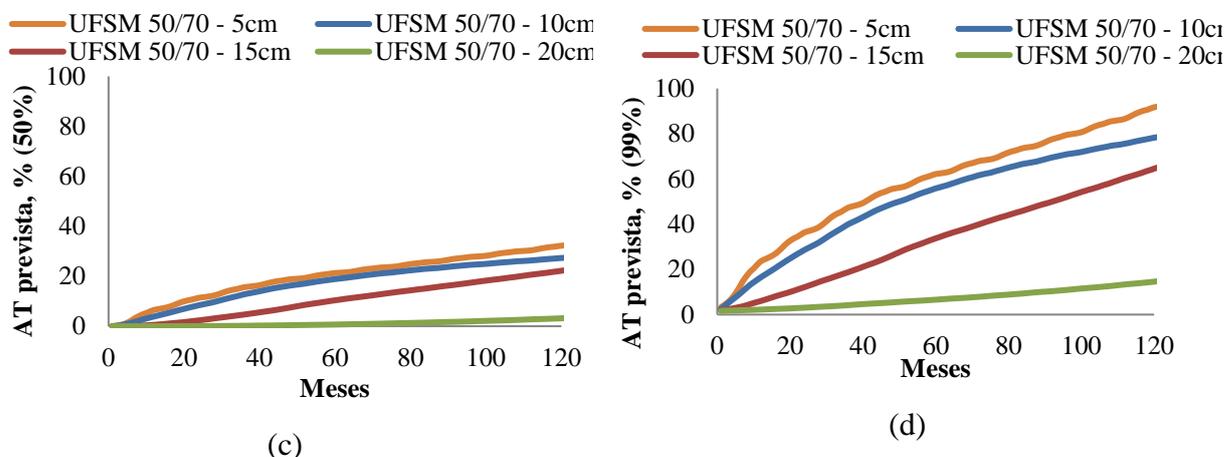
No caso do pavimento dimensionado com a mistura UFSC 50/70, percebeu-se uma distorção nas áreas trincadas, a partir do mês 30. A curva representativa do pavimento com 20cm de revestimento apresenta um comportamento melhor do que a curva representativa do pavimento com 15cm de revestimento. Isso não condiz com a premissa de que revestimentos mais esbeltos apresentam trincamento mais rapidamente do que revestimentos mais espessos, conforme pôde ser observado no pavimento com a mistura UFSM 50/70.

Figura 51 - Evolução prevista da área trincada em função do tempo com diferentes espessuras para Mistura UFSC 50/70 (a) com 50% de confiabilidade e (b) com 99% de confiabilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

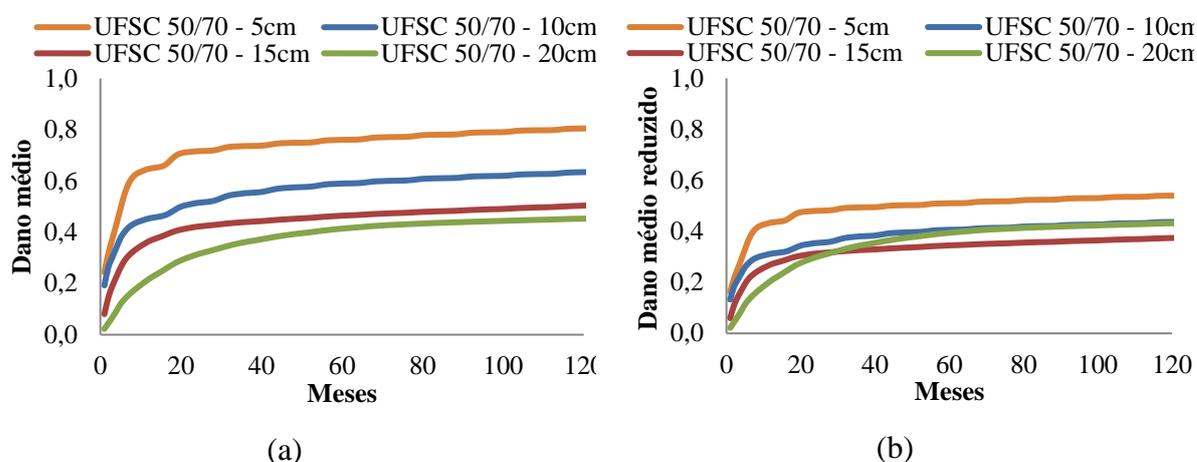
Figura 52 - Evolução prevista da área trincada em função do tempo com diferentes espessuras para (a) Mistura UFSM 50/70 com 50% de confiabilidade e (b) Mistura UFSM 50/70 com 99% de confiabilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Diante desta distorção, buscou-se verificar o que estaria provocando-a, no que se refere ao dano. O gráfico da Figura 53a mostra que o dano médio calculado está condizente com o esperado: revestimentos mais esbeltos apresentam danos médios maiores que aqueles mais espessos. Notou-se, no entanto, que o mesmo não ocorreu em relação ao dano reduzido. Na Figura 53b, percebe-se que a curva de dano reduzido para os 20cm de revestimento quase coincide com a de 10cm logo após os 40 meses. Isso não condiz com o esperado.

Figura 53 - (a) Dano médio em função do tempo e (b) dano reduzido em função do tempo para mistura UFSC



Fonte: Elaborado pela autora.

Detectou-se, assim, que a passagem matemática entre o dano médio e o dano médio reduzido foi o que provocou o comportamento contraditório das curvas de evolução de %AT prevista. Foram, então, realizadas novas análises na fase de calibração com o intuito de resolver tal questão, contudo a tendência dos resultados foi a mesma para determinadas misturas e estruturas.

Observa-se, no entanto, que em torno de 20% de AT as curvas não apresentam inconsistências. Sendo esse o valor típico para análise de área trincada para fins de projeto no Brasil pode-se dizer que o uso da metodologia é adequado para a previsão de áreas trincadas em torno de 20%. Além disso, também percebeu-se que para as estruturas com revestimento de até 15cm, a previsão do %AT ao longo do tempo está coerente com o comportamento esperado. Essas são as espessuras mais comuns para os revestimentos asfálticos nacionais.

É digno de se notar também, que maiores valores de confiabilidade levam ao alcance, em menor tempo, de determinado nível de %AT, pois a análise é mais rigorosa. Nesse sentido, os valores de confiabilidade a serem aplicados no dimensionamento devem ser definidos de maneira cuidadosa pelo projetista. Para isso, ele deverá levar em consideração a importância da via e os recursos disponíveis para sua construção.

## 5.5 Considerações finais sobre este capítulo

Considerando o exposto neste capítulo, conclui-se que:

- a) a importância da consideração da frequência de carregamento nas análises, dado que ela exerce influência sobre o comportamento mecânico dos materiais constituintes do pavimento, haja vista a variação nos resultados de dano quando se modificou a velocidade nas análises;
- b) a inclusão da variação de temperatura gera resultados de dano diferentes daqueles quando se considera uma temperatura fixa. Essa importância é reforçada quando se considera utilizar as mesmas misturas em projetos em diferentes regiões do país;
- c) a diferença nos resultados de simulação utilizando CD ou TD produz resultados distintos, principalmente quando consideradas temperaturas diferentes. É importante investigar a eficiência dos dois resultados no intuito de encontrar aquele que forneça uma melhor correlação com os dados de campo;
- d) a utilização do  $|E^*|$  se mostrou pertinente, dado que este parâmetro permite análises para diferentes condições de temperatura, o que na prática é importante para o dimensionamento de pavimentos considerando as variadas condições climáticas regionais;
- e) a determinação do dano por fadiga utilizando análises elásticas e o modelo S-VECD permite o desenvolvimento de uma função de transferência que pode gerar bons resultados de previsão de %AT;
- f) o conjunto de dados da validação se adequou bem aos dados da calibração, demonstrando que o modelo de calibração tem uma correlação adequada com os %AT previstos;
- g) percebe-se pelo conjunto de dados de erro médio que a medida que o dano aumenta também crescem os erros de previsão. A fim de minimizar esses erros no dimensionamento de um trecho, faz-se necessário utilizar uma função de erro de previsão. A esta também podem estar associados diferentes níveis de confiabilidade;
- h) por fim, a função de transferência desenvolvida demonstrou-se adequada a previsão de desempenho do pavimento em campo, sobretudo para os níveis de área trincada inferiores próximos de 20%, valor mais condizente com o estado da prática da pavimentação rodoviária nacional.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas no âmbito do trabalho ora apresentado, bem como recomendações para elaboração de trabalhos futuros correlacionados com a temática abordada nesta Tese.

### 6.1 Principais contribuições Tese

Considera-se como principal contribuição desta Tese a formatação de um modelo simplificado de dimensionamento mecanístico-empírico que pode ser utilizado como nível intermediário de análise no novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos, ora em desenvolvimento no Brasil. A metodologia de determinação do dano considerada para esse modelo mostrou-se promissora, já que capturou os efeitos de velocidade e temperatura, além de trazer algumas questões sobre o efeito do ensaio de fadiga considerado. As análises contendo  $|E^*|$  e TD combinaram a premissa de *steady state* do pavimento, por meio da utilização de  $|E^*|$  para avaliar as respostas estruturais (que variam com velocidade e temperatura), com o S-VECD. Trata-se, respectivamente, de um modelo para previsão de respostas combinado com um modelo de dano, numa metodologia que pode facilitar o processo de predição de desempenho de pavimentos quanto à fadiga de materiais asfálticos em campo.

Ainda como parte do modelo de dimensionamento proposto e atestando sua eficiência, foi calibrada e validada uma função de transferência de percentual de área trincada durante a via de serviço do pavimento. De posse dessa função de transferência a metodologia pôde então ser formatada em um programa computacional de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos, o CAP 3D-D. Um sistema de dimensionamento capaz de levar em consideração o fenômeno de fadiga ocorrendo com diferentes temperaturas e velocidades de passagem de veículos, quando se considera modelos de rigidez e de fadiga dos materiais que permitam uma análise estrutural que considere o material viscoelástico. A fim de atestar a eficiência desse sistema, ele foi usado no dimensionamento de diferentes pavimentos, com diferentes materiais.

Através dos resultados de dimensionamentos obtidos observou-se que ele é mais indicado para pavimentos com espessura de revestimento abaixo de 15cm e com severidade de previsão de trincamento menor que 30%, pois para valores maiores que esse pode ocorrer

uma inconsistência de previsão devido ao modo como é calculado o dano médio reduzido. Assim, o modelo é adequado para o dimensionamento de pavimentos com a severidade de área trincada tipicamente adotada no Brasil de 20%.

## 6.2 Outras constatações desta Tese

O desenvolvimento desta pesquisa levou a outras constatações, listadas a seguir:

- a) a revisão bibliográfica dos métodos de dimensionamento mostrou que, do ponto de vista do trincamento das misturas asfálticas, a tendência dos métodos mais modernos é de fazer sua correlação com o dano por fadiga para obtenção de funções de transferência de %AT. Ela também mostrou a importância de um consistente banco de dados de desempenho de pavimentos em campo, a fim de que possam ser utilizados para a calibração de funções de transferência de previsão de defeitos;
- b) o mapeamento dos recursos humanos e laboratoriais das Superintendências Regionais do DNIT mostrou pouco conhecimento por parte dos técnicos vinculados aos setores de projetos sobre os métodos mecanísticos-empíricos rsos, além de não ter uma infraestrutura física laboratorial adequada para realização dos ensaios no âmbito desses métodos. Trata-se, portanto, de um alerta que um programa de treinamento seja considerado para os próximos anos e também que se pense estrategicamente na questão da capacitação laboratorial do órgão em suas diversas regionais ou a possibilidade de contratação de empresas particulares para realização dos ensaios necessários;
- c) as universidades têm papel fundamental nos avanços científicos inerentes a um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos e, possivelmente, pode exercer um papel relevante também no aspecto do item anterior, ou seja, na capacitação e prestação de serviços técnicos;
- d) já considerando que um novo método de dimensionamento deve se originar sob uma estratégia concreta de melhoramento contínuo, o mesmo deve utilizar diversos recursos que possam ser agregados ao processo, tais como os dados de tráfego do PNCT e de clima das estações meteorológicas do INMET, bem como os modelos mais avançados e viáveis de serem usados nacionalmente neste momento;

- e) o CAP 3D-D se configura como uma boa opção de programa de dimensionamento de pavimentos asfálticos, tendo como características a acurácia e a rapidez nas análises realizadas, fácil interação com o usuário, além da incorporação do modelo S-VECD no seu escopo. Contudo, entende-se que outros programas possam realizar a mesma tarefa e que, uma vez respeitados os passos bem delineados de um método mecanístico-empírico, o software específico a ser usado num projeto de pavimentação não precisa ser restritivo. É salutar, todavia, que os diversos programas que vierem a surgir sejam devidamente validados frente ao banco de dados hoje existente no país e que possui esse relevante papel de calibração e validação de modelos;
- f) Por fim, acredita-se que a particularização dos bancos de dados para a elaboração de funções de transferência de área trincada regionais possibilitará melhoria da previsão de área trincada. Isso devido ao fato de que os materiais, as condições climáticas e de tráfego numa perspectiva mais local (estadual ou regional) se aproximarão mais da realidade do que tratar localidades tão distintas sob uma perspectiva nacional, ainda mais num país com as dimensões do Brasil. Sugere-se, portanto, que sejam fortalecidas ações de pesquisa estaduais ou regionais para a construção de funções de transferência a partir de bancos de dados locais e suficientemente robustos.

### **6.3 Recomendações para trabalhos futuros**

Algumas dos objetivos que se almejava alcançar quando se inicia uma pesquisa como esta, que envolve aspectos diversos da pavimentação, não são necessariamente atingidas. Seguem então recomendações para trabalhos futuros:

- a) acrescentar ao banco de dados nacional de monitoramento de trechos experimentais, o SRTA, dados de outros trechos experimentais localizados em diversos outros estados do Brasil, aumentando a robustez do mesmo;
- b) realizar novos processos de calibração e validação da função de transferência de previsão de percentual de área trincada, à medida que forem sendo acrescentados mais informações ao banco de dados dos trechos experimentais monitorados, de modo que a sua utilização permita um dimensionamento de

pavimentos cada vez mais coerente com o comportamento normalmente registrado em campo;

- c) realizar estudos que verifiquem o efeito das diferentes condições de aderência, entre as camadas do pavimento, nos resultados da análise estrutural do CAP 3D-D;
- d) incorporar ao CAP 3D-D rotinas que permitam a previsão de outros defeitos característicos de pavimentos asfálticos, tais como deformação permanente em camadas granulares e nos revestimentos asfálticos;
- e) desenvolver, para os mesmos trechos utilizados no âmbito desta pesquisa, valores admissíveis ou funções de transferência para parâmetros funcionais, tais como microtextura e macrotextura;
- f) desenvolver um guia completo de um método de dimensionamento nacional. Nele devem estar listados os procedimentos e normas necessários aos ensaios de laboratório e de campo. Nesse guia também deve constar os estágios de implantação do método, bem como a periodicidade das revisões pelas quais ele deve passar.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice**. Estados Unidos da America, 2008.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 107: Method of test for determining the damage characteristic curve of asphalt mixtures from direct tension cyclic fatigue tests**. Estados Unidos da América, 2014.

ADVAMEG. **Average climate in Ottawa, Illinois**. Advameg, Inc. Estados Unidos da América, 2014. Disponível em: <<http://www.city-data.com/city/Ottawa-Illinois.html>>. Acesso em: 23 jan. 2014.

ALBITRES C. M. C. *et al.* Aplicabilidade del Método Mecanístico-Empírico de Diseño de Pavimentos (MEPDG) AASHTO 2008 en Latinoamérica. *In: XVII CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO*, 17., 2013, Guatemala, México. **Anais [...]**. Guatemala, México: CILA, 2013. Disponível em: <<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/808>>. Acesso em: 03 jul. 2014.

AUSTROADS. **Guide to Pavement Technology – Part 2: Pavement Structural Design**. Sydney: Austroads, 2012.

BABADOPULOS, L. F. A. L. *et al.* Aplicação de análogos mecânicos para representar o comportamento viscoelástico linear de misturas asfálticas e interpretar sua influência no módulo de resiliência. *In: XVII CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO*, 17., 2013, Guatemala, México. **Anais [...]**. Guatemala, México: CILA, 2013. CD-ROM.

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**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 85-94, 2015. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/898/549>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

BARRA, B, *et al.* Metodologia francesa para o dimensionamento de estruturas de pavimentos de concreto asfáltico. **Revista Pavimentação**, Rio de Janeiro, v. 17, p. 10-26, 2010.

BENEVIDES, S. A. S. **Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Estado do Ceará**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

BERNUCCI, L. B. *et al.* Estudo Comparativo de Bases de Pavimentos por meio de Trechos Monitorados: Efeito da Adição de Cimento. *In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (ABPV)*, 40., 2010, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro: RPAV, 2010. CD-ROM.

BOCK, A. L. **Monitoramento de Desempenho de Pavimentos Flexíveis como parte integrante para o Desenvolvimento e Validação de um Novo Método Racional de Dimensionamento Brasileiro**. 2014. Qualificação de Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BORGES, R. L. **Deformação Permanente em Misturas Asfálticas a partir do Shift Model Viscoplastico e Ensaio Triaxiais de Carga Repetida**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

CHOI, Y. T.; KIM, Y. R. Implementation and Verification of a Mechanistic Permanent Deformation Model (Shift Model) to Predict Rut Depths of Asphalt Pavement. **Road Materials and Pavement Design**, Estados Unidos da América, v. 15, n. 1, p. 195-218, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Plano CNT de Transportes e Logística 2014**. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/Plano-CNT-de-Log%20%C3%ADstica.aspx>>. Acesso em: 30 abr. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de Rodovias 2016: Relatório Gerencial**. Brasília, 2016a. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso em: 09 nov. 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Anuário CNT do Transporte 2016: Estatísticas consolidadas**. Brasília, 2016b. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/#>>. Acesso em: 20 out. 2016.

DAROUS, J. **Estudo comparativo entre sistemas de cálculo de tensões e deformações utilizado em dimensionamento de pavimentos asfálticos novos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DIOGO, J. F. R.; SHUBBER, A.M.; LIN, M. H. Design Methodologies of asphalt Pavement Used in China and Mozambique. **Journal of Applied Sciences**, Paquistão, v. 7, n. 9, p. 1333-1338, 2007. Disponível em: <<https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2007.1333.1338>>. Acesso em: 01 jun. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 1998. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual%20de%20Reabilita%20E7%20de%20Pavimentos%20Asf%20E1lticos.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Reabilita%20E7%20de%20Pavimentos%20Asf%20E1lticos.pdf)>. Acesso em: 20 mai. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Publicação IPR 719: Manual de Pavimentação Rodoviária**. Rio de Janeiro, 2006a. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual\\_de\\_Pavimentacao\\_Versao\\_Final.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf)>. Acesso em: 20 mai. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Publicação IPR 723 - Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro, 2006b. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/723\\_manual\\_estudos\\_trafego.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/723_manual_estudos_trafego.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Plano Nacional de Contagem de Tráfego: Resultados preliminares**. Primeiro Seminário PNCT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, 2014. Disponível em: <<https://189.9.128.64/download/planejamento-e-pesquisa/planejamento/contagem-de-trafego/resultados-do-sistema-pnct-heider-augusto-da-silva-gomes-08.10.2014.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

DODT, L. S. S.; SOARES, J. B.; BARROSO, S. H. A. Contribuições para o Desenvolvimento de um Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos a partir da Utilização de Ensaios Acelerados e Pistas Experimentais. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 26., 2012, Joinville. **Anais** [...] Joinville: ANPET, 2012. CD-ROM.

EL-BADAWY, S. ITD, AASHTO, and MEPDG Pavement Design Methods – A comparison. *In*: IDAHO ASPHALT CONFERENCE, 51., 2011, Moscow, Idaho, Estados Unidos da América. **Palestras** [...] Moscow, Idaho, Estados Unidos da América: Department of Civil, Engineering University of Idaho, 2011. Disponível em: <[http://www.webpages.uidaho.edu/bayomy/IAC/51st/Presentations\\_51st/3.%20ITD-AASHTO-MEPDG\\_El-Badawy.pdf](http://www.webpages.uidaho.edu/bayomy/IAC/51st/Presentations_51st/3.%20ITD-AASHTO-MEPDG_El-Badawy.pdf)>. Acesso em: 14 de abr. 2015.

ESLAMINIA, M. *et al.* Accelerated Pavement Performance Modeling Using Layered Viscoelastic Analysis. *In*: RILEM INTERNATIONAL CONFERENCE ON CRACKING IN PAVEMENTS: MECHANISMS, MODELING, TESTING, DETECTION AND PREVENTION CASE HISTORIES, 7., v. 4. 2012, Delft, Holanda. **Anais** [...] Delft, Holanda: RILEM Bookseries, 2012. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-007-4566-7\\_48?LI=true](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-007-4566-7_48?LI=true)>. Acesso em: 14 de mai. 2015.

FONTENELE, H. B. **Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 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 Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GAETE, P. R.; THENOUX Z, G. Analisis Mecanicista de Estructuras de Pavimentos Utilizadas em Chile Diseñadas por el Metodo AASHTO-93. **Revista Ingeniería de Construcción (RIC)**, v. 19, p. 36-48, 1999. Disponível em: <<http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/388/327>>. Acesso em: 25 mai. 2015.

GIOVANON, O.; PAGOLA, M. Modelo Mecanicista Empírico para Análisis de Pavimentos Flexibles Desarrollado en Argentina. *In: XVII CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO*, 17., 2013, Guatemala, México. **Anais [...]**. Guatemala, México: CILA, 2013. CD-ROM.

GOUVEIA, B. C. S. **Validação de modelos de previsão de módulo dinâmico para misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

HAAS, R. Reinventing the (Pavement Management) Wheel. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGING PAVEMENTS*, 6., 2001, Seattle, Estados Unidos da América. **Anais [...]**. Seattle, Estados Unidos da América: University of Washington, 2001. CD-ROM.

HOLANDA, A. S. *et al.* Finite Element Modeling of Flexible Pavements. *In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING*, 27., 2006, Belém. **Anais [...]**. Belém: CILAMCE, 2006. CD-ROM.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Organização do Território: Estrutura Territorial – Área dos Municípios**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm>>. Acesso em: 21 out. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

KALOUSH, K. E.; RODEZNO, M. C. **Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) para a Concessionária Nova Dutra**. Arizona State University. Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2011.

KERTÉSZ, I.; LOVAS, T.; BARSÍ, A. Photogrammetric pavement detection system. *In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING*, 21., 2008, Beijing, China. **Anais [...]**. Beijing, China: IAPRS, 2008. Disponível em: <[https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/5\\_pdf/156.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/5_pdf/156.pdf)>. Acesso em: 04 mar. 2017.

KIM, Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete**. American society of Civil Engineers. Estados Unidos da América: Mc Graw Hill Construction, 2009.

LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO. **Estudo de Desempenho de Pavimento Experimental com objetivo de validar método racional de dimensionamento de Pavimentos flexíveis**. Projeto de Pesquisa Concepa - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2011.

LEMAITRE, J. **A Course on Damage Mechanics**. 2. ed. Estados Unidos da América: Springer, 1996.

LIZCANO, F. A. R. Diseño de pavimentos flexibles por metodologia Racional. *In*: SIMPOSIO COLOMBIANO SOBRE INGENIERÍA DE PAVIMENTOS, 14., Popayán, Colômbia, 2003. **Anais [...]**. Popayán, Colômbia: Universidad del Cauca, 2003. Disponível em: <[http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/7cma\\_2011/34.pdf](http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/7cma_2011/34.pdf)>. Acesso em: 24 mai. 2015.

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS PAVIMENTOS. **CAP 3D** [Mensagem pessoal]. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017. Mensagem recebida por lucimar@det.ufc.br em 24 mai. 2017.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS - A implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Inter Ciência, 2015. ISBN: 9788571933668.

MOTTA, L. M. G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

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: IBP, 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 Materiais de Transportes) - North Carolina State University, Raleigh, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H. **Apresentação realizada no Departamento de Engenharia de Transportes**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2016.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report. Part 3: Design Analysis**. National Research Council, Transportation Research Board. Estados Unidos da América, 2004.

NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. **Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses: LVECD 1.0 Beta (User Guide)**. Raleigh, 2014.

NORDCBECK, A. V. *et al.* Calibración del Ensayo de Módulo Dinámico, Mediante Ensayos Interlaboratoriales y los Modelos de la Guía Mecánico-Empírica de la Aashto en Costa Rica. *In: XVII CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO*, 17., 2013, Guatemala, México. **Anais** [...]. Guatemala, México: CILA, 2013. CD-ROM.

PETROBRAS. **Sistema da Rede Temática de Asfalto**. Petrobras SA. 2013. Disponível em: <<http://srta.petrobras.com.br/SRTAWeb/index.jsf>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

PREGO, A. S. S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

QUINTANA, R. *et al.* Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones. **Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, Bogotá, Colômbia, v. 17, n. 2, p. 41-65, 2007. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91117204>>. Acesso em: 25 mai. 2015.

REDE TEMÁTICA DE TECNOLOGIA EM ASFALTO. **Manual de Execução de Trechos Monitorados**. Rio de Janeiro: Petrobras SA., 2010.

REDE TEMÁTICA DE TECNOLOGIA EM ASFALTO. **Desenvolvimento de um Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos – SDIMPA (Sistema de Dimensionamento de Pavimento Asfáltico)**. Rio de Janeiro: Petrobras SA., 2012.

RIVERA, C. C. **Revisión de los métodos de diseño de pavimentos flexibles “AASHTO93” y el “Modelo elastico lineal (KENLAYER)”, mediante el modelo viscoelástico propuesto por la “MEPDG NCHRP 1-37A (3D-MOVE)**. Tese (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Sistemas de Transportes) – Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Medellín-CO, 2014.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do Trincamento dos Pavimentos**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

SALAZAR, L. G. L. Desarrollo de la Guia de Diseno de Pavimentos de Costa Rica: CR\_ME. *In: XVII CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO*, 17., 2013, Guatemala, México. **Anais** [...]. Guatemala, México: CILA, 2013. CD-ROM.

SANTIAGO, L. S. **Interfaces entre Desenvolvimento, Políticas de Agronegócio e Políticas de Transportes: O Caso da Região da Ibiapaba no Estado do Ceará**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SCHEFFY, C.; COETZEE, N.; DIAZ, E. Asphalt Concrete Fatigue Crack Monitoring and Analysis Using Digital Image Analysis Techniques. *In: ACCELERATED PAVEMENT TESTING INTERNATIONAL CONFERENCE*, 1., 1999, Reno, Estados Unidos da América. **Anais** [...]. Reno, Estados Unidos da América: APT, 1999. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.61.4478&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 04 mar. 2017.

SHAH, S. P.; SWARTZ, S. E.; OUYANG, C. **Fracture Mechanics of Concrete: Applications of fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials**. Nova York - EUA: Wiley-Interscience, 1995.

SHAHIN, M. Y. **Pavement Managementm for Airports, Roads, and Parking Lots. Second Edition**. 2. ed. Nova York – EUA: Ed. Springer Science + Business Media, 2006.

SOARES, J. B.; MORENO, A. M.; MOTTA, L. M. G. Aspectos gerais de Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro. **Revista Pavimentação**, Rio de Janeiro, v. 17, p. 20-35, 2009.

SOUZA, M. L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis: Public. IPR 667**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias Departamento-Nacional de Estradas de Rodagem, 1981.

TANCO, A.; RICO, M.; BRUFMAN, D. Influencia del Clima en la Predicción de la Performance de Pavimentos Flexibles rehabilitados Según la MEPDG 2002. *In: XVII CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO*, 17., 2013, Guatemala, México. **Anais [...]**. Guatemala, México: CILA, 2013. CD-ROM.

TORQUATO E SILVA, S. A. *et al.* Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos utilizando elementos finitos e infinitos. **Revista Transportes**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 5-13, 2013. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/viewFile/676/483>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

TORRICO, O. R.; TORRICO, C. O. R. Calibración de los Modelos de Fisuración Tipo Piel de Cocodrilo y Ahuellamiento de la Guía AASHTO MEPDG para las Condiciones del Altiplano Boliviano. *In: XVII CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO*, 17., 2013, Guatemala, México. **Anais [...]**. Guatemala, México: CILA, 2013. CD-ROM.

UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C. M.; KIM, Y. R. Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. **Journal of the Transportation Research Board**, Estados Unidos da América, v. 2296, p. 36-45, 2012.

VASCONCELOS, K. L. *et al.* Estudo Laboratorial e de Campo de Revestimentos Asfálticos Preparados com Ligantes de Diferente Consistência. *In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA*, 17., 2011, Porto Alegre. **Anais [...]** Porto Alegre: ABPV, 2011.

WITCZAK, M. W. Should Latin America Develop Their Own LAMPA- Latin American Mechanistic Pavement Analysis Procedure? Palestra: Introdução e Calibragem do Novo Guia de Projeto de Pavimentos Empírico-mecanicista AASHTO-MEPDG. *In: CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO*, 16., 2011, Rio de Janeiro. **Palestras [...]**. Rio de Janeiro: CILA, 2011. CD-ROM.

YÁÑEZ, R. *et al.* Ensayes de Módulo Resiliente en Materiales no Ligados en el Contexto de la Guía de Diseño Interina AASHTO 2008. *In: XVII CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO*, 17., 2013, Guatemala, México. **Anais [...]**. Guatemala, México: CILA, 2013. CD-ROM.

ZHANG, X. Design Procedure of Asphalt Concrete Pavements in China: Current Issues and Future Development. **International Journal of Pavement Research and Technology**, China, v. 2, n. 3, p. 4-4, 2009.

ZHENG, J. Design Guide for Semirigid Pavements in China Based on Critical State of Asphalt Mixture. **Journal of Materials in Civil Engineering - ASCE**, Estados Unidos da América, v. 25, n. 7, p. 899-906, 2013.

## APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO APLICADO AS SR's DO DNIT E DER's

### Mapeamento da Infraestrutura Física e de Recursos Humanos dos Órgãos Rodoviários Nacionais

– Dados do Entrevistado			
Órgão:		Cidade:	Estado:
Nome:		Função:	
E-mail:		Telefone:	( )

#### Breve explicação sobre a pesquisa

Pretende-se no âmbito desta pesquisa realizar um mapeamento da infraestrutura e de recursos humanos das Superintendências Regionais (SR) do DNIT. Garantimos o sigilo da sua identidade. Ao final da pesquisa enviaremos os principais dados obtidos com as informações coletadas. Desde já agradecemos sua atenção e colaboração.

#### Instruções de preenchimento

Este questionário é constituído por 19 perguntas. Com exceção da última, em que o entrevistado é livre para colocar sua opinião sobre o tema, as demais são múltipla escolha, devendo a resposta se adequar a realidade no órgão. O tempo de preenchimento é estimado em menos de 10 minutos.

ITEM	PERGUNTA	RESPOSTA
<b>Recursos Humanos</b>		
1	Quantos engenheiros existem no Serviço de Projetos da sua SR?	<input type="checkbox"/> De zero a 3 <input type="checkbox"/> De 4 a 6 <input type="checkbox"/> De 7 a 9 <input type="checkbox"/> De 10 a 12 <input type="checkbox"/> Mais de 12
2	Quantos laboratoristas, com conhecimentos em ensaios de pavimentação, existem na sua SR?	<input type="checkbox"/> Nenhum <input type="checkbox"/> De um a 3 <input type="checkbox"/> De 4 a 6 <input type="checkbox"/> De 7 a 9 <input type="checkbox"/> 10 ou mais
<b>Infraestrutura Disponível</b>		
3	Existe laboratório de pavimentação na sua SR?	<input type="checkbox"/> Sim, está em total funcionamento <input type="checkbox"/> Sim, funciona parcialmente <input type="checkbox"/> Sim, contudo não funciona <input type="checkbox"/> Não

4	<p>Marque, na lista ao lado, os ensaios laboratoriais convencionais em <u>solos</u> que podem ser realizados na sua SR:</p> <p><i>Obs: Mais de um item pode ser marcado.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Determinação da massa específica aparente</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação da umidade de solos e agregados miúdos</li> <li><input type="checkbox"/> Análise granulométrica por peneiramento</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação do limite de plasticidade</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação do limite de liquidez</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação da densidade real</li> <li><input type="checkbox"/> Compactação utilizando amostras não trabalhadas</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas</li> <li><input type="checkbox"/> Preparação de amostras de solos para ensaios de caracterização</li> <li><input type="checkbox"/> Nenhum dos ensaios citados</li> </ul>
5	<p>Marque, na lista ao lado, os ensaios laboratoriais convencionais relacionados a <u>misturas asfálticas</u> que podem ser realizados na sua SR:</p> <p><i>Obs: Mais de um item pode ser marcado.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Viscosidade do ligante asfáltico</li> <li><input type="checkbox"/> Análise granulométrica de agregados</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação do abrasão “Los Angeles”</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação da densidade real de agregados miúdos</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação da massa específica real de agregados finos</li> <li><input type="checkbox"/> Dosagem Marshall de misturas asfálticas</li> <li><input type="checkbox"/> Dosagem Superpave de misturas asfálticas</li> <li><input type="checkbox"/> Ensaio Marshall em misturas betuminosas à quente</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação de % de betume de misturas betuminosas (rotarex)</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação de % de betume utilizando o extrator Soxlet</li> <li><input type="checkbox"/> Determinação do Volume de Vazios (%) de corpos de prova</li> <li><input type="checkbox"/> Nenhum dos ensaios citados</li> </ul>
6	<p>Marque, na lista ao lado, os ensaios de <u>caracterização mecânica avançada</u> que podem ser realizados na sua SR:</p> <p><i>Obs: Mais de um item pode ser marcado.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Ensaio reológico em ligantes</li> <li><input type="checkbox"/> Resistência à tração estática de misturas asfálticas</li> <li><input type="checkbox"/> Módulo de resiliência em misturas asfálticas</li> <li><input type="checkbox"/> Módulo complexo de misturas asfálticas</li> <li><input type="checkbox"/> Vida de Fadiga em misturas asfálticas</li> <li><input type="checkbox"/> Creep dinâmico (uniaxial de carga repetida) – Def. permanente em misturas asfálticas</li> <li><input type="checkbox"/> Def. permanente de misturas asfálticas em simulador de tráfego laboratorial</li> <li><input type="checkbox"/> Módulo de resiliência em solos</li> <li><input type="checkbox"/> Deformação permanente em solos</li> <li><input type="checkbox"/> Desgaste Cântabro</li> <li><input type="checkbox"/> Perda por umidade induzida</li> <li><input type="checkbox"/> Nenhum dos ensaios citados</li> </ul>

7	<p>Marque, na lista ao lado, os ensaios de <u>campo</u> que podem ser realizados na sua SR:</p> <p><i>Obs: Mais de um item pode ser marcado.</i></p>	<input type="checkbox"/> Determinação de área trincada <input type="checkbox"/> Determinação de deflexão no pavimento por meio de treliça <input type="checkbox"/> Determinação de deflexão no pavimento por meio de equipamento móvel (Viga ou FWD) <input type="checkbox"/> Microtextura do pavimento <input type="checkbox"/> Macrotextura do pavimento <input type="checkbox"/> Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) <input type="checkbox"/> Nenhum dos ensaios citados
<b>Projetos atuais de Pavimentação Rodoviária</b>		
8	<p>Como se dá o acompanhamento da evolução do tráfego (quantidade de veículos/ carga) nas vias monitoradas por sua SR?</p>	<input type="checkbox"/> Pesquisas com utilização de contadores manuais, sem a determinação direta da carga <input type="checkbox"/> Pesquisas com a utilização por meio de postos de pesagem <input type="checkbox"/> Pesquisas com a utilização da tecnologia <i>Weigh in Motion</i> (equipamentos que utilizam laços magnéticos para determinação do peso, velocidade e temperatura dos veículos) <input type="checkbox"/> Outro: _____
9	<p>Qual a frequência de acompanhamento da evolução do tráfego nas vias monitoradas por sua SR?</p>	<input type="checkbox"/> Anual <input type="checkbox"/> Em intervalos de até 5 anos <input type="checkbox"/> Em intervalos de até 10 anos <input type="checkbox"/> Não são realizados acompanhamentos frequentes <input type="checkbox"/> Só são realizados levantamentos de tráfego quando da implantação de uma nova via ou de uma restauração
10	<p>Quantos quilômetros de rodovias, <u>aproximadamente</u>, foram objeto de projetos de implantação/ pavimentação/ duplicação/ melhoramentos/ restauração (exceto CREMA) na jurisdição da sua SR, nos últimos 5 (cinco) anos?</p>	<p style="text-align: center;">_____ km, aproximadamente.</p>
11	<p>Os projetos de implantação/ pavimentação na sua SR são elaborados por:</p>	<input type="checkbox"/> Engenheiros do Serviço de Projetos da sua SR <input type="checkbox"/> Engenheiros do Serviço de Projetos da sede federal <input type="checkbox"/> Empresa consultora privada, contratada por meio de licitação para cada projeto em específico <input type="checkbox"/> Empresa consultora privada, contratada por meio de licitação para todos os projetos que ocorrem dentro de um período específico (2 anos, por exemplo)
12	<p>Caso os projetos de pavimentos sejam elaborados fora da sua SR, como se dá a interação com a executora do projeto?</p>	<input type="checkbox"/> Não ocorre interação. Eles elaboram o projeto completamente, fazem os ensaios e tomam as decisões técnicas necessárias <input type="checkbox"/> A interação é parcial. No meio do projeto avaliamos os resultados dos ensaios e indicamos os caminhos a serem seguidos <input type="checkbox"/> A interação é parcial. No fim do projeto podemos aprova-lo ou não <input type="checkbox"/> Ocorre interação durante todo o processo de elaboração do projeto <input type="checkbox"/> Outra (especifique): _____

<b>Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos</b>		
<b>13</b>	Você tem conhecimento do desenvolvimento de um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional?	<input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Sim, já ouvi falar, mas se me perguntarem não saberia explicar <input type="checkbox"/> Sim, conheço parcialmente o desenvolvimento, mas não detalhes <input type="checkbox"/> Sim, tenho plenos conhecimentos
<b>14</b>	Se respondeu <u>SIM</u> a pergunta anterior, a informação que obteve sobre o novo método foi obtida através:	<input type="checkbox"/> De uma conversa na SR onde trabalho <input type="checkbox"/> De uma palestra para os funcionários na SR onde trabalho <input type="checkbox"/> De divulgação no Serviço de Projeto na SR onde trabalho <input type="checkbox"/> De uma palestra, workshop, congresso ou evento externo <input type="checkbox"/> Outro (especifique): _____
<b>15</b>	Está claro para você a diferença entre um método de dimensionamento de pavimentos <u>empírico</u> e um método de dimensionamento <u>mecanístico-empírico</u> ?	<input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Sim, já ouvi falar, mas se me perguntarem não saberia explicar <input type="checkbox"/> Sim, poderia explicar de uma maneira geral, mas não em detalhes <input type="checkbox"/> Sim, conheço plenamente a diferença entre esses dois métodos <input type="checkbox"/> Sim, além de conhecer plenamente a diferença entre esses dois métodos, ainda saberia utilizar o mecanístico-empírico
<b>16</b>	Foi oferecida alguma capacitação pelo seu órgão no que se refere a métodos de dimensionamento de pavimentos mecanístico-empírico e sua utilização?	<input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Sim, mas apenas os coordenadores participaram <input type="checkbox"/> Sim, mas não pude participar <input type="checkbox"/> Sim, mas a explanação não foi clara <input type="checkbox"/> Sim, a capacitação foi completa e já tenho como utilizar este método na minha atuação profissional
<b>17</b>	Que incrementos você consideraria necessárias no setor de projetos do seu órgão, com relação a recursos humanos, caso o novo método dimensionamento de pavimentos asfálticos seja implementado num futuro breve?	<input type="checkbox"/> Nenhum engenheiro <input type="checkbox"/> Um engenheiro <input type="checkbox"/> Pelo menos 2 engenheiros <input type="checkbox"/> Entre 3 e 5 engenheiros <input type="checkbox"/> Mais de 5 engenheiros <input type="checkbox"/> Não consigo dimensionar essa demanda
<b>18</b>	Em quanto tempo você considera que a sua SR estará preparada para a mudança de um método de dimensionamento empírico (Murillo Lopes de Sousa) para um método mecanístico-empírico (que faz uso de análise estrutural, modelos de desempenho e necessita de dados de tráfego e clima):	<input type="checkbox"/> Em menos de um ano <input type="checkbox"/> No mínimo em um ano <input type="checkbox"/> No mínimo em 2 anos <input type="checkbox"/> No mínimo em 5 anos <input type="checkbox"/> Em mais de 5 anos <input type="checkbox"/> A implantação de um novo método depende da elaboração e aprovação de novas normas, sendo assim, é difícil determinar um tempo de implantação <input type="checkbox"/> Não tenho conhecimentos técnicos para responder a esta pergunta

**19.** Caso queira, utilize este espaço para acrescentar alguma informação que considere relevante a temática aqui abordada.

Agradecemos a sua atenção e disponibilidade em nos responder.

Profa. Lucimar da Silva Santiago (lucimar@det.ufc.br)

Prof. Jorge Barbosa Soares (jsoares@det.ufc.br)

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes

Departamento de Engenharia de Transportes

Universidade Federal do Ceará

Telefone: (85) 3366-9488

### ANEXO A – TELAS INTERFACE DO PROGRAMA FlexPAVETM 1.0 (LVECD)

Figura A.1 - Tela de inserção das informações gerais

**General Information** ✕

**Pavement Type**

- New Pavement
- AC-on-AC overlay Rehabilitation

**Pavement Location**

Latitude:

Longitude:

**Traffic**

- Design Vehicle
- Traffic Spectrum

**Analysis Options**

- Pavement Response Analysis
- Pavement Performance Analysis

**Fatigue Options**

- Fatigue Cracking
- Thermal Stress
- Healing
- Aging

**Rutting Options**

- Rutting

**Pavement Construction Timeline**

Pavement Construction Date:

Traffic Opening Date:

Pavement Design Life (years):

**Optional Description**

Project Name	
Author	
City/State	
Date	
Note	

Fonte: North Carolina State University (2014).

Figura A.2 - Tela de inserção da estrutura de camadas do pavimento

General Information ×
Design Structure ×
Climate Information ×

**Structure General Information**

Structure Name

Pavement/Lane Width (m)



AC (Click to Edit Layer)

Base (Click to Edit Layer)

Subgrade (Click to Edit Layer)

**Layer Properties**

Layer

Thickness (cm)   Infinite Layer

Material Type

Specific Gravity (optional)  Expansion Co. (1/C)

**Strength/Modulus**

Poisson's Ratio	0.3000	Alpha	Fatigue	Beta	Rutting		Rutting
Einf (KPa)	9.7300e+04	a	4	Epsilon0	0.8026	p1	0.6069
Ref. Temp. (C)	5	b	0.0017	NI	0.0052	p2	0.0719
Shift Factor a1	6.9619e-04	Initial C	0.5449	TR(C)	0.8024	d1	0.0396
Shift Factor a2	-0.1620	Gamma	0.8000		61	d2	1.6831
Shift Factor a3	0.7928	Delta	100000000			d3	-1.1721
			-1.4000				

	Ti (sec)	Ei (KPa)	
1	<input type="checkbox"/> 2.0000e+16	757.4885	+ -
2	<input type="checkbox"/> 2.0000e+15	97.6079	-
3	<input type="checkbox"/> 2.0000e+14	267.7187	
4	<input type="checkbox"/> 2.0000e+13	366.0952	
5	<input type="checkbox"/> 2.0000e+12	686.5036	
6	<input type="checkbox"/> 2.0000e+11	1.2298e+03	
7	<input type="checkbox"/> 2.0000e+10	2.2287e+03	
8	<input type="checkbox"/> 2.0000e+09	4.0690e+03	...

Fonte: North Carolina State University (2014).

## ANEXO B – TEMPERATURAS UTILIZADAS NAS ANÁLISES DE DANO

Os dados de temperatura aqui expostos são um resumo dos dados coletados nas Normais Climatológica 1961 a 1990 (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2017).

1 – Trechos da Ilha do Fundão (Rio de Janeiro/RJ) - Estação: São Bento (Duque de Caxias)/RJ

<b>Temperatura</b>	<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>	<b>Abril</b>	<b>Mai</b>	<b>Junho</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	21,7	22,0	21,2	19,3	16,8	15,4
08:00 as 16:00 (máxima)	32,4	32,7	32,0	29,2	27,6	26,6
16:00 as 24:00 (média)	26,2	26,4	25,7	23,4	21,2	20,0

<b>Temperatura</b>	<b>Julho</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>	<b>Outubro</b>	<b>Novembro</b>	<b>Dezembro</b>	<b>Ano</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	14,8	15,7	17,3	18,8	19,7	21,0	18,6
08:00 as 16:00 (máxima)	26,4	27,5	27,7	28,3	29,3	31,1	29,2
16:00 as 24:00 (média)	19,5	20,7	21,8	22,9	23,9	25,3	23,1

2 – Trechos Nova Dutra (Aparecida/SP) - Estação: Taubaté/SP

<b>Temperatura</b>	<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>	<b>Abril</b>	<b>Mai</b>	<b>Junho</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	18,8	19,1	18,5	16,2	13,0	11,1
08:00 as 16:00 (máxima)	30,2	30,5	29,9	27,8	25,4	24,6
16:00 as 24:00 (média)	23,3	23,5	22,9	20,8	18,1	16,7

<b>Temperatura</b>	<b>Julho</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>	<b>Outubro</b>	<b>Novembro</b>	<b>Dezembro</b>	<b>Ano</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	10,7	12,2	14,5	16,1	17,0	18,4	15,5
08:00 as 16:00 (máxima)	24,4	26,4	27,6	27,5	28,7	29,1	27,7
16:00 as 24:00 (média)	16,4	18,2	20,0	20,7	21,7	22,7	20,4

3 – Trechos USP (Ribeirão Preto/SP) - Estação: Franca/SP

<b>Temperatura</b>	<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>	<b>Abril</b>	<b>Mai</b>	<b>Junho</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	17,7	17,8	17,8	16,1	14,2	12,9
08:00 as 16:00 (máxima)	27,0	27,1	27,6	26,5	24,8	23,9
16:00 as 24:00 (média)	21,7	22,0	22,0	21,0	19,0	17,8

<b>Temperatura</b>	<b>Julho</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>	<b>Outubro</b>	<b>Novembro</b>	<b>Dezembro</b>	<b>Ano</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	12,6	14,0	15,7	16,4	16,9	17,1	15,8
08:00 as 16:00 (máxima)	24,0	26,4	27,5	27,1	26,9	26,4	26,3
16:00 as 24:00 (média)	17,7	19,7	20,7	21,2	21,5	21,3	20,5

## 4 – Trecho UFSM (Santa Maria/RS) - Estação: Santa Maria/RS

<b>Temperatura</b>	<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>	<b>Abril</b>	<b>Mai</b>	<b>Junho</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	19,1	19,5	17,9	14,5	11,8	9,3
08:00 as 16:00 (máxima)	30,4	30,0	28,2	25,0	22,1	19,2
16:00 as 24:00 (média)	24,2	23,9	21,9	18,4	15,9	13,9

<b>Temperatura</b>	<b>Julho</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>	<b>Outubro</b>	<b>Novembro</b>	<b>Dezembro</b>	<b>Ano</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	9,5	10,4	11,3	13,5	15,9	18,3	14,3
08:00 as 16:00 (máxima)	19,6	20,3	22,5	24,8	27,3	29,5	24,9
16:00 as 24:00 (média)	14,1	14,2	16,5	18,6	21,0	23,3	18,8

## 5 – Trecho UFRGS (Porto Alegre/RS) - Estação: Porto Alegre/RS

<b>Temperatura</b>	<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>	<b>Abril</b>	<b>Mai</b>	<b>Junho</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	20,5	20,8	19,3	16,3	13,0	10,7
08:00 as 16:00 (máxima)	30,2	30,1	28,3	25,2	22,1	19,4
16:00 as 24:00 (média)	24,6	24,6	23,1	19,9	16,9	14,3

<b>Temperatura</b>	<b>Julho</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>	<b>Outubro</b>	<b>Novembro</b>	<b>Dezembro</b>	<b>Ano</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	10,7	11,5	13,1	15,0	17,0	18,9	15,6
08:00 as 16:00 (máxima)	20,3	20,4	21,8	24,4	26,7	29,0	24,8
16:00 as 24:00 (média)	14,4	15,2	16,8	19,1	21,2	23,3	19,5

## 6 – Trechos UFSC (Araranguá/SC) - Estação: Araranguá/SC

<b>Temperatura</b>	<b>Janeiro</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>Março</b>	<b>Abril</b>	<b>Mai</b>	<b>Junho</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	19,3	19,7	18,4	15,0	12,2	10,0
08:00 as 16:00 (máxima)	29,0	28,9	27,7	25,6	23,8	21,8
16:00 as 24:00 (média)	24,0	24,1	22,8	20,2	17,8	15,6

<b>Temperatura</b>	<b>Julho</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>	<b>Outubro</b>	<b>Novembro</b>	<b>Dezembro</b>	<b>Ano</b>
00:00 as 08:00 (mínima)	9,7	10,9	12,8	14,3	16,3	17,9	14,7
08:00 as 16:00 (máxima)	21,4	21,7	22,2	23,9	25,9	28,0	25,0
16:00 as 24:00 (média)	15,2	16,0	17,4	19,1	21,1	22,9	19,7

## ANEXO C – PROPRIEDADES DE CAMPO E DE LABORATÓRIO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS NESTA PESQUISA

Os dados apresentados neste anexo foram obtidos em Nascimento (2015).

### 1 - Trechos Experimentais da Iha do Fundão

Tabela C.1 – Segmentos homogêneos do pavimentos, sua localização e espessuras das camadas.

Segmentos homogêneos	Estacas de marcação	Espessura, cm		
		Camada asfáltica	Base Granular	Subbase Granular
1	0 to 21	7	23	29
2	63 to 68	11	24	18
3	68 to 89	5	19	19
4	90 to 120	6	16	36
5	126 to 158	6	15	39
6	158 to 236	8	10	25
7	352 to 382	6	15	13
8	391 to 417	6	14	40
9	425 to 450	6	18	40
10	462 to 512	12	38	24
11	513 to 545	10	42	23

Tabela C.2 – Trechos experimentais da Ilha do Fundão utilizados nesta pesquisa

Trecho Experimental	Segmento homogêneo (Tabela C.1)	Espessura da camada de cobertura, mm	Mistura asfáltica
1	3	55	30/45 19,1 mm
4	4	54	30/45 19,1 mm
7	4	59	30/45 19,1 mm
11	5	55	30/45 19,1 mm
19	10	51*	30/45 19,1 mm*
		59**	65/90 19,1 mm**
34	10	58	30/45 19,1 mm
37	8	52	30/45 12,5 mm
40	8	59	30/45 12,5 mm
43	8	50	30/45 12,5 mm
45	8	51	50/70 12,5 mm
46	8	51	30/45 12,5 mm
47	8	50	30/45 12,5 mm

\* camada de topo; \*\* camada de base

Tabela C.3 – Misturas do Grupo 1 (Ilha do Fundão): Curvas mestras (sigmoidal) e coeficientes de ajuste da função Shift factor

Mistura asfáltica	Coeficientes da função sigmoidal, $ E^* $ em MPa				Coeficientes da função polinomial do <i>shift factor</i>		
	$a$	$b$	$d$	$g$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
50/70 12.5 mm	1,1200	3,2900	1,4300	0,6720	0,00049	-0,1420	2,6400
50/70 19.1 mm	1,0800	3,3400	1,4200	0,6640	0,00101	-0,1730	3,0500
30/45 12.5 mm	-0,5960	5,0700	2,0700	0,5030	0,00135	-0,2000	3,4600
30/45 19.1 mm	-0,1850	4,6300	2,1800	0,5450	0,00100	-0,1820	3,2400
65/90 19.1 mm	1,1900	3,2900	0,9130	0,5100	0,00121	-0,1780	3,0800
RA-TB 19.1 mm	0,8890	3,4500	1,2300	0,5920	0,00066	-0,1440	2,6100
Syn 19.1 mm	1,7538	2,5737	1,5320	0,7262	0,0014	-0,2046	3,5221
Bio 19.1 mm	-0,6688	5,1645	2,0589	0,4491	0,0014	-0,2083	3,6192
60/85 9.5 mm	1,1678	3,1696	0,9391	0,5308	0,0011	-0,1765	3,0994
60/85 19.1 mm	1,1310	3,2904	1,2670	0,5247	0,0010	-0,1675	2,9617
Elvaloy 19.1 mm	-1,4326	6,0081	2,1468	0,4093	0,0015	-0,2025	3,4495

Tabela C.4 – Misturas do Grupo 1 (Ilha do Fundão): Expoente da taxa de dano ( $\alpha$ ), Curvas características do dano médio e coeficientes de regressão da falha pelo  $G^R$

Mistura asfáltica	$C$ vs, $S$			$G^R$	
	$\alpha$	$C_{11}$	$C_{12}$	$Y$	$\Delta$
50/70 12.5 mm	2,88	0,000083	0,807	5064581	-1,360
50/70 19.1 mm	2,86	0,000154	0,758	1587412	-1,214
30/45 12.5 mm	2,77	0,000089	0,787	2988891	-1,288
30/45 19.1 mm	2,71	0,000071	0,812	4673062	-1,348
65/90 19.1 mm	3,43	0,001530	0,528	3709564	-1,211
RA-TB 19.1 mm	2,71	0,000907	0,599	6120075	-1,359
Syn 19.1 mm	3,23	0,000626	0,617	20749123	-1,430
Bio 19.1 mm	2,92	0,000148	0,754	4862885	-1,332
60/85 9.5 mm	3,41	0,004997	0,422	13637499	-1,291
60/85 19.1 mm	3,39	0,002140	0,500	24110196	-1,412
Elvaloy 19.1 mm	2,89	0,000083	0,780	4460400	-1,331

Tabela C.5 – %AT medido em campo nos 27 trechos da Ilha do Fundão

TE	Dezembro de 2007	Junho de 2009	Dezembro de 2010	Novembro de 2011	Outubro de 2012	Setembro de 2013
1	0	0,4	5,4	1,9	3,5	15,4
4	7,3	18,7	65,2	61,6	85,5	93,2
7	4,2	87,5	65	37,5	100	100
11	0	0	3,1	6,7	12,8	30
19	0	1,3	6,7	-	0,7	6,7
34	0	0	12,04	-	31,9	41,9
37	0	5,8	45	77,5	83,3	80,8
40	0	0	0	0	0	0
43	0	0	2,5	6,7	10	40
45	0	2,5	30	65,8	65,8	91,7
46	0	0	0,8	0,6	18,9	24,4
47	0	0	0	0	0	0,0
48	0	0	0	0	0	0,3
50	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	8,7	30,4
58	0	0	0	0	2,7	22,7
60	0	0	100	85	51,7	55
63	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0
67	0	1,2	-	9,7	24,4	59,8
70	0	1,3	3,3	1,3	3,3	11,3
73	-	1,1	5,5	4,4	14,1	49,6
75	-	0	0	0	0	0
86	-	-	0	0	0	1,4
88	-	-	0	0	0	3,3
89*	-	-	-	0,3	0,7	8,0
93	-	-	0	0	0	0

\* TE 89: %AT em fevereiro de 2015 = 29.0%.

## 2 - Trechos Experimentais Nacionais

Tabela C.6 – Trechos experimentais nacionais (Grupo 2)

<b>TE</b>	<b>Localização</b>	<b>Espessura da nova camada asfáltica, mm</b>
<b>UFSM 1</b>	Santa Maria, RS	50
<b>UFSM 3</b>	Santa Maria, RS	70
<b>UFRGS 2</b>	Porto Alegre, RS	50
<b>USP 4</b>	Ribeirão Preto, SP	40
<b>USP 5</b>	Ribeirão Preto, SP	40
<b>ND 1</b>	Aparecida do Norte, SP	140
<b>ND 2</b>	Aparecida do Norte, SP	200
<b>ND 3</b>	Aparecida do Norte, SP	140
<b>ND 4</b>	Aparecida do Norte, SP	200
<b>ND 5</b>	Aparecida do Norte, SP	200
<b>ND 6</b>	Aparecida do Norte, SP	200
<b>ND 7</b>	Aparecida do Norte, SP	140
<b>ND 8</b>	Aparecida do Norte, SP	140
<b>ND 9</b>	Aparecida do Norte, SP	200
<b>ND 10</b>	Aparecida do Norte, SP	140
<b>UFSC 2</b>	Araranguá, SC	150
<b>UFSC 3</b>	Araranguá, SC	114 (topo); 56 (base)

Tabela C.7 – Misturas asfálticas usadas nos Trechos experimentais nacionais (Grupo 2)

<b>TE</b>	<b>Ident. Mistura Asfáltica</b>
<b>UFSM 1</b>	UFSM 50/70 2
<b>UFSM 3</b>	UFSM 50/70 1
<b>UFRGS 2</b>	UFRGS 60/85
<b>USP 4</b>	USP 50/70
<b>USP 5</b>	USP 30/45
<b>ND 1</b>	ND 15/25
<b>ND 2</b>	ND 15/25
<b>ND 3</b>	ND 15/25
<b>ND 4</b>	ND 15/25
<b>ND 5</b>	ND HM 1
<b>ND 6</b>	ND HM 1
<b>ND 7</b>	ND HM 1
<b>ND 8</b>	ND HM 2
<b>ND 9</b>	ND HM 2
<b>ND 10</b>	ND HM 2
<b>UFSC 2</b>	UFSC 50/70
<b>UFSC 3</b>	UFSC 50/70 (topo); UFSC RA (base)

Tabela C.8 – Tráfego e data de abertura da via aos tráfego dos trechos experimentais nacionais (Grupo 2)

TE	ESALs (1º ano)	Data de abertura ao tráfego
UFSM 1	4,49E+05	Dezembro de 2012
UFSM 3	8,72E+05	Maio de 2013
UFRGS 2	7,60E+06	Outubro de 2011
USP 4	1,40E+05	Junho de 2010
USP 5	1,40E+05	Junho de 2010
ND 1	2,56E+06	Setembro de 2012
ND 2	2,56E+06	Setembro de 2012
ND 3	2,56E+06	Setembro de 2012
ND 4	2,56E+06	Setembro de 2012
ND 5	2,56E+06	Setembro de 2012
ND 6	2,56E+06	Setembro de 2012
ND 7	2,56E+06	Setembro de 2012
ND 8	2,56E+06	Setembro de 2012
ND 9	2,56E+06	Setembro de 2012
ND 10	2,56E+06	Setembro de 2012
UFSC 2	1,33E+07	Julho de 2013
UFSC 3	1,33E+07	Julho de 2013

Tabela C.9 – %AT medido em campo nos 17 trechos nacionais

TE	% AT				
	Jan 2013	Jun 2013	Jan 2014	Jul 2014	Jan 2015
UFSM 1	0.9	12.7	21.8	22.4	32.9
UFSM 3	Janeiro de 2015				
	0				
UFRGS 2	Novembro de 2014				
	0				
	Maio de 2015				
USP 4	0				
USP 5	0				
ND 1	9,0				
ND 2	3,0				
ND 3	4,8				
ND 4	12,5				
ND 5	19,0				
ND 6	5,9				
ND 7	10,0				
ND 8	0,0				
ND 9	0,0				
ND 10	0,0				
	Julho de 2014				
UFSC 2	20,0*				
UFSC 3	0				

Tabela C.10 – Misturas do Grupo 2 (Trechos Nacionais): Curvas mestras (sigmoidal) e coeficientes de ajuste da função Shift factor

Mistura asfáltica	Coeficientes da função sigmoidal, $ E^* $ em MPa				Coeficientes da função polinomial do <i>shift factor</i>		
	$a$	$b$	$d$	$g$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
<b>UFMS 50/70 1</b>	0,9473	3,3961	1,2626	0,6024	0,0006	-0,1634	3,0193
<b>UFMS 50/70 2</b>	0,9477	3,4774	1,5433	0,5453	0,0010	-0,1882	3,3681
<b>UFRGS 60/85</b>	1,6288	2,7900	0,9925	0,5610	0,0007	-0,1699	3,1054
<b>USP 30/45</b>	0,9514	3,5363	1,4108	0,5410	0,0010	-0,1818	3,2258
<b>USP 50/70</b>	1,0799	3,3309	1,3356	0,5909	0,0005	-0,1498	2,8080
<b>ND 15/25</b>	-3,0617	7,4954	2,8493	0,4483	0,0009	-0,1813	3,2563
<b>ND HM 1</b>	0,3928	4,0538	1,9009	0,4471	0,0013	-0,1901	3,2711
<b>ND HM 2</b>	-0,8328	5,3268	1,9684	0,3855	0,0011	-0,1857	3,2848
<b>UFSC 50/70</b>	0,8186	3,7379	1,1587	0,5515	0,0016	-0,2089	3,5321
<b>UFSC RA</b>	1,2111	3,2826	1,0921	0,4974	0,0010	-0,1711	3,0259

Tabela C.11 – Misturas do Grupo 2 (Trechos Nacionais): Expoente da taxa de dano ( $\alpha$ ), Curvas características do dano médio e coeficientes de regressão da falha pelo  $G^R$

Mistura asfáltica	$C$ vs, $S$			$G^R$	
	$\alpha$	$C_{11}$	$C_{12}$	$Y$	$\Delta$
<b>UFMS 50/70 1</b>	3,01	0,001407	0,543	15151428	-1,409
<b>UFMS 50/70 2</b>	3,20	0,0000037	1,050	34074335	-1,510
<b>UFRGS 60/85</b>	2,60	0,004740	0,431	11476905	-1,293
<b>USP 30/45</b>	3,13	0,000310	0,658	56654128	-1,503
<b>USP 50/70</b>	3,08	0,000627	0,609	20154012	-1,433
<b>ND 15/25</b>	2,91	0,000117	0,774	9770375	-1,445
<b>ND HM 1</b>	3,27	0,000181	0,715	33080398	-1,571
<b>ND HM 2</b>	3,21	0,000205	0,706	26171974	-1,496
<b>UFSC 50/70</b>	3,01	0,000829	0,601	19603064	-1,489
<b>UFSC RA</b>	3,50	0,001005	0,574	36384385	-1,462