



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

JARDEL ANDRADE DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA METODOLOGIA FAD-CI DE SELEÇÃO
GRANULOMÉTRICA NA VIDA DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

FORTALEZA-CE

2019

JARDEL ANDRADE DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA METODOLOGIA FAD-CI DE SELEÇÃO
GRANULOMÉTRICA NA VIDA DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Jorge Barbosa Soares, PhD.

FORTALEZA-CE

2019

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)

- O47a Oliveira, Jardel Andrade de Oliveira.
Avaliação do impacto da metodologia FAD-CI de seleção granulométrica na vida de fadiga de misturas asfálticas / Jardel Andrade de Oliveira Oliveira. – 2019.
107 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
1. Agregado. 2. Granulometria. 3. Mistura asfáltica. 4. Fadiga. 5. Tração-compressão. I. Título.
CDD 388
-

JARDEL ANDRADE DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA METODOLOGIA FAD-CI DE SELEÇÃO
GRANULOMÉTRICA NA VIDA DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 18/12/2019.

BANCA EXAMINADORA

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

Profª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso (Examinadora interna)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Dr. Luis Alberto Herrmann do Nascimento (Examinador externo)
Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes)

Prof. Dr. Jorge Carvalho Pais (Examinador externo)
Universidade do Minho

*Aos professores que me ensinaram as lições
mais importantes, meus amados pais, Manoel e
Efigênia. E ao saudoso vovô Dedé.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais (Manoel e Efigênia) pelo amor e apoio incondicionais direcionados a mim, e agora também direcionados à minha filha. Agradeço ainda pelos exemplos diários e involuntários da importância da retidão moral nos pequenos e grandes vieses da vida e do trabalho duro. Sem vocês nada seria possível.

À minha esposa e filha que conviveram com amor (nem sempre com paciência ☺), mas sempre da melhor forma possível com o Jardel aluno de doutorado, muitas vezes cansado, irritado e ausente.

Ao Professor Jorge Soares pela orientação e pelas inúmeras provocações feitas ao longo dos 10 últimos anos. Essas nem sempre foram fáceis de ser atendidas, mas certamente trouxeram-me ricas vivências e crescimento pessoal.

A todas as pessoas que formam (de fato ou de alma – Clélia) o LMP/CT-Asfalto N/NE (lugar que passei mais horas na última década). Ao nosso grupo de pesquisa, o melhor e mais fantástico do Brasil.

À Petrobras/Cenpes pelos dados das misturas asfálticas. Em especial ao Luis Alberto pelo apoio ao longo da pesquisa.

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade e valiosas contribuições ao presente trabalho.

À Capes pela bolsa de doutorado concedida ao autor.

MUITO OBRIGADO!

“Nada substitui a persistência, nem mesmo o talento.”

Rai Kroc

RESUMO

A fadiga de misturas asfálticas é uma das causas mais comuns de falha prematura de pavimentos. Normalmente, as misturas são dosadas pelo enquadramento de suas granulometrias em faixas granulométricas predeterminadas, não existindo outra etapa na metodologia de dosagem utilizada no Brasil que vise incrementar a sua resistência à fadiga. Neste contexto, cita-se a metodologia de seleção granulométrica chamada de Faixa de Agregados Dominantes considerando os Componentes Intersticiais (FAD-CI), que pode ajudar a produzir misturas com melhor desempenho à fadiga e à deformação permanente. As especificações nacionais que tratam da dosagem de misturas apontam a execução de ensaios para caracterizá-las mecanicamente. Todavia, os mesmos não são específicos para avaliar à fadiga. Tentando suprir essa deficiência, em 2018 o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) normatizou um ensaio destinado a avaliar a fadiga de misturas. Outro avanço recente foi o desenvolvimento do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), de natureza mecanística-empírica, e que faz uso do referido ensaio. O método, a exemplo de outros existentes, simula o surgimento e a evolução dos defeitos em pavimentos, ao passo que adéqua as espessuras das camadas com vistas a mitigá-los. Percebe-se então a importância de se buscar utilizar as técnicas com maior capacidade de caracterizar com precisão os defeitos. Nesse panorama, o ensaio de fadiga por tração-compressão é apontado internacionalmente como o teste mais fundamental e sólido do ponto de vista mecanicista para caracterizar a fadiga de misturas, sendo, contudo, ainda pouco disseminado no meio técnico e mesmo no meio acadêmico nacional. O objetivo da presente pesquisa foi avaliar a susceptibilidade à fadiga de misturas com diferentes granulometrias. Para tanto, um banco de dados da Rede de Tecnologia em Asfalto (RTA) foi utilizado. Foram avaliadas misturas compostas por Ligantes Asfálticos (LA) convencionais e esqueletos pétreos diferentes. As resistências à fadiga das misturas foram simuladas de forma isolada, a nível de material, e também compondo estruturas de pavimentos. Procurou-se ser tutorial, explicando os detalhes do ensaio de fadiga por tração-compressão, uma vez que a sua popularização representa um grande avanço para a pavimentação nacional. Além da metodologia FAD-CI, foram avaliados outros critérios associados à fadiga de misturas, como o Fator de Fadiga do Ligante (FFL), o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) e classes de fadiga. Esse último critério mostrou-se promissor, podendo ser adotado como parâmetro de aceitação de misturas asfálticas a serem empregadas em campo.

PALAVRAS-CHAVE: Agregado. Granulometria. Mistura asfáltica. Fadiga. Trincamento. Tração-compressão.

ABSTRACT

Fatigue in asphalt mixtures is one of the most common causes of premature pavement failure. Such mixtures are usually designed by framing aggregate particle sizes into predetermined sieve sizes, with no other step in the methodology used in Brazil aiming to attend aspects such as fatigue resistance. In this context, the aggregate gradation selection methodology called the Dominant Aggregate Size Range (DASR) can help to produce mixtures with improved fatigue and rutting performance. National specifications related to mixture design indicate laboratory mechanical tests, not specifically to evaluate fatigue resistance. In an attempt to address this shortcoming, the National Department of Transport Infrastructure standardized in 2018 a test to evaluate mixture fatigue. Another recent advance has been the development of the mechanistic–empirical National Design Method, which makes use of the referred test. Like other existing methods, it simulates the development and the evolution of pavement distresses, while calculating layer thicknesses to mitigate them. Therefore, there is great importance in seeking techniques able to accurately characterize distresses. In this scenario, the tensile-compression fatigue test is today considered the most fundamental and mechanically consistent laboratory test to characterize asphalt mixture fatigue. Its details and reach are still not widespread in the state of practice or even in the national academia. The objective of the present research is to evaluate the fatigue susceptibility of asphaltic mixtures with different particle sizes. A database of the Asphalt Technology Network was used. Mixtures with conventional asphalt binders and different stone skeletons were evaluated. Fatigue resistance was simulated at the material level of the mixture, and also as part of a pavement structure. There is a tutorial aspect in the present document, which contains details of the tensile-compression fatigue test, since its popularization is considered to represent an important improvement for the national pavement community. In addition to the DASR methodology, other criteria associated with mixture fatigue were evaluated, such as binder and mixture fatigue factors, and also fatigue classes. The latter proved to be promising and such classes may be adopted as part of an acceptance parameter for asphalt mixtures to be used in the field.

KEYWORDS: Aggregate. Particle size. Asphalt mixture. Fatigue. Cracking. Tensile-compression fatigue test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Divisão dos modais de transportes no Brasil (CNT, 2016)	16
Figura 1.2 – Identificação das partículas na metodologia FAD-CI (PORTELA NETO, 2018)..	18
Figura 1.3 – Apresentação dos capítulos da tese	22
Figura 2.1 – Atividades desenvolvidas pelo LMP/UFC na RTA, no Ceará	25
Figura 2.2 – Localização dos trechos experimentais monitorados pelo LMP/UFC	25
Figura 2.3 – Localização do Trecho PMF	26
Figura 2.4 – Localização do Trecho DER 1.....	27
Figura 2.5 – Localização do Trecho DER 2.....	27
Figura 2.6 – Localização dos Trechos DNIT 1 e 2	28
Figura 2.7 – Localização do Trecho TEP	29
Figura 2.8 – Detalhe da grade metálica e da contagem do %AT	31
Figura 2.9 – %AT dos trechos monitorados pelo LMP/UFC e por demais instituições.....	33
Figura 2.10 – Deflexões máximas médias dos trechos cearenses da RTA.....	34
Figura 2.11 – Realização de ensaios nos trechos monitorados pelo LMP/UFC.....	34
Figura 3.1 – Inadequação dos ensaios não homogêneos (com dano) para caracterizar a fadiga	38
Figura 3.2 – Ensaios empregados para caracterizar a fadiga de misturas asfálticas.....	41
Figura 3.3 – Preparação, posicionamento e possibilidades de ruptura da amostra no ensaio de fadiga por tração-compressão	45
Figura 3.4 – Ilustrações detalhando o critério de ruptura adotado no presente trabalho	50
Figura 3.5 – Características de fadiga das misturas e suas respectivas simulações.....	57
Figura 4.1 – Identificação das partículas na metodologia FAD-CI (PORTELA NETO, 2018)..	64
Figura 4.2 – Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	68
Figura 4.3 – Curvas características dos danos e curvas G^R vs N_f	69
Figura 4.4 – Simulações das vidas de fadiga separadas por temperatura e por N_f	71
Figura 4.5 – Curvas de Wöhler de M4 variando temperaturas e frequências	72
Figura 4.6 – FFM e classificação de resistência à fadiga das misturas avaliadas.....	73
Figura 5.1 – Área para cálculo do FFL e FFM (NASCIMENTO, 2015)	80
Figura 5.2 – Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	81
Figura 5.3 – Evolução dos %AT para as 3 estruturas consideradas	82

Figura 5.4 – $N_f @ 20\%AT$ agrupados por características das misturas (Estrutura 1).....	84
Figura 5.5 – Classes de fadiga das misturas.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Atividades de pós-execução realizadas nos trechos experimentais	30
Tabela 2.2 – %AT dos trechos monitorados no Ceará.....	32
Tabela 3.1 – Dados das misturas investigadas e estruturas dos trechos simulados	56
Tabela 4.1 – Características das misturas e critérios FAD-CI	66
Tabela 4.2 – Critérios para FAD-CI das misturas avaliadas.....	69
Tabela 4.3 – Parâmetros da equação WLF e das equações do modelo S-VECD	71
Tabela 5.1 – Características das misturas e critérios FAD-CI	78
Tabela 5.2 – Características dos pavimentos considerados nas análises computacionais	79
Tabela 5.3 – Valores de $N_f @ 20\%AT$ para as 3 estruturas avaliadas.....	82
Tabela 5.4 – Origem dos agregados, parâmetros FAD-CI, $N_f @ 20\%AT$, %AT @ 120M, FFL, FFM e classes de fadiga (Estrutura 1).....	85
Tabela 5.5 – Separação das misturas por níveis de trincamento (20%AT @ 120M)	85
Tabela 5.6 – Óxidos dos tipos de agregados utilizados nas misturas avaliadas.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%AT	Percentual de Área Trincada
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BGS	Brita Graduada Simples
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAP3D	<i>Computational Analysis of Pavements – 3D</i>
CAP3D-D	<i>Computational Analysis of Pavements – 3D – Design</i>
Cenpes	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
CI	Componentes Intersticiais
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
DASR	<i>Dominant Aggregate Size Range</i>
DER	Departamento Estadual de Rodovias
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EEFL	Espessura Efetiva do Filme de Ligante
FAD	Faixa de Agregados Dominante
FAD-CI	Faixa de Agregados Dominante considerando os Componentes Intersticiais
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
FFM	Fator de Fadiga da Mistura
FR	Fator de Ruptura
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LA	Ligante Asfáltico
LAS	<i>Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binder Using the Linear Amplitude Sweep</i>
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MD	Módulo Dinâmico

MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MR	Módulo de Resiliência
PID	Parâmetros Proporcional-Integral-Derivativo de Controle
PMF	Prefeitura Municipal de Fortaleza
PSTT	Princípio da Superposição Tempo-Temperatura
RAF	Razão de Agregados Finos
RBV	Relação Betume Vazios
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RTA	Rede de Tecnologia em Asfalto
S-VECD	<i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage</i>
TD	Tração Direta
TEP	Termelétrica Energia Pecém
TMN	Tamanho Máximo Nominal
TSD	Tratamento Superficial Duplo
UF	Universidade da Flórida
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFSM	Universidade de Federal de Santa Maria
VECD	<i>Viscoelastic Continuum Damage</i>
VI	Volume Intersticial
V _v	Volume de Vazios
WLF	Williams-Landel-Ferry

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
$ E^* _{LVE}$	Módulo dinâmico na condição de viscoelasticidade linear
$ E^* $	Módulo dinâmico
A_t	Área transversal
C_1 e C_2	Parâmetros da equação de Williams-Landel-Ferry
C_{11} e C_{12}	Constantes de ajuste da curva característica do dano
N_f	Número de ciclos de carregamento até a falha
S_t	Níveis de tensão na curva de Wöhler
a_T	<i>Time-temperature shift factor</i>
ε_{TA}^R	Amplitude da pseudodeformação
C	Integridade do material
F	Força de tração uniaxial
G^R	Taxa média de pseudo-energia liberada por ciclo
Hz	Frequência
K	Coefficientes estruturais
M	Metro
N	Número de operações do eixo padrão
°	Graus
R\$	Reais
S	Dano acumulado
T	Temperatura
T_{REF}	Temperatura de referência
Y e Δ	Constantes de regressão que ajustam os valores de G^R vs N_f
E	Deformação
σ	Tensão
f_R	Frequência reduzida
α	Parâmetro que representa a taxa de evolução do dano
β	Parcela de tração no pulso de carga no ensaio de fadiga por tração-compressão
$\varepsilon_{0,pp}$	Amplitude de deformação pico a pico
μ	Micro
μFAD	Porosidade FAD

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Problema de pesquisa e justificativa	20
1.2	Objetivos	21
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>21</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>21</i>
1.3	Estrutura da tese	21
2	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS PELO LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS PAVIMENTOS (LMP) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC) NO ÂMBITO DA REDE DE TECNOLOGIA EM ASFALTO (RTA).....	24
2.1	Introdução.....	24
2.2	Identificação dos trechos experimentais	25
<i>2.2.1</i>	<i>Trecho PMF (Avenida Jovita Feitosa, Fortaleza-CE).....</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Trechos DER 1 e 2 (CE-350, Horizonte-CE e CE-085, Caucaia-CE)</i>	<i>26</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Trechos DNIT 1 e 2 (BR-222, Umirim-CE e Itapajé-CE)</i>	<i>28</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Trecho TEP (via privada, Pecém-CE)</i>	<i>28</i>
2.3	Metodologia de coleta de dados nos trechos experimentais	29
2.4	Avaliação da fadiga dos revestimentos asfálticos nos trechos monitorados	30
2.5	Considerações Finais.....	34
3	USO DO ENSAIO DE FADIGA POR TRAÇÃO-COMPRESSÃO E DO MODELO S-VECD PARA CARACTERIZAR A VIDA DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS	35
3.1	Introdução.....	35
3.2	Fundamentação Teórica	36
<i>3.2.1</i>	<i>Fundamentos Básicos de Análise de Fadiga.....</i>	<i>36</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Dano por Fadiga</i>	<i>41</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Mecânica do Dano Contínuo (MDC)</i>	<i>43</i>

3.3	Métodos	43
3.3.1	<i>Ensaio de fadiga por tração-compressão</i>	43
3.3.2	<i>Tratamento de dados com modelo S-VECD do ensaio de fadiga por tração-compressão e critério de ruptura</i>	48
3.3.3	<i>Avaliação da susceptibilidade à fadiga de misturas asfálticas com simulação a nível de material</i>	51
3.3.4	<i>Avaliação da susceptibilidade à fadiga de pavimentos asfálticos com simulação a nível de estrutura</i>	52
3.4	Exemplos de simulação em materiais e em pavimentos	55
3.5	Conclusões.....	58
4	AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS FAD-CI E SEUS IMPACTOS NA VIDA DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS	60
4.1	Introdução.....	60
4.2	Fundamentação teórica.....	62
4.2.1	<i>Fadiga, dano e trincamento</i>	62
4.2.2	<i>Metodologia FAD-CI</i>	63
4.3	Materiais e métodos	65
4.4	Resultados e discussões	69
4.5	Conclusões.....	73
5	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM SIMULAÇÕES DA VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS	75
5.1	Introdução.....	75
5.2	Fundamentação teórica.....	76
5.2.1	<i>Fadiga, dano e trincamento</i>	76
5.2.2	<i>Metodologia FAD-CI</i>	77
5.3	Materiais e métodos	77
5.4	Resultados e discussões	81

5.4.1	<i>Impacto da adoção de diferentes estruturas</i>	81
5.4.2	<i>Avaliação dos parâmetros FAD-CI, FFL, FFM e classes de fadiga das misturas</i>	83
5.5	Conclusões	89
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
6.1	Principais conclusões da tese	92
6.2	Recomendações para trabalhos futuros	94
	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo o Brasil priorizou a expansão da malha rodoviária, mitigando investimentos em outros modais, como o ferroviário e o aquaviário (SILVEIRA, 2002). Dessa forma, o país é caracterizado pela elevada concentração do transporte de mercadorias por meio rodoviário (CNT, 2018a) (Figura 1.1). Esse cenário pode acelerar a degradação das rodovias, uma vez que tende a facilitar o surgimento e o agravamento de defeitos em campo. CNT (2018a) avaliou as condições técnicas de 107.000km de rodovias em todos os estados brasileiros, sendo que aproximadamente 60% do total de rodovias avaliadas foram classificadas como regulares, ruins ou péssimas.

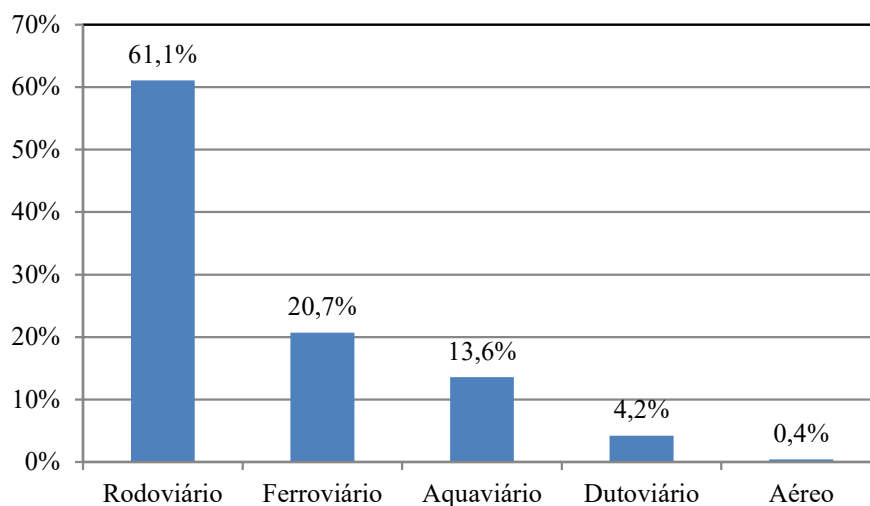


Figura 1.1 – Divisão dos modais de transportes no Brasil (CNT, 2016)

A economia nacional pode ser impactada negativamente pelas más condições de conservação da malha rodoviária, haja vista os baixos índices de serventia das mesmas tendem a elevar os custos de transportes de produtos, diminuindo assim a competitividade da indústria nacional. Vale ressaltar ainda que condições desfavoráveis nos pavimentos fomentam a ocorrência de acidentes, possivelmente com vítimas fatais ou com sequelas irreversíveis (CNT, 2018b). Pode-se entender o conceito de serventia, como a capacidade do pavimento proporcionar conforto para ao rolamento em um dado momento da vida do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A fadiga é um dos principais defeitos experimentados pelas misturas asfálticas aplicadas em campo. Segundo CNT (2018a), verificaram-se trincas, panelas, afundamentos e ondulações em 79% das rodovias nacionais. De acordo com Pinto (1991) e Benevides (2000), a ocorrência de falhas por fadiga no revestimento de pavimentos asfálticos pode propiciar a percolação de água através da referida camada, com a consequente saturação das subcamadas. Camadas granulares saturadas tendem a apresentar uma menor capacidade de suporte e, como consequência, a estrutura fica submetida a maiores deformações oriundas das solicitações mecânicas e, por conseguinte, sujeita a maiores danos estruturais e funcionais.

Neste contexto, nota-se a importância de se manter as vias em boas condições de serventia, prolongando as suas vidas úteis e propiciando economia, conforto e segurança aos usuários. Percebe-se então a necessidade de se acelerar o desenvolvimento e a popularização de novas metodologias capazes de melhorar as técnicas hoje empregadas pelo meio prático rodoviário. Acredita-se que com a adoção de procedimentos/ensaios mais sofisticados e com maior capacidade de caracterizar os defeitos com eficácia, com melhor poder preditivo, as rodovias nacionais passariam a apresentar menos defeitos de forma prematura. Em detrimento dessa demanda, destaca-se o fato de que, no Brasil, a escolha das granulometrias das misturas asfálticas é feita comumente pelo enquadramento das mesmas em faixas granulométricas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (DNIT-ES 031/2006) ou dos Departamentos Estaduais de Rodovias (DER), ou mesmo de órgãos internacionais (AASHTO, 1993). A adequação às referidas faixas não é condição suficiente para produzir misturas que apresentarão bom desempenho em campo (FERREIRA, 2015). As metodologias de definição de granulometria mencionadas, ainda que advindas da experiência de diversos anos, não consideram de forma mais explícita questões relevantes, como escolher uma combinação de agregados capaz de propiciar trabalhabilidade e resistência aos principais defeitos, sobretudo deformação permanente e trincamento por fadiga. Muitas vezes recorre-se ao conhecimento empírico do projetista para se determinar e ajustar a curva granulométrica que supostamente irá atender às exigências de desempenho (FERREIRA, 2015).

Existem tecnologias capazes de auxiliar a tomada de decisão, no que tange à seleção de curva granulométrica de misturas asfálticas, com o intuito de incrementar suas resistências quanto aos defeitos. Cita-se como exemplo a metodologia FAD (Faixa de Agregados Dominante), que avalia a granulometria e a volumetria de misturas descontínuas e densas, possibilitando que o projetista adeque os referidos componentes às recomendações do modelo

e, assim, produza misturas com boa trabalhabilidade e bom desempenho (KIM, 2006). A metodologia FAD, conhecida internacionalmente como *Dominant Aggregate Size Range* (DASR), fundamenta-se na teoria do empacotamento de partículas e foi proposto por Kim (2006).

Segundo Greene *et al.* (2014), pode-se entender a FAD como sendo uma fração dos tamanhos dos agregados que compõem o esqueleto pétreo da mistura, que efetivamente interagem, ou seja, que têm pontos de contato e intertravam-se, contribuindo para que a mistura resista à deformação permanente. Agregados com tamanhos superiores à FAD simplesmente flutuam dentro da mistura e não contribuem para o desempenho mecânico da mesma (KIM, 2006). Além da FAD, existe o Volume Intersticial (VI), definido como uma rede interativa secundária da FAD e formado pelos Componentes Intersticiais (CI), que são os agregados menores do que a FAD, o Ligante Asfáltico (LA) e o Volume de Vazios (Vv) (Figura 1.2). O VI mantém as partículas unidas, atribuindo adesão e resistência à tração (GREENE *et al.*, 2014). Suas propriedades podem influenciar o trincamento por fadiga e a energia de ruptura das misturas asfálticas (GUARIN, 2009; GREENE *et al.*, 2014; CHUN e KIM, 2016).

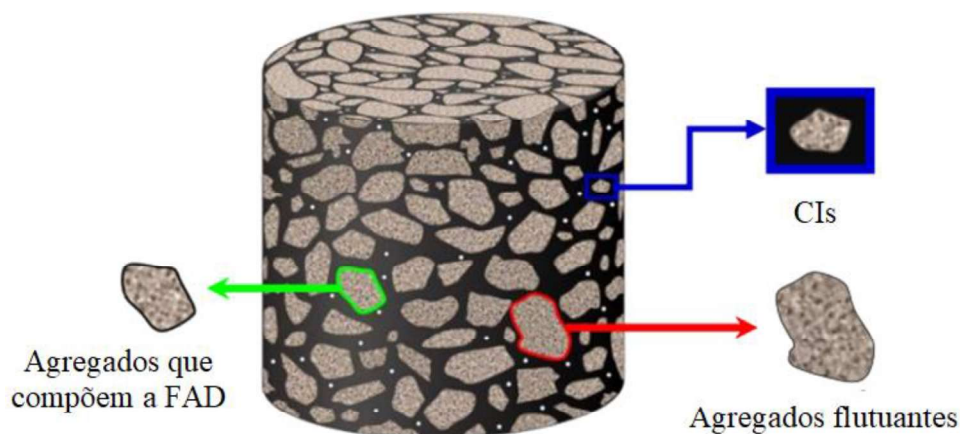


Figura 1.2 – Identificação das partículas na metodologia FAD-CI (PORTELA NETO, 2018)

Recentemente, expandiram-se as recomendações da metodologia FAD, incorporando-se nas análises a influência dos CIs. Criou-se, assim, a metodologia FAD-CI (Faixa de Agregados Dominante – considerando os Componentes Intersticiais), de modo que o mesmo passasse a abordar e propor possíveis melhorias visando diminuir a susceptibilidade de misturas asfálticas também ao trincamento por fadiga (GUARIN, 2009; GREENE *et al.*, 2014; CHUN e KIM, 2016). Vale ressaltar que a adoção e a implementação das premissas da

metodologia FAD-CI são relativamente simples, uma vez que não exigem equipamentos especiais ou a realização de ensaios complexos, baseando-se apenas em informações da granulometria e em propriedades volumétricas da mistura.

Outro aspecto capaz de contribuir para a melhoria dos pavimentos em campo é a adoção, pelo meio prático, de ensaios de caracterização mais modernos/sofisticados, com capacidade de fornecer informações sobre os defeitos mais recorrentes em pavimentos asfálticos. Neste panorama, vale notar que o método nacional de dimensionamento de pavimentos asfálticos mais usado (DNER, 1981) é puramente empírico, baseando-se no ISC (Índice de Suporte Califórnia) das subcamadas e em coeficientes estruturais (K), além do parâmetro de tráfego, o número de operações do eixo padrão, N. Ressalta-se, ainda, que o DNIT, antigo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – DNER, apenas exige que a avaliação da resistência mecânica de misturas asfálticas, do tipo Concreto Asfáltico (CA), seja feita pela execução dos ensaios de estabilidade Marshall (DNER-ME 043/1995) e de resistência à tração por compressão diametral (DNIT-ME 136/2010). Os referidos ensaios não têm a capacidade de representar a susceptibilidade de misturas asfálticas a um defeito específico experimentado por essas em campo (e.g. fadiga e/ou deformação permanente).

Desde o início da década de 2010, grupos de pesquisa de diversas universidades nacionais, incluindo o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC), o DNIT e algumas instituições internacionais, capitaneados pela Petrobras (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello – Cenpes), interagem no projeto denominado de RTA. O referido projeto tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Em 2018 foi divulgado o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) (MOTTA *et al.*, 2018). O MeDiNa representa um progresso em relação aos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacionais desenvolvidos anteriormente pelo mesmo departamento, embora não se encontre exigido pelo DNIT até este momento, sendo o método empírico de dimensionamento o procedimento ainda mais usado pelo meio prático. Embora, deva-se ressaltar que diversas obras federais relevantes, segundo informações do próprio DNIT, fazem uso de alguma forma de projeto mecanicista.

Como avanços trazidos pelo MeDiNa, pode-se apontar a indicação de ensaios de caracterização mecânica para avaliar a susceptibilidade das misturas aos defeitos de deformação

permanente (DNIT, 184/2018) e fadiga (DNIT, 183/2018). Há outros ensaios disponíveis (DI BENEDETTO *et al.*, 2001, 2004; LOUREIRO, 2003; BABADOPULOS, 2014; NASCIMENTO, 2015) e possivelmente com maior capacidade de aferir a susceptibilidade de misturas asfálticas a defeitos, sobretudo a fadiga. O ensaio de fadiga por tração-compressão (*Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*, AASHTO TP 107, 2018), por exemplo, vem sendo apontado como um teste com capacidade de caracterizar a fadiga de misturas asfálticas. O referido ensaio considera/monitora um maior número de variáveis da mistura ao longo de sua execução, quais sejam: temperatura, frequência de carga, deformação e ângulo de fase. O mesmo é caracterizado por ser o único ensaio de fadiga disponível com estado homogêneo de tensões. O resultado do ensaio é expresso pela curva característica do dano, considerada uma propriedade do material; logo, possibilita a avaliação de parâmetros da mistura obtidos em condições diferentes das adotadas durante a execução do ensaio.

1.1 Problema de pesquisa e justificativa

O macro problema desta tese é a fadiga (trincamento) de misturas asfálticas, principalmente quando essa surge de forma prematura nas rodovias. O acúmulo de solicitações do tráfego de veículos e a exposição às intempéries climáticas podem reduzir a capacidade das misturas resistirem aos esforços de fadiga. Nesse cenário surgem as trincas que evoluem, coalescem, propagam-se e diminuem a serventia e a capacidade estrutural dos pavimentos. É importante que o surgimento e o avanço da fadiga em misturas aconteça de forma lenta e que seja previsível, de modo a possibilitar a identificação de momentos oportunos para atividades de manutenção que visam prolongar a serventia adequada dos pavimentos e diminuir os custos do ciclo de vida útil.

Colabora com esse cenário o fato de as normas brasileiras que tratam das atividades da pavimentação historicamente não preconizarem uma etapa/procedimento que vise mitigar os efeitos da fadiga nos revestimentos asfálticos. As normas também não apontam características dos constituintes (agregado, LA, relação agregado-ligante e curva granulométrica) das misturas que tenham a capacidade de diminuir a susceptibilidade das mesmas à fadiga. Logo, não é possível, seguindo apenas procedimentos hoje oficiais dos órgãos do setor rodoviário nacional (DNIT e DERs), avaliar se uma curva granulométrica, LA ou agregado pode potencializar o desempenho dos pavimentos em campo.

Assim, percebe-se a importância do desenvolvimento e da popularização, no meio técnico-científico nacional, de procedimentos modernos e eficazes para representar bem o defeito investigado na presente tese, e que apresentem boa correlação entre os cenários de campo e de laboratório. Considerando a referida perspectiva, é desejável que se utilizem metodologias capazes de auxiliar na escolha de curvas granulométricas de misturas com maior resistência à fadiga.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da presente pesquisa é contribuir com uma melhor compreensão dos aspectos relacionados aos constituintes (sobretudo a granulometria dos agregados) e a volumetria de misturas asfálticas, capazes de impactar a resistência à fadiga dessas misturas.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Contribuir para o entendimento e a popularização do ensaio de fadiga por tração-compressão em misturas asfálticas. De forma tutorial, detalhar sua execução e subsequente tratamento de dados;
- b) Simular desempenhos de campo de misturas asfálticas com vistas a identificar, com o auxílio de técnicas de seleção granulométrica, aspectos relacionados aos materiais (agregados, LA e relação agregado-LA) utilizados nas suas produções com capacidade de potencializar a resistência à fadiga;
- c) Avaliar a capacidade, baseado em simulações computacionais do surgimento e evolução do trincamento em campo, de diferentes estruturas de pavimentos asfálticas resistirem à fadiga.

1.3 Estrutura da tese

Esta tese aborda, sob diferentes óticas, o assunto da fadiga de misturas asfálticas. Ela é iniciada por um capítulo introdutório que contextualiza o tema proposto, traz o

delineamento da problemática da pesquisa e os objetivos geral e específicos. Já o seu desenvolvimento é composto por 4 capítulos. No primeiro, abordam-se as atividades desenvolvidas pelo LMP/UFC na RTA, bem como a formação do seu banco de dados. Em seguida são apresentados 3 capítulos construídos em formato de artigos científicos que abordam a fadiga de misturas sob pontos de vistas diferentes. A tese é finalizada com um capítulo de conclusões, que também apresenta sugestões para trabalhos futuros. Embora, os capítulos que antecedem o fechamento da tese, apresentados como artigos científicos, tenham suas próprias seções de conclusões, no capítulo final são apresentadas conclusões de ordem geral, possíveis de serem delineadas após a observação global da tese. A Figura 1.3 apresenta uma descrição dos 6 capítulos que compõem o presente documento.

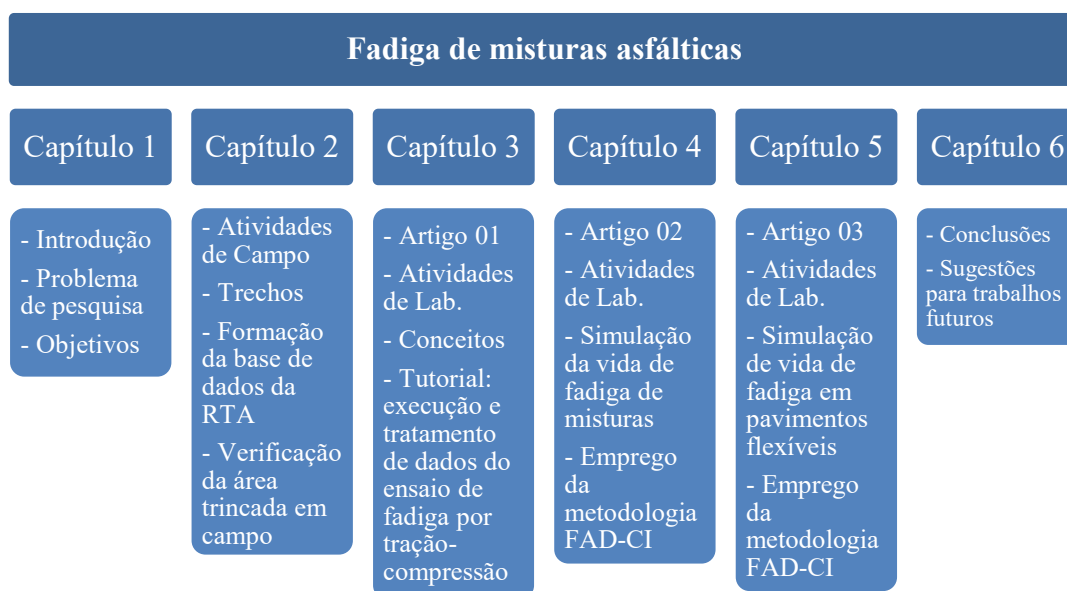


Figura 1.3 – Apresentação dos capítulos da tese

Capítulo 1: Este capítulo apresenta a Introdução, que tem como objetivo contextualizar a presente pesquisa sobre a metodologia FAD-CI e os possíveis impactos de sua adoção na susceptibilidade de misturas a defeitos. Aborda ainda as limitações das normas nacionais correntes do setor de pavimentação. Apresenta, por fim, o cenário que circunscreve as atividades realizadas no âmbito da presente tese de doutorado.

Capítulo 2: Destina-se a elencar as atividades desenvolvidas pelo LMP/UFC no âmbito da RTA, com envolvimento direto do autor da tese. Essas contribuíram para a formação do banco de dados do referido projeto, o que possibilitou a presente pesquisa.

Capítulo 3: Este capítulo está escrito no formato de artigo e apresenta as diversas possibilidades de ensaios para avaliar a fadiga de misturas asfálticas. Apresenta também de forma tutorial os detalhes da realização, o tratamento de dados e o emprego em simulações computacionais do ensaio de fadiga por tração-compressão, bem como as teorias que dão suporte ao referido ensaio.

Capítulo 4: Apresentado como um artigo, este capítulo traz uma contextualização dos principais defeitos ocorrentes nas misturas asfálticas em campo (fadiga e deformação permanente), destacando a necessidade do desenvolvimento e/ou adoção de metodologias laboratoriais simples e de baixo custo capazes de auxiliar na seleção de granulometrias (e.g. metodologia FAD-CI), com vistas a originar misturas com o melhor desempenho possível.

Capítulo 5: Neste capítulo aborda-se a metodologia FAD-CI, apresentada como uma técnica de seleção granulométrica de baixo custo, capaz de contribuir para a identificação de misturas asfálticas (aplicadas em camadas de revestimentos) com o melhor desempenho possível. O capítulo, apresentado como terceiro e último artigo científico, traz a simulação computacional da evolução do trincamento em pavimentos flexíveis com mesma estrutura, diferentes apenas pelo revestimento. Em paralelo, fez-se uso da metodologia FAD-CI para avaliar a susceptibilidade à defeitos de misturas aplicadas nas camadas de revestimento dos referidos pavimentos.

Capítulo 6: Este capítulo final apresenta as conclusões obtidas após as diversas avaliações, pelo emprego do ensaio de fadiga por tração-compressão das misturas asfálticas (Capítulo 3) e dos pavimentos correspondentes (Capítulo 4), bem como pelo emprego da metodologia FAD-CI para ajudar na seleção de granulometrias de misturas. O capítulo é finalizado com sugestões para a realização de trabalhos futuros.

2 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS PELO LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS PAVIMENTOS (LMP) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC) NO ÂMBITO DA REDE DE TECNOLOGIA EM ASFALTO (RTA)

2.1 Introdução

Apresentam-se neste capítulo as atividades desenvolvidas pelo LMP/UFC no âmbito da RTA. Ainda que os dados coletados no Ceará não tenham sido utilizados integralmente nas análises apresentadas nos capítulos subsequentes, optou-se por incluí-los no presente documento pelas seguintes razões: (i) os mesmos constituem parte do banco de dados da RTA que serviu de base aos artigos que compõem esta tese; (ii) a participação efetiva do autor, integrando o time do LMP/UFC, para a construção do banco de dados que deu subsídio à calibração dos modelos de desempenho que, por sua vez, constituem uma base para os métodos mecanístico-empíricos que surgiram no país, como o MeDiNa e o CAP3D-D; (iii) acredita-se, por fim, que é bastante importante familiarizar o leitor desse documento com a metodologia adotada nas coletas de dados feitas em campo nos trechos monitorados pela RTA.

A RTA é capitaneada e patrocinada pela Petrobras/Cenpes. A UFC, classificada como instituição âncora, integra a rede desde o início, no ano de 2010. Essa instituição, no princípio do projeto (primeira rodada), foi uma das responsáveis pela elaboração do Manual de Execução de Trechos Monitorados (METM, 2010). O referido documento norteia todas as atividades de coleta de dados realizadas pelas instituições desde o começo da Rede até os dias atuais (terceira rodada).

A Figura 2.1 ilustra as atividades desenvolvidas pelo LMP/UFC, destacando-se (i) o acompanhamento dos trechos experimentais e (ii) as atividades específicas, que envolvem pesquisas científicas vinculadas à vocação do grupo, em suas subdivisões: misturas asfálticas, ligantes, solos, modelagem computacional e gerência. Especificamente, as atividades relacionadas aos trechos experimentais foram gerenciadas, no âmbito da UFC, pelo autor da presente tese.

2.2.1 Trecho PMF (Avenida Jovita Feitosa, Fortaleza-CE)

A recuperação da Avenida Jovita Feitosa fez parte das obras do Programa de Transporte Urbano de Fortaleza (Transfor), sendo que nela circulam diariamente mais de 32 mil pessoas por meio do transporte público (RELATÓRIO TÉCNICO FINAL, 2016). A fundação (subleito) do Trecho PMF (Figura 2.3) é composta por um solo arenoso. Na camada de sub-base fez-se uso de um solo argiloso oriundo de jazida localizada no município de Maranguape–CE. A camada de base é composta de uma mistura de solo (50%) com Resíduo de Construção e Demolição (RCD) misto (50%). No revestimento empregou-se um CA confeccionado com britas 1/2” e 3/8”, pó de pedra e areia de campo, sendo o LA empregado caracterizado por penetração como CAP 50/70.

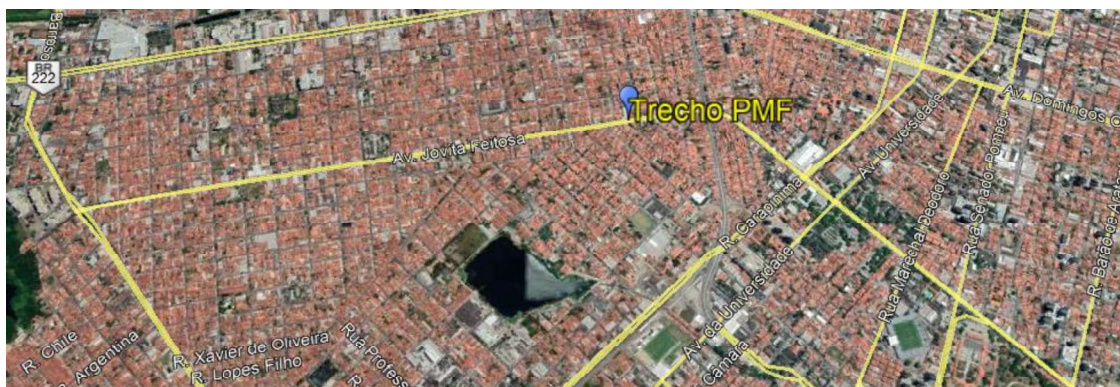


Figura 2.3 – Localização do Trecho PMF

2.2.2 Trechos DER 1 e 2 (CE-350, Horizonte-CE e CE-085, Caucaia-CE)

O primeiro trecho monitorado viabilizado junto ao DER (Trecho DER 1) situa-se na rodovia CE-350, entre as estacas 935 e 950 (Figura 2.4). A referida rodovia tem 26km de extensão e localiza-se entre os municípios de Cascavel-CE e Horizonte-CE. O ponto de início do trecho apresenta as seguintes coordenadas geográficas: 4,08868°S e 38,34272°O. O subleito do Trecho DER 1 é composto por um solo arenoso. Esse material, após ser estabilizado pela adição de brita, passou a compor a única camada granular do trecho (camada de base). Como revestimento o trecho recebeu um Tratamento Superficial Duplo (TSD) (RELATÓRIO TÉCNICO FINAL, 2016).



Figura 2.4 – Localização do Trecho DER 1

O Trecho DER 2 localiza-se na CE-085, importante rota turística no Ceará, cortando o estado no sentido Leste – Oeste. A distância entre os municípios localizados nas extremidades da referida rodovia (Camocim-CE e Fortaleza-CE) é de 340km, passando por Caucaia-CE (município onde está localizado o trecho) (Figura 2.5). As atividades realizadas pelo LMP/UFC foram concentradas nas obras de duplicação da CE-085. O Trecho DER 2 conta com 3 camadas granulares (base, sub-base e reforço de subleito) e um revestimento em CA. No revestimento foram utilizados como agregados graúdos 2 britas (3/4’’ e 1/2’’) e como agregado miúdo 1 pó de pedra. Já o LA foi caracterizado por penetração como CAP 50/70. Um segmento da rodovia CE-085 (incluindo os 300m que compõem o Trecho DER 2), por apresentar defeitos de forma prematura, em julho de 2016 recebeu uma nova camada de revestimento asfáltico, aplicada sobre o revestimento já existente. Por ter sua estrutura modificada durante o período de análise o trecho não foi mais monitorado (RELATÓRIO TÉCNICO FINAL, 2016).



Figura 2.5 – Localização do Trecho DER 2

2.2.3 Trechos DNIT 1 e 2 (BR-222, Umirim-CE e Itapagé-CE)

O primeiro trecho (Trecho DNIT 1) monitorado pelo LMP/UFC junto ao DNIT foi delimitado em um segmento da rodovia BR-222. Esta rodovia, a partir do município de Croatá-CE, passando por Umirim-CE (município de localização do trecho – Figura 2.6) até o acesso à cidade de Sobral-CE, foi reconstruída. O trecho em estudo é constituído das seguintes camadas granulares: regularização, construída com o material da camada de base existente antes das obras de reconstrução do trecho, sub-base construída com material de empréstimo e base de Brita Graduada Simples (BGS). Já o revestimento é composto por duas camadas, sendo a primeira uma camada de ligação (*binder*) e a segunda uma camada de rolamento, ambas compostas por CAs. Nos revestimentos foram usados 3 britas (3/4”, 1/2” e 3/8”) como agregados graúdos e, como agregados miúdos, 1 areia de campo e 1 pó de pedra. O LA foi classificado como CAP 50/70. Já o trecho DNIT 2 faz parte dos serviços de adequação de capacidade e restauração da rodovia BR-222 (mesma rodovia do Trecho DNIT 1). O ponto de início do trecho foi georreferenciado, apresentando as seguintes coordenadas geográficas: 3°45'27.75"S e 39°29'44.35"O. A Figura 2.6 localiza o trecho na rodovia estudada (RELATÓRIO TÉCNICO FINAL, 2016).



Figura 2.6 – Localização dos Trechos DNIT 1 e 2

2.2.4 Trecho TEP (via privada, Pecém-CE)

Trecho situado na via de acesso da usina Termelétrica Energia Pecém (TEP), empreendimento instalado no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), município de São Gonçalo do Amarante-CE, integrante da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Com capacidade de geração de energia na ordem de 5.500 gigawatts-hora e fazendo uso de carvão

mineral como combustível, a TEP possibilitou que o estado do Ceará aumentasse sua produção de energia em 90% (UTE PECÉM, 2019). Dentre outros rejeitos ambientais, essa atividade industrial gera um grande volume de cinzas pesada e leve, oriundas da queima de combustíveis fósseis. A cinza leve é caracterizada pela sua granulometria fina, enquanto a cinza pesada é o resíduo que fica depositado no fundo da caldeira de combustão (VASCONCELOS, 2016). O Trecho TEP (Figura 2.7) foi construído com o intuito de verificar a viabilidade técnica do uso dos rejeitos da TEP (cinzas) em camadas de pavimento.



Figura 2.7 – Localização do Trecho TEP

2.3 Metodologia de coleta de dados nos trechos experimentais

Conforme já mencionado, a metodologia utilizada nas ações desenvolvidas na RTA consta no METM (2010). Todos os testes indicados para a fase de pós-execução, bem como os seus períodos de realização, são apontados na Tabela 2.1. A fase de pré-execução (projeto) dos trechos experimentais deveria ser realizada pela instituição que iria monitorá-lo. Entretanto, não foi possível participar dessa etapa, pois os projetos no Ceará já estavam finalizados e em execução. Contudo, ressalta-se que durante a fase de execução (construção), além das tarefas específicas dessa fase, o LMP/UFC avaliou a conformidade do que foi construído ao que havia sido projetado. Já na fase de pós-execução (monitoramento das condições estruturais e funcionais), as tarefas previstas foram executadas como aponta o METM (2010). Os dados coletados nas etapas de acompanhamento dos trechos experimentais por todas as entidades integrantes da RTA são enviados para a Petrobras/Cenpes por meio de relatório e por um sistema *on-line* chamado de SRTA (Sistema da Rede de Tecnologia em Asfalto) (RELATÓRIO TÉCNICO FINAL, 2016). Embora o presente capítulo mencione análises diversas realizadas

em campo, optou-se por expor apenas os dados que se relacionam com fadiga de misturas, tema central da presente tese.

Tabela 2.1 – Atividades de pós-execução realizadas nos trechos experimentais

Atividades	Período de execução (meses)			
	0	1	6	12 (com repetição a cada 12)
Retirada de amostras do revestimento	X	-	X	X
Deflexão	X	-	X	X
Levantamento de irregularidade (IRI)	X	-	X	X
Micro e macrotextura	X	X	X	X
Levantamento de defeitos	X	X	X	X
Atrito (com equipamentos contínuos)	*	-	*	*
Permeabilidade	X	-	X	X
Levantamento Visual	-	X	-	X

* Opcional

2.4 Avaliação da fadiga dos revestimentos asfálticos nos trechos monitorados

Em campo, a fadiga de misturas normalmente é avaliada pela quantidade de trincas observadas na superfície de pavimentos asfálticos. Define-se, portanto, um parâmetro chamado de Percentual de Área Trincada (%AT) do revestimento, obtido pela avaliação da fração trincada relativa a área total do pavimento. As medições de %AT feitas pelo LMP/UFC nos trechos da RTA foram executadas com o auxílio de uma grade metálica com área de 1m², subdividida em 100 partes de 100cm² (Figura 2.8a). A área de cada subdivisão representa 1% da área total da grade. O %AT é quantificado da seguinte maneira: repousa-se a grade sobre uma região do revestimento asfáltico (início do trecho monitorado) e observa-se a quantidade de subdivisões posicionadas sobre trincas. A estas se confere a condição de totalmente trincada independente do comprimento e abertura da trinca.

A Figura 2.8b mostra a grade posicionada na superfície do revestimento com as trincas realçadas por cores. A contagem das subdivisões marcadas, no exemplo, indica um %AT de 26% para essa região (1m²) da camada de rolamento. Os círculos pretos foram inseridos na imagem apenas para facilitar a contagem das subdivisões trincadas. Para calcular o %AT do trecho monitorado inteiro, replica-se o procedimento descrito em toda a sua superfície. Em seguida, deve-se fazer a razão do somatório dos %AT do trecho monitorado inteiro pela sua área superficial (em m²). O código de cores utilizado na imagem pode servir para representar as idades de cada trinca, por exemplo: na primeira medição observaram-se as trincas pintadas

de amarelo; na segunda marcaram-se as trincas destacadas em cor de laranja; já em uma terceira avaliação, indicaram-se as trincas com a cor vermelha. Assim, é possível avaliar o crescimento do %AT com o tempo. Não é trivial avaliar trincamento em revestimentos do tipo TSD, por não se tratar de uma camada densa, sendo formado apenas pela aplicação de agregados graúdos e ligante asfáltico, o que impede a identificação de trincas em sua superfície que muitas vezes se confundem com os contornos entre agregados. Logo, o Trecho DER 1 não teve esta variável aferida.

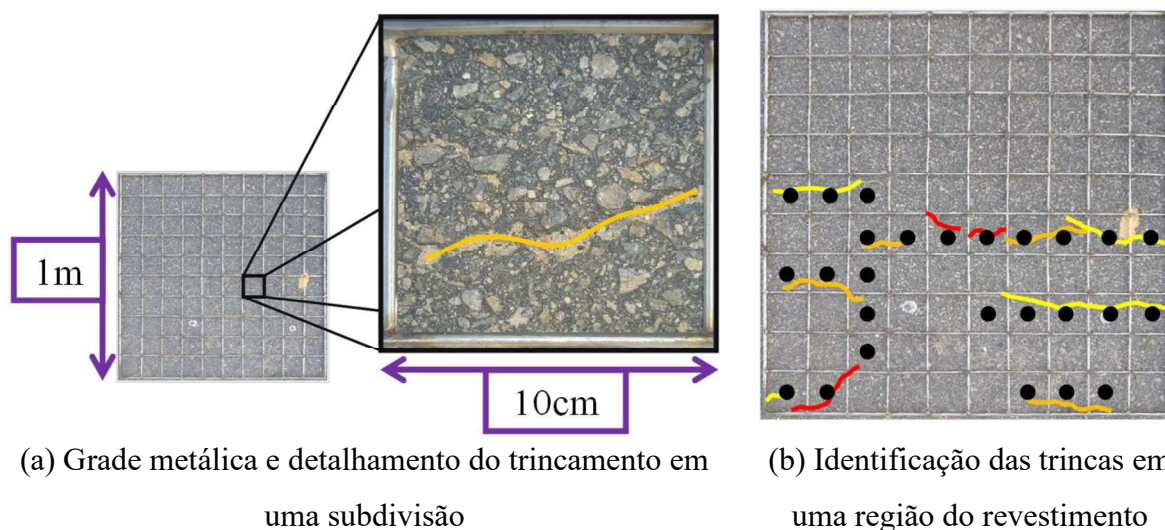


Figura 2.8 – Detalhe da grade metálica e da contagem do %AT

Os valores dos %AT obtidos nos levantamentos realizados nos trechos monitorados constam na Tabela 2.2. Células com traço indicam que os referidos levantamentos não foram realizados, ou porque os trechos não eram monitorados ainda na data do levantamento ou porque as avaliações serão feitas no futuro. Já a indicação de “recapeado”, significa que o trecho recebeu uma nova camada de revestimento, não sendo possível, então, avaliar o %AT. A Figura 2.9 posiciona os %AT dos trechos monitorados pelo LMP/UFC, que tiveram essa característica medida (PMF, DNIT 1 e 2 e TEP), em uma nuvem de pontos que representa os %AT dos trechos monitorados por outras instituições integrantes da RTA. Optou-se por não nomear os trechos para maior clareza do gráfico e pelo interesse ser em comparar os dados do Ceará com os demais dados do país. Percebe-se que os trechos cearenses apresentaram %AT relativamente baixos. As medições seguem sendo realizadas e novos trechos incorporados à base de dados, algo essencial para o ganho crescente de confiança em qualquer método de dimensionamento de pavimentos.

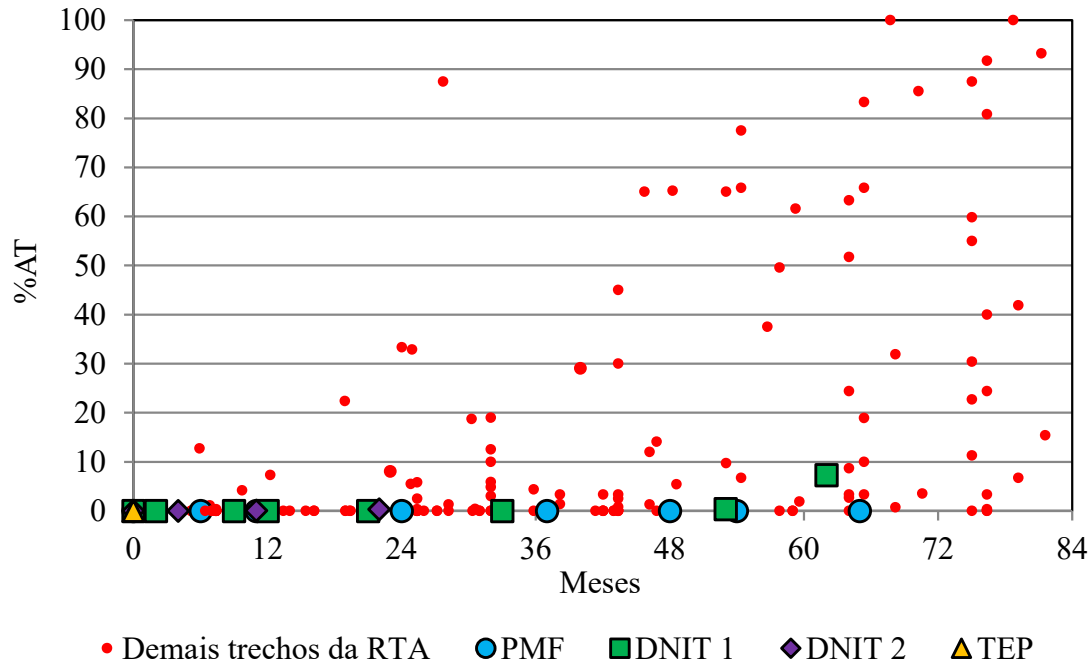
Para propiciar uma avaliação associativa entre o %AT e a estrutura dos sistemas de

camadas dos trechos cearenses da RTA, expõem-se as suas deflexões máximas. São colocados os valores médios das leituras realizadas nas superfícies dos revestimentos em todas as estacas de cada trecho (Figura 2.10). As medições foram realizadas com o equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD). É comum apontar-se no Ceará o intervalo entre 30 e 50×10^{-2} mm como valores aceitáveis de deflexão em pavimentos novos, com revestimento composto por CA e base granular em boa condição (RELATÓRIO TÉCNICO FINAL, 2016). Percebe-se que os trechos locais da RTA apresentaram deflexões máximas relativamente baixas, o que está consistente com os baixos %AT verificados em campo. Apenas o Trecho TEP mostrou-se mais susceptível ao desenvolvimento de trincas, sendo a sua deflexão máxima média superior a 50×10^{-2} mm (para uma carga de 40kN) no primeiro levantamento logo após a construção. Tal valor pode representar, nas próximas avaliações, um rápido crescimento do %AT, a depender do tráfego solicitante. A Figura 2.11 mostra a equipe do LMP/UFC realizando levantamentos em campo, inclusive o de %AT com a grade metálica, assinalada por uma seta amarela.

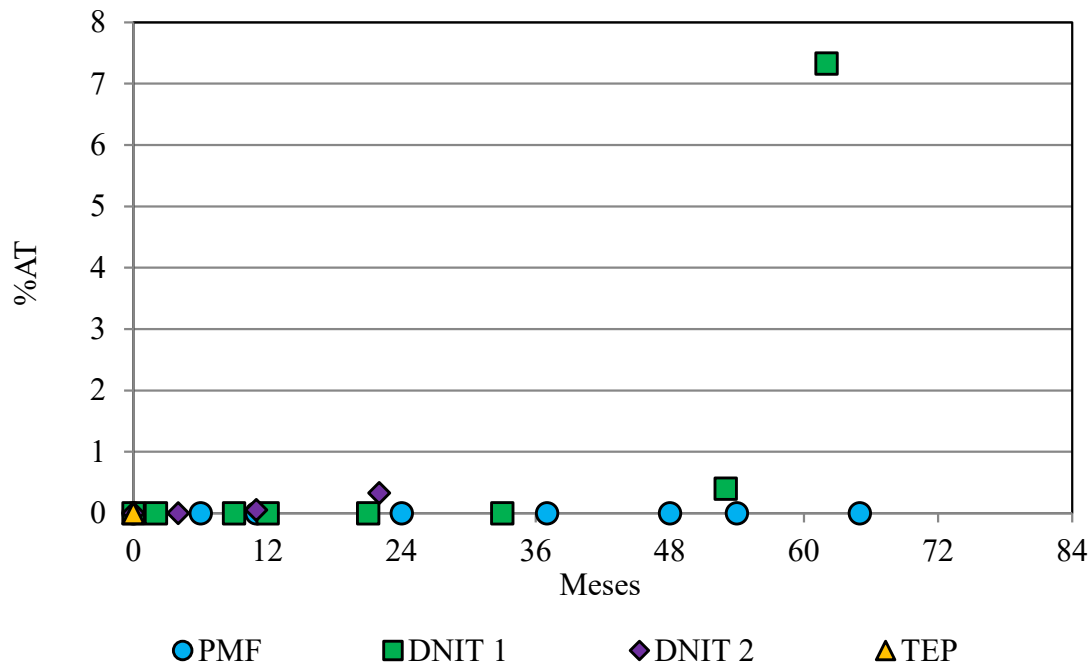
O grupo de pesquisa da UFC empreende no ano de 2019 esforços no intuito de desenvolver uma metodologia mais eficiente de quantificação do %AT em campo. Essa nova ferramenta em desenvolvimento baseia-se na avaliação/identificação, computacionalmente, de trincas registradas em fotografias com elevada resolução, previamente captadas por câmeras fotográficas acopladas em veículos.

Tabela 2.2 – %AT dos trechos monitorados no Ceará

	Data	nov/10	mai/11	nov/11	dez/12	jan/14	mar/15	ago/15	jul/16	ago/19	
PMF	Mês	0	6	11	24	37	48	54	65	102	
	%AT	0	0	0	0	0	0	0	0	Recap.	
T r e c h o	DNIT 1	Data	mar/12	mai/12	dez/12	mar/13	jan/14	jan/15	ago/15	jul/16	-
		Mês	0	2	9	12	21	33	53	62	-
		%AT	0	0	0	0	0	0	0,4	7,33	-
DNIT 2	Data			-		jan/14	jan/15	ago/15	jul/16	-	
	Mês			-		0	4	11	22	-	
	%AT			-		0	0	0,05	0,33	-	
TEP	Data					-				ago/19	
	Mês					-				0	
	%AT					-				0	



(a) Comparativo entre os trechos monitorados pelo LMP/UFC e pelas demais instituições



(b) Trechos monitorados pelo LMP/UFC

Figura 2.9 – %AT dos trechos monitorados pelo LMP/UFC e por demais instituições

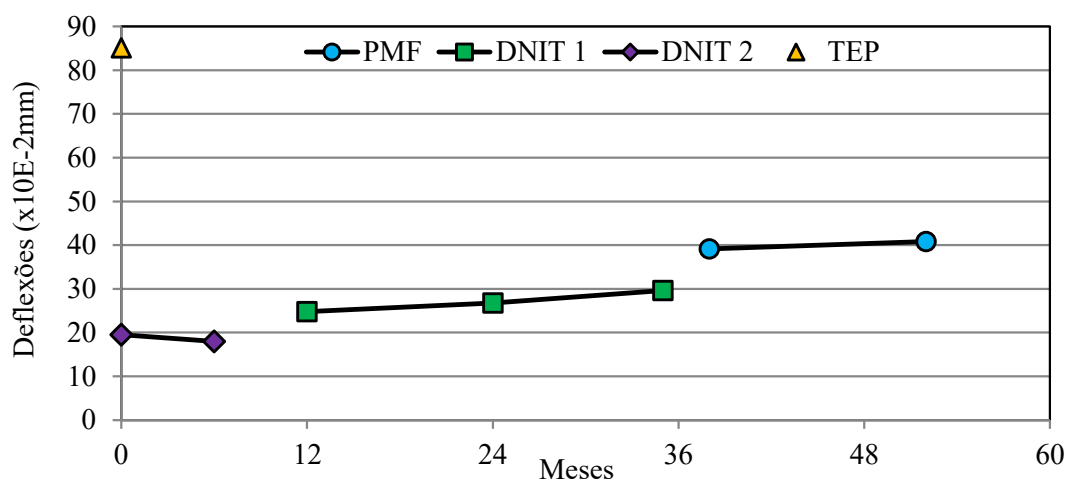


Figura 2.10 – Deflexões máximas médias dos trechos cearenses da RTA



Figura 2.11 – Realização de ensaios nos trechos monitorados pelo LMP/UFC

2.5 Considerações Finais

Esse capítulo abordou as atividades desenvolvidas pelo LMP/UFC na RTA. Apresentam-se informações relevantes para a pesquisa, sendo que essas integram o banco de dados utilizado nos artigos que compreendem os Capítulos 4 e 5. As atividades ajudaram no desenvolvimento e na calibração de métodos de dimensionamento nacionais recentemente desenvolvidos. O capítulo apresentou ainda um resumo de esforços realizados na última década com o envolvimento do autor e que tiveram impacto direto na produção da presente tese.

3 USO DO ENSAIO DE FADIGA POR TRAÇÃO-COMPRESSÃO E DO MODELO S-VECD PARA CARACTERIZAR A VIDA DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Resumo:

No Brasil, é comum se avaliar a fadiga de misturas asfálticas pelo ensaio de fadiga por compressão diametral com carga repetida. Existem algumas poucas experiências nacionais também com ensaios de fadiga por flexão em viga. Ensaios como esses, entre outros, apresentam limitações, como estado não homogêneo de tensões e, no caso do ensaio de compressão diametral, em que o carregamento é sempre no mesmo sentido, há uma incapacidade de diferenciar o dano sofrido por fadiga do dano sofrido por fluência excessiva. Esta última limitação pode ocorrer em ensaios com carga controlada caso haja desvio da deformação com relação a seu valor inicial. Citam-se ainda como limitações atuais a não consideração do aquecimento das amostras durante o ensaio, e a ausência da ponderação da oxidação sofrida pela mistura quando se realiza a previsão de vida útil de pavimentos asfálticos, temas ainda abertos na literatura. Mesmo que também apresente as duas últimas limitações citadas, acredita-se que o ensaio de fadiga por tração-compressão seja hoje o mais capaz de incorporar um maior número de variáveis, assim possibilitando uma melhor compreensão da fadiga em misturas asfálticas. Vencidas as dificuldades de ordem prática (disponibilidade de equipamentos e técnicos treinados) e de análise/interpretação de resultados, a representação da vida de fadiga e a previsão de desempenho de campo realizadas com a adoção do ensaio de fadiga por tração-compressão tem o potencial de alcançar um maior número de centros de pesquisas nacionais, seja pela acurácia dos resultados ou pelo menor tempo para caracterizar uma mistura. Neste contexto, o presente artigo pretende contribuir para o entendimento e a popularização dos detalhes e teorias que permeiam o referido ensaio, bem como o seu tratamento de dados com o uso do modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD) e uma implementação do uso de seus resultados para previsão de desempenho de pavimentos.

Palavras-chave: Pavimentos asfálticos; Misturas asfálticas; Fadiga; Dano.

3.1 Introdução

A elevada dependência do setor rodoviário combinada com o alto percentual de pavimentos apresentando defeitos em campo (CNT, 2018) é deletéria para a competitividade de produtos brasileiros. A fadiga, muitas vezes apontada como a principal falha observada nos pavimentos, é um dos defeitos que mais desafia pesquisadores, não apenas no Brasil, uma vez que é bastante complexa a relação entre ensaios de laboratório relativos a essa falha e aquilo que de fato ocorre em campo ao longo de milhões de passagens de veículos.

A Rede de Tecnologia em Asfalto (RTA) capitaneada pela Petrobras tem fomentado a pesquisa e o desenvolvimento da pavimentação nacional. Por meio de seus trechos experimentais, a RTA contribuiu para o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) apoiado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) como um potencial substituto do método empírico de dimensionamento vigente há décadas no Brasil.

No MeDiNa, faz-se uso do ensaio de fadiga por compressão diametral (DNIT 183, 2018), normatizado em 2018, mas realizado no Brasil há muitos anos (PINTO, 1991). Menciona-se ainda o ensaio de fadiga por tração-compressão, que vem sendo aceito

internacionalmente como o teste mais bem empacotado para caracterizar o referido defeito. As possibilidades de testes laboratoriais que avaliam a fadiga de misturas são diversas, podendo apresentar variações/limitações decorrentes das condições de ensaio. Dessa maneira, recomenda-se que as lógicas de análise dos ensaios sejam avaliadas sempre com vistas a se usar aquele capaz de caracterizar o defeito investigado com maior eficácia.

Neste panorama, o presente capítulo tem como objetivo contribuir para o entendimento e a popularização da realização e do tratamento de dados do ensaio de fadiga por tração-compressão. Para atender estes objetivos incorporou-se à seção de fundamentação teórica do presente capítulo o tópico denominado de fundamentos básicos de análise de fadiga. Fez-se ainda avaliações da susceptibilidade à fadiga de misturas asfálticas considerando as escalas do material e do pavimento. Adotou-se o procedimento apresentado na proposta de norma da AASHTO TP 107 (2018), que trata, além da execução do ensaio, da obtenção de propriedades do modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD).

3.2 Fundamentação Teórica

3.2.1 Fundamentos Básicos de Análise de Fadiga

Podem ser sublinhadas duas características principais de ensaios mecânicos em geral: (i) geometria da amostra, que acaba por se relacionar com a forma como o carregamento é aplicado e medido, bem como com a maneira de medir a deformação; (ii) percurso de carregamento, monotônico ou cíclico, formato da função de carregamento, presença de repouso, etc. No caso dos ensaios de fadiga, a escolha dessas duas características é fundamental (DI BENEDETTO *et al.*, 2001, 2004).

Entre as geometrias de ensaio de fadiga comumente consideradas na prática ou na literatura (viga, trapézio, cilindro esbelto ou espesso) e, por conseguinte, a forma de carregamento (flexão, compressão diametral e tração-compressão), somente o ensaio por tração-compressão apresenta estados de tensões e de deformações teoricamente homogêneos. A ensaios deste tipo, dá-se o nome de ensaios homogêneos, enquanto os demais são chamados ensaios não-homogêneos (DI BENEDETTO *et al.*, 2001, 2004). Os ensaios homogêneos são mais adequados para a investigar a fadiga do que os ensaios não homogêneos, pois nesses últimos há violações de hipóteses simplificadoras utilizadas na análise dos resultados. A razão

é simples, mas precisa ser melhor difundida: em ensaios homogêneos, a tensão pode ser calculada diretamente a partir de medidas obtidas no contorno do Corpo de Prova (CP) com uma célula de carga e da consideração da geometria adotada. O exemplo clássico é o do cálculo da tensão de tração ($\sigma = F/A_t$) oriunda da força de tração uniaxial (F) uniformemente distribuída sobre a área transversal (A_t) de um CP. O comportamento reológico (elástico linear ou não-linear, viscoelástico linear ou não-linear, viscoelastoplástico, com ou sem dano, etc.) do material testado não tem qualquer influência no cálculo das tensões, desde que o ensaio possa ser considerado homogêneo, o que é uma hipótese fundamental da Mecânica dos Meios Contínuos (REDDY e GARTLING, 2010). A referida hipótese impõe condições ao distanciamento entre as escalas da menor dimensão do CP e da maior dimensão das heterogeneidades, adotada em função da aplicação como algo em torno de 3 a 10 vezes para a razão entre essas dimensões. Raciocínio semelhante pode ser elaborado para o cálculo de deformações.

Já em ensaios não-homogêneos, o cálculo das tensões e/ou das deformações é feito a partir da solução de um problema de valor de contorno, que envolverá necessariamente a utilização de uma equação constitutiva (elástico linear ou não-linear, viscoelástico linear ou não-linear, viscoelastoplástico, com ou sem dano, etc.). Ou seja, é preciso *a priori* o estabelecimento de uma hipótese sobre o comportamento reológico do material para, em seguida, estabelecer-se uma equação para obtenção dos campos de tensões e de deformações. A escolha do modelo constitutivo tem fundamental relevância no resultado da análise de tensões e deformações. Sendo assim, caso o comportamento do material não respeite a hipótese original feita sobre ele, o cálculo simplesmente não é válido. Idealmente, em vez de tensões e deformações, deveríamos tratar em ensaios não homogêneos de cargas (ou torques) e deslocamentos (ou deslocamentos angulares), para evitar o erro fundamental referido anteriormente.

Em ensaios sem danificação do CP, a adoção de testes não-homogêneos pode ser eficiente, desde que haja segurança sobre o tipo de comportamento do material testado e que a equação adotada no cálculo seja a adequada. Já em ensaios com dano, porém, não é possível no ensaio que busca determinar como o dano se desenvolve, saber *a priori* como o mesmo ocorre. Apesar da carga aplicada em um ensaio não-homogêneo frequentemente ser controlada, a tensão, a rigor, não o é. Por este motivo, a própria taxonomia associada ao Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à “Tensão Controlada” adotada pela norma brasileira é inapropriada.

Ademais, o cálculo de tensões e deformações, e, conseqüentemente, o cálculo de propriedades que relacionem tensões e deformações (Módulo Dinâmico – $|E^*|$ ou Módulo de Resiliência – MR) ao longo dos ciclos fica comprometido. Idealmente, em vez de módulos, deveríamos tratar em ensaios não homogêneos de rigidezes, para evitar o erro fundamental apontado.

A Figura 3.1 ilustra os ensaios de fadiga por (a) compressão diametral, (b) flexão em viga e (c) tração-compressão. Nos dois primeiros casos, por conta da não homogeneidade dos ensaios, as equações só são válidas para determinar tensões e deformações em um CP sem dano, já no ensaio por tração-compressão (c – homogêneo) as equações são válidas também para calcular tensões e deformações em qualquer situação de danificação.

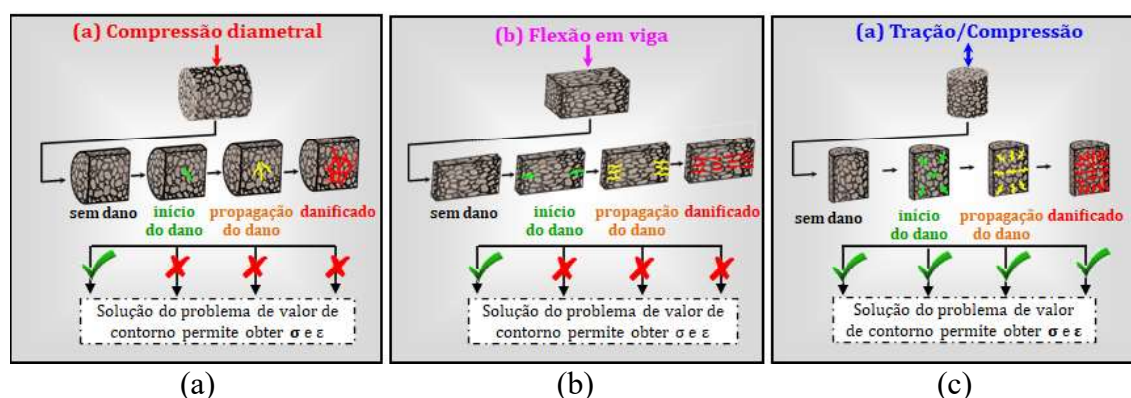


Figura 3.1 – Inadequação dos ensaios não homogêneos (com dano) para caracterizar a fadiga

Pelas razões aqui discutidas, entre essas opções, a única que apresenta um ensaio homogêneo, com carregamento de vaivém ϵ , portanto, a única capaz de obter propriedades fundamentais do material testado quanto à fadiga, é o ensaio de tração-compressão.

Quanto ao percurso de carregamento, é importante notar que, à exceção de materiais elásticos (cujo comportamento mecânico é reversível de maneira instantânea), há fluência quando o carregamento não oscila em torno de um eixo que representa a ausência de deformação. Além disso, a fluência excessiva leva ao dano e, em última avaliação, à ruptura. Ensaio de flexão e de tração-compressão direta (que não sejam de tensão controlada) respeitam essa característica da oscilação para o estudo do comportamento de fadiga dos materiais asfálticos. Porém, no caso do ensaio de compressão diametral, o carregamento é sempre no mesmo sentido, transmitindo-se em termos de tensões sempre de compressão ou sempre de tração em um dado ponto e uma dada direção no material. Dessa maneira, há a certeza de que

a fluência ocorre. Considerando este ensaio, determinar quanto de dano está associado à fluência ainda não é possível, devido à complicação fundamental mencionada anteriormente quanto à solução do problema de valor de contorno em materiais viscoelásticos com dano.

A tarefa de determinar o que é, no comportamento ao longo do ensaio fadiga por compressão diametral, proveniente do dano por fadiga e o que é proveniente simplesmente da fluência não é, à luz do conhecimento atual, possível. Dessa maneira, assim como se mostrou que o termo “tensão controlada” é usado inadequadamente para o ensaio adotado no Brasil, a própria nomenclatura de “fadiga” traz uma incoerência.

Alguns autores (BABADOPULOS *et al.*, 2015; FRITZEN, 2016) avaliaram a fadiga de misturas asfálticas com o emprego dos ensaios por tração-compressão e/ou por compressão diametral e/ou flexão em viga 4 pontos. Os referidos autores concluíram que misturas caracterizadas pelo ensaio por tração-compressão com semelhante susceptibilidade à fadiga, eram classificadas de forma diferente pelo ensaio por compressão diametral, pois esse último sempre apontou que as misturas com maiores MRs (maior rigidez) apresentavam maiores resistências à fadiga. Bernucci *et al.* (2008) corroboram com essa conclusão, alertando que existe uma tendência de considerar misturas com MRs mais elevados como melhores ao se realizar o ensaio de fadiga por compressão diametral, algo quase sempre inadequado como ficará demonstrado na presente tese.

Medina e Motta (2015) observam que revestimentos asfálticos com rigidezes elevadas têm capacidade limitada de contribuir com a fadiga de pavimentos. Ao empregar misturas com valores demasiadamente elevados de MR, principalmente quando a rigidez da camada de base é baixa, pode-se reduzir a vida útil do pavimento, com aumento do %AT. Essas observações corroboram a discussão anterior quanto à presença de dano por fluência (não contabilizado na análise) ao longo do ensaio de compressão diametral.

Não existe ensaio que, em laboratório, represente com exatidão o comportamento de campo. Contudo, é importante que se busquem continuamente procedimentos mais eficientes, capazes de simular o mais fielmente possível o mecanismo da fadiga e o comportamento fundamental do material. São essas representações de base física que permitem a simulação do comportamento de campo e, conseqüentemente, um melhoramento da correlação dos resultados obtidos em laboratório, e subsequente simulação computacional, com

as observações em escala real. Simulações de situações reais experimentadas pelas misturas (envolvendo a solução de problemas considerando uma geometria, contorno e cargas, além das propriedades fundamentais dos materiais) requerem a obtenção de propriedades fundamentais que possuam sentido físico e que permitam a previsão do trincamento do revestimento asfáltico, desde que os modelos estejam adequadamente calibrados com relação às observações feitas em misturas aplicadas em pavimentos. Sublinha-se, portanto, além da importância da evolução dos procedimentos de ensaio e análise, a imprescindível necessidade de dados de trincamento medidos em campo na maior qualidade (o que depende do arcabouço teórico sendo adotado) e quantidade possíveis.

Ensaio de tração-compressão são indicados como os mais adequados para caracterizar a fadiga de materiais há décadas (DI BENEDETTO *et al.*, 2001, 2004). No entanto, é necessário perceber que, além da escolha do ensaio, é importante selecionar um mecanismo de análise eficiente, capaz de contribuir com uma representação adequada do comportamento do material. Dessa forma, a combinação de ensaio de tração-compressão, executado com amplitudes de carregamento mais elevadas, em conjunto com um modelo de dano contínuo (*Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*, AASHTO TP 107, 2018) é apontado pela *Federal Highway Administration* (FHWA) como a metodologia mais promissora para caracterizar a fadiga de misturas asfálticas, por aliar um equilíbrio entre fundamentação e tempo curto de ensaio.

O uso do referido ensaio no dimensionamento de pavimentos pode vir a representar um incremento de precisão nas previsões de desempenho. Todavia, ainda que isso não ocorra num primeiro momento (sempre se dependerá de uma base de dados razoável), é o caminho indicado quando se considera o mais confiável conhecimento da Mecânica dos Materiais (Soares, 2019).

Reconhece-se, contudo, dificuldades de ordem prática existentes nesse momento no Brasil relativas à execução do ensaio de tração-compressão, que segue limitado a alguns grupos de pesquisa. Entretanto, esse tipo de dificuldade não deve ser usada como argumento para sequer se considerar os ensaios e métodos mais adequados à luz do melhor conhecimento disponível.

Nos últimos anos diversos autores nacionais vêm estudando fadiga de misturas, considerando diferentes ensaios (BARRA, 2009; MELO, 2014; BABADOPULOS, 2014; NASCIMENTO *et al.*, 2014; NASCIMENTO, 2015; BABADOPULOS *et al.*, 2015; FRITZEN, 2016; BOEIRA *et al.*, 2018; MOCELIN, 2018; SCHUSTER, 2018; ALMEIDA, 2019; OLIVEIRA, 2019; SANTOS, 2019). A Figura 3.2 ilustra as características de algumas das opções de ensaios que podem ser adotados para caracterizar a fadiga de misturas asfálticas.

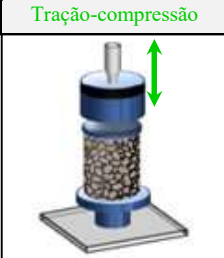
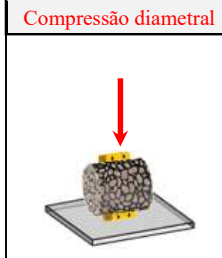
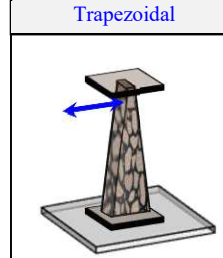

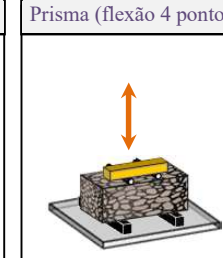
Tração-compressão	Compressão diametral	Trapezoidal	Prisma (flexão 3 pontos)	Prisma (flexão 4 pontos)
				
AASHTO TP 107 (2018)	DNIT 183 (2018)	EN 12697-24 (2018)	EN 12697-24 (2018)	EN 12697-24 (2018)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carregamento axial; ▪ Tensão ou deformação controlada; ▪ Estado homogêneo de tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compressão diametral; ▪ Força controlada; ▪ Dano por fluência; ▪ Estado biaxial de tensões; ▪ Estado não homogêneo de tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carregamento na menor extremidade; ▪ Força ou deslocamentos controlados; ▪ Deformação elástica constante; ▪ Estado não homogêneo de tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carregamento vertical no centro da viga (biapoiada nas extremidades); ▪ Força ou deslocamentos controlados; ▪ Estado não homogêneo de tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carregamento vertical nos dois terços médios da viga; ▪ Força ou deslocamentos controlados; ▪ Estado não homogêneo de tensões.

Figura 3.2 – Ensaios empregados para caracterizar a fadiga de misturas asfálticas

3.2.2 Dano por Fadiga

Nos últimos anos, o meio científico nacional vem se dedicando a estudar a fadiga de misturas asfálticas e buscando uma harmonização na nomenclatura e compreensão do fenômeno (BABADOPULOS, 2014; NASCIMENTO, 2015; FRITZEN, 2016; SANTIAGO *et al.*, 2018, 2019). Sob a óptica da mecânica do dano contínuo, o dano deve ser avaliado pela observação da densidade efetiva de microtrincas.

Tem-se que o indicador clássico de dano D (LEMAITRE e CHABOCHE, 1990; LEMAITRE, 1996) é numericamente igual a razão da porção da área efetivamente trincada e da área total da amostra. Esta variável busca relacionar a área de seção resistente perdida pela presença de microdefeitos em relação à área total intacta, variando, portanto, de 0 (material intacto) a 1 (material sem qualquer contato resistente entre duas faces, completamente rompido). Outro indicador clássico é o de Integridade (C) proposto inicialmente por Kachanov (1958), que consiste na razão entre a área efetivamente resistente e a área resistente inicial. A

integridade é, portanto, o complemento em relação a 1 do Dano D . Como é difícil medir as áreas resistentes perdidas pela presença dos microdefeitos, classicamente, para materiais elásticos, se mede o módulo de elasticidade aparente (\tilde{E}) dos materiais, em seguida deve relacioná-lo com o valor de D ou de C , considerando que à parte os microdefeitos os pontos materiais permanecem com seu módulo intacto (E), o que se traduz pela Equação 3.1.

$$\tilde{E} = E(1 - D) = C.E \quad (3.1)$$

Para materiais que têm como origem da variação de módulo outros fenômenos, como é o caso de materiais betuminosos (NGUYEN *et al.*, 2011; MANGIAFICO *et al.*, 2017; BABADOPULOS *et al.*, 2019), essa obtenção das variáveis de dano a partir de variações de módulo deve ser enxergada com muita cautela. Seguindo a literatura atualmente mais adotada no Brasil, porém, no presente estudo, entende-se o dano por fadiga como a perda paulatina da rigidez da mistura asfáltica (CP em laboratório e revestimento asfáltico em campo) sujeita às solicitações, da mesma maneira que adotado no modelo S-VECD.

Em pavimentos, falhas por fadiga expressam-se na forma de trincas, avaliadas pela medição do percentual de Área Trincada (%AT) na superfície do pavimento. Já em laboratório, durante a execução de ensaios, a falha pode ser identificada com a ruptura da amostra ensaiada ou a partir de alterações observadas nas medidas macroscópicas no volume do CP, como o pico de ângulo de fase ao longo dos ciclos (GOODRICH, 1991; BABADOPULOS, 2014; NASCIMENTO, 2015). Essas variáveis são de natureza diferente e acabam, à luz do conhecimento atual, forçando o uso de empirismo para o relacionamento entre elas, o que dá origem às famosas Funções de Transferência (FTs) mesmo para os métodos considerados mais de natureza mais mecanicista.

Finalmente, é importante citar outros cuidados com a interpretação de resultados de caracterização e de simulação de fadiga. Uma delas é em relação ao sentido de propagação das trincas, uma vez que as mesmas se propagam na vertical e na horizontal, respectivamente, nos revestimentos em campo e nos CPs em laboratório. Os métodos europeus de análise de fadiga (EN 12697-24, 2012), independente de qual geometria seja selecionada, recomendam a obtenção de amostras de placas compactadas de maneira que o sentido de carregamento no CP corresponda ao sentido de carregamento que ocorreria se a placa inteira fosse carregada. Trata-se de uma preocupação com possível comportamento anisotrópico das misturas asfálticas, que

se sabe ter efeito de diferenças da ordem de 15% quanto ao módulo (DI BENEDETTO *et al.*, 2016) e tem potencial para efeito ainda mais importante quanto à resistência à fadiga. Neste trabalho, considerou-se comportamento isotrópico para todos os materiais do pavimento, incluindo efeito isotrópico do dano. Em outras palavras, além de as rigidezes não variarem em função da direção dentro de um material, uma vez que ocorre dano (perda de seção resistente) em um determinado ponto, esse dano é considerado com o mesmo valor em todas as direções no material naquele ponto.

3.2.3 Mecânica do Dano Contínuo (MDC)

Segundo Lemaitre e Desmorat (2005), o termo Mecânica do Dano Contínuo foi empregado pela primeira vez por J. Hult em 1972, quando esse pesquisador tentava simular o momento do surgimento de trincas em estruturas sujeitas a cargas pesadas. Ainda segundo esses autores, analisar tensões e deformações de estruturas e componentes não é um fim em si, pois este tipo de análise se destina a buscar previsibilidade da capacidade de manutenção e fabricação de estruturas, componentes e de projetos. O dano causado pela formação de descontinuidades pode ser avaliado pela redução de diversas propriedades, tais como: módulo de elasticidade, tensão de escoamento, dureza e densidade. Ou ainda medido pelo aumento de outras propriedades, e.g., taxa de deformação por fluência e resistência elétrica. Prever as consequências da deterioração na integridade mecânica é o objetivo da mecânica do dano (LEMAITRE e DESMORAT, 2005), dando suporte ao projeto de estruturas e de sua manutenção. Neste trabalho, a propriedade avaliada para estimar o dano é o valor absoluto do módulo complexo da mistura asfáltica, utilizada para o cálculo da integridade (C) no modelo S-VECD.

3.3 Métodos

3.3.1 Ensaio de fadiga por tração-compressão

Dentre as opções de testes hoje disponíveis para caracterizar a fadiga de misturas asfálticas, o ensaio por tração-compressão é o que considera um maior número de variáveis relevantes, como carga aplicada, deformação, temperatura, frequência de carregamento, viscoelasticidade do material, ângulo de fase, $|E^*|$, além de controlar o valor da deformação imposta pela prensa, sem a maior parte das complicações fundamentais apresentadas

anteriormente. Aplica-se carregamento senoidal de tração-compressão (com amplitudes constantes de movimentação do pistão da prensa) levando o CP à ruptura ou até que seja observada uma queda abrupta do ângulo de fase. O fato de as amostras serem submetidas aos carregamentos oscilatórios com troca de sinal e com períodos de tração semelhantes aos de compressão mantém controlado o dano por fluência. Tal característica é um diferencial positivo do referido teste, pois corrobora com a obtenção de resultados com maior exatidão, identificando a parcela do dano realmente causado por fadiga.

As amostras utilizadas no ensaio de fadiga por tração-compressão devem apresentar geometria cilíndrica, medir aproximadamente 100mm de diâmetro e 150mm de altura. Normalmente, para misturas densas, essas têm aproximadamente 4% ($\pm 0,4\%$) de Volume de Vazios (Vv). Alguns autores argumentam que se deve empregar amostras com o Vv médio esperado em campo, ou seja, 5,5% no caso de misturas densas (NASCIMENTO, 2015). Segundo a norma da AASHTO TP 107 (2018), a temperatura selecionada para a realização do ensaio deve ser a média menos 3°C das temperaturas baixa e alta do PG (*Performance Grade*) do Ligante Asfáltico (LA) adotado, sem ultrapassar 21°C (temperatura máxima indicada para realizar o ensaio). Para os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAPs) 50/70 utilizados no Brasil, normalmente a temperatura de 19°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) é adequada.

É importante serrar topos e bases das amostras a serem ensaiadas, para extrair suas porções com maior porosidade (Vv), uma vez que é sabido que a distribuição do Vv nas amostras não é homogênea (NASCIMENTO, 2006). As amostras originalmente de 100mm de diâmetro por 150mm de altura depois de serradas, devem medir aproximadamente 130mm de altura. Para garantir o sucesso na acoplagem dos CPs à prensa, recomenda-se o uso de serras/retíficas capazes de assegurar o paralelismo das novas faces geradas. Amostras não serradas, ou serradas com pouca precisão, tendem a romper nas extremidades (terço superior ou terço inferior – zona onde normalmente a compactação das amostras é mais ineficiente), regiões fora da área de medição (terço médio do CP) dos LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) utilizados para medir deslocamentos no CP, o que inviabiliza os seus usos para obtenção de propriedades de fadiga. Alguns autores (e.g. KUTAY *et al.*, 2009, PAPE *et al.*, 2018 e LEE *et al.*, 2019) utilizaram com sucesso amostras com geometrias menores do que as reportadas no parágrafo anterior. Os mesmos compararam os impactos da adoção do tamanho regular de corpos de prova (100 mm de diâmetro por 150 mm de altura) com tamanhos menores (71,4 mm e 38,1 mm de diâmetro por 100 mm de altura), os autores concluíram que a menor

geometria avaliada poderia ser usada sem prejuízo, possibilitando inclusive a realização dos testes de fadiga por tração-compressão em corpos de prova extraídos de campo.

Em seguida, deve-se proceder com a colagem dos *targets* e dos *end plates*, havendo gabaritos específicos para auxiliar nessa etapa (Figura 3.3 – passos 1, 2 e 3). Para a colagem dos *targets*, recomenda-se, respectivamente, a utilização de aproximadamente 7g de adesivo epóxi pastoso (tempo de cura de aproximadamente 10min). Para os *end plates*, que requerem maior quantidade de adesivo (cerca de 80g), pode-se utilizar um gabarito de colagem e um adesivo epóxi de média ou baixa fluidez (tempo de cura de aproximadamente de 10h), para evitar escoamento durante o período de cura. Dessa forma, para acelerar a colagem dos *end plates* de diversos CPs, recomenda-se a confecção de mais de um gabarito.

Após as etapas de colagem, as amostras estão aptas a serem montadas na prensa (com o auxílio de um sistema de acoplagem, de preferência rotulado) e ensaiadas (Figura 3.3 – passos 4 e 5). Não raro, a ruptura, durante a execução do ensaio, ocorre na interface da cola e não na amostra (Figura 3.3 – passo 6), o que também inviabiliza a utilização da amostra ensaiada para análise. Processos de limpeza das superfícies antes da colagem, finalizados com álcool ou acetona, mitigam esse problema. Vale ressaltar que, a depender da prensa adotada na realização dos ensaios, os modelos das peças (rótula, *targets* e *end plates*) variam e podem ser projetados diferentemente, desde que se garanta que as medidas de deformação realizadas com os LVDTs sejam semelhantes (amostra testada em tração-compressão com flexão desprezível).

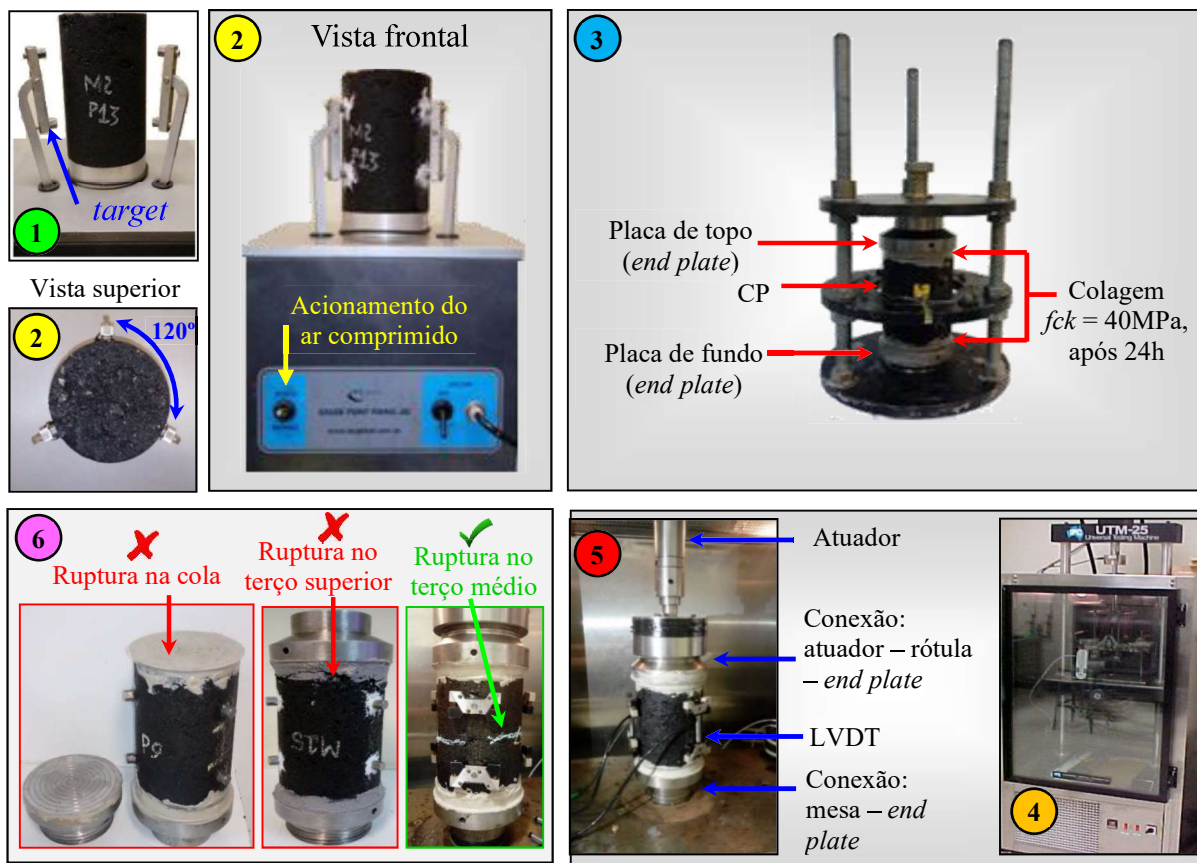


Figura 3.3. Preparação, posicionamento e possibilidades de ruptura da amostra no ensaio de fadiga por tração-compressão

Após a acoplagem da amostra na prensa, para garantir que o ensaio seja realizado com todo o conjunto solidarizado, faz-se necessário um teste de sinal. Nesse procedimento são aplicados 15 ciclos de carregamento a 10Hz de frequência e baixa amplitude de deslocamento ($-0,1$ e $+0,1$ mm medido no atuador), para analisar se o sinal das deformações medidas nos LVDTs está seguindo uma função senoidal aceitável. Havendo folgas na montagem, a função apresentará desvios em sua forma, principalmente próximo aos picos e vales, e próximo à inversão de sinal (onde o sistema de acoplagem pode trocar de face de contato, especialmente se acoplagens de parafuso forem utilizadas). Nesse caso, duas alternativas são propostas: (i) desmontar todo o conjunto e remontar novamente apertando o mais firmemente possível todas as conexões e proceder um novo teste de sinal para analisar a forma da função senoidal, e/ou (ii) modificar os valores dos controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) e realizar um novo teste para verificar o sinal. A adoção de PID inadequado pode levar não apenas a ensaios com sinal inadequado, mas também ao rompimento inadequado das amostras logo no início do ensaio.

Para a caracterização do dano segundo o modelo S-VECD, é necessário conhecer o comportamento viscoelástico linear da mistura asfáltica previamente à realização do ensaio de fadiga. Para tal, realiza-se o ensaio de Módulo Dinâmico ($|E^*|$) (DNIT 416, 2019), com carregamento de compressão axial semi-senoidal (*haversine*), e obtém-se a curva mestra média correspondente à mistura que será avaliada quanto à fadiga. O ensaio de fadiga por tração-compressão preconiza a execução de uma etapa denominada de *fingerprint*, antes da realização do ensaio de fadiga propriamente dito. Esse procedimento é uma espécie de ensaio de $|E^*|$ resumido, realizado apenas na temperatura e na frequência do ensaio de fadiga (10Hz), porém com a aplicação de poucos ciclos de carregamento de tração-compressão (a mesma do ensaio de fadiga), com o objetivo de situar, em termos de rigidez, o CP do ensaio de fadiga em comparação à média esperada para a mistura com que foi fabricado aquele CP.

Diferentemente do ensaio de $|E^*|$, o *fingerprint* é realizado com o CP submetido às mesmas condições do ensaio de fadiga (temperatura do ensaio de fadiga, carregamento de tração-compressão, e submetido à colagem de *targets* e *end plates*), com a diferença particular a ser sublinhada de que o carregamento é de tração-compressão, diferentemente do carregamento de compressão *haversine* utilizado no ensaio de $|E^*|$. Há diferenças esperadas entre os resultados com os dois métodos de carregamento (NGUYEN *et al.*, 2019). O referido autor, ao variar o modo de carregamento, verificou diferenças nos valores de $|E^*|$ de até 40%, sobretudo nos ensaios conduzidos com temperaturas mais elevadas. Dessa maneira, o procedimento é imprescindível para a adequada interpretação da variação de rigidez ao longo dos ciclos do ensaio de fadiga.

Após a finalização do *fingerprint*, para que as deformações retornem e não haja mais carregamento, deve-se descansar o CP por aproximadamente 20 a 45min. O CP deve permanecer acoplado ao equipamento durante esse tempo. Deve-se então determinar, para cada CP testado, qual o movimento de pistão da prensa é requerido para se aplicar a amplitude de deformação axial desejada na amostra (medida com auxílio dos LVDT).

Em seguida, o ensaio de fadiga propriamente dito é iniciado, com o movimento de pistão determinado para uma dada amplitude de deformação visada no CP, até a ruptura. Recomenda-se o ensaio em 9 CPs por mistura, sendo que cada conjunto de 3 CPs deve ser submetido a um valor específico de deformação axial, como por exemplo, 200, 350 e 500 *microstrains* ($\mu m/m$), não devendo o ensaio ter quantidade de ciclos inferior a 500 (50s) e nem

superior a 100.000 (166,66min). Dessa maneira, mantém-se uma lógica de busca de propriedades de fadiga (muitas repetições de ciclos, em diversas amplitudes de carregamento) e se evitam tempos de caracterização muito elevados.

Com o ensaio de tração-compressão, mesmo que algumas amostras sejam perdidas (por ruptura fora das medições dos LVDTs por exemplo), a obtenção de pelo menos 4 ensaios válidos em pelo menos 3 amplitudes de deformação diferentes já permite a obtenção das propriedades de dano desejadas. Uma vez que os *end plates* já estejam colados, a realização do ensaio de fadiga por tração-compressão completo em uma mistura pode ser realizado em 1 único dia de trabalho, costumando requerer até no máximo 3 dias. Costuma-se precisar de menos de 1 semana para a caracterização completa de viscoelasticidade linear e de fadiga de uma dada mistura asfáltica (3 CPs para ensaios de módulo e 9 para ensaios de fadiga S-VECD). Comparativamente, os ensaios de fadiga por compressão diametral e flexão em viga, por exemplo, podem demandar até 1 mês para a caracterização de uma mistura.

3.3.2 Tratamento de dados com modelo S-VECD do ensaio de fadiga por tração-compressão e critério de ruptura

A etapa de tratamento de dados do ensaio de fadiga por tração-compressão utilizada neste trabalho é feita à luz do modelo de Dano Contínuo Viscoelástico Linear Simplificado (S-VECD) (UNDERWOOD *et al.*, 2012), esse derivado da teoria do Dano Contínuo Viscoelástico Linear (VECD) (PARK *et al.*, 1996). Vale destacar que optar pelo ensaio de fadiga por tração-compressão não significa necessariamente escolher também o modelo de tratamento de dados citado. Ambos, modelo e teoria, são apresentados de forma resumida nas próximas seções, sendo que mais detalhes constam em Badadopoulos (2014), Nascimento (2015), Almeida (2019), Oliveira (2019) e Santos (2019).

De posse da caracterização viscoelástica da mistura ($|E^*|$), os parâmetros (C_1 e C_2) da equação de Williams-Landel-Ferry (WLF) devem ser obtidos. Após a finalização do ensaio de fadiga, estarão disponíveis dados das variáveis monitoradas ao longo do tempo de sua execução. Esses dados, sem tratamento, não permitem a avaliação da vida de fadiga da mistura ensaiada. Os mesmos devem ser tratados utilizando a metodologia S-VECD, etapa discutida na Seção 3.3.3. Para tratar o grande volume de dados resultante do ensaio de fadiga por tração-compressão, a equipe do LMP/UFC desenvolveu uma rotina no *software* Matlab.

Em seguida, deve-se quantificar a integridade (C) e a variável interna de estado de dano (S) para a posterior obtenção da curva C vs S . Para quantificar o parâmetro S emprega-se a Equação (3.2). Este parâmetro deriva da Teoria do Potencial de Trabalho de Schapery (SCHAPERY 1990; PARK *et al.*, 1996) e da escolha particular de uma equação para a evolução do dano. Recomenda-se a leitura de Almeida (2019) para um bom entendimento do parâmetro S , que funciona como uma “contagem de dano” (ou de outras mudanças microestruturais reunidas para o S-VECD em apenas uma variável interna de estado) a ser utilizada para o material analisado apenas. Esta variável tem inclusive unidades diferentes em função do valor de α e não deve ser comparada entre diferentes misturas.

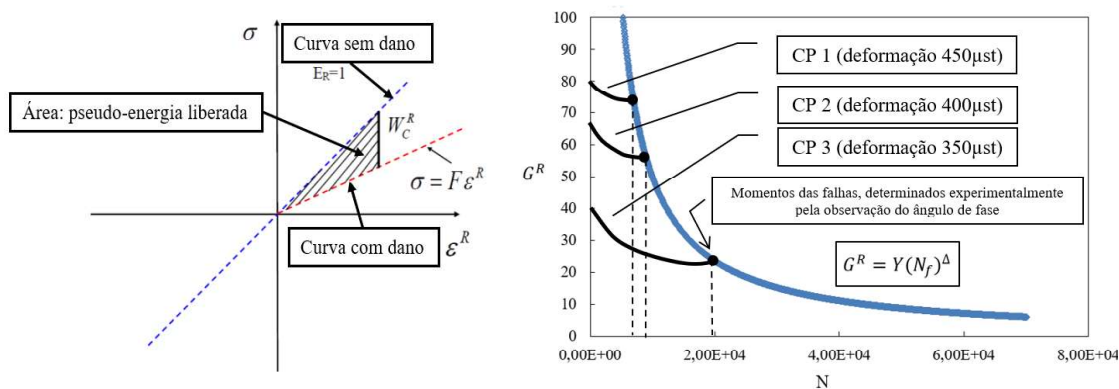
$$S(t) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} (\varepsilon_m^R)_i^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (3.2)$$

Onde: $S(t)$ = variável interna de estado de dano no instante de tempo igual a t ; N = número de ciclos do ensaio; $(\varepsilon_m^R)_i^2$ = quadrado da pseudodeformação no ciclo i ; $C_{i-1} - C_i$ = diferença da integridade do material entre os ciclos $i - 1$ e i ; α = taxa de evolução do dano; $t_i - t_{i-1}$ = intervalo de tempo entre os ciclos i e $i - 1$.

Nessa etapa faz-se uso da equação $C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}}$. A curva C vs S é considerada uma característica intrínseca de cada mistura testada que independe da temperatura e do modo de carregamento (DANIEL e KIM, 2002), de maneira que a consideração da mesma é adequada para simulação de condições diferentes das ensaiadas.

Embora a referida curva descreva a evolução do dano em cada mistura testada, analisá-la isoladamente não permite inferir sobre a susceptibilidade à fadiga de misturas. Não possibilita ainda a avaliação do desempenho de pavimentos em campo. Para suprir essas necessidades, é necessária a adoção de um critério de ruptura/falha para uso associado com a curva C vs S . Tal critério pode assumir diversas formas, sendo a mais comumente adotada aquela baseada na taxa média de liberação de pseudo-energia (G^R) (Figura 3.4a). Sabouri *et al.* (2014) propuseram esse critério de falha. A Figura 3.4b mostra o referido critério de ruptura (G^R vs N_f), representado pelo envoltório de ruptura (curva azul), que, por sua vez, é obtida pela união dos pontos/momentos das falhas das curvas pretas (curvas experimentais de diferentes ensaios – $N = N_f$). A referida envoltória de ruptura determina o limite superior da taxa média

de pseudo-energia liberada por ciclo que a mistura suporta, sendo, portanto, uma característica do material. Assim, esse pode ser utilizado como critério de falha na simulação de sollicitações diferentes daquela em que a curva foi obtida.



(a) Representação gráfica da pseudo-energia liberada (adaptada de Zhang *et al.*, 2013)

(b) Critério de ruptura (G^R vs N_f)

Figura 3.4. Ilustrações detalhando o critério de ruptura adotado no presente trabalho

A curva G^R vs N_f é obtida durante o tratamento de dados posterior à realização do ensaio de fadiga, podendo ser ajustada pela equação $G^R = Y(N_f)^\Delta$. Os parâmetros Y e Δ são constantes de regressão que ajustam os valores de G^R vs N_f obtidos do ensaio de fadiga por tração-compressão para diferentes amplitudes de deformação. Para que um CP chegue à ruptura é necessário que este libere a taxa média de pseudo-energia (G^R) necessária à ruptura. Logo, dispor de uma menor velocidade (taxa) de liberação de pseudo-energia é fator determinante para que uma mistura tenha uma menor susceptibilidade à fadiga. Almeida (2019) detalhou todas as equações que devem ser utilizadas na obtenção dos parâmetros necessários para as curvas C vs S e G^R vs N_f .

De posse dos parâmetros das curvas C vs S e G^R vs N_f é então possível avaliar a susceptibilidade à fadiga de misturas asfálticas observando-se a curva de Wöhler simulada em diferentes condições de frequência, temperatura e controle (tensão ou deformação, ou ainda ciclos em amplitudes diferentes). Essa curva de Wöhler pode ser obtida em diferentes condições de carregamento (controle de tensão ou de deformação, diferentes temperaturas e frequências etc.) e corresponde à simulação de fadiga a nível de material utilizando os resultados da caracterização mecânica. O procedimento detalhado é apresentado na Seção 3.3.3 a seguir. Para simulação do trincamento a nível de estrutura (em pavimentos asfálticos) pode ser usada análise

estrutural combinada com as propriedades de dano do material da camada de revestimento e com FT devidamente calibradas (SANTIAGO *et al.*, 2019). Neste trabalho, para a simulação a nível de estrutura, foi adotada a calibração de Santos (2019). O procedimento detalhado é apresentado na Seção 3.3.4.

3.3.3 Avaliação da susceptibilidade à fadiga de misturas asfálticas com simulação a nível de material

A curva de Wöhler é uma maneira tradicional de se representar a vida de fadiga de materiais, relacionando valores de níveis de tensão ou de deformação com o número de ciclos de carregamento (N_f). Vale notar que se deve escolher uma temperatura e uma frequência de referência para construir esta curva. No Brasil é comum a utilização de 25°C e 10Hz, enquanto na Europa empregam-se os valores de 10°C e 10Hz. Logo, os resultados expostos pela referida curva só representam o comportamento das misturas nesta condição particular. Fez-se uso das Equações (3.3 a 3.6) descritas em Nascimento (2016) para simular o número de ciclos até a falha (N_f) (curva de Wöhler).

$$N_f = \left(\frac{\delta}{Y \left(\frac{C_{12}}{p} + 1 \right)} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \frac{C_{12}}{p}}} \quad (3.3)$$

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon_{TA}^R)^2 C_{11} \left(\frac{p(C_{11} C_{12})^\alpha (\varepsilon_{TA}^R)^{2\alpha} K_1}{f_R 2^\alpha} \right)^{\frac{C_{12}}{p}} N^{\frac{C_{12}}{p}} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{TA}^R = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \left[(\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right] \quad (3.5)$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \quad (3.6)$$

Onde: C_{11} e C_{12} = coeficientes da curva C vs S ; Y e Δ = coeficientes do critério de ruptura G^R vs N_f ; N_f = número de ciclos até a falha; ε_{TA}^R = amplitude da pseudodeformação; α = taxa de evolução do dano; f_R = frequência reduzida; $\varepsilon_{0,pp}$ = amplitude de deformação pico a pico; β = parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração; $|E^*|_{LVE}$ = módulo dinâmico viscoelástico (sem dano) linear nas condições de temperatura e frequência.

O parâmetro relacionado à taxa de evolução de dano (α) é calculado a partir das propriedades viscoelásticas lineares do material ($\alpha = 1 + \frac{1}{m}$, onde m indica o máximo valor da derivada do módulo de relaxação em relação ao tempo, em escala log-log), sugerindo-se que materiais com menor capacidade de relaxação devem evoluir em danificação mais rápido do que materiais com maior capacidade de relaxação.

Nas análises, deve-se adotar ainda um valor para β que quantifica a duração do tempo de esforço de tração no ciclo de carregamento (β varia de -1 até +1, respectivamente para solicitação somente de compressão e para solicitação somente de tração). Normalmente, considera-se $\beta = -0,08$, valor médio encontrado nos testes desenvolvidos por Nascimento (2015). Na prática, a adoção deste β indica que o tempo ao qual a amostra é submetida à compressão durante a execução do ensaio é ligeiramente superior ao tempo de tração. Caso esses tempos fossem iguais, deveria ser adotado o valor de 0 para β . Recomenda-se a leitura de Santos (2019) para ter acesso a um maior detalhamento sobre o parâmetro β . Segundo Lemaitre e Desmorat (2005), microfissuras são abertas sob tração e são fechadas sob compressão, ou seja, o dano se manifesta quando existir esforços de tração, algo que também é adotado no modelo S-VECD (UNDERWOOD *et al.*, 2012).

3.3.4 Avaliação da susceptibilidade à fadiga de pavimentos asfálticos com simulação a nível de estrutura

A fadiga de misturas se manifesta em campo na forma de trincamento, sendo possível quantificá-la pela observação do percentual de área superficial trincada do revestimento (%AT). Esse parâmetro deve ser simulado computacionalmente para modelar a susceptibilidade à fadiga de pavimentos reais. Para isso será necessário ligar informações mecanísticas (simulação de dano nos materiais) com a observação de campo, que é de outra natureza, normalmente com utilização de uma FT. Deve-se selecionar um procedimento de análise (eventualmente codificado em um *software*) e em última instância a própria FT, que considere o mesmo critério de falha adotado no tratamento de dados para obter as propriedades materiais, por exemplo, a curva G^R vs N_f . Qualquer escolha diferente de modelos materiais ou estruturais deve ser associada ao uso de uma FT diferente, fruto de uma nova calibração (SANTOS, 2019), conforme detalhado adiante. Além dos dados da mistura aplicada na camada

de revestimento do pavimento a ser simulado, é necessário conhecer os parâmetros das subcamadas e do subleito (espessuras, MRs e coeficientes de Poisson), do tráfego de veículos e do clima. Poderiam ainda ser mencionados parâmetros não levados em conta nos sistemas de dimensionamento, mas que já fazem parte do corpo de conhecimento atual, como as condições de aderência entre as camadas (SILVA *et al.*, 2017), efeitos não lineares dos materiais, efeitos de umidade (BASTOS, 2013; ARAÚJO *et al.*, 2019), entre outros.

Nesse ponto, reside a maior parte do empirismo dos atuais métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento. Enquanto que em laboratório se determina uma falha por fadiga a partir de medidas do comportamento do material (como a evolução do ângulo de fase ao longo do ensaio de fadiga por tração-compressão ou pela obtenção de determinado valor de G^R a uma dada quantidade de ciclos), considerando-o como um meio contínuo com dano, em campo o que se observa são trincas macroscópicas, cuja própria medida depende do indicador adotado. Ou seja, as variáveis previstas de fato através de cálculo mecanístico não correspondem às variáveis observáveis em campo.

Dessa maneira, será necessário o uso de uma FT capaz de relacionar o dano previsto a partir das medidas em laboratório (que é dependente dos modelos estruturais e de materiais adotados e dos ensaios de caracterização empregados) e a “contagem” de trincas em campo (que é dependente do método de contagem). Como pode ser visto, o empirismo desse processo, dada a lógica corrente dos métodos mecanístico-empíricos, acaba sendo inevitável. Afinal, enquanto em laboratório se considera o dano em meio contínuo, em campo se consideram trincas e área trincada. Observa-se ainda que a escolha da FT a ser empregada não é livre, devendo-se empregar a FT adequada àquele conjunto de hipóteses simplificadoras, modelos estruturais, materiais adotados e ensaios de caracterização empregados, além do próprio método de contagem de trincas. É incorreto adotar uma FT diferente da correspondente ao sistema de previsão usado no cálculo, devendo-se, para modificações nos modelos utilizados, proceder-se com novas calibrações com relação aos dados de campo. O desenvolvimento de uma FT, calibrada para uma determinada região e/ou grupo de trechos, não é tarefa do usuário final das tecnologias descritas neste capítulo, e sim do profissional responsável pela calibração do procedimento de análise (eventualmente codificado em um *software*) a ser adotado nas simulações computacionais. Apresenta-se aqui um resumo dos princípios de desenvolvimento de uma FT com o intuito de evidenciar os impactos da adoção de diferentes procedimentos nesta etapa.

Para Santiago *et al.* (2018), entende-se o dano médio (*DM*) como sendo o somatório dos danos sofridos pelos pontos analisados abaixo de um dos pneus do eixo padrão e dividido pelo número total de pontos da área do revestimento afetada pelo carregamento. Segundo Santiago *et al.* (2019), para desenvolver uma *FT*, inicialmente deve-se determinar o *DM* para cada mês (podendo os dias ser divididos, por exemplo, em 3 turnos – manhã, tarde e noite) da simulação da duração da vida útil. Mesmo que a análise estrutural realizada não seja viscoelástica, nessa etapa pode-se inserir a influência de diferentes temperaturas e da velocidade do carregamento no valor de módulo de elasticidade utilizado na análise estrutural elástica para o cálculo das tensões e deformações, assim como na curva de Wöhler do ponto analisado. Dessa forma, para cada temperatura ou frequência avaliada, uma análise estrutural diferente é realizada. Esse procedimento fornece uma curva *DM vs N*.

É necessário ainda calcular um fator de ajuste (translação) que deve ser aplicado ao *DM*, que, depois de ter a translação aplicada, passa a ser chamado de *DM* reduzido. Este permite correlacionar com maior precisão o dano com o %AT. Vale notar que a adoção de premissas distintas conduz a evoluções também diferentes de *DM* e, por conseguinte, expectativas divergentes de vida útil de pavimentos. A leitura de Santiago *et al.* (2019) ajuda a compreender os impactos da adoção de premissas distintas na análise da fadiga de pavimentos asfálticos. Esses autores compararam 3 trabalhos científicos (NASCIMENTO, 2015; FRITZEN, 2016; SANTIAGO *et al.*, 2018) que partem de premissas de ensaios/análises diferentes e chegam a resultados diferentes ao avaliarem a vida útil do mesmo banco de dados de misturas. Nas avaliações realizadas nos citados trabalhos, o ensaio de fadiga por compressão diametral conduziu a valores mais severos de *DM* e de %AT. Fritzen *et al.* (2019) reportaram que, ainda na fase de testes do MeDiNa, foram encontradas inconsistências motivadas, entre outras coisas, pela severidade excessiva da caracterização da vida fadiga feita pelo ensaio de fadiga por compressão diametral.

No entanto, faz-se aqui uma reflexão sobre o estereótipo de severo, não raramente atribuído ao ensaio de fadiga por compressão diametral. Avalia-se que, independentemente da severidade ou brandura do ensaio adotado, no caso desse ter sentido físico, com capacidade de representar o dano por fadiga do material que se pretende avaliar, é razoável ansiar por resultados satisfatórios na representação deste defeito. Isso é esperado desde que se esteja trabalhando com uma *FT* bem calibrada/adequada. Porém, se o ensaio não tem capacidade de

representar o dano por fadiga, não deve haver expectativa de que o processo de calibração leve a uma previsão de desempenho adequada.

Vale destacar ainda os tempos de execução dos ensaios de fadiga por tração-compressão e compressão diametral, respectivamente, 1 dia e 1 mês (ver Seção 3.1). Entende-se então, que o ensaio tração-compressão é comumente o mais severo (e não o inverso, conforme normalmente entendido no Brasil), haja vista que o rompimento dos CPs durante a sua execução ocorre em menos tempo. Logo, acredita-se não ser razoável indicar a severidade do ensaio de fadiga por compressão diametral como o motivo principal da falta de acurácia de métodos de dimensionamento e/ou análise de pavimentos que adotam esse procedimento. Ainda considerando o ensaio de fadiga por compressão diametral, sublinha-se a impossibilidade de separar o dano por fadiga do dano por fluência, além da sua não homogeneidade como os reais motivos dos dissabores mencionados. Logo, entende-se que esse ensaio é inapropriado para representar a fadiga de misturas asfálticas. Para mais detalhes dos tópicos discutidos neste item, recomenda-se a leitura de Nascimento (2015), Fritzen (2016), Santiago (2017) e Santiago *et al.* (2018, 2019).

3.4 Exemplos de simulação em materiais e em pavimentos

Para exemplificar a aplicação do processo de caracterização de dano a partir do ensaio de fadiga por tração-compressão, investiga-se a seguir o comportamento de duas misturas asfálticas (M1 e M2). A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros das referidas misturas: C_1 e C_2 (equação WLF), C_{11} e C_{12} (ajuste da curva C vs S), α (taxa de evolução do dano), $|E^*|_{LVE}$ (rigidez sem dano e nas condições de temperatura e frequência do ensaio de fadiga por tração-compressão), Y e Δ (parâmetros da curva G^R vs N_f). Como discutido anteriormente, adotou-se $\beta = -0,08$. A tabela apresenta ainda a estrutura de pavimento usada nas simulações do trincamento de campo. Já as Figuras 3.5a e 3.5b trazem as curvas C vs S e G^R vs N_f , respectivamente, para M1 e M2.

Tabela 3.1. Dados das misturas investigadas e estrutura dos trechos simulados

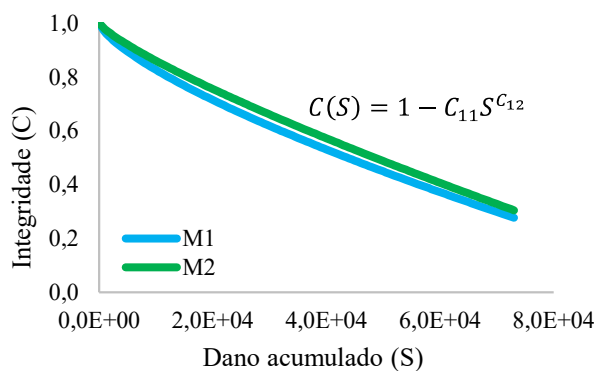
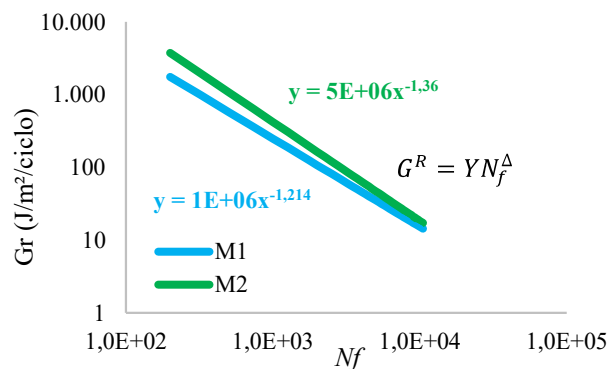
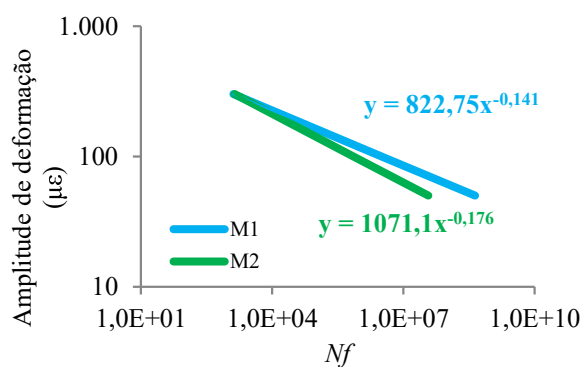
Características das misturas (temperatura de referência = 20°C)								
Misturas	WLF		C vs S		α	$ E^* _{LVE}$ (kPa)	G^R vs N_f	
	C_1	C_2	C_{11}	C_{12}			Y	Δ
M1	12,4	98,1	2,33E-04	7,18E-01	2,94	9,42E+06	1,09E+06	-1,214
M2	24,9	194,4	8,27E-05	8,07E-01	2,89	1,10E+07	5,06E+06	-1,360
Características adotadas para o coeficiente de Poisson da mistura asfáltica, a geometria do pavimento e os módulos das camadas granulares								
Camada	Espessura (cm)		Módulo de elasticidade (MPa)		Coeficiente de Poisson			
Revestimento	8		-		0,30			
Base	15		400		0,35			
Sub-base	15		204		0,35			
Subleito	-		150		0,40			

Foram analisadas as susceptibilidades à fadiga de M1 e M2 a nível de material pela avaliação de suas curvas de Wöhler (Figura 3.5c) a 20°C e 10Hz. Em seguida, utilizou-se o *software* de dimensionamento de pavimentos asfálticos CAP3D-D para simular do %AT (Figura 3.5d) de dois pavimentos P1 e P2 (de mesma geometria variando a mistura) revestidos, respectivamente, por M1 e M2. O referido *software* é a evolução do programa de análise estrutural CAP3D (HOLANDA *et al.*, 2006) e traduz o procedimento de análise resumido na Seção 3.4 com a calibração apresentada em Santos (2019).

Nas simulações, adotou-se um tráfego correspondente a $N = 1,9 \times 10^7$ e um período de 120 meses e foi usado o valor médio de temperatura de Fortaleza-CE nos últimos 12 meses (27,2°C), constante ao longo do tempo. Os pavimentos foram simulados adotando-se a velocidade dos veículos igual a 7,8km/h, pois, conforme a equação de Brown (1973) (Equação 3.7), esta velocidade associada à estrutura do pavimento proposta equivale a uma frequência de carregamento na fibra inferior do revestimento igual a 10Hz. Considerou-se ainda um modelo de eixo padrão simples de roda dupla (80kN), tendo cada roda um raio de 0,108m. Assumiu-se um grau de confiança (unicaudal) de 90%.

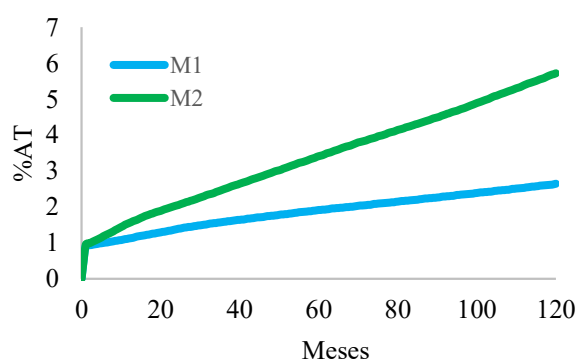
$$\log t = 0,5y - 0,2 - 0,94 \log v \quad (3.7)$$

Onde: t = inverso da frequência em Hz (s); y = profundidade do pavimento (m); v = velocidade dos veículos (km/h).

(a) Curvas C vs S (b) Curvas G^R vs N_f 

$T = 20^\circ\text{C}$ e $f = 10\text{Hz}$

(c) Curvas de Wöhler



$T = 27,2^\circ\text{C}$ (temperatura média de Fortaleza)

$V = 7,8\text{km/h}$ (equivalente a $f = 10\text{Hz}$)

Estrutura = ver Tabela 3.1

(d) Simulação da evolução dos %AT

Figura 3.5. Características de fadiga das misturas e suas respectivas simulações

Das Figuras 3.5a (curva característica de dano) e 3.5b (envoltória de ruptura), tem-se que M2 posicionou-se acima de M1, entretanto, para se delimitar conclusões acerca de suas susceptibilidades à fadiga é necessário considerar outras variáveis, tais como, seus valores de rigidezes e as suas taxas de evolução do dano (α), o que é feito nas simulações a nível de material. Quando se observam os valores das amplitudes de deformação para um dado N_f de M2 na curva de Wöhler (Figura 3.5c), percebe-se que esses são menores do que os valores de M1, indicando que M1 tem maior resistência à fadiga.

Para facilitar a visualização das diferentes susceptibilidades à fadiga das misturas avaliadas, apresenta-se um exemplo numérico: fixou-se o valor de amplitude de deformação (y) nas equações da Figura 3.5c) em $150\mu\text{m/m}$ (valor compatível com aqueles observados em campo para muitos pavimentos nacionais) e em seguida se calculou os valores correspondentes de N_f (x nas equações da Figura 3.5c) para ambas as misturas. Nesta condição, os valores de N_f de M1 e M2 são, respectivamente, $1,7 \times 10^5$ e $0,7 \times 10^5$, logo, M1 mostrou-se

aproximadamente 145% mais resistente à fadiga do que M2. Ressalta-se que esse dado deve ser relativizado, pois o mesmo foi obtido com uma única amplitude de deformação e pela consideração da curva de Wöhler das misturas, que, por sua vez, foi construída a partir de valores únicos de temperatura e frequência (20°C e 10Hz, respectivamente). Comportamento análogo é notado ao avaliar a evolução da previsão do %AT (Figura 5d), pois M2 (5,72% de AT ao final do período de simulação), mostrou-se aproximadamente 117% menos resistente à fadiga do que M1 (2,64% de AT ao final do período de simulação).

O FFM (Fator de Fadiga das Misturas), parâmetro proposto por Nascimento (2015), é numericamente igual à área abaixo da Curva de Wöhler (para 20°C e 10Hz), calculada entre os valores de 100 até 200 *microstrains*. Valores maiores de FFM indicam misturas com resistências à fadiga superiores, logo, por este índice M1 também se mostrou mais resistente do que M2, uma vez que os seus FFM são 1,63 e 1,50, respectivamente.

3.5 Conclusões

Com o intuito de tornar o ensaio de fadiga por tração-compressão de mais fácil compreensão, fez-se uma explanação de detalhes de ordem prática, do posterior tratamento de dados para a obtenção da curva de dano (C vs S) e do critério de falha (curva G^R vs N_f), bem como do seu emprego para avaliar a susceptibilidade à fadiga a nível de material (curvas de Wöhler de misturas) e de estruturas (previsão de desempenho de pavimentos asfálticos). Como exemplo das metodologias abordadas, avaliou-se a susceptibilidade à fadiga de duas misturas (M1 e M2). Além da curva de Wöhler a 20°C e 10Hz, a previsão de desempenho de dois pavimentos (P1 e P2) revestidos por M1 e M2, respectivamente, foi obtida. As conclusões listadas a seguir foram retiradas.

- Considerando a reflexão desenvolvida no presente trabalho, que aborda aspectos do ensaio de fadiga por compressão diametral, sugerindo a sua possível inadequação para representar a fadiga de misturas, recomenda-se, então, a utilização do ensaio de fadiga por tração-compressão, executado adequadamente, para caracterizar este defeito. Sublinha-se ainda que o mesmo é o ensaio disponível que aborda um maior número de variáveis, além de também ser o que requer menor tempo de execução. Haverá necessidade de evolução inclusive deste modelo no futuro.

- As simulações da vida de fadiga das misturas e dos pavimentos realizadas neste capítulo apresentaram o mesmo ranqueamento. Reitera-se que analisar a susceptibilidade à fadiga de misturas sem considerar as variáveis observadas em campo (e.g. estrutura do pavimento, temperatura ambiente, diferentes velocidades/frequências dos veículos) não é a metodologia ideal, pois as simplificações mencionadas podem conduzir a resultados inconsistentes.

4 AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS FAD-CI E SEUS IMPACTOS NA VIDA DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Resumo:

Entre as patologias mais comuns em pavimentos estão a deformação permanente e o trincamento por fadiga de misturas asfálticas a quente usadas no revestimento. Os defeitos destacados ainda carecem de metodologias laboratoriais simples e consistentes capazes de apontar misturas com maior potencial de resistência. Há teorias que contribuem, ainda na fase de projeto, para a seleção de granulometrias e de outros parâmetros, com vistas a produzir misturas com maior capacidade de resistir a defeitos em campo. A FAD-CI (Faixa de Agregados Dominantes, considerando os Componentes Intersticiais) é uma promissora metodologia de seleção granulométrica. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de 6 misturas, observando se aquelas que atendem os critérios da metodologia investigada apresentam comportamento superior quanto à fadiga. Para isso, selecionaram-se misturas de um banco de dados composto por 54 misturas, de forma que a primeira mistura não atendessem qualquer dos parâmetros e, paulatinamente, os parâmetros fossem sendo atendidos. Após os ensaios laboratoriais e a avaliação das simulações das vidas de fadiga, concluiu-se que as misturas que atendiam a mais parâmetros da metodologia FAD-CI apresentaram maior resistência à fadiga.

Palavras-chave: Pavimentos asfálticos; Misturas; Fadiga; Dano; Modelagem.

4.1 Introdução

Segundo a WHO (2018) (*World Health Organization* – Organização Mundial da Saúde), os acidentes de trânsito são responsáveis pela morte de mais de um milhão de pessoas por ano. Embora os acidentes possam ser causados por diferentes motivações, a má condição do pavimento é apontada como importante fator para a geração de sinistros. É sabido que as rodovias nacionais não oferecem bons níveis de serventia aos usuários (CNT, 2018), observando-se não raro nas mesmas a ocorrência de afundamentos plásticos e de trincamentos, respectivamente, deformação permanente e fadiga. Entre as duas patologias, aponta-se a fadiga como a mais desafiadora, pois não há bem estabelecido uma metodologia ou critérios laboratoriais capazes de se relacionarem bem com o surgimento de trincas e a correspondente evolução em campo.

O DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) normatizou recentemente o ensaio de Fadiga por Compressão Diametral (DNIT 183/2018), que é o mais empregado no Brasil para caracterizar a fadiga de misturas asfálticas. Contudo, a maioria das misturas aplicadas em campo no país permanece não tendo suas vidas de fadiga verificadas, uma vez que não há neste momento uma exigência legal para tal. Ressalte-se ainda que, de acordo com Monismith (1998) e Babadopulos *et al.* (2015), amostras submetidas ao ensaio de fadiga por compressão diametral tendem a romper por uma maior influência da deformação permanente (fluência) do que propriamente por fadiga. Já o ensaio *Controlled Crosshead Direct Tension-Compression* (ensaio Tração Direta – TD ou tração-compressão) (*American*

Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO TP 107, 2018), vem sendo apontado com potencial para caracterizar a fadiga de misturas considerando um número maior de variáveis, como temperatura, frequência de carga, além do valor da deformação.

A vida de fadiga de misturas asfálticas é influenciada pelas características dos seus constituintes (forma e mineralogia dos agregados, curva granulométrica, teor e características do ligante). Normalmente não se relaciona a curva granulométrica com a performance de misturas em campo, mas selecionam-se as granulometrias considerando especificações definidas por percentuais passantes em séries de peneiras e nos tamanhos dos agregados. No Brasil, as faixas granulométricas do DNIT (DNIT 031/2006) ou dos Departamentos Estaduais de Rodovias (DER) representam o estado da prática. Há também experiências específicas como, por exemplo, alguns órgãos rodoviários e empresas concessionárias de rodovias, que possuem suas próprias faixas, adaptadas ou não de faixas existentes. Garantir o enquadramento nestas faixas, sem avaliar a capacidade da mistura resistir a defeitos, não é condição suficiente para produzir misturas com desempenhos satisfatórios.

Existem algumas tecnologias capazes de auxiliar na escolha da curva granulométrica de misturas, como, por exemplo, a metodologia FAD (Faixa de Agregados Dominante) (KIM, 2006), que avalia a granulometria e a volumetria de misturas. Inicialmente, este modelo abordava somente a suscetibilidade das misturas à deformação permanente. Recentemente, expandiram-se as recomendações, criando-se o modelo FAD-CI (CI significando Componentes Intersticiais), que visa identificar aspectos das misturas capazes de diminuir a susceptibilidade das mesmas também ao trincamento por fadiga (GUARIN, 2009; GREENE *et al.*, 2014; CHUN e KIM, 2016). Acredita-se que a adoção desta tecnologia ou similares pode auxiliar a produção de misturas com boa performance em campo. O presente trabalho focou em identificar aspectos com a capacidade de incrementar a resistência de misturas à fadiga. Foram selecionadas 6 misturas de um banco de dados de 54 misturas, sendo seus constituintes e parâmetros volumétricos analisados considerando as premissas da metodologia FAD-CI de modo a cobrir um amplo espectro de atendimento aos parâmetros da metodologia. As misturas tiveram suas rigidezes e vidas de fadiga caracterizadas, respectivamente pelos ensaios de módulo dinâmico (AASHTO T 342, 2011) e fadiga TD (AASHTO TP 107, 2018). Por fim, com o intuito de comparar as vidas de fadiga das misturas selecionadas, simularam-se os seus desempenhos em campo. Nesta etapa, as deformações

suportadas por cada mistura, frente a limites fixos de solicitações (curvas de Wöhler), foram comparadas.

4.2 Fundamentação teórica

4.2.1 Fadiga, dano e trincamento

Segundo a ASTM E1823 (2013) (*American Society for Testing and Materials*), a fadiga pode ser definida como o processo de mudança estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que, por sua vez, se transformam na falha após um determinado número de ciclos. O dano por fadiga em misturas asfálticas pode ser compreendido como uma perda progressiva de resistência do material quando submetido a um número de repetições de carga. Vários autores (KIM *et al.*, 2009; BABADOPULOS, 2014; NASCIMENTO, 2015; ALMEIDA, 2019) vêm estudando fadiga de misturas asfálticas sob a ótica da teoria da Mecânica do Dano Contínuo Viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage – VECD*). Esta teoria faz uso de propriedades fundamentais das misturas, sendo uma abordagem funcional na qual se assumem simplificações que não reduzem a sua capacidade de previsões de desempenho.

A VECD baseia-se em variáveis internas de estado que quantificam o dano no material, sendo a evolução deste dano descrita por um modelo fenomenológico desenvolvido a partir de ensaios de laboratório. O que diferencia um sólido sem dano do mesmo sólido danificado é apenas um valor menor de rigidez. A variável interna de estado (ou parâmetro de dano) quantifica qualquer alteração microestrutural que resulta em uma redução de rigidez. O modelo VECD apoia-se em 3 conceitos principais: (i) teoria do trabalho potencial de Schapery, (ii) princípio da correspondência elástica-viscoelástica e (iii) Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT) com dano. Simplificações no cálculo dos parâmetros do modelo VECD e na lei de evolução de dano foram propostas por Underwood *et al.* (2009), sendo esta abordagem denominada *Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) Model*. Uma revisão desses conceitos consta em Nascimento (2015) e em Almeida (2019).

4.2.2 Metodologia FAD-CI

A adoção e a implementação das premissas da metodologia FAD-CI são relativamente simples, uma vez que não exigem equipamentos especiais ou a realização de ensaios complexos, baseando-se apenas em informações da granulometria e em propriedades volumétricas da mistura.

A referida metodologia identifica uma faixa de tamanho de agregados dominantes (FAD) como sendo a maior responsável por proporcionar a uma mistura asfáltica uma boa capacidade de resistir à deformação permanente. Os fundamentos são da teoria do empacotamento de partículas (FERREIRA, 2015). Os tamanhos de agregados que efetivamente interagem, compondo a FAD, podem ser identificados quando se observa a proporção relativa do percentual de agregados retidos em peneiras consecutivas. Para que um determinado intervalo (2 peneiras consecutivas) de tamanho de agregado pertença a FAD, a referida proporção deve permanecer entre 2,33 (70/30) e 0,43 (30/70). Intervalos de tamanhos de agregados que não se enquadrem nas proporções indicadas, tem o espaçamento entre suas partículas aumentado, reduzindo assim os pontos de contato entre as demais partículas da mistura.

Dessa forma, os maiores intervalos de tamanhos de partículas, maiores do que a FAD, apenas flutuam dentro da mistura, diminuindo assim os pontos de contato (interação) dos demais tamanhos de agregados (KIM, 2006). Os agregados que flutuam na mistura são chamados de flutuantes. Existem ainda os Componentes Intersticiais (CI), que consistem, combinadamente, dos seguintes componentes: agregados menores do que a FAD, LA e Volume de Vazios (Vv).

Os CIs mantêm as partículas unidas, atribuindo adesão e resistência à tração (GREENE *et al.*, 2014). As propriedades dos CIs influenciam o trincamento por fadiga e a energia de ruptura das misturas (GUARIN, 2009; PORTELA NETO, 2018). Segundo Guarim (2009), para avaliar a estabilidade geral da estrutura da FAD, é importante conhecer o volume de partículas do CI que são maiores do que os vazios da FAD, uma vez que essas são as partículas potencialmente rompedoras da FAD.

A metodologia FAD-CI tem potencial para apontar misturas teoricamente mais resistentes aos defeitos (deformação permanente e fadiga). Tal fato se dá pela consideração dos seguintes critérios: (i) Porosidade FAD (η_{FAD}); (ii) Fator de Ruptura (FR); (iii) Razão de Agregados Finos (RAF); e (iv) Espessura Efetiva do Filme de Ligante (EEFL). Os intervalos ótimos são apresentados na seção de resultados. Para a obtenção de maiores detalhes recomenda-se a leitura de Ferreira (2015), Chun e Kim (2016) e Portela Neto (2018). Todas as equações para cálculo dos parâmetros FAD-CI podem ser encontradas em Greene *et al.* (2014). A Figura 4.1 apresenta um esquema ilustrativo dos agregados que compõem a FAD (dominantes), os CIs e os agregados flutuantes (partículas maiores do que a FAD).

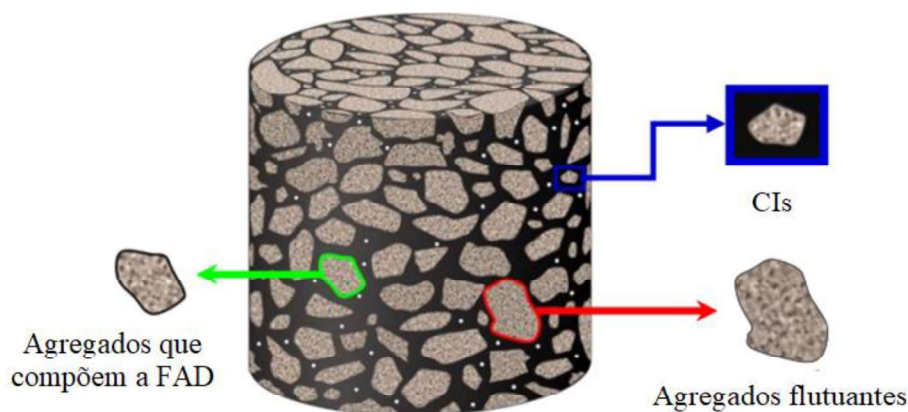


Figura 4.1 – Identificação das partículas na metodologia FAD-CI (PORTELA NETO, 2018)

O conceito da espessura do filme de LA surgiu na década de 1940, sendo que vários estudos tentaram, sem sucesso, correlacionar este parâmetro com a durabilidade de misturas (GUARIM, 2009). Já o conceito de EEFL foi apresentado por Nukunya *et al.* (2001). Sengoz e Topal (2007) encontraram uma boa relação entre a espessura do filme de LA e a resistência à tração indireta das misturas envelhecidas. Estudos desenvolvidos por Zhou *et al.* (2006) mostraram que o *Performance Grade* (PG) do LA, o teor de LA, a EEFL e a área de superfície dos agregados tiveram impacto significativo na resistência à fadiga de misturas.

No que toca aos parâmetros volumétricos comumente usados no Brasil, segundo Fengler (2018), menores valores de RBV (Relação Betume Vazios) acarretam em pequenas espessuras de filme de LA que, por sua vez, aumentam o atrito interno das partículas de misturas e suas rigidezes. De acordo com o referido autor, misturas com baixos valores de RBV apresentam-se quebradiças e com menor durabilidade.

4.3 Materiais e métodos

As misturas avaliadas no presente artigo são oriundas de diferentes partes do país, portanto, compostas por ligantes e agregados diferentes. Elas integram o banco de dados da Rede Temática de Asfalto (RTA) e foram cedidas pela Petrobras. De um banco de dados composto por 54 misturas, foram selecionadas 6 (M1, M2, M3, M4, M5 e M6) de acordo com seus enquadramentos nos parâmetros da metodologia FAD-CI. Vale notar que foram avaliados os parâmetros FAD-CI de todo o banco de dados de misturas para que fossem escolhidas as 6 aqui investigadas. Inicialmente, para a M1, buscou-se uma mistura que não atendesse quaisquer dos critérios relativos aos parâmetros mencionados. Já para a M2, buscou-se uma que atendesse a apenas a porosidade, η FAD. Para a M3, buscou-se uma mistura que atendesse a η FAD e o FR. Seguindo essa lógica, onde cada mistura deveria atender um parâmetro adicional, a M5 deveria atender todos os parâmetros (η FAD, FR, RAF, EEFL). Contudo, as misturas do banco de dados que atendiam o critério para EEFL, atendiam apenas a este parâmetro. Dessa forma, a M5 atende apenas o EEFL. Além de M5, apenas uma outra mistura do banco de dados atendia o critério EEFL e, da mesma forma que M5, esta satisfazia apenas este critério. Logo, incluiu-se a referida mistura nas análises (M6) com o intuito de melhor avaliar a capacidade do parâmetro EEFL relacionar-se com o dano por fadiga.

A origem mineralógica dos agregados, Tamanho Máximo Nominal (TMN) e alguns parâmetros volumétricos constam na Tabela 4.1, que apresenta ainda os critérios da metodologia FAD-CI. Células assinaladas com “x” e com “Ok” significam critério não atendido e critério atendido, respectivamente.

Tabela 4.1. Características das misturas e critérios FAD-CI

Misturas	CAP*		V _v (%)	G _{mm}	Origem	Fíler (Cal)	TMN (mm)	Critérios FAD-CI			
	Pen.	Teor (%)						η FAD	FR	RAF	EEFL
M1	57	5,5	4,2	2,532	Sienito		12,7	x	x	x	x
M2	43	5,5	4,0	2,631	Granítico		12,7	Ok	x	x	x
M3	61	4,7	4,0	2,700	-		12,7	Ok	Ok	x	x
M4	50	4,9	3,8	2,591	Granítico		12,7	Ok	Ok	Ok	x
M5	50	4,1	5,0	3,027	Basáltico	1,5%	19,0	x	x	x	Ok
M6	46	5,0	5,0	2,621	Calcária	2,0%	25,0	x	x	x	Ok

*Cimento Asfáltico de Petróleo

Para avaliar a relevância na vida de fadiga dos parâmetros FAD-CI de forma isolada, desejava-se selecionar misturas compostas por agregados de mesma origem, com os

mesmos TMNs e tipo de CAP, e que diferissem apenas pelo enquadramento nos critérios FAD-CI. Porém, não foi possível identificar a origem mineralógica dos agregados de M3. Já M5 e M6 tem TMN maiores que as demais misturas, além de serem as únicas misturas a conter filer artificial (1,5% e 2,0% de cal, respectivamente) em suas composições, características que afetam a resistência à fadiga. A influência que cada critério da metodologia FAD-CI exerce sobre a resistência da mistura ainda é objeto de pesquisa, como a reportada neste artigo. Pela realização do ensaio de Modulo Dinâmico e pela consideração do PSTT (Princípio da Superposição Tempo-Temperatura), foram obtidas as curvas mestras das misturas. Nesta etapa optou-se pelo uso da equação de Williams-Landel-Ferry (WLF) (Equação 4.1).

$$\log(a_T) = \frac{-C_1 \cdot (T - T_{REF})}{C_2 + (T - T_{REF})} \quad (4.1)$$

Onde: a_T = *time-temperature shift factor*; C_1 e C_2 = constantes de ajuste da curva; T = temperaturas de obtenção dos dados; T_{REF} = temperatura de referência para construção da curva. Para a obtenção das curvas mestras realizaram-se ensaios de módulo dinâmico com três valores (4, 20 e 40°C) de temperatura (T). Utilizou-se 20°C como temperatura de referência (T_{REF}).

As vidas de fadiga das misturas foram avaliadas pelo ensaio TD com o modelo S-VECD. Utilizou-se critério de falha baseado na taxa média de pseudoenergia liberada por ciclo (G^R). Foram empregadas as Equações 4.2 e 4.3 para gerar as curvas características dos danos (C vs S) e as curvas G^R vs N_f de cada mistura. Para obter mais detalhes sobre o conceito das curvas C vs S e G^R vs N_f , recomenda-se a leitura de Nascimento (2016).

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (4.2)$$

$$G^R = YN_f^\Delta \quad (4.3)$$

Onde: C_{11} e C_{12} = coeficientes da curva C vs S ; G^R = taxa de variação média da energia de pseudo-deformação liberada (por ciclo) durante a execução do ensaio; Y = coeficientes do critério de ruptura G^R vs N_f ; Δ = expoente da equação Y ; N_f = número de ciclos até a falha.

Com o intuito de avaliar a capacidade de cada mistura resistir à fadiga foram utilizadas as equações descritas em Nascimento (2016), que simulam a previsão da vida de

fadiga (N_f) e do parâmetro de dano, a partir de dados do ensaio de fadiga TD (Equações 4.2 a 4.7).

$$N_f = \left(\frac{\delta}{Y \left(\frac{C_{12}}{p} + 1 \right)} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \frac{C_{12}}{p}}} \quad (4.4)$$

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon_{TA}^R)^2 C_{11} \left(\frac{p(C_{11} C_{12})^\alpha (\varepsilon_{TA}^R)^{2\alpha}}{f_R 2^\alpha} \right)^{\frac{C_{12}}{p}} N^{\frac{C_{12}}{p}} \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{TA}^R = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} [(\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE}] \quad (4.6)$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \quad (4.7)$$

Onde: C_{11} e C_{12} = coeficientes da curva C vs S ; Y = coeficientes do critério de ruptura G^R vs N_f ; Δ = expoente da equação Y ; N_f = número de ciclos até a falha; ε_{TA}^R = amplitude da pseudo-deformação; α = taxa de evolução do dano; f_R = frequência reduzida; $\varepsilon_{0,pp}$ = amplitude de deformação pico a pico; β = parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração; $|E^*|_{LVE}$ = módulo dinâmico viscoelástico linear nas condições de temperatura e frequência.

A taxa de evolução de dano α é obtida do espectro de relaxação ($\alpha = 1 + 1/m$, onde m indica o máximo valor da derivada do módulo de relaxação em relação ao tempo, em escala log-log). As simulações utilizaram como critério de qualidade as respostas das amplitudes das deformações suportadas por cada mistura frente a valores fixos de N_f (parâmetros das Curvas de Wöhler). Com o valor de N_f mantido constante, a mistura que apresentar o maior valor de amplitude de deformação pode ser apontada como tendo um melhor comportamento à fadiga.

De modo a simplificar a comparação entre as misturas optou-se por valores fixos de N_f (1×10^6 e 1×10^4). As simulações foram realizadas considerando as frequências de 25Hz, 10Hz e 0,5Hz e dois valores de temperatura para representar locais com climas frios e quentes (10°C e 40°C). Com o intuito de observar a influência de diferentes valores de temperatura gerou-se uma curva de Wöhler da mistura M4, mantendo-se fixos os valores de frequência em 10Hz e variando-se os valores de temperatura.

Fez-se uso de metodologia similar para evidenciar a influência da frequência, gerando-se outra curva de Wöhler da mesma mistura, porém mantendo-se constantes os valores

de temperatura (10°C) e variando-se os valores de frequência. Curvas de Wöhler, ou simplesmente curvas de fadiga, relacionam amplitude de deformação com número de ciclos de carregamento. Ainda com o intuito de avaliar a resistência à fadiga empregou-se o Fator de Fadiga das Misturas (FFM), parâmetro proposto por Nascimento (2015). O referido parâmetro é numericamente igual à área abaixo da Curva de Wöhler (para 20°C e 10Hz). A referida área é calculada entre os valores de 100 até 200 *microstrains*, pois estes são valores de deformação tipicamente encontrados em pavimentos brasileiros (Equação 4.8). Valores maiores de FFM indicam misturas com maiores resistências à fadiga.

$$(8) \quad FFM = \frac{[\log(N_{f,100\mu\epsilon}) + \log(N_{f,200\mu\epsilon})]}{2} \times [\log(200) - \log(100)] \quad (4.8)$$

Fez-se uso ainda de metodologia proposta por Nascimento (2018), que classifica misturas em 4 diferentes níveis de resistência à fadiga. As classes variam de 1 a 4, respectivamente, representando as misturas com piores resistências até as misturas com maiores resistências. A referida técnica consiste em relacionar o FFM com a rigidez ($|E^*|$ @ 20°C, 10Hz) de cada mistura. A Figura 4.2 apresenta o fluxo das ações para o desenvolvimento deste artigo.

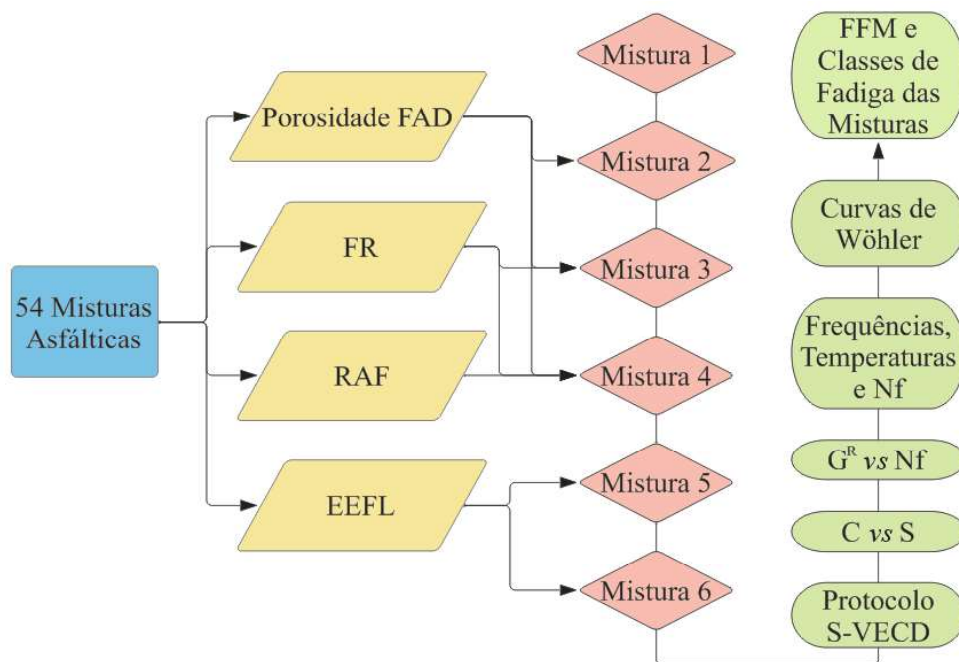


Figura 4.2. Fluxograma das atividades desenvolvidas

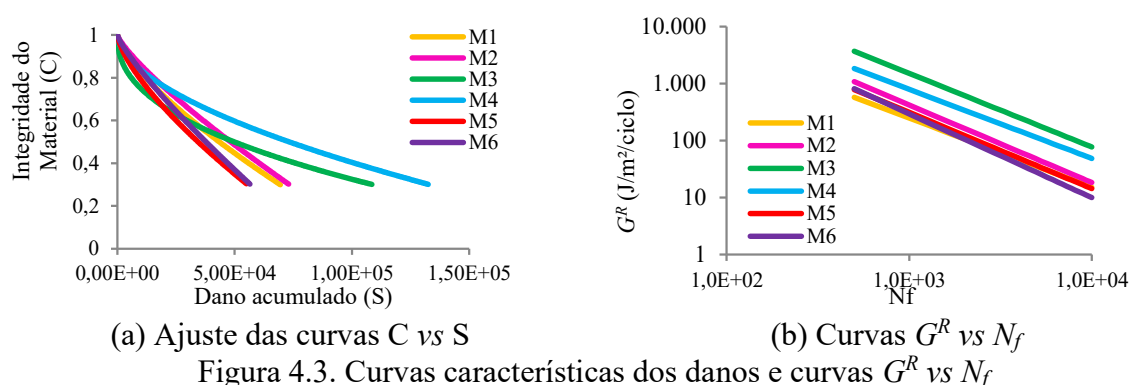
4.4 Resultados e discussões

Os valores obtidos e os intervalos ideais dos parâmetros da metodologia FAD-CI constam na Tabela 4.2, enquanto a Figura 4.3a apresenta as curvas características de dano (C vs S) e a Figura 4.3b apresenta as curvas G^R vs N_f das misturas avaliadas.

Tabela 4.2. Critérios para FAD-CI das misturas avaliadas

Misturas	η FAD (%)		FR		RAF		EEFL (<i>microns</i>)	
	Obt.	Ideal	Obt.	Ideal	Obt.	Ideal	Obt.	Ideal
M1	64		1,36		0,57		55,8	
M2	43*		0,39		0,26		67,3	
M3	43*		0,83*		0,47		36,5	
M4	44*	38 - 48	0,81*	0,50 - 0,95	0,35*	0,28 - 0,36	37,0	12,5 - 25,0
M5	51		1,20		0,70		24,7*	
M6	61		1,40		0,26		23,7*	

* Valores enquadrados no intervalo tido como ideal.



Para valores menores do que aproximadamente 0,5 de integridade do material (C), percebe-se que as curvas das misturas M1, M2, M3 e M4 (Figura 3a), para um mesmo valor de dano acumulado (S), apresentam maiores valores de C. Tal observação corrobora o enquadramento paulatino dos parâmetros FAD-CI das misturas citadas. Já as misturas M5 e M6 apresentam curvas com formatos similares. Estas não seguiram a lógica de enquadramento nos parâmetros FAD-CI das demais (atenderam apenas o parâmetro EEFL), e também não seguiram a tendência observada em M1, M2, M3 e M4, ficando posicionadas abaixo das curvas das demais misturas (Figura 3a). Contudo, é importante destacar que os diferentes valores de rigidez e as diferentes formas de evolução do dano nas misturas (α) não permitem concluir que misturas com maior integridade na curva C vs S tenham maior resistência à fadiga. Diferentes inclinações nas curvas G^R vs N_f indicam que o dano nas misturas evoluem de forma diferente. Portanto, não é possível utilizar apenas as curvas da Figura 4.3 para concluir sobre quais misturas apresentam

maior resistência à fadiga. A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros da equação WLF, das equações do modelo S-VECD e a taxa de evolução do dano das misturas. Já a Figura 4.4 apresenta os valores das simulações das vidas de fadiga (parâmetros das curvas de Wöhler). As Figuras 4.4a e b expõem os valores de amplitude de deformação calculados à 10°C e com dois valores de N_f (1×10^6 e 1×10^4). Já as Figuras 4.4c e 4.4d expõem a mesma propriedade, calculada com os mesmos valores de N_f , porém à 40°C.

Tabela 4.3. Parâmetros da equação WLF e das equações do modelo S-VECD

Misturas	C_1	C_2	C_{11}	C_{12}	Y	Δ	α
M1	1,24E+01	9,81E+01	2,33E-04	7,18E-01	1,09E+06	-1,214	2,94
M2	2,49E+01	1,94E+02	8,27E-05	8,07E-01	5,06E+06	-1,360	2,89
M3	2,25E+01	1,56E+02	4,74E-03	4,31E-01	1,15E+07	-1,293	2,60
M4	2,20E+01	1,64E+02	9,04E-04	5,64E-01	3,40E+06	-1,211	3,50
M5	2,10E+01	1,48E+02	3,19E-04	7,04E-01	3,16E+06	-1,335	2,88
M6	2,12E+01	1,55E+02	8,31E-05	8,26E-01	7,57E+06	-1,470	3,07

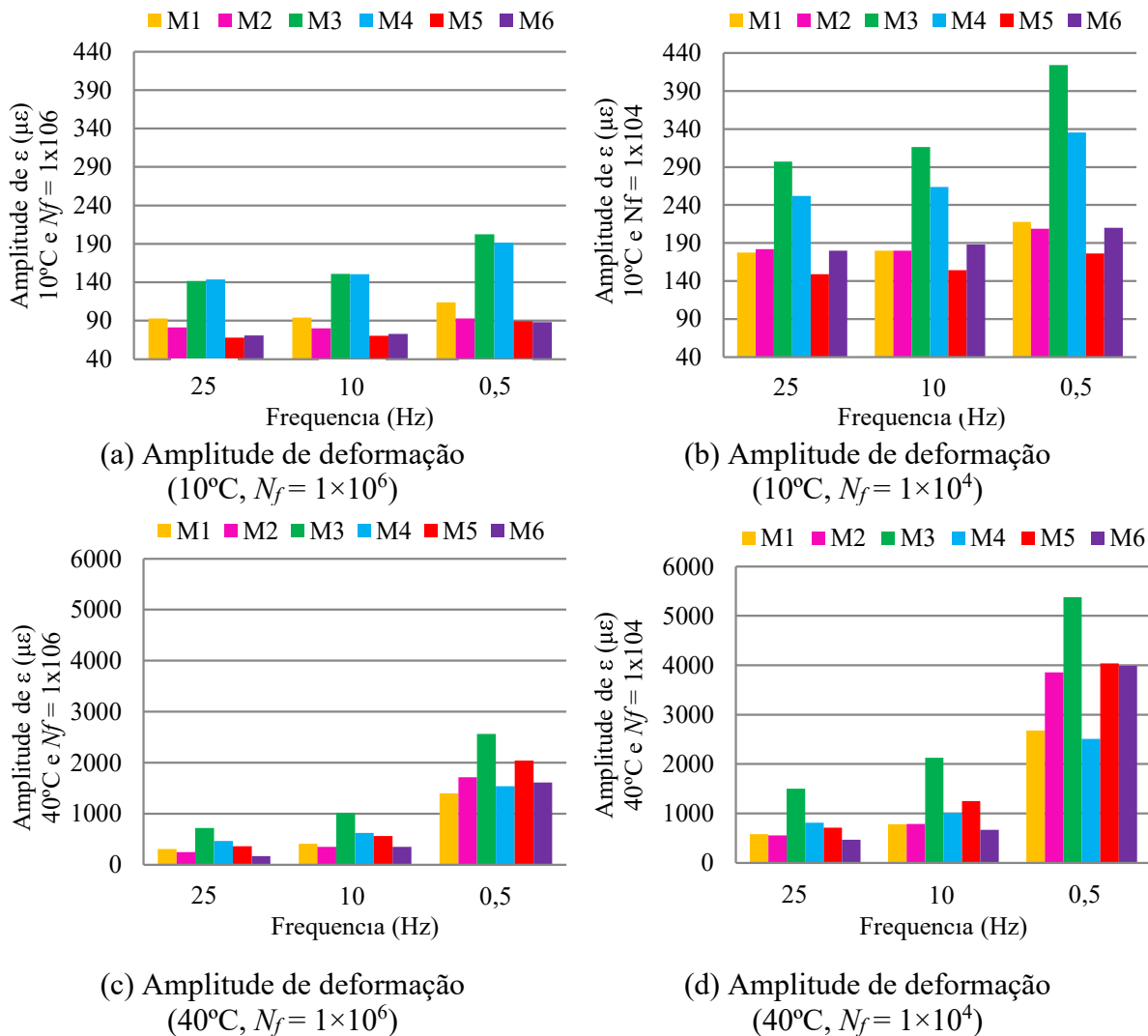


Figura 4.4. Simulações das vidas de fadiga separadas por temperatura e por N_f

Observando os valores das amplitudes de deformação de M1 e M2 (Figura 4.4), percebe-se que estes sempre são menores do que os valores das misturas que atenderam mais parâmetros FAD-CI (M3 e M4), indicando que as referidas misturas têm as menores resistências à fadiga. Nas Figuras 4.4c e 4.4d percebe-se uma exceção a esta tendência, pois M2, na frequência de 0,5Hz, mostrou-se superiores a M4. Lembrando que M2 atende apenas a η FAD, sendo que este parâmetro supostamente não se relaciona com fadiga e sim com deformação permanente (KIM, 2006). Logo, considera-se que os resultados das simulações de vida de fadiga de M1 e M2 corroboram as indicações da metodologia FAD-CI.

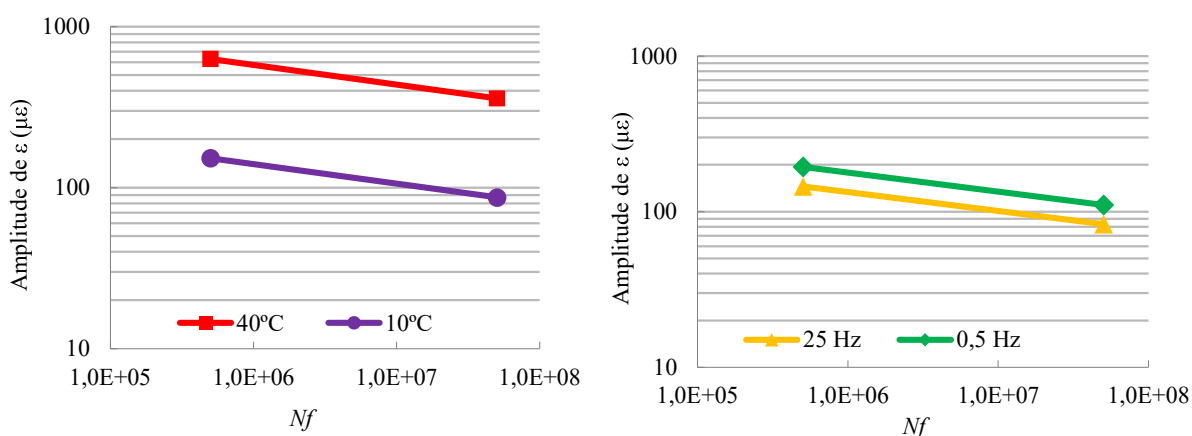
Por sua vez, M3 e M4, as misturas que mais atenderam os critérios FAD-CI, posicionam-se como as mais resistentes à fadiga à 10°C nos dois valores de N_f . Já quando se observa as análises à 40°C, nota-se que a resistência à fadiga de M4 apresenta pior performance, sendo superada pelas outras misturas com o menor valor de N_f (Figura 4d). Comparando-se M3 e M4 nas 4 configurações de temperatura e N_f avaliadas na Figura 4, nota-se que M3 não apresentou desempenho superior a M4 apenas na Figura 4a (10°C, $N_f = 1 \times 10^6$).

Ainda observando a Figura 4.4, percebe-se que M5 pode ser apontada como a mistura com menor capacidade de resistir à fadiga nas análises a 10°C, independentemente do valor de N_f e da frequência. A mesma afirmação não pode ser feita para M6, pois na Figura 4b (10°C, $N_f = 1 \times 10^4$), esta mistura apresentou desempenho, embora similar, superior às misturas M1 e M2. É importante destacar que M5 e M6 têm os maiores TMNs, respectivamente 19mm e 25mm, sendo que todas as demais misturas têm os mesmos TMNs (12,7mm). Hou *et al.* (2010), fazendo uso da metodologia VECD, avaliaram e ranquearam 11 misturas asfálticas. As misturas avaliadas por estes autores com menores TMNs apresentaram-se mais resistentes à fadiga.

Ainda sobre M5 e M6, quando se observa as análises a 40°C, percebe-se que os seus desempenhos à fadiga são incrementados em alguns momentos (Figuras 4c e 4d), sobretudo nas análises com menores frequências, posicionando-se como as melhores misturas entre as testadas. É importante perceber que, embora o parâmetro EEFL de M5 e M6 esteja enquadrado no intervalo desejável, estas misturas apresentam as menores EEFL. Dessa forma, acredita-se que seus esqueletos pétreos sejam os menos lubrificadas e que seus agregados tenham mais pontos de contatos, elevando assim as suas rigidezes e diminuindo as suas resistências à fadiga. Tal comportamento deve ser incrementado quando submetido a menores valores de

temperatura, devido a maior rigidez do LA nessa condição. Já quando as misturas são submetidas a maiores valores de temperatura, seus CAPs tendem a apresentar-se menos viscosos, diminuindo as rigidezes das misturas e incrementando suas resistências à fadiga.

Com o intuito de investigar o impacto da variação da temperatura e da frequência, construíram-se as Curvas de Wöhler (Figura 4.5). Utilizou-se apenas M4 nesta etapa do trabalho, contudo, com os dados e as equações, as demais curvas de Wöhler podem ser facilmente construídas. Percebe-se que o procedimento adotado se mostrou mais sensível as variações de temperatura do que de frequência. Ao submeter M4 a um valor maior de temperatura e menor de frequência, a mistura resistiu a níveis mais elevados de amplitude de deformação, ou seja, apresentou maior resistência à fadiga. Tal fato pode indicar que, misturas aplicadas em locais com maiores médias de temperatura ou menores frequências de carregamento do tráfego de veículos, tendem a ser mais resistentes à fadiga. É sabido que temperaturas mais elevadas proporcionam menor viscosidade dos ligantes asfálticos e, por conseguinte, menores valores de rigidez das misturas. Dessa forma, acredita-se que as referidas condições podem incrementar a resistência ao trincamento de misturas. Considera-se bastante importante que tal fato seja reconhecido no dimensionamento de pavimentos asfálticos (SANTIAGO *et al.*, 2018, 2019).

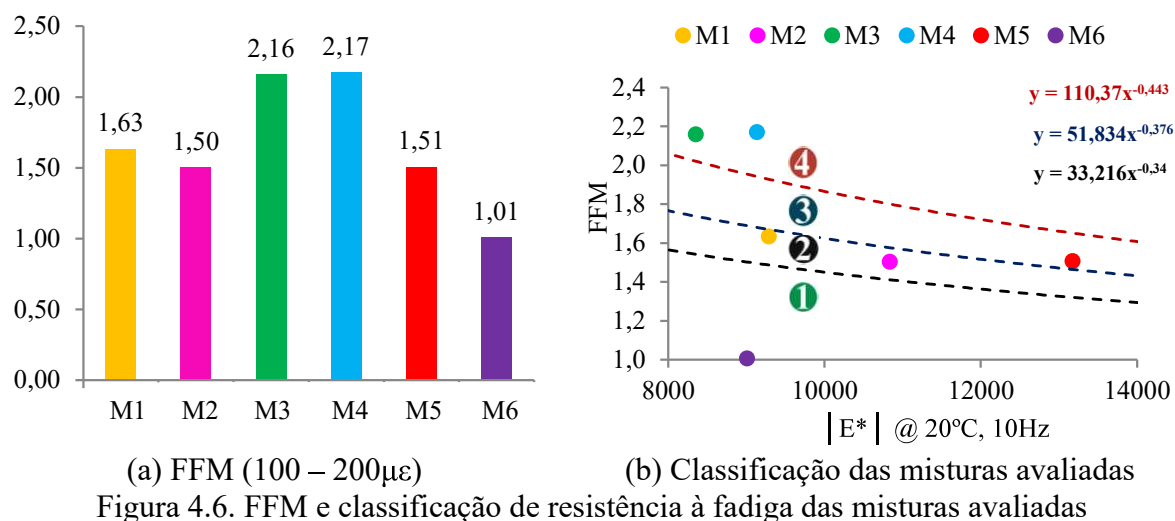


(a) Variação de temperaturas (40 e 10°C) e frequência fixa (10Hz)

(b) Variação de frequência (25 e 0,5Hz) e temperatura fixa (10°C)

Figura 4.5. Curvas de Wöhler de M4 variando temperaturas e frequências

A Figura 4.6a apresenta os valores dos FFM, enquanto a Figura 4.6b apresenta o posicionamento das misturas nas 4 classes de resistência à fadiga propostas por Nascimento (2018). As curvas observadas na Figura 4.6b separam as classes de fadiga das misturas.



Da Figura 4.6a, percebe-se que M3 e M4 apresentaram os maiores valores de FFM,

logo espera-se que sejam as misturas mais resistentes à fadiga. Este fato corrobora com o enquadramento das misturas nos parâmetros da metodologia FAD-CI, uma vez que as referidas misturas atenderam a mais parâmetros. Chama-se atenção para o parâmetro FR (atendido por M3 e M4), principal parâmetro da metodologia FAD-CI para indicar misturas resistentes à fadiga. Já M1, M2, M5 e M6 que se enquadram no intervalo ótimo de apenas um parâmetro ou em nenhum (caso de M1), apresentaram valores de FFM mais baixos, indicando menores resistências à fadiga. As referidas quatro misturas não atendem o critério FR, principal parâmetro da metodologia FAD-CI para indicar resistência à fadiga. Já quando se observam as classes das misturas (Figura 4.6b), percebe-se a mesma tendência observada na Figura 6a, com M3 e M4 tendo maior resistência à fadiga, enquadrando-se na classe 4. As demais misturas enquadram-se nas classes 1 e 2, que identifica as misturas mais susceptíveis a este defeito, com exceção de M5 que se enquadrou na classe 3, porém muito próxima a classe 2. É importante notar que M4 é a mistura que atende a mais critérios da metodologia FAD-CI, sendo também a mistura melhor posicionada dentro das classes de resistência das misturas.

4.5 Conclusões

A partir de um banco de dados de 54 misturas asfálticas foram calculados todos os critérios FAD-CI. Escolheram-se 6 misturas (M1, M2, M3, M4, M5 e M6), de tal forma que a primeira mistura não atendesse qualquer critério e as demais atendessem crescentemente aos critérios da citada metodologia (η FAD, FR, RAF e EEFL). Das 54 misturas, apenas duas (M5 e M6) enquadravam-se no intervalo desejado de EEFL, sendo que estas atendiam apenas ao

mesmo. Em seguida, simularam-se as vidas de fadiga das 6 misturas com o intuito de comparar o ranqueamento feito a partir da metodologia FAD-CI, e também dos resultados das simulações. Observou-se ainda o FFM e as classes de resistência à fadiga das misturas. As seguintes conclusões foram possíveis:

- A mistura que não atende qualquer critério da metodologia FAD-CI (M1) e a que atende apenas a porosidade FAD (M2) apresentam menores resistências à fadiga. Portanto, quando se observam as curvas de Wöhler, percebe-se que a metodologia tem potencial de ajudar na etapa de seleção granulométrica, pois misturas que se enquadraram nos intervalos ótimos dos parâmetros tendem a apresentar maior resistência à fadiga.

- Quando se analisam as misturas que atendem mais critérios da metodologia FAD-CI (M3 e M4), percebe-se que ambas apresentaram desempenho superior na maioria das análises, sobretudo a 10°C. Porém, devem-se conduzir pesquisas considerando misturas dosadas com os mesmos CAP e agregado (mesma formação mineralógica e TMN). Dessa forma, acredita-se que será possível identificar com mais clareza a influência dos parâmetros da metodologia FAD-CI na suscetibilidade à fadiga, superando algumas das limitações do presente artigo.

- M5 e M6, misturas que atendem apenas o parâmetro EEFL, apresentaram um desempenho superior nas análises com maior valor de temperatura (40°C). Logo, este parâmetro específico demonstrou ser relevante e importante de ser observado no projeto de misturas. Acredita-se que misturas que atendem o parâmetro EEFL podem apresentar maior resistência à fadiga quando aplicadas em locais com temperaturas elevadas. M5 e M6 possuem cal como filer e seus TMNs são os maiores dentre as misturas avaliadas, sendo que estas características afetaram o EEFL e, por conseguinte, influenciaram os seus comportamentos mecânicos.

- Pode-se concluir, ao observar os índices FFM e classes das misturas, que M3 e M4 atenderam mais parâmetros FAD-CI (sobretudo FR e RAF) e mostraram-se, respectivamente, como as mais resistentes à fadiga. Estas misturas também foram ranqueadas como as mais resistentes ao observar as curvas de Wöhler. Independente do parâmetro de fadiga escolhido (curva de Wöhler ou FFM e classes das misturas), as misturas que mais atenderam parâmetros FAD-CI apresentaram-se como as mais resistentes à fadiga. Conclui-se então que atender ao maior número possível de parâmetros FAD-CI pode incrementar a performance das misturas com vistas a diminuir a suscetibilidade à fadiga.

5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM SIMULAÇÕES DA VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS

Resumo:

Muitas das rodovias brasileiras não apresentam boas condições de serventia, sendo necessário grande investimento financeiro para requalificá-las. Percebe-se então a necessidade do emprego de técnicas que propiciem a melhoria dos pavimentos sem elevar seus custos de produção e manutenção. O trincamento por fadiga destaca-se como o defeito mais desafiador, não sendo tarefa simples produzir misturas com longa vida útil no que diz respeito à referida falha. O emprego de técnicas de seleção granulométrica pode contribuir neste contexto, pois identifica misturas que tendem a apresentar performance superior. Por meio da simulação computacional da evolução do trincamento, o presente artigo avaliou o desempenho de 15 pavimentos asfálticos, diferentes apenas pelo revestimento, mantendo-se constantes as demais camadas e condições de análise (tráfego e clima). Fez-se uso da técnica de seleção granulométrica FAD-CI (Faixa de Agregados Dominantes, considerando os Componentes Intersticiais) para avaliar a susceptibilidade das misturas à fadiga, sendo estas testadas em laboratório por ensaios de tração-compressão. Observou-se ainda a capacidade de parâmetros relacionados aos agregados, ligantes, relação agregado-ligante e misturas completas de influenciarem a susceptibilidade à fadiga. Foram diferentes os ranqueamentos das misturas obtidos por critérios distintos, quais sejam, simulações computacionais, FAD-CI, resistência à fadiga dos ligantes e das misturas, e por classes de fadiga das misturas. Outros fatores, como adesividade agregado-ligante, propriedades químicas e de forma dos agregados influenciam a resistência à fadiga e devem ser considerados. Para avaliar a influência das subcamadas no trincamento simulado, 3 cenários de subestrutura foram considerados.

Palavras-chave: Pavimentos asfálticos; Fadiga; Dano; Modelagem; Percentual de área trincada.

5.1 Introdução

Dentre as medidas necessárias para que o Brasil possa viver um novo ciclo de crescimento econômico, a Confederação Nacional do Transporte (CNT) destaca a necessidade de melhorar a qualidade das rodovias (CNT, 2018a), havendo uma necessidade de investimento de quase meio trilhão de reais em obras de infraestrutura de rodovias (CNT, 2018b). Considerando a atual crise econômica, a crescente escassez de recursos e a característica do país ser predominantemente rodoviário, percebe-se a necessidade de se construir pavimentos duráveis, preferencialmente utilizando técnicas e materiais que não onerem sua produção e manutenção. O emprego de metodologias de seleção granulométrica (*e.g.* Método Bailey e Faixa de Agregados Dominantes considerando os Componentes Intersticiais – FAD-CI) pode ajudar nessa tarefa, pois, ainda na fase de projeto, essas permitem identificar aspectos ligados ao esqueleto pétreo e à volumetria da mistura capazes de influenciar a sua performance em campo (GUARIN, 2009; GREENE *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Não é tarefa trivial projetar um pavimento com baixa susceptibilidade ao trincamento, sobretudo sem a utilização de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) modificado por polímero, sendo que esse eleva sobremaneira os custos iniciais dos revestimentos. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de pavimentos asfálticos de resistirem

à fadiga. Para isso, inicialmente foi simulado computacionalmente a evolução do trincamento de campo de 15 pavimentos. As características das subcamadas, clima e tráfego de veículos foram mantidas constantes nas primeiras análises. Para avaliar o impacto da adoção de diferentes estruturas de pavimento, as mesmas misturas foram então avaliadas em outras 2 estruturas.

As misturas são compostas por ligantes do tipo CAP 50/70 sem modificação. Utilizou-se o *software* de dimensionamento de pavimentos asfálticos CAP3D-D, uma evolução do programa de análise estrutural CAP3D (HOLANDA *et al.*, 2006), incluindo as análises de previsão de dano e de área trincada. Com vistas a identificar aspectos das 15 misturas capazes de influenciar positivamente os seus desempenhos à fadiga, observou-se as características dos agregados, volumetrias, parâmetros da metodologia FAD-CI e aspectos relacionados aos CAP e as misturas. Ampliam-se aqui os desenvolvimentos contidos em Oliveira *et al.* (2019), onde se avaliou a capacidade de misturas asfálticas, sem, contudo, considerar a estrutura do pavimento, serem mais ou menos resistentes à fadiga de acordo com a variação dos seus esqueletos pétreos. Não são consideradas a adesividade ligante-agregado, propriedades químicas e de forma dos agregados, o que será objeto de trabalho futuro do autor.

5.2 Fundamentação teórica

5.2.1 Fadiga, dano e trincamento

Aborda-se a fadiga de misturas asfálticas sob a óptica da teoria da Mecânica do Dano Contínuo Viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage – VECD*), que faz uso de propriedades fundamentais das misturas e assume simplificações que não reduzem a sua capacidade de previsões de desempenho. A avaliação da fadiga em laboratório baseia-se na Teoria do Potencial de Trabalho de Schapery e de seu princípio da correspondência elástico-viscoelástico, que utiliza a definição de pseudodeformações (SCHAPERY, 1984; PARK *et al.*, 1996) para propor uma metodologia de análise simplificada de dano em revestimentos asfálticos. As teorias aqui apresentadas são discutidas em Babadopulos (2014), Nascimento (2015) e Almeida (2019).

Em campo, a fadiga se manifesta em pavimentos asfálticos na forma de trincamento, podendo ser quantificada pela medição do %AT do pavimento. Esse índice leva

em consideração a extensão total do trecho analisado e a área julgada por técnicos como trincada (SANTIAGO *et al.*, 2019). Normalmente, adota-se como o limite máximo aceitável um valor de 20%AT (Nascimento, 2015).

5.2.2 Metodologia FAD-CI

O meio técnico carece de uma ferramenta prática apta a auxiliar na escolha de granulometrias que possam originar misturas asfálticas com desempenho superior, sobretudo à fadiga. A metodologia FAD-CI tem o potencial de suprir esta necessidade, pois apenas com dados de granulometria e de volumetria é possível avaliar, ainda que de forma aproximada, a resistência ao trincamento e à deformação permanente de misturas. As análises são realizadas pela observação do enquadramento em intervalos ótimos de alguns parâmetros, quais sejam: porosidade FAD-CI (η FAD), Fator de Ruptura (FR), Relação de Agregados Finos (RAF), Espessura Efetiva do Filme de Ligante (EEFL). Além do intervalo ótimo (38% – 48%) da η FAD, é importante observar o intervalo chamado de porosidade marginal (48% – 52%) do mesmo parâmetro. Percebeu-se que a capacidade de resistir à deformação permanente de misturas enquadradas no intervalo da porosidade marginal é instável, ou seja, algumas têm boa resistência, enquanto outras não. A descrição dos parâmetros citados está disponível em Oliveira *et al.* (2019).

5.3 Materiais e métodos

Foi usado um banco de dados da RTA composto por 54 misturas de vários estados do país e cedido pela Petrobras/Cenpes, sendo selecionadas para o presente artigo todas as 15 misturas compostas por CAP 50/70 puro (sem modificadores). A origem mineralógica dos agregados, Tamanho Máximo Nominal (TMN) e alguns parâmetros volumétricos são apresentados na Tabela 5.1, que traz ainda os critérios da metodologia FAD-CI atendidos pelas misturas investigadas (manteve-se a numeração das misturas do banco de dados completo). Células assinaladas com o X e com Ok significam critério não atendido e critério atendido, respectivamente. Note-se que as misturas selecionadas são compostas por agregados, TMN e volumetrias distintas. Como todas foram dosadas com CAP 50/70, fica facilitado se observar a influência dos parâmetros FAD-CI nas simulações computacionais descritas adiante.

Tabela 5.1 – Características das misturas e critérios FAD-CI

Mistura	% de CAP	Vv (%)	G _{mm}	TMN (mm)	Origem	Parâmetros FAD-CI			
						η_{FAD}	FR	RAF	EEFL
M01	5,5	4,2	2,425	12,7	Sienito	X	X	X	X
M02	5,5	4,0	2,526	12,7	Granítica	Ok	X	X	X
M05	4,1	5,0	2,876	19,1	Basalto	X	X	X	Ok
M06	5,0	4,8	2,495	25,4	Calcária	X	X	X	Ok
M09	6,2	4,3	2,345	19,1	Basalto	X	X	X	X
M10	6,0	3,7	2,459	12,7	Calcária	X	X	X	X
M15	6,9	4,0	2,358	19,1	Basalto	Ok	X	X	X
M25	4,7	4,0	2,641	12,7	Basalto	X	X	X	X
M27	5,5	4,0	2,677	12,7	Granítica	Ok	X	Ok	X
M28	5,5	4,0	2,677	12,7	Granítica	Ok	X	Ok	X
M29	5,5	4,0	2,677	12,7	Granítica	Ok	X	Ok	X
M30	5,0	4,0	2,535	19,1	Granítica	X	Ok	Ok	X
M31	4,2	4,0	2,710	19,1	-	X	Ok	X	X
M32	5,5	4,2	2,425	12,7	Sienito	X	X	X	X
M33	5,5	4,2	2,425	12,7	Sienito	X	X	X	X

Sobre a simulação realizada, o CAP3D-D é caracterizado por utilizar uma abordagem elástica linear para o cálculo estrutural de tensões e deformações, exigindo esforço computacional bem inferior à abordagem viscoelástica. Uma simulação viscoelástica ocorre ao longo do tempo, sendo que cada passo de tempo no cálculo requer esforço equivalente ao de uma única análise elástica. Apesar de utilizar elasticidade linear a uma dada temperatura e frequência, a análise feita pelo CAP3D-D permite a inserção de parâmetros próprios de viscoelasticidade. Desta forma, possibilita-se perceber a variação do comportamento do pavimento com a mudança da temperatura e da velocidade dos veículos, além da distribuição horária do tráfego. Portanto, trata-se de uma análise elástica linear correspondente à análise viscoelástica linear em caso de carregamento senoidal (SANTIAGO *et al.*, 2018).

Como *inputs* nas análises computacionais foram utilizados os dados de módulo dinâmico e de fadiga por tração direta (tração-compressão) das misturas consideradas. Com o intuito de avaliar a influência de diferentes estruturas de pavimentos, foram considerados 3 cenários para as subcamadas nas análises computacionais: a primeira estrutura testada é típica do estado do Ceará (Estrutura 1); a segunda foi proposta por Nascimento *et al.* (2014) (Estrutura 2); e a terceira difere da segunda apenas pelas espessuras mais esbeltas das camadas (Estrutura 3). Além das espessuras das camadas serem diferentes nas 3 estruturas, os materiais das subcamadas da Estrutura 1 diferem dos materiais das subcamadas das Estruturas 2 e 3, logo, os módulos de elasticidade destas estruturas também são diferentes. Adotou-se em todas as

análises um período de 120 meses (10 anos) e considerou-se um tráfego correspondente a $N = 1,9 \times 10^7$ eixos padrões para o período proposto de análise. A Tabela 5.2 apresenta as características das 3 estruturas adotadas.

Tabela 5.2 – Características dos pavimentos considerados nas análises computacionais

Camada	Espessura (cm)			Módulo de elasticidade (MPa)	
	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 1	Estruturas 2 e 3
Revestimento	8	12,5	6	-	-
Base	15	15	13	400	250
Sub-base	15	20	10	204	150
Subleito	-	-	-	150	50

No que diz respeito ao clima, em todas as análises foram usados valores médios de temperatura de Fortaleza-CE nos últimos 12 meses, considerando-se uma variação de 3 temperaturas ao longo de cada dia, embora o programa possa acomodar uma discretização maior. Os pavimentos foram simulados adotando-se a velocidade dos veículos igual a 80km/h e um modelo de eixo padrão simples de roda dupla (80kN), tendo cada roda um raio de 0,108m. Assumiu-se um grau de confiança (unicaldal) de 90%. Realizaram-se as modelagens computacionais da evolução do %AT nas 3 estruturas (45 pavimentos, divididos em 3 grupos de 15 pavimentos com estruturas distintas). O %AT obtido ao final dos 120 meses de simulação computacional é identificado como %AT @ 120M.

Como *outputs*, o CAP3D-D fornece um relatório que expõe o %AT e o N para cada mês do período simulado, além do afundamento de trilha de roda mensal para cada camada do pavimento. O dano no CAP3D-D é definido como o consumo relativo de vida de fadiga (número de ciclos aplicados com a deformação do ponto analisado, dividido pelo número máximo de ciclos que pode ser aplicado no material nessa mesma deformação, sem que haja ruptura por fadiga). O critério de falha por fadiga baseia-se na pseudo-energia (G^R) liberada, conforme Nascimento *et al.* (2014). Para ranquear as misturas, optou-se por observar o valor do tráfego de veículos (N) que implica em 20%AT ($N_f @ 20\%AT$). Maiores valores de $N_f @ 20\%AT$ indicam pavimentos menos susceptíveis à fadiga, pois os mesmos suportaram mais solicitações do tráfego para atingir 20%AT, definido como limite aceitável.

Embora as 15 misturas sejam compostas por um CAP convencional, 50/70, sem a utilização de modificadores, é possível que cada CAP apresente capacidade diferente de resistir à fadiga, influenciando os desempenhos das misturas correspondentes de forma distinta.

Corroborar com esta tendência o fato do banco de dados analisado ser composto por misturas de vários estados, dosadas com CAP oriundos de diferentes refinarias. Para avaliar a susceptibilidade à fadiga de cada CAP fez-se uso do parâmetro conhecido como FFL, já adotado por Nascimento *et al.* (2014) e por Martins (2014). Da curva de fadiga do CAP (Curva de Wöhler – deformação *versus* número de ciclos), tem-se que o FFL é numericamente igual à área definida entre 1,25% e 2,5% de deformação. A avaliação é feita a 19°C, conforme a Equação 5.1 (UNDERWOOD, 2011). O referido parâmetro é obtido do ensaio Varredura Linear de Amplitude de Deformação (AASHTO TP 101-12/18 – *Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binder Using the Linear Amplitude Sweep – LAS*). Já como parâmetros da mistura completa fez-se uso do FFM e da classificação de fadiga das misturas. O FFM foi proposto por Nascimento (2015), sendo similar ao FFL e numericamente igual à área abaixo da Curva de Wöhler da mistura (considerando 20°C e 10Hz), entre os valores de 100 até 200 *microstrains* de deformação (valores tipicamente encontrados em pavimentos brasileiros, obtidos a partir de simulação de ensaio de fadiga com amplitude de deformação constante, com diferentes amplitudes investigadas) (Equação 5.2). Valores maiores de FFL e FFM indicam, respectivamente, CAP e misturas com maiores resistências à fadiga, sem considerar características estruturais do pavimento. A Figura 5.1 apresenta a área que delimita os valores do FFL e FFM.

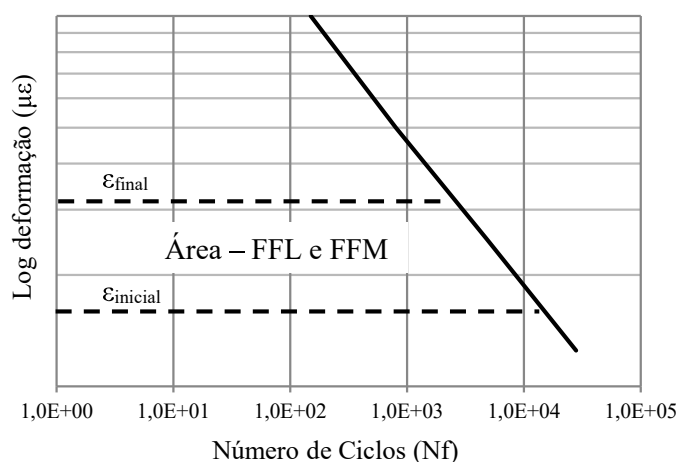


Figura 5.1 – Área para cálculo do FFL e FFM (NASCIMENTO, 2015)

$$(1) \quad FFL = \frac{[\log(N_{f,1,25\%}) + \log(N_{f,2,5\%})]}{2} \times [\log(0,025) - \log(0,0125)] \quad (5.1)$$

$$FFM = \frac{[\log(N_{f,100\mu\epsilon}) + \log(N_{f,200\mu\epsilon})]}{2} \times [\log(200) - \log(100)] \quad (5.2)$$

Por sua vez, as classes de fadiga das misturas propostas por Nascimento (2018) agrupam as misturas em 4 padrões de resistência. As misturas classificadas de 1 a 4, respectivamente, representam as misturas com resistências à fadiga inferiores até as misturas com resistências superiores. Esta metodologia consiste em correlacionar o FFM com a rigidez ($|E^*| @ 20^\circ\text{C}, 10\text{Hz}$) de cada mistura. A Figura 5.2 apresenta o fluxo das ações para o desenvolvimento da pesquisa reportada neste artigo.

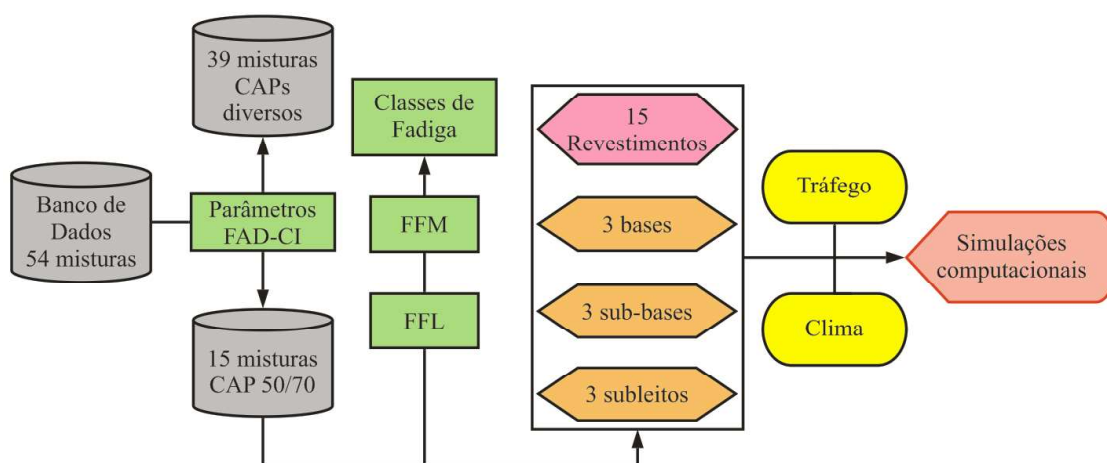


Figura 5.2 – Fluxograma das atividades desenvolvidas

5.4 Resultados e discussões

5.4.1 Impacto da adoção de diferentes estruturas

A Tabela 5.3 traz os valores de $N_f @ 20\%AT$ para as 15 misturas nas 3 estruturas de pavimentos consideradas nas simulações computacionais. A Figura 5.3 apresenta as evoluções dos %AT ao longo dos 120 meses de simulação. Encontra-se destacado (reta horizontal preta) nesta figura o limite máximo aceitável (20%AT) para o trincamento.

Tabela 5.3 – Valores de $N_f @ 20\%AT$ para as 3 estruturas avaliadas

Mistura	$N_f @ 20\%AT$ (em E+06)		
	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3
M01	7,77	4,40	3,06
M02	3,80	4,25	1,74
M05	3,06	4,25	2,47
M06	5,77	4,25	0,86
M09	6,53	5,01	2,76
M10	4,25	3,51	2,47
M15	14,70	6,53	4,40
M25	6,23	4,40	2,91
M27	6,38	5,31	2,76
M28	1,74	0,86	0,29
M29	3,65	4,25	2,17
M30	15,70	9,82	3,80
M31	3,80	4,25	2,62
M32	Não atingiram 20%AT		4,40
M33	Não atingiram 20%AT		5,46

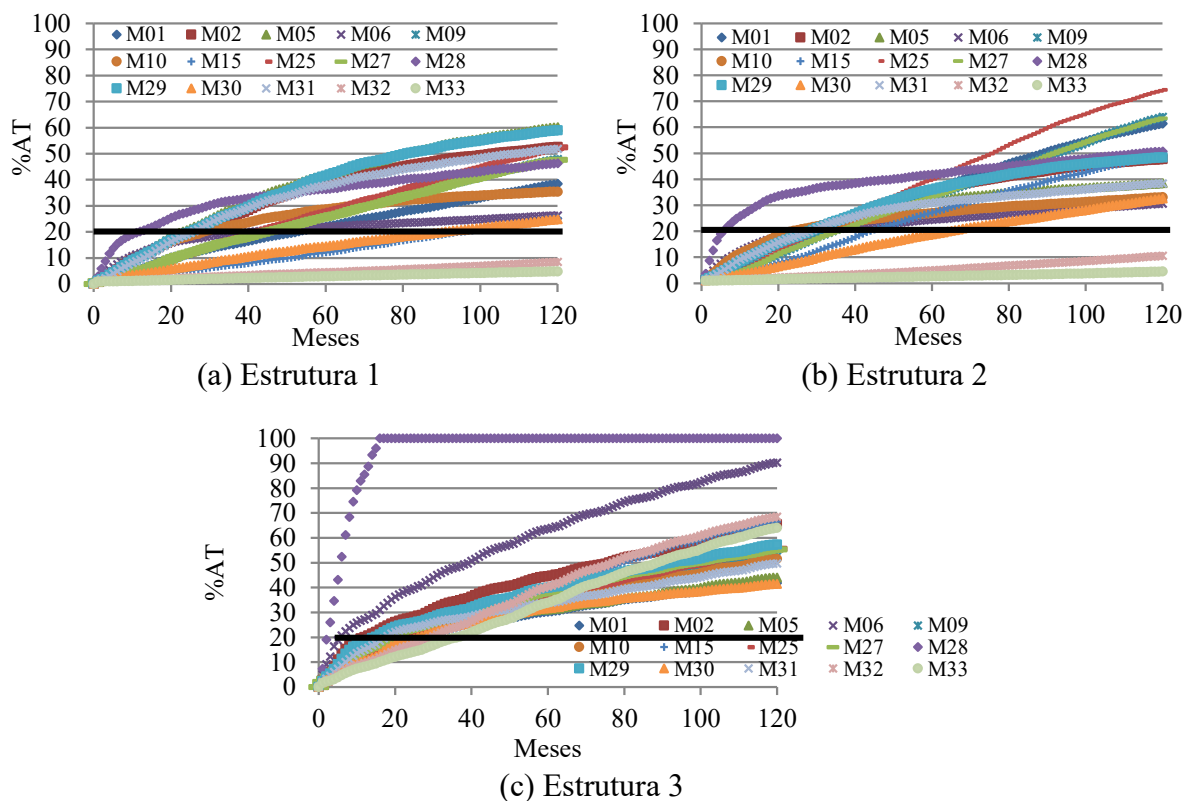


Figura 5.3 – Evolução dos %AT para as 3 estruturas consideradas

Da Tabela 5.3 e da Figura 5.3 percebe-se que a variação das espessuras das camadas e dos módulos de elasticidade dos materiais alterou a evolução do %AT dos revestimentos, consequentemente os valores de $N_f @ 20\%AT$. As análises com a Estrutura 1 (materiais com

módulos de elasticidade mais elevados) implicaram na maioria dos casos em maiores valores de $N_f @ 20\%AT$ (Tabela 5.3). A comparação do referido parâmetro obtido na Estrutura 1 e nas outras 2 estruturas não é imediata, uma vez que a primeira é composta por espessuras de camadas e materiais com características (módulo de elasticidade) diferentes. As Estruturas 2 e 3 são compostas pelos mesmos materiais, porém com espessuras distintas. Ao comparar os valores de $N_f @ 20\%AT$ nestas 2 estruturas, percebe-se que estes foram menores na Estrutura 3, como esperado, uma vez que a adoção de espessuras esbeltas e/ou subcamadas com menores módulos potencializa a ocorrência de defeitos em campo.

Nas análises feitas com as Estruturas 1 e 2, M33 e M32 apresentaram as melhores resistências à fadiga (menores valores de $\%AT @ 120M$), sem atingir 20%AT, logo não foi possível obter os seus parâmetros de $N_f @ 20\%AT$. Já quando se observam os resultados das análises obtidos com a Estrutura 3, as mesmas misturas mostraram-se mais susceptíveis à fadiga. Esta observação evidencia a relevância da estrutura do pavimento em qualquer análise de fadiga, afinal a estrutura determina em grande medida as tensões e deformações na camada de revestimento, interferindo na evolução do $\%AT$ e, conseqüentemente no $N_f @ 20\%AT$.

5.4.2 Avaliação dos parâmetros FAD-CI, FFL, FFM e classes de fadiga das misturas

Os resultados abordados nesta seção foram restritos à Estrutura 1. A Figura 5.4 traz o $N_f @ 20\%AT$ separado por (a) enquadramento nos valores ideais dos parâmetros da metodologia FAD-CI, (b) pela origem mineralógica dos agregados e (c) pelo TMN. A Tabela 5.4 apresenta a origem mineralógica dos agregados, os valores dos parâmetros FAD-CI e seus intervalos ideais, o $N_f @ 20\%AT$, o $\%AT @ 120M$, o FFL e o FFM. A Tabela 5.5 classifica as misturas por níveis de trincamento atingidos ao final do tempo de simulação ($\%AT @ 120M$). As classes de fadiga das misturas estão apresentadas na Figura 5.5. Ressalta-se que o FFL, FFM, classes de fadiga e parâmetros FAD-CI são características apenas da mistura do revestimento e de seus constituintes, não tendo relação com o restante da estrutura do sistema de camadas.

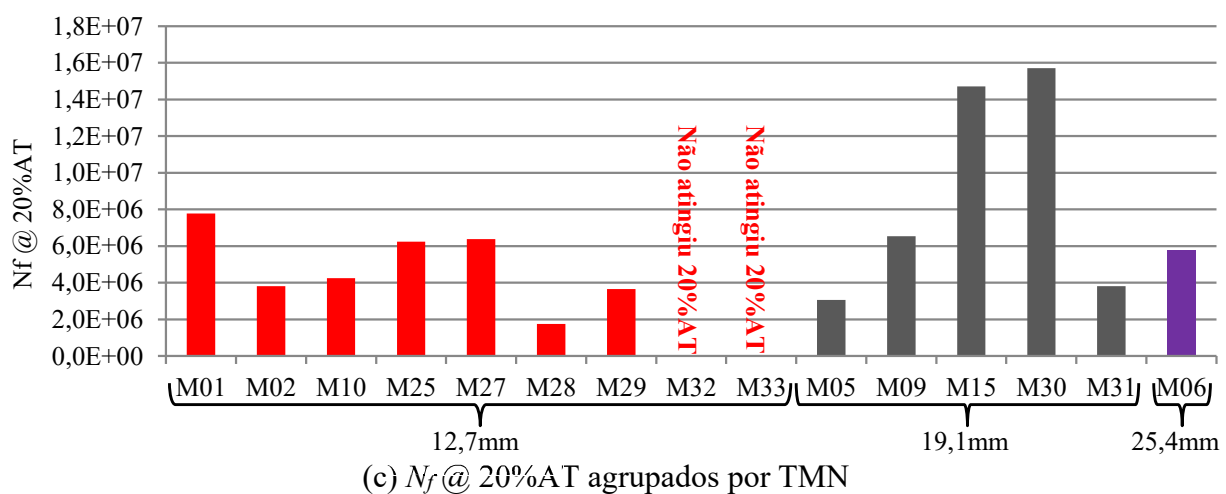
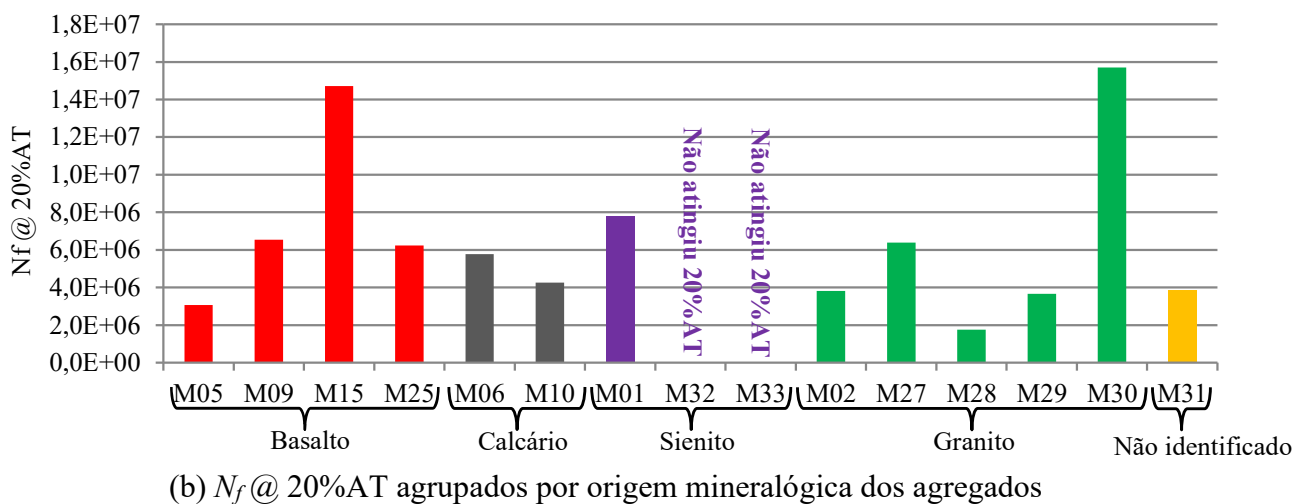
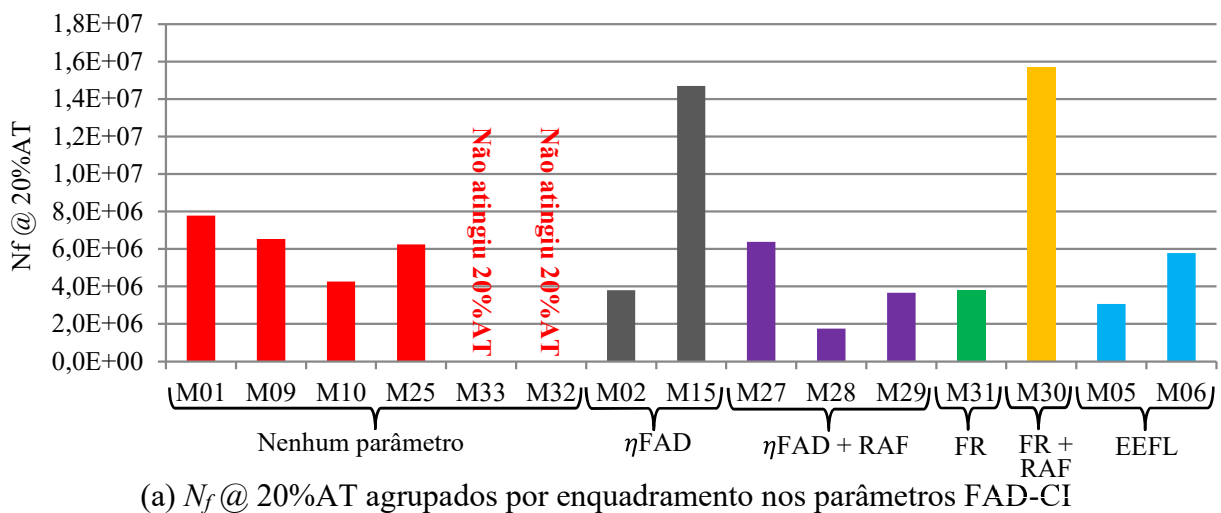


Figura 5.4 – $N_f @ 20\%AT$ agrupados por características das misturas (Estrutura 1)

Tabela 5.4 – Origem dos agregados, parâmetros FAD-CI, N_f @ 20%AT, %AT @ 120M, FFL, FFM e classes de fadiga (Estrutura 1)

Mistura	Origem agregados	Parâmetros FAD-CI				N_f @ 20 %AT (E+06)	%AT @ 120M	FFL	FFM	Classe fadiga
		η_{FAD} (%)	FR	RAF	EEFL (microns)					
M01	Sienito	64	1,36	0,57	55,8	7,77	39	1,27	1,63	2
M02	Granítica	43*	0,39	0,26	67,3	3,80	54	1,22	1,86	4
M05	Basalto	51	1,20	0,7	24,7*	3,06	60	1,20	1,53	2
M06	Calcária	61	1,40	0,26	23,7*	5,77	26	1,07	1,51	2
M09	Basalto	54	1,46	1,29	2,5	6,53	48	1,34	1,71	3
M10	Calcária	61	1,02	0,16	32,4	4,25	35	1,07	1,54	1
M15	Basalto	45*	1,33	1,31	7,4	14,70	25	1,36	1,55	1
M25	Basalto	50	0,98	0,24	8,4	6,23	52	1,36	1,50	2
M27	Granítica	43*	0,37	0,34*	67,3	6,38	50	1,34	1,70	3
M28	Granítica	43*	0,37	0,34*	67,3	1,74	46	1,28	1,60	2
M29	Granítica	43*	0,37	0,34*	67,3	3,65	59	1,19	1,44	2
M30	Granítica	49	0,89*	0,34*	53,8	15,70	23	1,22	1,45	2
M31	-	26	0,52*	0,4	53,2	3,80	51	1,34	1,53	2
M32	Sienito	64	1,36	0,57	55,8	**	9	1,32	1,90	3
M33	Sienito	64	1,36	0,57	55,8		5	1,39	1,92	4

* Resultados enquadrados nos intervalos ideais

** Misturas que não atingiram 20%AT no período simulado

Tabela 5.5 – Separação das misturas por níveis de trincamento (20%AT @ 120M)

Níveis de %AT @ 120M	Classe de fadiga	Misturas
Até 10%	4	M33
	3	M32
Entre 10% e 20%	-	-
	3	M09 e M27
Entre 20% e 50%	2	M01, M06, M28 e M30
	1	M10 e M15
Acima de 50%	4	M02
	2	M31, M25, M29 e M05

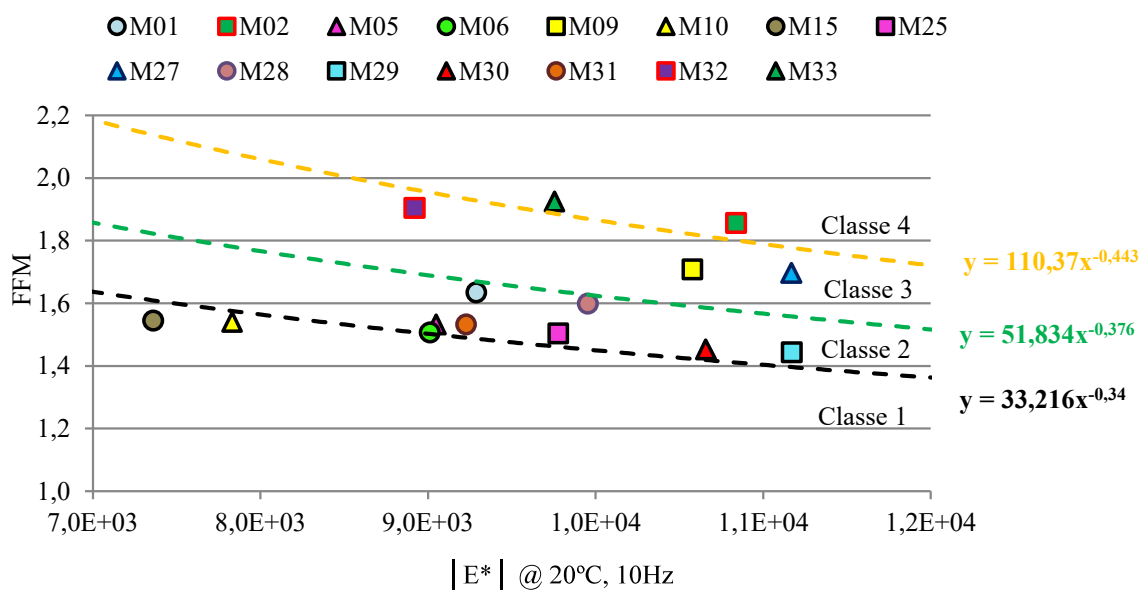


Figura 5.5 – Classes de fadiga das misturas

Avaliando-se as Tabelas 5.4 e 5.5 e a Figura 5.5, percebe-se que as misturas que apresentaram trincamento mais elevado ao final do período de simulação (%AT @ 120M) posicionaram-se nas piores classes de fadiga (1 e 2). Logo, acredita-se que observar este critério pode ajudar a identificar misturas mais susceptíveis à fadiga.

Verifica-se nas Figuras 5.3a e 5.4 e nas Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 que apenas M32 e M33 não atingiram o limite máximo aceitável de 20%AT. Portanto, M32 e M33 apresentaram a menor susceptibilidade à fadiga e não tem o parâmetro $N_f @ 20 \%AT$. Estas misturas não atenderam qualquer parâmetro FAD-CI (Figura 5.4a), o que supostamente indicaria misturas com baixa resistência à fadiga. Acredita-se que características dos agregados (origem mineralógica e propriedades químicas), propriedades químicas do CAP e a adesividade (relação agregado-ligante) podem ser fatores relevantes para influenciar os desempenhos à fadiga observados nestas 2 misturas específicas.

M01 foi dosada com o mesmo agregado de M32 e M33 (sienito), entretanto apresentou-se mais suscetível ao trincamento por fadiga. Logo, a observação somente da origem mineralógica do agregado (Figura 5.4b) não foi capaz de explicar o desempenho à fadiga. Observando o FFL, o FFM e as classes de fadiga de M33, M32 e M01 (agregados sieníticos, mesma granulometria, mesmos parâmetros FAD-CI e mesma volumetria), percebe-se que os valores dos referidos parâmetros corroboraram com o ranqueamento dos seus $N_f @ 20 \%AT$

(Tabelas 5.3 e 5.4), uma vez que indicam resistências superiores apenas para as 2 primeiras misturas, respectivamente enquadradas nas Classes 4 e 3.

Embora o TMN de M33 e M32 seja 12,7mm (menor TMN considerado), não existem elementos que indiquem que a resistência à fadiga dessas misturas tenha sido influenciada por este fator. Haja vista que M28 e M29, com o mesmo TMN de 12,7mm, apresentaram baixos valores de $N_f @ 20 \%AT$.

O parâmetro FFM apresentou boa correlação com as classes de fadiga das misturas, uma vez que as misturas com maiores FFM (respectivamente, M02, M33 e M32) apresentaram os melhores posicionamentos nas classes de fadiga. Ao avaliar os referidos parâmetros conjuntamente com o $N_f @ 20 \%AT$, percebe-se que das 3 misturas destacadas, M32 e M33 não atingiram o limite máximo de 20%AT @ 120M.

Acredita-se que diferentes composições químicas dos CAP podem influenciar a susceptibilidade à fadiga (observada pelo parâmetro FFL) desse material de forma diferente, mesmo que todos os CAP apresentem a mesma classificação por penetração. Vale notar que M06 e M10, misturas que utilizaram os CAP com menores FFL posicionam-se nas piores classes de fadiga (1 e 2), e que as misturas com melhores desempenhos (M32 e M33) apresentaram os maiores valores de FFL e posicionaram-se nas melhores classes de fadiga (3 e 4). Ressalta-se ainda que M06 e M10 e que M32 e M33 apresentaram, respectivamente, valores baixos e elevados de FFM.

Segundo Lucas Júnior *et al.* (2019a), as composições químicas de agregados e CAP influenciam a adesividade entre estes constituintes, o que interfere no desempenho à fadiga, principalmente quando as misturas são submetidas a pequenos níveis de deformação. Acredita-se que uma boa adesividade entre agregados e LA tende a potencializar a resistência ao trincamento por fadiga. Os referidos autores concluíram que alguns óxidos (SiO_2 , K_2O , CaO e Fe_2O_3) presentes nos agregados apresentam boas correlações (79%, 77%, 96% e 93%, respectivamente) com a adesividade. Os óxidos SiO_2 e K_2O prejudicam, enquanto CaO e Fe_2O_3 incrementam a adesividade. Lucas Júnior *et al.* (2019b) avaliaram as adesividades e seus impactos nas vidas de fadiga de misturas compostas por agregados com formações geológicas distintas (fonolito e granito), mantendo a mesma curva granulométrica. Concluíram que as

misturas com melhores adesividades também apresentaram as maiores resistências à fadiga. As misturas com adesividades superiores eram compostas por agregados que apresentavam maiores teores dos óxidos CaO e Fe₂O₃ e menores teores dos óxidos SiO₂ e K₂O. A Tabela 5.6 traz o percentual de alguns óxidos que compõem os 3 tipos de agregados utilizados nas misturas aqui investigadas. Embora estes percentuais não tenham sido obtidos com as mesmas amostras usadas na dosagem das misturas avaliadas, acredita-se que os valores sejam representativos.

Tabela 5.6 – Óxidos dos tipos de agregados utilizados nas misturas avaliadas

Agregado	Óxidos (%)			
	Prejudica adesividade		Incrementa adesividade	
	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
Basalto (LE MAITRE, 1976)*	49,2	1,1	9,5	3,8
Granito (BLATT e TRACY, 1996)*	72,0	4,1	1,8	1,2
Sienito (KLIEN e CORNELIUS, 1985)*	58,4	5,6	2,6	3,3

* Valores médios obtidos pela avaliação de milhares de amostras de agregados

Considerando apenas os óxidos, as resistências à fadiga das misturas compostas por agregados basálticos deveriam ser as mais elevadas. Em seguida viriam as misturas compostas por agregados sieníticos e, por fim, graníticos. Todavia, este ranqueamento não foi o mesmo observado nas simulações computacionais.

Ao avaliar as próximas misturas com os melhores desempenhos à fadiga, M30, M15 (valores elevados de $N_f @ 20 \%AT$), percebe-se que cada uma é formada por um tipo diferente de agregado, não sendo possível, portanto, identificar a influência desta variável na resistência à fadiga. Já quando se observa a Figura 5.4b, nota-se que M30 é a única mistura que atende aos parâmetros FAD-CI que mais se relacionam com a fadiga (FR e RAF). As resistências à fadiga das demais misturas variaram independentemente do enquadramento nos intervalos ótimos dos parâmetros FAD-CI. A não avaliação de variáveis como as propriedades de forma dos agregados pode limitar a capacidade de explicar as variações nas performances das misturas. Correlacionou-se os $N_f @ 20 \%AT$ com as propriedades volumétricas das misturas e com o TMN. Porém, não se verificou uma correlação elevada (R^2) com quaisquer destas propriedades.

Acredita-se que o banco de dados disponível para o desenvolvimento do presente trabalho não possibilitou distinguir, de forma clara, a influência que o FFL exerceu no desempenho a fadiga das misturas, haja vista que os valores deste parâmetro observados na

Tabela 5.4 são relativamente próximos. Como exceção, apontam-se os FFLs com valor máximo (1,39 – M33, classe de fadiga 4) e mínimo (1,07 – M06 e M10, classes de fadiga 2 e 1). Por sua vez, ao se avaliar o FFM, percebe-se que M32 e M33, misturas com maiores valores para este parâmetro, apresentaram os melhores comportamentos, uma vez que não atingiram o limite máximo de trincamento (20%AT @ 120M). Chama-se a atenção ainda para M30 (atendeu os parâmetros FR e RAF) que apresentou o maior valor de $N_f @ 20 \%AT$, a despeito de ter sido dosada com um CAP com baixo FFL. Assim, o FFM mostrou-se mais relevante do que o FFL para indicar a resistência à fadiga das misturas, o que era esperado, uma vez que o mesmo considera características dos agregados (metodologia FAD-CI, origem mineralógica, propriedades de forma e composição química) e a relação agregado-ligante (e.g. adesividade), sendo que o presente estudo ilustra como é complexo isolar a importância dos diversos fatores. Foram encontradas baixas correlações entre o FFL e o FFM com o parâmetro $N_f @ 20 \%AT$.

5.5 Conclusões

A partir de um banco de dados de 54 misturas asfálticas foram calculados todos os critérios FAD-CI, tendo sido selecionadas apenas aquelas misturas dosadas com CAP50/70 puro (15 no total). Essas misturas são formadas por agregados com diferentes origens mineralógicas e diversos enquadramentos nos intervalos ótimos dos parâmetros da metodologia FAD-CI. Observou-se ainda a capacidade de cada CAP de resistir à fadiga pelo emprego do ensaio LAS (parâmetro FFL) e das misturas resistirem ao mesmo defeito pela consideração do FFM e classes de fadiga. Avaliou-se a capacidade das misturas resistirem à fadiga pela simulação computacional da evolução do trincamento em diferentes cenários. Foram adotadas 3 estruturas de subcamadas diferentes para avaliar o impacto dessa variação. Apesar da dificuldade de se isolar a importância de parâmetros considerados relevantes pela literatura, e também da usual dificuldade em estabelecer relações de causa-efeito em qualquer pesquisa, o autor julga importante as seguintes conclusões da pesquisa realizada:

- A ponderação de diferentes estruturas de pavimentos mostrou-se relevante para influenciar a susceptibilidade à fadiga das misturas em camadas de revestimento. Algumas misturas alteraram seus posicionamentos nos ranqueamentos dos valores de $N_f @ 20 \%AT$ obtidos nas diferentes simulações. Logo, não foi possível dissociar a avaliação do desempenho à fadiga de misturas em campo da observação da estrutura do pavimento.

- Apenas a consideração da metodologia FAD-CI não foi suficiente para explicar os desempenhos à fadiga das misturas avaliadas. Acredita-se que outros fatores como características dos CAP (susceptibilidade à fadiga e propriedades químicas), origem mineralógica, composição química dos agregados e a relação agregado-ligante exercem influência na performance das misturas.

- M01, M32 e M33 foram dosadas com a mesma curva granulométrica e são compostas pelos mesmos agregados (origem sienítica). M33 e M32 apresentaram os melhores desempenhos à fadiga dentre as 15 misturas. Supostamente a compatibilidade entre as composições químicas de agregados e ligantes e as resistências à fadiga dos ligantes (FFL) e das misturas completas (FFM) influenciaram positivamente os seus desempenhos à fadiga. Embora tenha sido dosada com os mesmos agregados, M1 não apresentou o mesmo desempenho, o que pode evidenciar que a susceptibilidade à fadiga do CAP (FFL) influenciou este resultado. Crê-se ainda que o ligante empregado na dosagem de M01 apresentou menor compatibilidade química com seus agregados, o que pode influenciar negativamente a adesividade (ligante-agregado) e, conseqüentemente a resistência à fadiga.

- Recomenda-se que misturas posicionadas nas piores classes de fadiga (1 e 2) não sejam aceitas, uma vez que todas com essa classificação apresentaram-se com baixa resistência à fadiga.

- A observação apenas dos parâmetros da metodologia FAD-CI (FR, RAF e EEFL), sem a consideração de outras variáveis, não se mostrou apropriada para avaliar a fadiga das misturas investigadas. As diferentes origens mineralógicas dos agregados e as diversas resistências à fadiga dos CAP limitam a observação da relevância dos parâmetros FAD-CI. O FFL não pode ser avaliado amplamente, uma vez que os CAP apresentaram valores próximos para esse parâmetro. Contudo, nota-se que para os valores distintos, por exemplo, FFL 1,07 e 1,39, observou-se menor e maior desempenho, respectivamente.

- Para o devido isolamento de variáveis e obtenção de conclusões mais assertivas, é importante avaliar a influência da metodologia FAD-CI na fadiga com misturas dosadas rigorosamente com o mesmo CAP e os mesmos agregados, variando tão somente a granulometria, o que é

objeto de pesquisa futura do autor num programa mais amplo de busca de compreensão do fenômeno de fadiga em misturas asfálticas e as principais variáveis que levam a esta falha.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresentam-se neste capítulo as principais conclusões oriundas do desenvolvimento da presente tese de doutorado, bem como recomendações para trabalhos futuros. Mesmo que se tenha buscado ser o mais abrangente possível na escolha dos dados/misturas asfálticas consideradas nas análises, as conclusões restringem-se ao universo dos materiais estudados, às tecnologias/ensaios empregados, aos resultados do programa experimental e às análises realizadas. O presente texto foi planejado de modo a ser apresentado em 6 capítulos, sendo que 3 destes (Capítulos 3, 4 e 5) são artigos submetidos e/ou aceitos em revistas técnico-científicas. As conclusões dos artigos citados foram apresentadas nos seus respectivos capítulos. Porém, para facilitar o entendimento da contribuição da tese, foram trazidas para esta seção final as principais conclusões delimitadas nos capítulos anteriores. Apresentam-se ainda conclusões gerais, construídas com uma visão global referente aos dados apresentados na pesquisa, bem como da forma como os mesmos interagem com os trechos experimentais do Ceará descritos no Capítulo 2.

6.1 Principais conclusões da tese

- As inovações advindas da RTA (métodos de dimensionamentos, e.g., MeDiNa e CAP3D-D, e ensaios mais sofisticados de caracterização de defeitos) são avanços significativos para a pavimentação nacional, pois representam uma mudança de direção, afastando-se do empirismo, rumo ao mecanicismo. Contudo, é importante que a comunidade da pavimentação nacional permaneça exercendo a faculdade do ceticismo racional que é uma marca da Ciência. Dessa forma, possibilitará a evolução dos métodos recém desenvolvidos, sobretudo quando houver potencial de incrementar a precisão das avaliações realizadas em laboratório, com vistas a aumentar a vida útil dos pavimentos em campo.

- Como o próprio nome da RTA explicita, a mecânica de trabalho *em rede* tornou possível a construção de um robusto e inédito banco de dados nacional de materiais de pavimentação, agrupando informações de vias construídas em todas as regiões do Brasil. As atividades desenvolvidas no âmbito desta tese apontam que a maneira eficiente de se extrair os maiores benefícios do referido banco de dados é abrindo-o para que um número crescente de grupos de pesquisa possa, acessando seus detalhes, buscar uma maior compreensão dos fenômenos em questão. Quanto mais diversas forem as perspectivas, maiores as chances de surgirem avanços,

sendo que a presente pesquisa trouxe um prisma da fadiga a partir de granulometria dos agregados e da volumetria das misturas asfálticas contidas no banco de dados.

- A avaliação das amostras consideradas na tese evidenciou alguma influência da granulometria (aqui avaliada sob a ótica do modelo FAD-CI) na susceptibilidade à fadiga de misturas asfálticas. Entretanto, apreciar esta característica somente, sem considerar propriedades químicas do LA e a relação entre os constituintes mostrou-se insuficiente para mapear o referido defeito.

- Como esperado, a susceptibilidade à fadiga de misturas aplicadas em revestimentos de pavimentos asfálticos, em algum nível, é influenciada por características das subcamadas (espessuras e rigidezes). A referida influência é capaz de alterar o ranqueamento do desempenho das misturas. Não é recomendado, portanto, avaliar somente o revestimento asfáltico para inferir sobre a vida útil do pavimento no que tange a resistência à fadiga. Mostrou-se ser insuficiente apreciar a fadiga de misturas somente pelo juízo de suas curvas de Wöhler, devendo-se realizar simulações do sistema de camadas como um todo.

- Ponderar as classes de fadiga mostrou ser uma ação útil na tarefa de selecionar misturas mais resistentes à fadiga. Os dados arrolados na presente tese indicam que misturas enquadradas nas classes 1 e 2 devem ser descartadas por apresentarem baixa resistência ao trincamento por fadiga.

- Embora muitos autores apontem que os tamanhos máximos dos agregados integrantes dos esqueletos pétreos de misturas asfálticas influenciem na resistência à fadiga, não foram encontradas evidências nesse sentido a partir do banco de dados e ensaios analisados.

- Selecionar apenas LAs com a mesma classificação (por exemplo: CAPs 50/70) mostrou-se ser insuficiente para isolar possíveis influências oriundas desse componente. Pois, a ponderação de algumas características abordadas ao longo da tese (e.g. FFL) denotaram que LAs inicialmente julgados como iguais (por terem a mesma classificação), apresentavam resistências diferentes à fadiga. Destaca-se ainda que a relação (adesividade) de CAPs 50/70 com diferentes agregados em misturas asfálticas distintas é capaz de interferir na susceptibilidade à fadiga destas misturas de maneiras diferentes.

- Avaliar o trincamento de revestimentos asfálticos em campo, pelo sucessivo posicionamento manual de uma grade metálica, mostrou-se simples, porém pouco produtivo. Uma vez que são quantificadas apenas as trincas visíveis na superfície do pavimento, fissuras existentes em diferentes profundidades da camada de rolamento, mas que não atingiram a superfície, são desconsideradas. Tal forma de quantificar o %AT, ainda que prática e passível de ser modernizada com novas técnicas de avaliação de superfície, é questionável quanto a sua real capacidade de representar o dano por fadiga em campo.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Ao longo das ações de laboratório desenvolvidas no âmbito desta tese, buscou-se selecionar as misturas de forma a destacar a capacidade das granulometrias de seus agregados de influenciarem a resistência à fadiga. Procurou-se ainda avaliar parâmetros capazes de se relacionar com misturas asfálticas mais resistentes ao mesmo defeito. Já na esfera de campo, sobretudo na apreciação do trincamento dos revestimentos asfálticos, fez-se uso de uma metodologia simples, facilmente replicável no estado da prática. Foram encontradas limitações nas diferentes frentes, sendo apresentadas a seguir sugestões para trabalhos futuros que se relacionam com as deficiências destacadas:

- Para o devido isolamento de variáveis e obtenção de conclusões mais assertivas, é importante avaliar a influência da metodologia FAD-CI na fadiga com misturas dosadas rigorosamente com o mesmo LA e os mesmos agregados (oriundos do mesmo veio e da mesma pedreira), variando tão somente a granulometria.

- Verificar se, em campo, alterações na estrutura (rigidez e espessuras das subcamadas) de pavimentos são capazes de impactar a vida de fadiga, da mesma forma que as referidas modificações afetaram os resultados das simulações computacionais de trincamento realizadas nesta tese.

- É oportuno o desenvolvimento de metodologia/mecanismo que possibilite o reconhecimento de trincas na superfície de pavimentos asfálticos sem a necessidade da utilização da grade metálica empregada. É desejável ainda avaliar a ocorrência e a posterior consideração de trincas no revestimento, porém não identificáveis em sua superfície.

- A fadiga de misturas é avaliada pela apreciação de características diferentes nos cenários de campo e de laboratório, sendo observados o %AT no campo e o decréscimo de rigidez da mistura asfáltica em laboratório. Dado que a medição do %AT não é precisa, sugere-se que se avalie a possibilidade de verificação da fadiga em campo pela identificação da diminuição do valor da rigidez do revestimento asfáltico medido *in situ* com o uso de equipamentos como, por exemplo, o *geogauge* ou ensaios não destrutivos de propagação de ondas. Essas medições em campo possibilitariam, ainda, avaliar se, após um período de ausência de solicitações, o valor da rigidez do revestimento pode ser recuperado, ainda que parcialmente.

- A não consideração do envelhecimento de misturas asfálticas nas simulações de desempenho desses materiais é uma simplificação. Sugere-se que sejam realizadas simulações que levem este aspecto em consideração, ou seja, que seja considerado algum modelo de ganho de rigidez das misturas asfáltica devido ao endurecimento do ligante, contrapondo-se à perda de rigidez devido a formação de trincas.

- É importante simular computacionalmente diferentes possibilidades/cenários de pavimentos, confrontando as simulações com dados de campo. Sugere-se a avaliação de situações não observadas na presente tese, por exemplo: (i) realizar novamente os testes considerando outras temperaturas ambientes, simulando o comportamento de pavimentos/misturas aplicados em cidades com condições climáticas diferentes das registradas em Fortaleza; (ii) verificar se os esforços que resultam na fadiga de revestimentos asfálticos são similares em vias em alicive e em declive, possivelmente com veículos trafegando com menores e maiores velocidades, respectivamente. Faz-se essa sugestão com vistas a identificar áreas de pavimentos sujeitas a maiores solicitações e, assim, ter a opção de projetá-las com algum reforço estrutural; (iii) avaliar o impacto da adoção de LAs mais consistentes na vida de fadiga de misturas asfálticas, sobretudo nas destinadas à aplicação em regiões com clima quente; e (iv) com o crescente emprego da reciclagem a frio de revestimentos asfálticos, ressalta-se a importância de se investigar as consequências da incorporação (reciclagem) do rejeito ambiental (material fresado) na vida de fadiga de misturas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.J.P. **Modelagem computacional de misturas asfálticas com utilização do método dos elementos finitos e da teoria do dano contínuo**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2019.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO guide for design of pavement structures**. Estados Unidos da América, 1993.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 342: Method of test for determining dynamic modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)**. Estados Unidos da América, 2011.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 101-12: Method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep**. Estados Unidos da América, 2018.

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, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1823: Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**. Estados Unidos da América, 2013.

ARAÚJO, C.B.C.; SOUZA FILHO, F.A.; SOARES, J.B. Água conecta infraestrutura hídrica e de transportes em ambiente urbano: clima, hidrologia e pavimentos. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu-PR, 2019.

BABADOPULOS, L.F.A.L. **A contribution to couple aging to Hot Mix Asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2014.

BABADOPULOS, L.F.A.L.; OROZCO, G.; SAUZÉAT, C; DI BENEDETTO, H. Reversible phenomena and fatigue damage during cyclic loading and rest periods on bitumen. **International Journal of Fatigue**, v. 124, p. 303-314, 2019. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.03.008

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. DOI: 10.14295/transportes.v23i2.898.

BARRA, B.S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2009.

BASTOS, J.B.S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2013.

BENEVIDES, S.A.S. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos – empírico do DNER e resiliência COPPE/UFRJ – em rodovias do Ceará**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2000.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro-RJ, 2008

BLATT, H.; TRACY, R.J. *Petrology: igneous, sedimentary and metamorphic*. 2nd ed. **New York: Freeman**. p. 66, 1996.

BOEIRA, F.D.; PINHEIRO, G.; SPECHT, L. P.; DRUZIAN, E. L.; JUST, M.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; NASCIMENTO, L. A. H.; PEREIRA, D. S. Projeto e implementação de ensaio de fadiga por tração-compressão direta (uniaxial) para avaliação de dano em misturas asfálticas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro-RJ, v. 23, p. 12148, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0482>

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

CHUN, S.; KIM, K. Effectiveness of dominant aggregate size range – interstitial component criteria for consistently enhanced cracking performance of asphalt mixtures in the field. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 43, p. 523-531, 2016. DOI: 10.1139/cjce-2015-0517.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**. DF-Brasília, 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2018**. DF-Brasília, 2018a.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Plano CNT de Transporte e Logística 2018**. DF-Brasília, 2018b

DANIEL, J.S. e Y.R. KIM. Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic continuum damage model. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, AAPT, Vol. 71, pp. 619-650, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 043: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Rio de Janeiro-RJ, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER: Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro-RJ, 1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031: Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico**. Rio de Janeiro-RJ, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136: Pavimentação asfáltica - misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro-RJ, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 183: Pavimentação asfáltica – ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada.** Rio de Janeiro-RJ, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 184: Pavimentação - misturas asfálticas - ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente.** Rio de Janeiro-RJ, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 416: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo dinâmico.** Rio de Janeiro-RJ, 2019.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. Fatigue of bituminous mixtures. **Materials and Structures**, v. 37, p. 202-216, 2004. DOI: 10.1007/BF02481620

DI BENEDETTO, H.; PARTL, M.N.; FRANCKEN, L.; DE LA ROCHE, C. Stiffness testing for bituminous mixtures. **Materials and Structures**, v. 34, p. 66-70, 2001. DOI: 10.1007/BF02481553

DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; CLEC’H, P. **Anisotropy of bituminous mixture in the linear viscoelastic domain.** *Mech Time-Depend Mater* 20, 281–297 (2016). DOI: 10.1007/s11043-016-9305-0

EUROPEN STANDARD. **EN 12697-24: Bituminous mixtures - test methods - resistance to fatigue.** 2018.

FENGLER, R.Z. **Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de Trinidad lake asphalt.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2018.

FERREIRA, J.L.S. **Melhoramento da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas pela escolha granulométrica a partir da metodologia da faixa de agregados dominantes.** Projeto de graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.

FRITZEN, M.A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão de dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2016.

FRITZEN, M.A.; FRANCO, F.A.C.P.; MOTTA, L.M.G.; UBALDO, M.O. **Atualização da função transferência do dano de fadiga para a área trincada do programa MeDiNa**. 9º Congresso Rodoviário Português, Portugal, 2019.

GOODRICH, J. L. Asphalt binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, 60, 80–120, 1991.

GREENE, J.; CHUM, S.; CHOUBANE, B. Enhanced gradation guidelines to improve asphalt mixture performance. **Transportation Research Board**, Estados Unidos da América, 2014. DOI: 10.3141/2456-01.

GUARIN, A. **Interstitial component characterization to evaluate asphalt mixture performance**. Tese de doutorado, Universidade da Flórida, Estados Unidos da América, 2009.

HOLANDA, A.S.; PARENTE Jr., E.; ARAÚJO, T.D.P.; MELO, L.T.B.; EVANGELISTA Jr., F.; SOARES, J.B. Finite element modeling of flexible pavements. **Iberian Latin-American Congress on Computational Methods In Engineering**, Belém-PA, 2006.

HOU, T.; UNDERWOOD, B.S.; KIM, Y.R. Fatigue performance prediction of North Carolina mixtures using the simplified viscoelastic continuum damage model. **Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)**, v. 79, p. 35-73, Estados Unidos da América, 2010.

KACHANOV, L.M. **On time to rupture in creep condition**. **Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk**, 8, pp. 26-31, 1958.

KIM, S. **Identification and assessment of the dominant aggregate size range of asphalt mixture**. Tese de doutorado, Universidade da Flórida, Estados Unidos da América, 2006.

KIM, Y.R.; GUDDATI, M.N.; UNDERWOOD, B.S.; YUN, T.Y.; SUBRAMANIAN, V.; SAVADATTI, S.; THIRUNAVUKKARASU, S. Development of a multiaxial viscoelastoplastic continuum damage model for asphalt mixtures. **Publication Department of Transportation Federal Highway Administration**, Estados Unidos da América, 2009.

KLIEN C.; CORNELIUS S.H. Manual of mineralogy after James D. Dana. **John Wiley & Sons, Inc**, Estados Unidos da América, 1985.

KUTAY, M. E.; GIBSON, N.; YOUTCHEFF, J.; DONGRÉ, R. Use of small samples to predict fatigue lives of field cores: newly developed formulation based on viscoelastic continuum damage theory. **Transportation Research Record**, 2127(1), 90–97, 2009. <https://doi.org/10.3141/2127-11>

LE MAITRE, R.W. The chemical variability of some common igneous rocks. **Journal of Petrology**, v. 17, n. 4, p. 589–598, Inglaterra, 1976.

LEE, K.; PAPE, S.; CASTORENA, C.; UNDERWOOD, B.S.; Kim, Y.R. Strain-level determination procedure for small-specimen cyclic fatigue testing in the asphalt mixture performance tester. **Transportation Research Record**, 2673(11), 824–835, 2019. <https://doi.org/10.1177/0361198119845357>

LEMAITRE, J. **A Course on damage mechanics**. 2a Edição. Ed. Springer, 1996. ISBN-13: 978-3540609803.

LEMAITRE, J.; DESMORAT, R. **Engineering, damage mechanics, ductile, creep, fatigue and brittle failures**. ISBN 3-540-21503-4, Alemanha, 2005.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J.L. **Mechanics of Solid Materials**. Cambridge University Press, 8 de fev. de 1990. ISBN: 1107392985.

LOUREIRO, T.G. **Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2003.

LUCAS JÚNIOR, J.L.O.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; SOARES, J.B. Aggregate–binder adhesiveness assessment and investigation of the influence of morphological and physico-chemical properties of mineral aggregates. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, p. s79-s94, 2019a. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1588773>

LUCAS JÚNIOR, J.L.O.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; SOARES, J.B. Moisture-induced damage resistance, stiffness and fatigue life of asphalt mixtures with different aggregate-binder adhesion properties. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 166–175, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.241>.

MANGIAFICO, S.; BABADOPULOS, L.F.A.L. ; SAUZEAT, C.; DI BENEDETTO, H. Nonlinearity of bituminous mixtures. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, v. Online, p. 1-21, 2017.

MANUAL DE EXECUÇÃO DE TRECHOS MONITORADOS. **METM: Rede de Tecnologia em Asfalto**, Rio de Janeiro-RT, 2010.

MARTINS, A.T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2014.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos (3ª Edição)**, ISBN: 9788571933668. Rio de Janeiro-RJ, 2015.

MELO, J.V.S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2014.

MOCELIN, D.M. **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2018.

MONISMITH, C.L. **Asphalt concrete: an extraordinary material for engineering applications**. Universidade da Califórnia, Estados Unidos da América, 1998.

MOTTA, L.M.G.; LEITE, L.F.M.; FRANCO, F.A.C.P.; SILVA, C.F.S.C.; MEDINA, J. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Relatório do Convênio Universidade Federal do Rio de Janeiro/Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.

NASCIMENTO, L.A.H. **Apresentação realizada no CT-Asfalto N/NE na Universidade Federal do Ceará**. Data: 12 de dezembro de 2018, Fortaleza-CE, 2018.

NASCIMENTO, L.A.H. **Apresentação realizada no Departamento de Engenharia de Transportes na Universidade Federal do Ceará**. Data: 21 de dezembro de 2016, Fortaleza-CE, 2016.

NASCIMENTO, L.A.H. **Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil**. Tese de doutorado, Universidade Estadual da Carolina do Norte, Estados Unidos da América, 2015.

NASCIMENTO, L.A.H.; LEITE, L.; CAMPOS, E.; MARQUES, G.; MOTTA, L. Uso da tomografia computadorizada e de imagens digitais para o estudo de misturas asfálticas. **18º Encontro de Asfalto**, Rio de Janeiro-RJ, 2006.

NASCIMENTO, L.A.H.; ROCHA, S.M.N.; NASCIMENTO, C.E.H.; CHACUR, M.; MARTINS, A.T. Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras. **21º Encontro de Asfalto**, Rio de Janeiro-RJ, 2014.

NGUYEN, Q.T.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; NGUYEN, M.L.; HOANG, T.T.N. 3D complex modulus tests on bituminous mixture with sinusoidal loading in tension and/or compression. **Materials and Structures**, v. 50, p.98, 2019. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0970-x>

NUKUNYA, B.; ROQUE, R.; TIA, M.; BIRGISSON, B. Evaluation of VMA and other volumetric properties as criteria for the design and acceptance of Superpave mixtures (with discussion and closure). **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)**, v. 70, p. 38-69, Estados Unidos da América, 2001.

OLIVEIRA, J.A.; SOARES, J.B.; NASCIMENTO, L.A.H. **Avaliação de parâmetros FAD-CI e seus impactos na vida de fadiga de misturas asfálticas**. Aceito pela **Revista Transportes**, 2019.

PAPE, S.; LEE, K.; CASTORENA, C.; Kim, Y.R. optimization of the laboratory fabrication of small specimens for asphalt mixture performance testing. **Transportation Research Record**, 2672(28), 438–450, 2018. <https://doi.org/10.1177/0361198118790845>

PARK, S.W.; KIM, Y.R.; SCHAPERY, R.A. A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. **Mechanics of Materials**, v. 24, n. 4, p. 241-255, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(96\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(96)00042-7)

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na validação estrutural de pavimentos**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 1991.

PORTELA NETO, M.G. **Avaliação da porosidade marginal da faixa de agregados dominantes em misturas asfálticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2018.

REDDY, J.N.; GARTLING, D.K. The finite element method in heat transfer and fluid dynamics third edition. Third Edition. **CRC Press Taylor & Francis Group**, 2010.

RELATÓRIO TÉCNICO FINAL. **Desenvolvimento de um método de dimensionamento de pavimentos asfálticos - SDIMPA (Sistema de Dimensionamento de Pavimento Asfáltico)**. Fortaleza-CE, 2016.

SABOURI, M. A.; KIM, Y. R.; GROSSMAN, I. E. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading In outer approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs. **TRB Annual Meeting Math. Prog.** v. 36, n. 3, p. 307-327, Estados Unidos da América, 2014.

SANTIAGO, L.S. **Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2017.

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

SANTIAGO, L.S.; SILVA, S.A.T; SOARES, J.B. Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas. **Revista Transportes**, v. 21, n. 2, p. 31-43. Rio de Janeiro-RJ, 2018. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1446.

SANTOS, A.B.V. **Contribuições para um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada.** Qualificação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2019.

SCHAPERY, R. A. **Simplifications in the behavior of viscoelastic composites with growing damage.** In: Symposium on Inelastic Deformation of Composite Materials, Mechanics and Materials Center. Texas: A&M University, College Station, 1990.

SCHAPERY, R.A. Correspondence principles and a generalized j integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. **International Journal of Fracture**, v. 25, p. 195-223, 1984.

SCHUSTER, S.L. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2018.

SENGOZ, B.; TOPAL, A. Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on asphalt film thickness. **Journal of Building and Environment**. v. 42, p. 3629-3635, 2007. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.10.005.

SILVA, S.A.T; SOARES, J B.; BARROSO, S.H.A. Proposta de método de caracterização da interface revestimento asfáltico-base granular. **XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes da ANPET**, Recife-PE, 2017.

SILVEIRA. M.R. Transporte e logística: as ferrovias no Brasil. **Revista Geosul**, v. 17, n. 34, p. 63-86, Florianópolis-SC, 2002.

SOARES, J.B. Reflexões sobre um programa de pesquisa científica para a infraestrutura viária do Brasil. Artigo aceito para a **Revista Transportes**, Rio de Janeiro-RJ, 2019.

UNDERWOOD, B.S. **Multiscale constitutive modeling of asphalt concrete**. Tese de doutorado, Universidade Estadual da Carolina do Norte, Estados Unidos da América, 2011.

UNDERWOOD, B.S.; BAEK, C.; KIM, Y.R. Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis. **Journal Sage**, v. 2296, p. 36-45, 2012. <https://doi.org/10.3141/2296-04>

UNDERWOOD, B.S.; HOU, H.E.T.; KIM, Y.R. Application of simplified VECD modeling to the fatigue prediction of asphalt concrete mixtures. **7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials**, Grécia, 2009.

UTE PECÉM. **A usina**. Disponível em: <https://pecem.brasil.edp.com/pt-br>. Acessado em: 05 de dezembro de 2019.

VASCONCELOS, S.D. **Avaliação da heterogeneidade de cinzas de carvão mineral advindas da termelétrica energia Pecém e sua aplicação em camadas granulares de pavimentos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2016.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global Status Report on Road Safety**, Suíça, 2018.

ZHANG, J.; SABOURI, M.; Kim, Y.R.; GUDDATI, M.N. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, AAPT, Vol. 82, pp. 1-22, 2013.

ZHOU, F.; HU, S.; SCULLION, T. Integrated asphalt (overlay) mixture design balancing rutting and cracking requirements. **Texas Department of Transportation and Federal Highway Administration** Report 0-5123-1, Estados Unidos da América, 2006.