

Igor Tiago Buzzi Torres

**APLICAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ANÁLISE E
CRITÉRIOS DE RUPTURA EM ENSAIOS DE FADIGA E SUA
INFLUÊNCIA NO DIMENSIONAMENTO RACIONAL DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina como
requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. João Victor Staub
de Melo, Dr.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Torres, Igor Tiago Buzzi Torres
Aplicação de Diferentes Métodos de Análise e Critérios de Ruptura em Ensaios de Fadiga e sua Influência no Dimensionamento Racional de Pavimentos Flexíveis. / Igor Tiago Buzzi Torres Torres ; orientador, João Victor Staub de Melo Melo, 2017.
108 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Misturas Asfálticas. 3. , Critérios de Ruptura. 4. , Métodos de Análise. 5. , Dimensionamento Mecânico. I. Melo, João Victor Staub de Melo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**APLICAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ANÁLISE E
CRITÉRIOS DE RUPTURA EM ENSAIOS DE FADIGA E SUA
INFLUÊNCIA NO DIMENSIONAMENTO RACIONAL DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Igor Tiago Buzzi Torres

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 26 de junho de 2017.



Prof.^ª. Luciana Rohde, Dr.^a.
Coordenadora do Curso

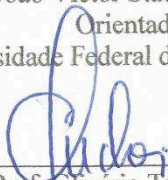
Banca Examinadora:



Prof. João Victor Staub de Melo, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Glicério Trichês, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.^ª. Liseane Padilha Thives, Dr.^a.

Universidade Federal de Santa Catarina

À minha mãe Isabel Buzzi, que sempre me motivou a ser uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pelo apoio e carinho em todos os momentos difíceis e prazerosos que enfrentei durante a graduação.

À minha mãe Isabel Buzzi por ser sempre uma pessoa inspiradora e amável. Aos meus dois irmãos Érico Leandro e Bruno Lucas pelo companheirismo e amizade hoje e sempre.

Aos meus tios, primos e primas que sempre fizeram do meu cotidiano uma alegria imensa.

Aos meus amigos de longa data: Eduardo Carvalho, Lucas, Kaio e Guilherme por sempre estarem por perto nos momentos mais precisos. Kaio e Lucas, os seus conselhos e filosofias de vida sempre me ajudaram a progredir cada vez mais como pessoa.

Aos meus amigos da graduação: Eduardo, Bruna, Vinicius, Rodrigo, Romeu, Juliana, Jonas, Gabriel, Fabiana e Ana, por todos os momentos divertidos, estressantes e descontraídos que passamos durante este percurso. Em especial a Fabiana por estar sempre disposta a escutar os meus desabafos em momentos de grande dificuldade.

À Kelli Karine Abrão pelo amor e apoio que sempre me proporcionou. Eu amadureci muito ao seu lado e sempre pensarei em você com muito carinho.

Ao meu orientador João Victor Staub de Melo por toda sua contribuição na realização deste trabalho e por sua paciência ao sanar minhas dúvidas.

A todos os professores da graduação que me ensinaram muito testando as minhas capacidades. Em especial aos professores Daniel Loriggio, Magnani, Liseane e Prudêncio pelas melhores aulas da minha vida.

À Universidade Federal de Santa Catarina por me proporcionar um excelente curso, onde eu descobri a paixão pela área de engenharia civil.

"Apenas aqueles que se arriscam a ir muito longe possivelmente conseguirão descobrir quão longe se pode ir" – T. S. Eliot.

RESUMO

A economia brasileira depende muito do sistema rodoviário, o qual se encontra em estado precário no quesito qualidade. Por conta disto, deve-se prevenir a propagação de danos excessivos no pavimento para proporcionar uma estrutura de maior conforto e segurança. Este trabalho tem como principal foco avaliar as diferenças encontradas na vida útil e espessura do revestimento asfáltico quando abordados diferentes critérios de ruptura por fadiga e métodos de análises usados na concepção das curvas e equações de fadiga. Com finalidade de se realizar este estudo, aplicaram-se os critérios de ruptura da ASU e de Pronk e Hopman nos dados brutos de resistência à fadiga adquiridos por Melo (2014) durante seu doutoramento. Novos pontos de ruptura foram obtidos graficamente e foram construídas novas equações de fadiga de acordo com diferentes abordagens. Complementou-se esta análise comparativa através do dimensionamento racional de um revestimento asfáltico utilizando o *Software Viscoroute*. Dentro dos resultados obtidos, constatou-se que a vida útil à fadiga de pavimentos flexíveis, quando considerado uma análise mecanicista (energia dissipada acumulada), é maior se comparado com a abordagem fenomenológica, apesar de ser mais complexo a sua aplicação. Entretanto, no que diz respeito ao dimensionamento racional de pavimentos flexíveis, ambas as metodologias são bastante semelhantes em termos de espessura. Já para os critérios de ruptura estudados, concluiu-se que o critério Pronk e Hopman apresenta-se mais conservador em ambas as abordagens.

Palavras-chave: Pavimentação. Misturas asfálticas. Resistência à fadiga. Critérios de ruptura. Métodos de análise. Dimensionamento mecanístico.

ABSTRACT

The Brazilian economy depends heavily on the road system, which is in a precarious state in terms of quality. Because of this, it is necessary to prevent the propagation of excessive damage to the pavement to provide a structure with comfort. The main objective of this work is to evaluate the differences in the useful life and thickness of the asphalt coating when different fatigue rupture criteria and analysis methods are used in the design of fatigue curves and equations. In order to perform this study, the ASU and Pronk and Hopman rupture criteria were applied to the raw fatigue resistance data acquired by Melo (2014) during his PhD. New rupture points were obtained graphically and new fatigue equations were constructed according to different approaches. This comparative analysis was complemented by the rational dimensioning of an asphalt coating using the *Software Viscoroute*. Within the results obtained, it was observed that the useful life of the fatigue of flexible pavements, when considered a mechanistic analysis (accumulated dissipated energy), is higher when compared to the phenomenological approach, although its application is more complex. However both methodologies are quite similar in terms of thickness. Regarding the rupture criteria studied, it was concluded that the Pronk and Hopman criteria are more conservative in both approaches.

Keywords: Pavement. Asphalt mixtures. Resistance to fatigue. Fatigue criteria. Methods of analysis. Mechanical dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal típica de um pavimento flexível.	29
Figura 2 - Deformações em diferentes sentidos nas camadas betuminosas devido à atuação da carga do pneu.	31
Figura 3 - Exemplo do sinal de deformação adquirido na face inferior do concreto asfáltico.	31
Figura 4 - Esquema de tensão e deformação sinusoidal.....	33
Figura 5 – Representação gráfica do plano Cole-Cole.....	36
Figura 6 - Esquematização do modelo analógico de Huet-Sayegh.	37
Figura 7 - Tipos de ensaios de resistência à fadiga.	42
Figura 8 - Aparato de flexão a quatro pontos (4PB).	43
Figura 9 - Representação gráfica do critério de ruptura de Carpenter.	47
Figura 10 - Representação gráfica dos critérios de ruptura energéticos (Pronk, Pronk e Hopman e Rowe).	49
Figura 11 – Fases de degradação do módulo complexo (rigidez) no concreto asfáltico: critério convencional de ruptura por fadiga.	50
Figura 12 - Representação gráfica dos critérios de ruptura baseados na degradação da rigidez (Rowe e Bouldin, ASU).	53
Figura 13 - Representação gráfica do critério de ruptura de Franken.	54
Figura 14 – Representação do loop de histerese para o critério de Al-Khateeb e Shenoy.	56
Figura 15 - Estimativa de N_f para a mistura asfáltica convencional em três diferentes temperaturas e diferentes níveis de deformação.	58
Figura 16 - Estimativa de N_f para a misturas asfáltica com borracha em duas diferentes temperaturas e diferentes níveis de deformação.	59
Figura 17 - Estimativa de N_f para a mistura asfáltica reforçada com fibras em três diferentes temperaturas e diferentes níveis de deformação.	59
Figura 18 - Plano de corte (dimensões em cm).	66
Figura 19 - Critérios de ruptura utilizados na abordagem fenomenológica.	68
Figura 20 - Critérios de ruptura utilizados na abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada.	68
Figura 21 - Propriedades necessárias para modelização da estrutura de um pavimento flexível.	70
Figura 22 - Fluxograma da modelização da estrutura de um pavimento segundo a abordagem fenomenológica.	71
Figura 23 - Fluxograma da modelização da estrutura de um pavimento segundo uma abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada.....	72
Figura 24 - Plano Cole-Cole elaborado por Melo (2014).	74
Figura 25 - Obtenção de N_f para o CP 1.4 (100 $\mu\epsilon$).	75
Figura 26 - Obtenção de N_f para o CP 3.4 (100 $\mu\epsilon$).	76
Figura 27 - Obtenção de N_f para o CP 1.2 (150 $\mu\epsilon$).	76
Figura 28 - Obtenção de N_f para o CP 2.2 (150 $\mu\epsilon$).	77
Figura 29 - Obtenção de N_f para o CP 1.5 (200 $\mu\epsilon$).	77
Figura 30 - Obtenção de N_f para o CP 2.3 (200 $\mu\epsilon$).	78

Figura 31 - Obtenção de Nf para o CP 1.4 (100 $\mu\epsilon$).	79
Figura 32 - Obtenção de Nf para o CP 3.4 (100 $\mu\epsilon$).	80
Figura 33 - Obtenção de Nf para o CP 1.2 (150 $\mu\epsilon$).	80
Figura 34 - Obtenção de Nf para o CP 2.2 (150 $\mu\epsilon$).	81
Figura 35 - Obtenção de Nf para o CP 1.5 (200 $\mu\epsilon$).	81
Figura 36 - Obtenção de Nf para o CP 2.3 (200 $\mu\epsilon$).	82
Figura 37 - Nf adquirido para os diferentes critérios.	83
Figura 38 - Curvas de fadiga: abordagem fenomenológica.	85
Figura 39 - Curvas de fadiga: abordagem da energia dissipada acumulada.	87
Figura 40 - Variação da deformação na fibra inferior da camada asfáltica analisada.	91
Figura 41 - Relação entre a espessura e as microdeformações de tração na fibra inferior da camada de concreto asfáltico.	92
Figura 42 - Relação gráfica entre a energia dissipada inicial e a energia dissipada acumulada para os diferentes critérios de ruptura abordados.	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Condicionantes do teste de resistência à fadiga realizado pela Universidade do Arizona.	58
Quadro 2 - Teste de fadiga 2PB com frequência de 15 Hz para diferentes critérios de ruptura.	60
Quadro 3 - Teste de fadiga 2PB com frequência 25 Hz para diferentes critérios de ruptura.	61
Quadro 4 - Resultados finais do teste de fadiga conduzido por Melo (2014). ..	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado da caracterização dos agregados.	73
Tabela 2 - Pontos de ruptura segundo diferentes critérios – Convencional e Pronk e Hopman.	78
Tabela 3 - Pontos de ruptura segundo diferentes critérios – Convencional e ASU.	83
Tabela 4 - Porcentagem de redução da rigidez nos critérios avaliados.	84
Tabela 5 - Pontos de ruptura e microdeformações de controle.	86
Tabela 6 - Vida de fadiga na abordagem fenomenológica.	86
Tabela 7 - Pontos de ruptura e a respectiva energia dissipada acumulada (MJ/m ³).	88
Tabela 8 - Vida de fadiga na abordagem de energia dissipada acumulada.	88
Tabela 9 - Parâmetros elásticos inseridos para modelização do pavimento flexível.	90
Tabela 10 - Parâmetros viscoelásticos do modelo reológico de Huet-Sayegh e inseridos no <i>Software ViscoRoute</i>	90
Tabela 11 - Desempenho mecânico de vida à fadiga para a abordagem fenomenológica.	93
Tabela 12 - Dimensionamento racional de pavimentos flexíveis adotando-se diferentes critérios de ruptura por fadiga (abordagem fenomenológica).	93
Tabela 13 - Desempenho mecânico de vida à fadiga para os critérios abordados – Análise mecanicista de energia dissipada acumulada.	96
Tabela 14 - Dimensionamento racional de pavimentos flexíveis adotando-se diferentes critérios de ruptura por fadiga (abordagem mecanicista de energia dissipada acumulada).	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	Association Française de Normalisation
ASU	Arizona State University
ASTM	American Society for Testing and Materials
BR	Brasil
Cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
DEINFRA	Departamento Estadual de Infraestrutura
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EM	European Standard
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
Kgf	Quilograma força
Km	Quilômetro
kN	Quilo Newton
M	Metro
Mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Número de repetições do eixo padrão de 8,2 tf
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
Nf	Ponto de Ruptura à Fadiga
SC	Santa Catarina
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
µm	Micrometro
Vv	Volume de vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS	27
1.1.1 Objetivo Geral	27
1.1.2 Objetivos Específicos	27
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	29
2.2 DEFORMAÇÕES RESULTANTES DA AÇÃO DE CARGAS DINÂMICAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	30
2.3 RIGIDEZ DO CONCRETO ASFÁLTICO	32
2.4 MÓDULO COMPLEXO DO CONCRETO ASFÁLTICO	32
2.4.1 Representação Gráfica do Comportamento Reológico da Mistura Asfáltica	35
2.5 MODELOS REOLÓGICOS PARA CARACTERIZAR O COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DO CONCRETO ASFÁLTICO	36
2.5.1 Modelo Reológico de Huet-Sayegh	36
2.6 RESISTÊNCIA À FADIGA DO CONCRETO ASFÁLTICO	38
2.6.1 Fatores que Influenciam a Resistência à Fadiga	39
2.6.2 Ensaio de Resistência à Fadiga	41
2.7 MÉTODOS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FADIGA 43	
2.7.1 Abordagem Fenomenológica	44
2.7.2 Abordagem Mecanicista da Energia Dissipada Acumulada	44
2.8 CRITÉRIOS DE RUPTURA POR FADIGA	46
2.8.1 Critérios de Ruptura Baseados na Energia Dissipada	46
2.8.1.1 Critério de Carpenter (2001)	47
2.8.1.2 Critério de Pronk (1997)	47
2.8.1.3 Critério de Pronk e Hopman (1989-1990)	48
2.8.1.4 Critério de Rowe (1993)	48
2.8.2 Critérios de Ruptura Baseados na Degradação da Rigidez	49
2.8.2.1 Critério Convencional: Caracterização das Três Fases de Degradação da Rigidez	50
2.8.2.2 Critério de Rowe ou Rowe e Bouldin (2000)	51
2.8.2.3 Critério da ASU (2007)	52
2.8.2.4 Critério de Franken (Modelo de Ajuste do Critério Convencional)	53
2.8.3 Outros Estudos Envolvendo Critérios de Ruptura	54
2.8.3.1 Critério de Al-Khateeb e Shenoy (2011)	54

2.8.3.2 Estudo de Abojaradeh, Witszak, Mamlouk e Kaloush (2007)..	56
2.8.3.3 Revisão de Shen e Lu Através de um Critério Baseado na Energia Dissipada (2011).....	57
2.9 ANÁLISES DE ARTIGOS PUBLICADOS SOBRE CRITÉRIOS DE RUPTURA.....	57
2.9.1 Estudo da Universidade do Arizona (M.I. Souliman, W.A Zeida, K.E. Kaloush & M.S. Mamlouk, 2012)	57
2.9.2 Estudo da Universidade de Nottingham (Cinzia Maggiore, Gordon Airey & James Grenfell, 2013).....	60
3 METODOLOGIA	63
3.1 ESTUDO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ANÁLISE E CRITÉRIOS DE RUPTURA POR FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS	64
3.2 DEFINIÇÃO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA A SER ESTUDADA E OBTENÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS BRUTOS DE ENSAIOS DE FADIGA DA MISTURA ASFÁLTICA	64
3.3 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM RELAÇÃO À DIFERENTES CRITÉRIOS DE RUPTURA POR FADIGA	67
3.4 OBTENÇÃO DAS CURVAS DE FADIGA PARA CADA CRITÉRIO DE RUPTURA ESTUDADO.....	68
3.5 MODELIZAÇÃO RACIONAL DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	69
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1 DEFINIÇÃO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA A SER ESTUDADA E OBTENÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS BRUTOS DE ENSAIOS DE FADIGA DA MISTURA ASFÁLTICA	73
4.2 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM RELAÇÃO À DIFERENTES CRITÉRIOS DE RUPTURA POR FADIGA	75
4.3 OBTENÇÃO DAS CURVAS DE FADIGA PARA CADA CRITÉRIO DE RUPTURA ESTUDADO.....	84
4.3.1 Abordagem Fenomenológica	84
4.3.2 Abordagem Mecanicista: Consideração da Energia Dissipada Acumulada.....	87
4.4 MODELIZAÇÃO RACIONAL DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	89
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	99
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a malha rodoviária brasileira apresenta baixíssimos níveis de conforto ao rolamento de acordo com estudos levantados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2016). Estima-se um custo de 5,95 bilhões de reais investidos no último ano para manutenção, implantação, operação e recuperação das rodovias federais, e este investimento passa a ser ainda maior se analisarmos o custo necessário para recuperação total de pavimentos deteriorados: uma quantia próxima a 57,08 bilhões de reais (BERNUCCI *et al.*, 2008; CNT, 2016).

A precária infraestrutura rodoviária do país contribui para geração de acidentes, além de ocasionar o desperdício de cargas comerciais, gastos adicionais com combustíveis e elevada taxa de manutenções corretivas em veículos de grande porte. Isso reflete diretamente na competitividade econômica do país. Por conta destes fatores problemáticos, diversos estudos técnico-científicos vêm sendo desenvolvidos para proporcionar pavimentos asfálticos de melhor qualidade, com melhor custo-benefício no que diz respeito à sua durabilidade em serviço e conforto (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os pavimentos asfálticos normalmente não apresentam rupturas bruscas e repentinas e sim deteriorações funcionais e estruturais acumuladas no momento em que passam a ser solicitados por cargas dinâmicas (abertura ao tráfego). Por conta disto, é interessante estudar as origens destas manifestações patológicas para aperfeiçoar o desempenho mecânico apresentado pela estrutura (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O fenômeno da fadiga é um destes mecanismos de degradação e consiste na solitação de um determinado material através de cargas cíclicas com baixos níveis de tensão/deformação. No caso de misturas asfálticas, devido ao seu comportamento viscoelástico, a temperatura e frequência de carregamento são parâmetros essenciais que influenciam mecanicamente a resposta que o material apresenta (KHALID, 2000).

Embora ainda não sejam normatizados no Brasil, os ensaios de fadiga estão sendo amplamente estudados nos centros de pesquisa do país. Estes testes experimentais permitem obter uma estimativa mais adequada do desempenho do revestimento sob à ação repetida de cargas durante a sua vida útil.

No que se refere aos critérios de ruptura empregados nos ensaios de fadiga, assume-se, em algumas normativas, que a ruptura do material ocorre quando a sua rigidez se reduz a metade do valor inicial. Contudo, este critério de ruptura adotado, apesar de ser constantemente empregado na concepção das curvas de fadiga, não fornece uma

descrição detalhada dos mecanismos de degradação da rigidez (SYBILSKI & BANKOWSKI, 2007). Por conta disto, diversos pesquisadores (PRONK E HOPMAN, 1989; PRONK, 1997; ROWE, 1993; ROWE E BOULDIN, 2000; ABOJARADEH, 2007) vêm desenvolvendo outros critérios de ruptura para descrever apropriadamente o comportamento mecânico à fadiga das misturas asfálticas.

Também é interessante destacar que as curvas e equações de fadiga são normalmente construídas a partir de uma abordagem fenomenológica, método de análise não mecânico (CARPENTER *et al.*, 2003 *apud* MELO, 2014).

Estudar e avaliar diferentes métodos de análise e critérios de ruptura à fadiga de misturas asfálticas, assim como as suas influências no dimensionamento mecânico da estrutura de um pavimento flexível, permite compreender melhor o comportamento e desempenho desses materiais aplicados à pavimentação asfáltica. Possibilita ainda, obter diretrizes mais sólidas e confiáveis para o desenvolvimento de normativas adequadas para condução de ensaios de resistência à fadiga de misturas asfálticas e para o dimensionamento mecânico (racional) de pavimentos flexíveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar e avaliar diferentes métodos de análise e critérios de ruptura à fadiga de misturas asfálticas, e sua repercussão no dimensionamento do pavimento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica dos diferentes métodos de análise e critérios de ruptura por fadiga;
- Obter dados brutos de resultados de fadiga já realizados e aplicar diferentes métodos de análise e critérios de ruptura por fadiga;
- Analisar a diferença entre os critérios de ruptura quando abordados sob diferentes métodos de análise, à luz do comportamento fenomenológico e mecanicista;
- Aplicar os resultados obtidos no dimensionamento racional da estrutura do pavimento.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 deste trabalho apresenta a introdução, os objetivos e a organização deste estudo.

O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento do TCC.

O Capítulo 3 refere-se à metodologia, onde são apresentadas as etapas necessárias à construção desse trabalho por meio de um fluxograma e seu posterior detalhamento.

O Capítulo 4 discorre e discute os resultados obtidos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas através do desenvolvimento deste trabalho.

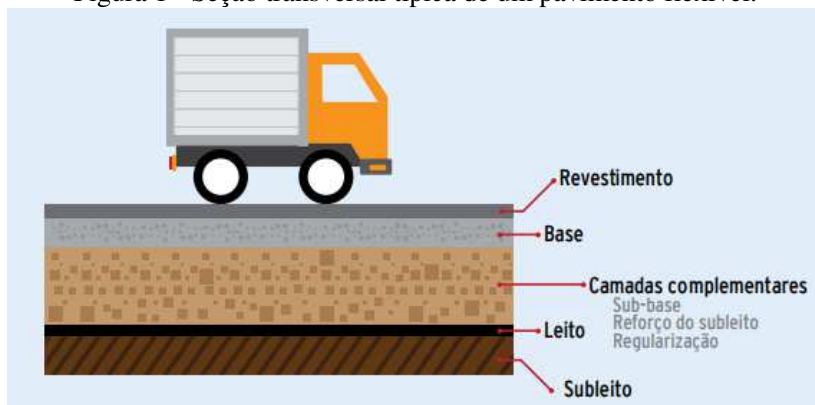
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O pavimento é uma estrutura formada por camadas de diferentes espessuras e materiais, assente sobre um solo de fundação, denominado subleito. Destina-se a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais e horizontais produzidos pelo tráfego, tornando mais durável a camada de rolamento e mantendo condições adequadas quanto à comodidade e segurança (MEDINA, 1997).

Quando denominados pavimentos flexíveis, se caracterizam por possuírem um revestimento composto de material asfáltico. A estrutura do pavimento é normalmente composta por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. A Figura 1 ilustra a seção transversal típica de um pavimento flexível (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 1 - Seção transversal típica de um pavimento flexível.



Fonte: CNT (2016).

Conforme a Figura 1, o subleito é o solo que serve de suporte para execução do pavimento, apresentando a finalidade estrutural de fundação, absorvendo as cargas verticais transmitidas.

A estrutura do pavimento pode apresentar a regularização do subleito, cuja finalidade é conformar o subleito tanto transversalmente quanto longitudinalmente, atendendo à determinadas especificações. Não é necessariamente considerada uma camada do pavimento (DNIT, 2006).

A camada de reforço do subleito é uma camada de espessura constante, construída acima da camada de regularização por questões técnico-econômicas, reduzindo as tensões e deformações transmitidas para a fundação. Normalmente o material que constitui esta camada possui características geotécnicas superiores ao subleito e inferiores ao material usado na camada da sub-base (DNIT, 2006).

A camada da sub-base está situada sobre a camada de regularização e serve como um complemento da base, uma vez que possui as mesmas funções mecânicas dentro da estrutura formada pelas multicamadas (DNIT, 2006).

A camada da base se localiza sobre a sub-base, fornecendo resistência mecânica para o pavimento flexível. Sua finalidade é transmitir as cargas verticais e distribuir adequadamente as pressões para as outras camadas que compõem o pavimento (ALMEIDA, 2013).

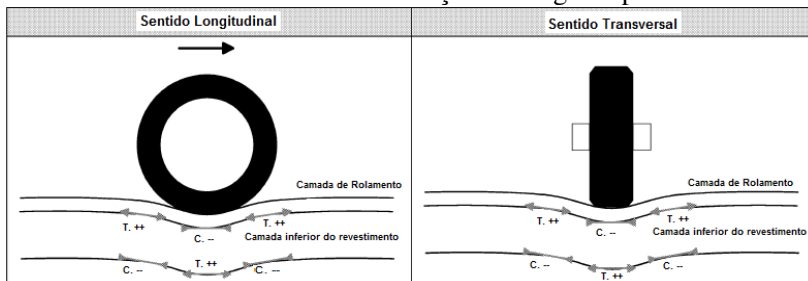
A camada de revestimento asfáltico é a camada destinada a receber diretamente a ação do rolamento imposta pelos veículos. Deve promover uma boa comodidade e segurança aos usuários (DNIT, 2006).

Um dos principais materiais empregados na construção das camadas de revestimento é o concreto asfáltico. O concreto asfáltico convencional é um material com propriedades variáveis devido à complexidade que rege o seu comportamento mecânico. É composto basicamente de dois materiais: agregados minerais de diversos tamanhos e formas, constituindo 90 a 95% do peso total da mistura, e cimento asfáltico de petróleo (CAP), representando cerca de 5 a 10% do peso da mistura. Os materiais são misturados e compactados em temperaturas específicas previamente estabelecidas em função das características de viscosidade-temperatura dos ligantes asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.2 DEFORMAÇÕES RESULTANTES DA AÇÃO DE CARGAS DINÂMICAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Quando solicitado pelos veículos na camada de rolamento, o pavimento sofre flexão alternada. Este procedimento é caracterizado por uma alternância de esforços de compressão na parte superior do revestimento asfáltico e tração na parte inferior. Através de análises em pistas experimentais das deformações de tração e compressão atuantes no concreto asfáltico, Perret (2003) esquematizou graficamente a variação destas ocorrências dentro da camada asfáltica. A Figura 2 ilustra os resultados adquiridos nas medições no concreto asfáltico quando sujeito a ação das cargas móveis dos pneus.

Figura 2 - Deformações em diferentes sentidos nas camadas betuminosas devido à atuação da carga do pneu.

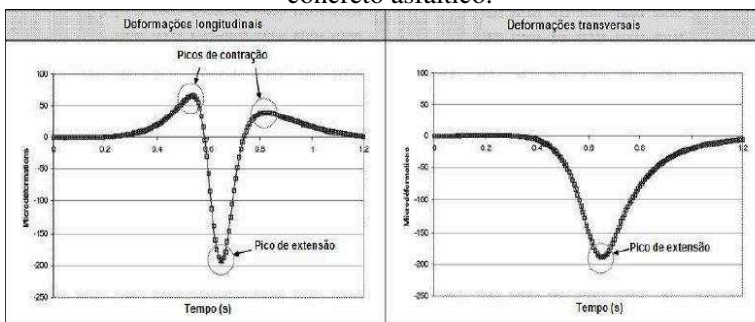


Fonte: PERRET (2003).

Na Figura 2, pode-se verificar no sentido longitudinal, que à medida que a roda avança têm-se esforços de tração – compressão – tração no topo da camada de rolamento e compressão – tração – compressão na base da camada. No sentido transversal, no topo da camada existe uma compressão abaixo da carga de roda e tração na área externa ao ponto de aplicação, enquanto que na base, este esquema se inverte (PERRET, 2003 *apud* SIMM, 2007).

As pesquisas também evidenciam os diferentes sinais de deformação que ocorrem na face inferior da camada asfáltica, sendo abordadas as duas direções previamente estabelecidas: longitudinal e transversal. Na direção longitudinal existe uma alternância entre compressão e tração, observados em picos distintos como ilustra a Figura 3. Na direção transversal não se verifica mudanças quanto ao sinal da deformação (SIMM, 2007).

Figura 3 - Exemplo do sinal de deformação adquirido na face inferior do concreto asfáltico.



Fonte: PERRET (2003).

Em resumo, os estudos de Perret (2003) demonstram uma alternância nos sinais de deformação quando analisados longitudinalmente sob a atuação de um eixo solicitante, não existindo proporcionalidade entre os picos de tração e compressão e obtendo valores que dependem do tamanho da espessura do revestimento asfáltico e da própria estrutura do pavimento (PERRET, 2003 *apud* MELO, 2014).

2.3 RIGIDEZ DO CONCRETO ASFÁLTICO

A rigidez dos materiais de construção como o concreto armado e o aço são, em geral, propriedades únicas descritas através do módulo de Young (razão entre tensão solicitante e consequente deformação), no qual, em condições normais de solicitação, independem da variação de temperatura e do tempo de carregamento. Entretanto, o concreto asfáltico, como analisado anteriormente, apresenta propriedades mecânicas que dependem da temperatura atuante e das condições de carregamento (PARL & FRANCKEN, 1998 *apud* FONTES, 2009).

Por se tratar de uma propriedade única do material, a rigidez independe de dispositivos para medições quantitativas e qualitativas, das dimensões e do tamanho da amostra. Caso o contrário, não se definiria rigidez como uma propriedade do material, pois estaria sujeita a análises de resultados experimentais variados (KIM, 2009 *apud* MELO, 2014).

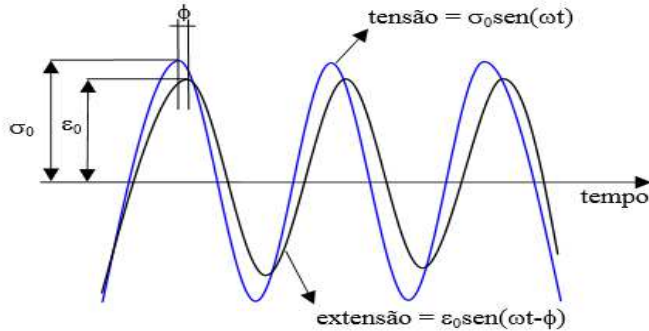
2.4 MÓDULO COMPLEXO DO CONCRETO ASFÁLTICO

A norma ASTM D 3497 (1995) define módulo dinâmico como o valor absoluto do módulo complexo (E^*) para definir as propriedades elásticas referentes à rigidez de um material viscoelástico linear submetido a um carregamento sinusoidal, sem períodos de repouso. Atualmente é um dos parâmetros mais utilizados para a concepção estrutural de novos pavimentos.

O módulo complexo é o número complexo que pode ser definido pela divisão entre a amplitude de uma tensão harmônica aplicada, com frequência e pulsação bem definidas, e a amplitude da deformação harmônica resultante em regime estável. Considerando o comportamento viscoelástico do material, estas deformações podem indicar um atraso com relação às cargas solicitantes, o que é representado por um ângulo de fase ou defasagem (ϕ). Isto caracteriza a predominância de parâmetros que indicam uma maior influência do

domínio elástico ou viscoso do material (RIVIERE, 1996 *apud* MELO, 2014). A Figura 4 ilustra graficamente o ângulo de defasagem entre a tensão aplicada (σ_0) e a conseqüente deformação da amostra (ε_0).

Figura 4 - Esquema de tensão e deformação sinusoidal.



Fonte: FONTES (2009).

As Equações 1 e 2 representam, respectivamente, as tensões e deformações sinusoidais a uma velocidade angular e amplitude constante:

$$\sigma = \sigma_0 \times \text{sen}(\omega \times t) \quad (1)$$

Onde:

σ = tensão solicitante em dado instante;

σ_0 = amplitude da tensão aplicada;

ω = velocidade angular aplicada (rad/s);

t = tempo (s).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \text{sen}(\omega \times t - \delta) \quad (2)$$

Onde:

ε = deformação;

ε_0 = amplitude da deformação resultante;

ω = velocidade angular aplicada (rad/s);

t = tempo (s);

δ = ângulo de fase ($^\circ$).

O valor absoluto do módulo complexo ($|E^*|$) é representado através da Equação 3:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

Ainda pode-se destacar a existência de duas componentes que contribuem para avaliação do módulo complexo (FERRY, 1980; PARTL & FRANCKEN, 1998 *apud* FONTES, 2009):

- Componente real (E1), buscando refletir a energia armazenada no material durante o seu carregamento (exprime comportamento do domínio elástico);
- Componente imaginária (E2), que descreve a energia dissipada por meio do atrito interno entre os materiais que compõe a amostra (exprime comportamento do domínio viscoso).

As Equações 4 a 7 expressam estas duas componentes, relacionando-as ao valor absoluto do módulo complexo:

$$E1 = |E^*| \times \cos(\delta) \quad (4)$$

$$E1 = \frac{\sigma_0 \cos(\delta)}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

$$E2 = |E^*| \times \sin(\delta) \quad (6)$$

$$E2 = \frac{\sigma_0 \sin(\delta)}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

Onde:

E1 = componente real do módulo complexo;

E2 = componente imaginária do módulo complexo.

Por fim são expostas as Equações 8 e 9 que exprimem o valor absoluto do módulo complexo e o ângulo de fase, respectivamente, com base nas componentes viscosas e elásticas apresentadas.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (8)$$

$$\delta = \arctan \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (9)$$

Onde:

$|E^*|$ = valor absoluto do módulo complexo;

δ = ângulo de fase.

Segundo Melo (2014) o módulo complexo do concreto asfáltico pode ser determinado através de modelos reológicos que buscam caracterizar o comportamento viscoelástico do material asfáltico.

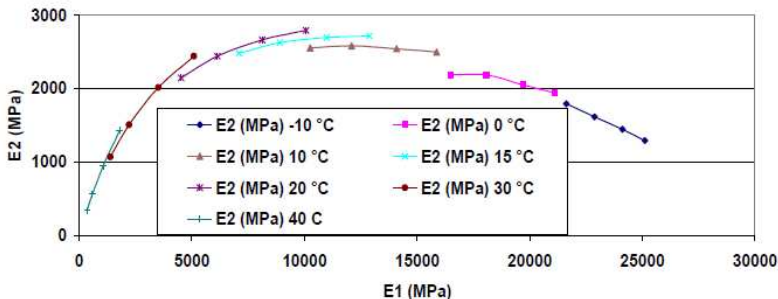
2.4.1 Representação Gráfica do Comportamento Reológico da Mistura Asfáltica

O módulo complexo possui valor numérico dependente da temperatura e da frequência de aplicação das cargas dinâmicas. Por conta disto, os ensaios devem ser realizados em um espectro de temperaturas e de frequências que envolva as situações correntes em campo (QUINTERO, 2016). Os modos clássicos de representação gráfica do módulo complexo são as curvas isócronas, as curvas isotérmicas, as curvas no espaço Black, no plano Cole-Cole e as curvas de equivalência frequência-temperatura.

No plano Cole-Cole a representação do módulo dá-se através da relação entre as componentes reais e imaginárias em coordenadas aritméticas. É através do plano Cole-Cole que se realiza a modelização do comportamento reológico das misturas asfálticas (HUET, 1963 *apud* QUINTERO, 2016).

A curva formada por este plano se assemelha a um semicírculo, conforme mostra a Figura 5. Esta forma de representação permite avaliar em que região, caracterizada por uma determinada temperatura e frequência, ocorre a maior energia dissipada durante o ciclo de aplicação do carregamento (DOUCET & AUGER, 2010 *apud* COLPO, 2014).

Figura 5 – Representação gráfica do plano Cole-Cole.



Fonte: MOMM (1998 *apud* FONTES, 2009).

2.5 MODELOS REOLÓGICOS PARA CARACTERIZAR O COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DO CONCRETO ASFÁLTICO

Pode-se definir o termo reologia como o estudo da deformabilidade dos materiais quando submetidos a um carregamento genérico em um dado tempo de aplicação. No caso específico do concreto asfáltico, a temperatura desempenha um papel importante nestas análises, tendo em vista que o material é termo sensível, variando a sua consistência conforme as mudanças climáticas (PINTO, 1991).

O estudo do comportamento reológico dos materiais asfálticos procura encontrar uma relação entre a deformação, a tensão, o tempo de aplicação de uma determinada carga e a temperatura. Uma melhor compreensão destas propriedades resulta em melhores desempenhos por parte do material como um todo, uma vez que se consegue estimar a sua performance quando solicitado pelo tráfego e em decorrência das variações de temperatura (PINTO, 1991).

Existem diversos modelos reológicos que buscam explicar o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas. Contudo, o que descreve melhor o comportamento da mistura asfáltica é o modelo físico-matemático de Huet-Sayegh (MELO, 2014).

2.5.1 Modelo Reológico de Huet-Sayegh

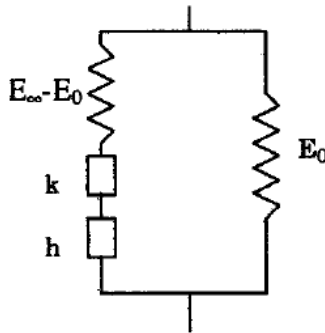
Uma maneira de representar as manifestações elásticas e viscosas presentes nos materiais viscoelásticos é através de diversos modelos físico-matemáticos, compostos por meio de arranjos geométricos de molas (representação da parte elástica) e amortecedores (representação

da parte viscosa). A mola linear representa a elasticidade instantânea do material durante o carregamento e descarregamento. Já o amortecedor viscoso retrata o quanto o material é dependente do tempo, tanto no carregamento quanto no descarregamento (MINHOTO, 2005).

Pronk (2005) destaca ainda que elementos parabólicos podem ser utilizados para retratar o comportamento de materiais viscoelásticos e constituem a base de modelos generalizados mais representativos. São modelos analógicos baseados num espectro contínuo de modelos elementares infinitos arranjados em série ou em paralelo (MINHOTO, 2005).

O modelo de Huet-Sayegh é inserido no espectro contínuo, traduzindo o comportamento linear das misturas asfálticas no domínio das pequenas deformações e para quaisquer faixas de temperaturas e frequências de carregamento. O modelo é composto de uma mola e dois elementos parabólicos em série, somados a uma mola em paralelo, conforme a Figura 6 (MINHOTO, 2005; MELO, 2014).

Figura 6 - Esquemática do modelo analógico de Huet-Sayegh.



Fonte: MINHOTO (2005).

A expressão matemática do modelo de Huet-Sayegh é apresentada pela Equação 10.

$$|E * (i\omega\tau(\theta))| = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (10)$$

Onde:

$|E^*|$ = módulo complexo;

E_o = módulo estático;

E_∞ = módulo infinito;

ω = frequência angular, $\omega = 2\pi f$;

f = frequência do carregamento;

k, h = parâmetros de elementos parabólicos;

τ = tempo de relaxação dos amortecedores, $\tau(\theta) = e^{(A_o + A_1\theta + A_2\theta^2)}$;

i = número complexo definido como $i^2 = -1$;

δ = constante adimensional;

A_o, A_1, A_2 = parâmetros escalares.

2.6 RESISTÊNCIA À FADIGA DO CONCRETO ASFÁLTICO

O fenômeno de fadiga consiste na redução gradual da capacidade estrutural de um material quando submetido a solicitações, caracterizado por uma ruptura lenta, como consequência das fissuras infinitesimais que se formam em seu interior. Este crescimento gradual das microfissuras ocorre para cada flutuação do estado de tensões, fazendo com que se tenham, em alguns pontos, deformações plásticas também variáveis dependendo se as solicitações são cíclicas ou não. Estas deteriorações progressivas podem originar trincas que, se atingirem um caminho crítico, podem levar à ruptura final do material, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil (ROSA, 2008).

No âmbito da pavimentação, a fadiga é definida como o processo de deterioração do concreto asfáltico quando solicitado por cargas cíclicas, que resultam em trincas ou na ruptura completa do material. Estas trincas, denominadas couro de jacaré no seu estágio final, surgem na extremidade inferior da camada de asfalto e se propagam para a superfície visível depois de certo período de uso do pavimento (KHALID, 2000).

A deflexão repetida no revestimento asfáltico causada pelas solicitações dinâmicas do tráfego e variações bruscas de temperatura faz com que apareçam tensões de tração na parte inferior do material, acarretando num comprometimento da sua vida útil conforme o número de ciclos de carregamentos avança. Este processo de flexão alternada gera diferentes estados físico-mecânicos no pavimento cuja velocidade de nucleação das trincas depende da amplitude e frequência destas deflexões (MELO, 2014).

2.6.1 Fatores que Influenciam a Resistência à Fadiga

Alguns dos principais fatores que influenciam o comportamento à fadiga das misturas asfálticas são relativos à confecção dos corpos de prova, as características peculiaridades dos ensaios adotados e aqueles relacionados às propriedades da mistura asfáltica. O modo de carregamento também influencia os resultados finais apresentados pela mistura asfáltica (TANGELLA *et al.*, 1990).

Existem dois modos distintos de carregamento nos ensaios de fadiga em concreto asfáltico: com tensão controlada (força) ou com deformação controlada (deslocamento). Existe ainda uma variedade dos padrões de carga aplicados para simulação dos pulsos de carga do tráfego, tais como: sinusoidal (senoidal), Haversine, quadrada e triangular, com ou sem períodos de repouso. No entanto as formas de onda mais comumente usadas para caracterizar diferentes misturas asfálticas e criar modelos representativos que buscam prever a resistência à fadiga são a sinusoidal e a Haversine (MELO, 2014).

Nos ensaios com deformação controlada, a amplitude é mantida constante e a força requerida para manter o nível de deformação inicial é gradativamente reduzida à medida que as microfissuras se propagam, reduzindo assim a rigidez à flexão da mistura asfáltica. A falha, ou o ponto de término do ensaio, é selecionado com base nesta redução da rigidez, geralmente sendo equivalente a uma diminuição de cerca de 50% do valor inicial adquirido (ZEIADA, 2012 *apud* MELO, 2014).

O modo à deformação controlada busca simular situações com camadas finas de concreto asfáltico em campo. O mecanismo principal de transmissão de cargas é feito através da base e da sub-base, fazendo com que as deformações na camada de concreto asfáltico sejam governadas por estas camadas subjacentes e as alterações na sua rigidez exerçam pouca influência nos deslocamentos mais generalizados (MONISMITH, 1966, *apud* MELO, 2014).

Já no modo de carregamento com tensão controlada, a amplitude da tensão é mantida constante. Desta forma, devido à aplicação constante da tensão, a deformação aumenta gradativamente até atingir o dobro da deformação inicial, fazendo com que a rigidez à flexão do concreto asfáltico seja reduzida à metade da rigidez inicial e assim constituindo a falha do material. Este tipo de carregamento é normalmente usual para simular o comportamento de camadas de concreto asfáltico de maiores espessuras. Neste caso, o principal componente de transmissão de carga e do aumento da deformação na estrutura do pavimento é a camada de concreto asfáltico (MONISMITH, 1966, *apud* MELO, 2014).

O desempenho à fadiga de concretos asfálticos com menor rigidez à flexão é superior em carregamentos com deformação controlada do que com tensão controlada em amplitudes iniciais de deformação/tensão iguais. Em geral, os testes com tensão controlada são mais severos que testes com deformação controlada e a energia é mais rapidamente absorvida. A energia inicial dissipada por ciclo é elevada e a taxa de dissipação da energia ocorre com maior velocidade no modo de carregamento com tensão controlada (PELL & COOPER, 1975 *apud* MELO, 2014).

Durante a realização dos testes de resistência à fadiga no concreto asfáltico deve-se buscar homogeneidade dos corpos de prova produzidos. Esta homogeneidade é produzida através de uma compactação adequada das amostras ensaiadas (COLPO, 2014).

O método de compactação por cisalhamento giratório é uma das diversas formas de se adquirir uma boa moldagem dos corpos de prova. A mistura asfáltica ensaiada neste procedimento possui uma forma cilíndrica e é compactada através de movimentos giratórios dos moldes de compactação. Tangella *et al.*, (1990, *apud* COLPO, 2014) afirma, através de diversos estudos realizados, que este método de compactação representa adequadamente as condicionantes de campo devido a várias análises comparativas entre os parâmetros de rigidez e deformação obtidas em campo com aquelas obtidas experimentalmente.

O concreto asfáltico pode apresentar um desempenho diferenciado com relação à fadiga quando algumas de suas propriedades constitutivas forem modificadas. Pode-se citar dentro destas propriedades: a distribuição granulométrica do agregado, o volume de vazios e o teor de ligante (COLPO, 2014).

As misturas asfálticas com distribuição granulométrica contínua têm como principais fatores que afetam a resistência à fadiga o teor de asfalto e o volume de vazios. O tipo de agregado exerce menos influência na magnitude desta propriedade mecânica (COLPO, 2014).

No ponto de vista de resistência à fadiga, um teor de asfalto elevado acarretaria em um projeto de mistura bastante apropriado. Entretanto, sabe-se que existe um limite nesta porcentagem de asfalto devido a alguns requisitos de estabilidade do material, principalmente quando avaliados as deformações permanentes. Além disso, uma compactação adequada também proporciona uma melhor resistência à fadiga, pois reduz o volume de vazios da mistura à medida que a densidade se aproxima da prevista em projeto (COLPO, 2014).

Existem implicações tanto indiretas quanto diretas das variáveis ambientais com relação ao desempenho à fadiga do concreto asfáltico.

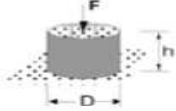

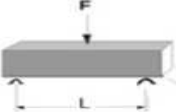
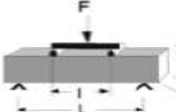
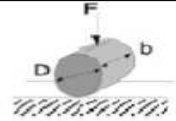
As misturas asfálticas são bastante suscetíveis à variação da temperatura, portanto uma variação brusca desta condicionante influi diretamente na rigidez do concreto asfáltico e conseqüentemente no seu desempenho à fadiga (TANGELLA *et al.*, 1990 & CAPITÃO *apud* COLPO, 2014).

2.6.2 Ensaios de Resistência à Fadiga

Existem diversos ensaios para definir a vida de fadiga em uma mistura asfáltica. Estes ensaios buscam elaborar modelos representativos do comportamento que o material terá em campo, e são realizados normalmente com cargas dinâmicas e diferentes níveis de deformação ou tensão.

Pode-se citar como ensaios utilizados para a avaliação da resistência à fadiga: o teste de fadiga por flexão de 2 pontos, o teste de fadiga por flexão de 3 pontos, o teste de fadiga por flexão de 4 pontos, o ensaio uniaxial de tração/compressão e o teste de tração indireta. Nota-se que apenas o teste de fadiga uniaxial é considerado com carregamento homogêneo. A Figura 7 ilustra os principais mecanismos de funcionamento de cada um dos ensaios (DI BENEDETTO, 2004 *apud* COLPO, 2014).

Figura 7 - Tipos de ensaios de resistência à fadiga.

Tipo Teste	Geometria	Tipo Carregamento
T/C		Tensão – Compressão Homogêneo
2PB		Flexão - dois pontos Não Homogêneo
3PB		Flexão - três pontos Não Homogêneo
4PB		Flexão - quatro pontos Não Homogêneo
IDT		Tração indireta Não Homogêneo

Fonte: DI BENEDETTO (2004 *apud* COLPO, 2014).

O ensaio mais aplicado nos Estados Unidos, Austrália e em grande parte da Europa é o teste de fadiga por flexão de quatro pontos, preconizado pelas seguintes normas: AASHTO T 321, ASTM D 7460 e EN 12697:24.

O teste consiste em submeter uma vigota prismática bi apoiada a duas cargas verticais. O posicionamento destes pontos de aplicação se encontram nos dois terços médios do corpo de prova, o que faz com que se originem tensões de tração uniforme na parte central da amostra. É considerado um teste bastante adequado para representar as condições de campo, uma vez que a flexão gerada na vigota se mantém constante e os esforços cortantes são nulos (MELO, 2014).

As dimensões dos corpos de prova moldados variam de acordo com as normas empregadas (TAYABALI *et al.*, 1994 *apud* COLPO, 2014).

A Figura 8 ilustra o aparato utilizado para o ensaio de fadiga a quatro pontos.

Figura 8 - Aparato de flexão a quatro pontos (4PB).



Fonte: MELO (2014).

Algumas vantagens deste ensaio podem ser citadas abaixo (TANGELLA *et al.*, 1990):

- É um método experimental bem conhecido, difundido e com certa simplicidade de aplicação;
- Pode ser usado para avaliação e obtenção de propriedades fundamentais, como: módulo complexo e lei de fadiga do concreto asfáltico;
- Neste ensaio a ruptura tende a ocorrer em uma região com momento fletor constante, ou seja, as tensões de cisalhamento se fazem ausentes. Isto contribui para redução dos coeficientes de ajuste dos resultados;
- Por conta da ausência de tensões de cisalhamento e maior precisão do número de ciclos para que ocorra a ruptura por fadiga, este tipo de ensaio requer um número razoavelmente menor de corpos de prova para obtenção das curvas de fadiga.

2.7 MÉTODOS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FADIGA

A seguir dois métodos de análise são abordados para a concepção das curvas de fadiga: a abordagem fenomenológica, que relaciona a

microdeformação das amostras com o número de ciclos onde ocorre a ruptura por fadiga e a abordagem mecanicista da energia dissipada, que considera a energia dissipada inicial e acumulada para construção da curva de fadiga.

2.7.1 Abordagem Fenomenológica

As curvas de fadiga clássicas são também chamadas de curvas de Wöhler e representam a duração da vida de fadiga em função das amplitudes de microdeformações aplicadas. No modelo fenomenológico, a relação entre as deformações de tração e o número de ciclos onde ocorre uma possível ruptura por fadiga é expressa através da Equação 11 (MELO, 2014):

$$N_f = k_1(\varepsilon_o)^{-k_2} \quad (11)$$

Onde:

N_f = número de ciclos de carregamento até a ruptura;

ε_t = amplitude da deformação aplicada;

k_1, k_2 = constantes obtidas experimentalmente.

As constantes determinadas experimentalmente são extremamente influenciadas pelo modo e a frequência do carregamento, a temperatura de teste e o teor e tipo de ligante asfáltico da mistura (MONISMITH *et al.*, 1969 *apud* MAGGIORE *et al.*, 2014).

Mesmo sendo amplamente utilizada, esta abordagem é essencialmente empírica e não proporciona uma boa relação entre a carga e a forma de acumulação de danos no concreto asfáltico. A relação entre a vida à fadiga e deformação é tratada de forma linear, não havendo uma boa representatividade para níveis pequenos de tensões (CARPENTER *et al.*, 2003 *apud* MELO, 2014).

2.7.2 Abordagem Mecanicista da Energia Dissipada Acumulada

As abordagens de energia costumam ser razoavelmente adequadas para concretos asfálticos, uma vez que a energia dissipada pode ser utilizada para explicar a evolução da redução das propriedades mecânicas durante os ensaios de resistência à fadiga. A energia dissipada por unidade de volume para um determinado ciclo i pode ser

definida através da Equação 12, ou, se considerado testes de fadiga com deformação controlada, pela Equação 13.

$$W_i = \pi \varepsilon_i \sigma_i \text{sen} \delta_i \quad (12)$$

Testes de fadiga com deformação controlada:

$$W_i = \pi \varepsilon_0^2 |E^*| \text{sen} \delta_i \quad (13)$$

Onde:

W_i = energia dissipada no ciclo i ;

σ_i = amplitude da tensão aplicada no ciclo i ;

ε_i = amplitude da deformação aplicada no ciclo i ;

ε_0 = amplitude da deformação inicial (constante);

$|E^*|$ = norma do módulo complexo;

δ_i = ângulo de fase entre os sinais do carregamento e da resposta do material.

Segundo Melo (2014), nesta abordagem, a energia dissipada inicial é considerada para o ciclo de número 50.

Van Dijk e Visser (1977) executaram algumas das primeiras pesquisas que buscavam relacionar a energia dissipada como um parâmetro de resistência à fadiga. O estudo deles elaborou uma equação que relacionava a energia dissipada acumulada com o número de ciclos necessários para ruptura por fadiga, este modelo é apresentado na Equação 14:

$$W_f = A(N_f)^Z \quad (14)$$

Onde:

W_f = energia dissipada acumulada até a ruptura;

N_f = número de ciclos de carregamento na falha por fadiga;

Z , A = constantes determinados experimentalmente que dependem da mistura asfáltica testada.

Segundo Maggiore *et al.* (2014), a energia dissipada acumulada não é um bom parâmetro para descrever o fenômeno de fadiga nos materiais asfálticos, pois não diferencia a energia dissipada devido à geração de danos permanentes (trabalho mecânico) daquela transformada em calor. O material viscoelástico tanto pode armazenar energia mecânica quanto

dissipá-la através do processo de amortecimento (transformação em energia térmica). Esta energia amortecida não está disponível para a propagação de microtrincas, portanto, não deveria ser considerada para determinação da falha por fadiga.

Também é interessante destacar que a Equação 14 não é única, podendo variar para frequências de carregamento muito baixas ou mais elevadas (fora do intervalo de 10 Hz a 50 Hz) e temperaturas (entre 10°C e 40°C) (MAGGIORE *et al.*, 2014; VAN DIJK, 1997 *apud* MELO, 2014).

2.8 CRITÉRIOS DE RUPTURA POR FADIGA

Atualmente grande parte dos protocolos de ensaios de fadiga em misturas asfálticas define arbitrariamente a falha por fadiga como sendo o número de ciclos de carregamento necessários para reduzir em 50% a rigidez inicial do material, tomada no centésimo ou quinquagésimo ciclo de carga. Apesar de muitos pesquisadores buscarem aprimorar estes critérios de ruptura, ainda não existe um consenso mundial sobre o critério mais adequado (ABOJARADEH, 2013). Neste sentido, nas próximas seções são levantados os principais critérios de ruptura para o ensaio de fadiga de misturas asfálticas.

2.8.1 Critérios de Ruptura Baseados na Energia Dissipada

A aplicação de um carregamento em um material qualquer faz com que se originem tensões internas que alteram as dimensões deste mesmo material por meio de microdeformações. A área abaixo da curva tensão-deformação representa a quantidade de energia mecânica que está sendo transferida para o material carregado (SOULIMAN *et al.*, 2012).

Quando o carregamento aplicado é interrompido, a tensão é removida e as deformações buscam voltar ao estágio inicial de configuração. Durante este procedimento, se a linha de carregamento coincidir com a linha de descarregamento, toda a energia aplicada no material é recuperada após a retirada dos esforços solicitantes. Caso isto não ocorra, existe uma perda de energia no material. Esta energia é consumida através da geração de calor ou trabalho mecânico, acarretando danos permanentes no material (SOULIMAN *et al.*, 2012).

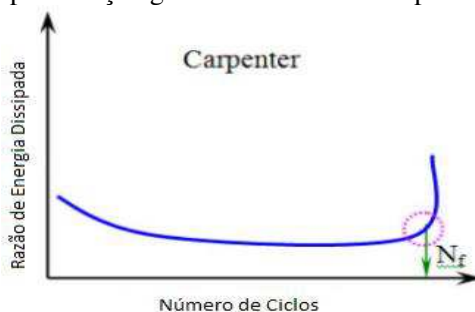
A energia dissipada é definida como a energia perdida por ciclo de carregamento em um teste dinâmico ou teste de cargas repetidas ou a energia de amortecimento do material. Muitos critérios de ruptura por fadiga buscam correlacionar esta energia dissipada com o ponto de falha

por fadiga apresentado pelo material asfáltico (SOULIMAN *et al.*, 2012).

2.8.1.1 Critério de Carpenter (2001)

Carpenter definiu como o ponto de ruptura por fadiga a mudança de energia dissipada entre os ciclos “a” e “a+1” (ΔDE) dividida pela energia dissipada no ciclo “a” (DE). Esta mudança de energia é calculada aproximadamente a cada 100 ciclos de carregamento. A taxa de energia dissipada ($\Delta DE/DE$) é plotada no eixo das ordenadas em função do número de ciclos, gerando uma curva que decresce rapidamente durante as primeiras parcelas de carregamento e depois continua constante por um longo período de ciclos até aumentar rapidamente no fim. O ponto de ruptura (N_f) é definido como o número de cargas necessárias para que a mudança da taxa de energia dissipada comece a aumentar em um curto período de tempo, conforme ilustra a Figura 9 (SOULIMAN *et al.*, 2012).

Figura 9 - Representação gráfica do critério de ruptura de Carpenter.



Fonte: SOULIMAN *et al.* (2012).

Por conta da complexidade de se adquirir os valores exatos de energia dissipada a cada 100 ciclos de carregamento, este critério não foi estudado neste trabalho e tampouco se desenvolveu uma curva de fadiga que o representasse.

2.8.1.2 Critério de Pronk (1997)

O critério de Pronk consiste em utilizar uma diferente expressão para taxa de energia dissipada na obtenção do ponto de ruptura por fadiga. A razão de energia dissipada é definida como a divisão da

energia dissipada acumulada até o ciclo n ($W_{ac,n}$) pela energia dissipada para o ciclo n (w_n). Os ensaios são realizados com uma deformação constante, plotando a razão de energia em função do número de ciclos de carregamento exercido em cada amostra. O ponto de ruptura (N_f) é definido como o número de ciclos de carregamento necessário para que a taxa de energia dissipada se afaste de uma linha reta tangente ao início da curva conforme ilustra a Figura 10 (SOULIMAN *et al.*, 2012).

2.8.1.3 Critério de Pronk e Hopman (1989-1990)

Hopman definiu a taxa de energia dissipada através da Equação 15:

$$ER = n \times \frac{w_o}{w_n} = \frac{n [\pi \varepsilon_o \sigma_o \text{sen}(\delta_o)]}{\pi \varepsilon_n \sigma_n \text{sen}(\delta_n)} \quad (15)$$

Onde:

ER = razão de energia dissipada no ciclo n ;

n = número de ciclos de carregamento;

w_n = energia dissipada no ciclo n ;

w_o = energia dissipada inicial, sendo equivalente a energia dissipada durante o quinquagésimo ciclo;

ε_o = deformação inicial;

σ_o = tensão inicial;

δ_o = ângulo de fase inicial;

ε_n = deformação para o ciclo n ;

σ_n = tensão para o ciclo n ;

δ_n = ângulo de fase para o ciclo n .

Plotando a taxa de energia dissipada em função do número de ciclos de carregamento com uma deformação constante, o ponto de ruptura (N_f) é caracterizado pela transição da formação de micro para macro fissuras, e sua obtenção gráfica se assemelha ao critério de Pronk: é igual ao número de ciclos necessários para que a taxa ou razão de energia dissipada se desvie de uma linha reta tangente ao primeiro trecho da curva como ilustra a Figura 10 (SOULIMAN *et al.*, 2012).

2.8.1.4 Critério de Rowe (1993)

Rowe também usou a definição da taxa ou razão de energia dissipada para definir a ruptura por fadiga. Se a tensão na Equação 15 é

substituída pelo produto da deformação e módulo, e se considerar que o nível de deformação aplicada se mantém constante em um ensaio onde este parâmetro é controlado, então se pode simplificar o critério de Pronk e Hopman através da Equação 16:

$$ER = \frac{n}{E_n^* \text{sen}(\delta_n)} = \frac{n}{E_n''} \quad (16)$$

Onde:

ER = razão de energia dissipada no ciclo n;

n = número de ciclos de carregamento;

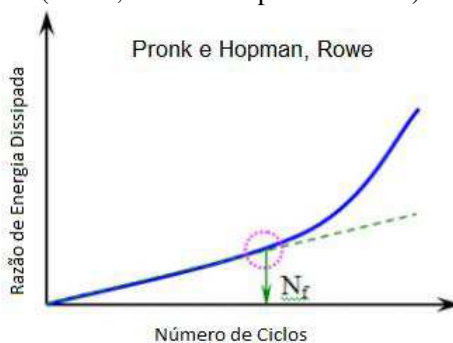
E_n^* = módulo complexo para o ciclo n;

δ_n = ângulo de fase para o ciclo n;

E_n'' = perda gradativa do módulo complexo para o ciclo n.

A obtenção do ponto de ruptura segue a mesma regra do critério de Pronk e Hopman (KHIAMI *et al.*, 2013).

Figura 10 - Representação gráfica dos critérios de ruptura energéticos (Pronk, Pronk e Hopman e Rowe).



Fonte: SOULIMAN *et al.* (2013).

2.8.2 Critérios de Ruptura Baseados na Degradação da Rigidez

Estes critérios abordam o conceito que o principal meio de ruptura por fadiga ocorre pela degradação da rigidez do material. Existem três critérios que podem ser usados para obter o ponto de falha por fadiga segundo esta concepção: critério convencional, critério da Universidade do Arizona (ASU), critério de Rowe e o critério de Franken (SOULIMAN *et al.*, 2012).

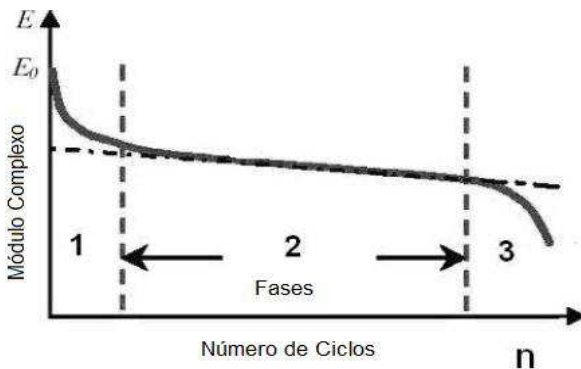
2.8.2.1 Critério Convencional: Caracterização das Três Fases de Degradação da Rigidez

Como já fora citado anteriormente, o critério de ruptura convencional define como ponto de falha o momento em que o módulo complexo do material se reduz em 50% com relação ao seu valor apresentado inicialmente. Este critério de avaliação de vida à fadiga é supostamente uma descrição subjetiva de ruptura, que considera apenas a rigidez da amostra, mas não as suas propriedades internas e o processo de fadiga em si (SYBILSKI & BANKOWSKI, 2007).

Uma típica evolução da degradação da rigidez pode ser facilmente ilustrada na Figura 11 que abrange o critério clássico avaliado. Sua redução gradativa é explicada através de três fases:

- A primeira fase representa o início do ensaio, onde a degradação da rigidez é rápida devido ao fenômeno de aquecimento interno (transição de energia mecânica para energia térmica);
- A segunda fase é marcada por uma redução lenta e linear;
- A terceira fase representa o início da coalescência ou junção das microfissuras, e isto faz com que esta etapa seja muito rápida até o ponto em que ocorre a ruptura completa por fadiga.

Figura 11 – Fases de degradação do módulo complexo (rigidez) no concreto asfáltico: critério convencional de ruptura por fadiga.



Fonte: SYBILSKI & BANKOWSKI (2007).

Em condições muito específicas de ensaios, com altas temperaturas e altas amplitudes de deformações constantes aplicadas, a redução da rigidez na primeira fase é bastante considerável. Por conta disto, a aplicação do critério convencional pode representar diferentes resultados em testes com uso de metodologias mais complexas (PRONK, 1997 *apud* SYBILSKI & BANKOWSKI, 2007).

Alguns fatores como o método de fixação do corpo de prova, a homogeneidade da amostra, as propriedades mecânicas do material asfáltico, as condicionantes de cada um dos ensaios realizados, entre outros, podem levar a dispersão dos resultados adquiridos com relação à resistência a fadiga. Assim, os dados experimentais e as análises mecânicas realizadas devem possuir um nível elevado de detalhamento para que o critério clássico de ruptura seja verdadeiramente validado (SYBILSKI & BANKOWSKI, 2007).

2.8.2.2 Critério de Rowe ou Rowe e Bouldin (2000)

Rowe e Bouldin aprimoraram a definição de ruptura apresentada por Pronk e Hopman. Um valor de ruptura foi produzido matematicamente ao invés de se fazer uso de um procedimento gráfico, como no critério de Pronk e Hopman. A expressão da taxa ou razão de energia dissipada foi simplificada tanto para ensaios a deformação controlada quanto a tensão controlada. Este critério recomenda que a análise do fenômeno de fadiga se baseie em parâmetros que envolvem a redução da rigidez do material, conforme a Equação 17 (ABOJARADEH, 2013):

$$SR = (n \times S) \quad (17)$$

Onde:

SR = rigidez do material no ciclo n;
n = número de ciclos de carregamento;
S = rigidez à flexão do material.

Plotando a degradação de rigidez em função do número de ciclos de carregamento, o ponto de ruptura é definido como o pico da curva formada como demonstra a Figura 12 (SOULIMAN *et al.*, 2012).

A principal vantagem deste critério é que os pontos de falha podem ser facilmente determinados através da aplicação de derivadas em funções polinomiais de maior ordem que representem os dados experimentais obtidos nos ensaios. O ponto de falha é caracterizado pela

transição do regime de micro fissuração para o regime de fissuração e propagação de dano. É comprovado que geralmente não se consegue adquirir este exato ponto com uma redução em 50% da rigidez inicial. O ponto de ruptura ou falha adquirido por este critério se encontra em um intervalo de 35% a 65% de redução do módulo complexo inicial, dependendo das condições vigentes no ensaio de resistência à fadiga (ABOJARADEH, 2013).

2.8.2.3 Critério da ASU (2007)

O critério da ASU foi desenvolvido a partir do critério de Rowe para definição de ruptura por fadiga. A degradação da rigidez ($S_i N_i$) foi normalizada através da divisão pela rigidez inicial do material (S_o) conforme a Equação 18:

$$SR = N_i \times \left(\frac{S_i}{S_o} \right) \quad (18)$$

Onde:

SR = taxa de degradação de rigidez no ciclo n;

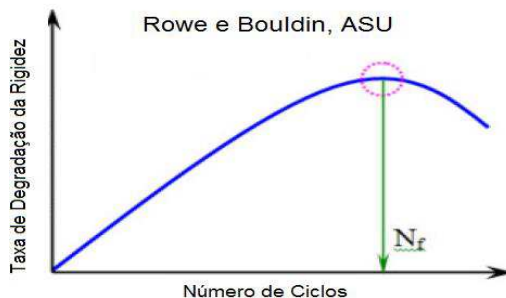
N_i = número de ciclos de carregamento no instante i;

S_i = rigidez à flexão do material no instante i;

S_o = rigidez à flexão inicial do material, sendo equivalente ao valor do módulo complexo durante o quinquagésimo ciclo.

Plotando o índice ou taxa de degradação de rigidez em função do número de ciclos de carregamento, a vida de fadiga é definida da mesma forma que o critério de Rowe e Bouldin: igual ao número de ciclos onde ocorre um pico da curva formada como demonstra a Figura 12 (SOULIMAN *et al.*, 2012).

Figura 12 - Representação gráfica dos critérios de ruptura baseados na degradação da rigidez (Rowe e Bouldin, ASU).



Fonte: SOULIMAN *et al.* (2012).

Os estudos realizados para concepção deste critério de ruptura por fadiga demonstram que os pontos de ruptura adquiridos apresentam bons coeficientes de correlação (R^2 próximo a 1, indicando melhores curvas lineares de ajuste) para metodologia fenomenológica de análise, tanto para ensaios com deformação controlada, quanto para ensaios com tensão controlada. Não foram obtidos resultados com diferenças muito significativas para ambos os modos de carregamento, realçando a tendência de os testes realizados apresentarem um comportamento semelhante durante a confecção das curvas de fadiga (ABOJARADEH, 2013).

Este critério de ruptura por fadiga através da flexão foi desenvolvido também com o intuito de fornecer uma potencial unificação das descrições ou metodologias fenomenológicas e de base energética (ABOJARADEH, 2013).

É preferível o uso deste critério de ruptura por fadiga do que daqueles baseados na energia dissipada, pois apresentam uma maior racionalidade e precisão matemática no ajuste dos dados e obtenção dos pontos de falha (ABOJARADEH, 2013).

2.8.2.4 Critério de Franken (Modelo de Ajuste do Critério Convencional)

Franken fez o uso da Equação 19 para desenvolver um modelo de ajuste ao critério convencional.

$$Y = 1 - [AXB + C(\exp^{DX} + 1)] \quad (19)$$

Onde:

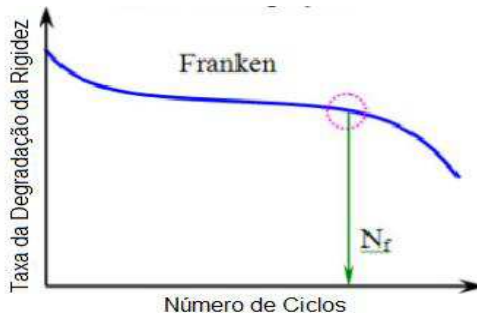
Y = rigidez do material;

X = número de ciclos de carregamento;

A, B, C, D = constantes de regressão;

O critério de Franken busca representar um modelo matemático que envolve uma função exponencial juntamente com uma de potência. Esse critério engloba as três fases de um ensaio de resistência à fadiga e sua aplicação possui certa complexidade devido aos parâmetros estatísticos regressivos. Normalmente é previsto um valor menor de ciclos para ruptura neste critério, já que nele se assume que a falha ocorrerá aproximadamente na transição da segunda para a terceira fase do teste convencional de resistência à fadiga (SOULIMAN *et al.*, 2012). A Figura 13 ilustra a obtenção do ponto de ruptura (N_f) de acordo com o modelo de Franken.

Figura 13 - Representação gráfica do critério de ruptura de Franken.



Fonte: SOULIMAN *et al.* (2012).

2.8.3 Outros Estudos Envolvendo Critérios de Ruptura

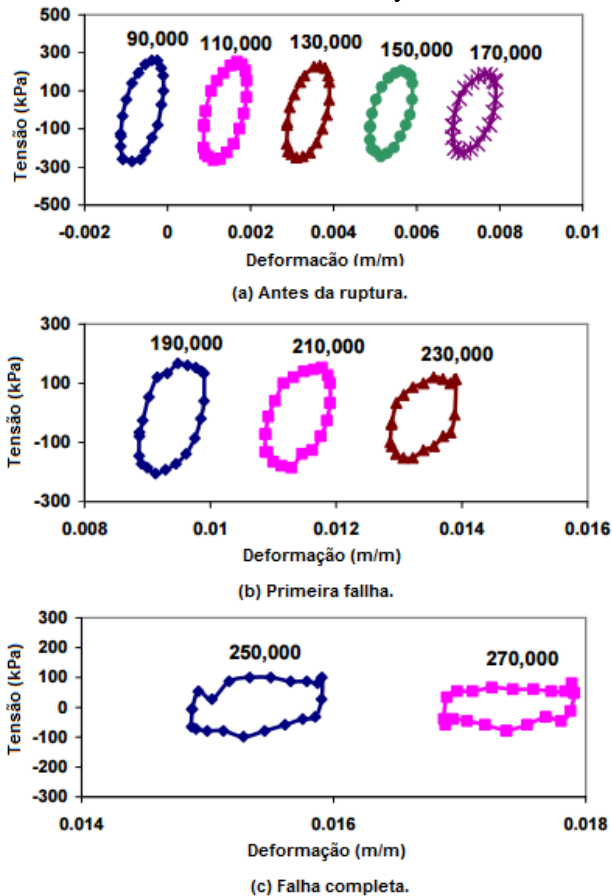
2.8.3.1 Critério de Al-Khateeb e Shenoy (2011)

Neste critério, a falha por fadiga é determinada diretamente pelo gráfico de tensão-deformação, observando-se o loop de histerese carga-deformação ou a forma da onda de saída do teste de fadiga. Os formatos das ondas de saída (sinais da tensão e deformação) são altamente correlacionados entre si antes da ruptura por fadiga e após a falha não existe qualquer relação matemática entre estas ondas. O primeiro ponto

de falha é identificado quando a forma do loop de histerese começa a demonstrar alguma distorção com relação a sua forma oval original. Esta forma distorcida inicial normalmente dura um longo período até que apareça um próximo estágio com muita distorção do loop de histerese ou forma da onda. Quando este ponto é alcançado, a viga prismática de teste apresenta uma falha completa por fadiga (ruptura final) (ABOJARADEH, 2013).

O interessante deste critério é que ele não está limitado apenas ao teste de fadiga 4 pontos, ou seja, pode-se fazer o uso deste conceito em qualquer tipo de ensaio por fadiga ou até mesmo em qualquer material incluindo aqueles não-betuminosos (ABOJARADEH, 2013). A Figura 14 ilustra a distorção do loop usada no critério de Al-Khateeb e Shenoy:

Figura 14 – Representação do loop de histerese para o critério de Al-Khateeb e Shenoy.



Fonte: AL-KHATEEB E SHENOY. (2004).

2.8.3.2 Estudo de Abojaradeh, Witzsak, Mamlouk e Kaloush (2007)

O objetivo primordial deste estudo foi validar os critérios usados para definir a rigidez inicial e final em ensaios de fadiga por flexão alternada. O estudo fez uso de extensivos testes de fadiga por flexão em cinco misturas típicas com graduação densa e misturas de asfalto com borracha.

Modelos de fadiga foram desenvolvidos usando ajustes de curvas por regressão linear e as condições que produziram melhores

coeficientes de correlação (R^2) foram selecionadas. Ambas as abordagens fenomenológica e de energia dissipada foram usadas na construção das curvas finais de fadiga. Estes testes experimentais concluíram que o valor de rigidez inicial deve ser definido para o ciclo de número 50 (quinquagésima carga dinâmica aplicada), e serviram de base para a construção do critério da ASU (ABOJARADEH *et al.*, 2007).

Abojaradeh *et al.* (2007) constataram em suas pesquisas que o uso de uma metodologia mecanicista de energia dissipada apresenta ruptura com rigidez final igual a 30% da rigidez inicial da amostra (fazendo uso de um critério com base na degradação da rigidez). Este resultado foi independente do modo de carregamento com deformação ou tensão controlada. Através destes estudos, evidenciou-se que a abordagem fenomenológica e de energia dissipada possuem desempenhos distintos de resistência à fadiga mesmo quando avaliadas com o mesmo critério de ruptura (ABOJARADEH *et al.*, 2007).

2.8.3.3 Revisão de Shen e Lu Através de um Critério Baseado na Energia Dissipada (2011)

Shen e Lu (2011) conduziram seus estudos através da revisão e reformulação dos estudos promovidos por Carpenter. Um critério de ruptura macroscópica foi se tornando evidente em suas análises, o que é definido como uma mudança brusca da curva de energia dissipada e está diretamente ligada com o início da propagação de trincas por fadiga no pavimento asfáltico.

Comparando este critério desenvolvido com o critério convencional de ruptura por fadiga, foi evidenciada uma grande correlação entre os pontos de falha para as amostras ensaiadas. Isto sugere que os 50% de redução do módulo inicial pode representar um critério de fadiga simples, porém razoável, que indica a transição de microfissuras para as trincas visíveis (ABOJARADEH, 2013).

2.9 ANÁLISES DE ARTIGOS PUBLICADOS SOBRE CRITÉRIOS DE RUPTURA

2.9.1 Estudo da Universidade do Arizona (M.I. Souliman, W.A. Zeiada, K.E. Kaloush & M.S. Mamlouk, 2012)

Neste estudo realizado pela Universidade do Arizona, foram avaliadas três misturas distintas de concreto asfáltico. Para todas as

misturas foram conduzidos testes de fadiga por flexão no aparato a quatro pontos em três diferentes temperaturas e níveis de deformação com base na normativa AASHTO T 321. O Quadro 1 resume as condicionantes experimentais citadas.

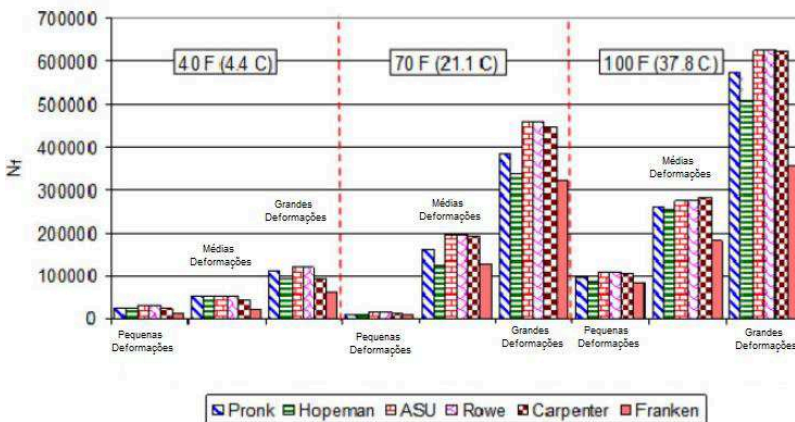
Quadro 1 - Condicionantes do teste de resistência à fadiga realizado pela Universidade do Arizona.

Misturas Asfálticas	Temperaturas de Ensaio (°C)	Tipo de Ligante	Teor de Ligante (%)	Volume de Vazios (%)
Convencional	4,4	PG 64-22	5,4	7
	21,1			
	37,8			
Asfalto Borracha	4,4	PG 58-22	8,8	18
	21,1			
Asfalto Reforçado com Fibras	4,4	PG 70-10	5,0	7
	21,1			
	37,8			

Fonte: SOULIMAN *et al.* (2012).

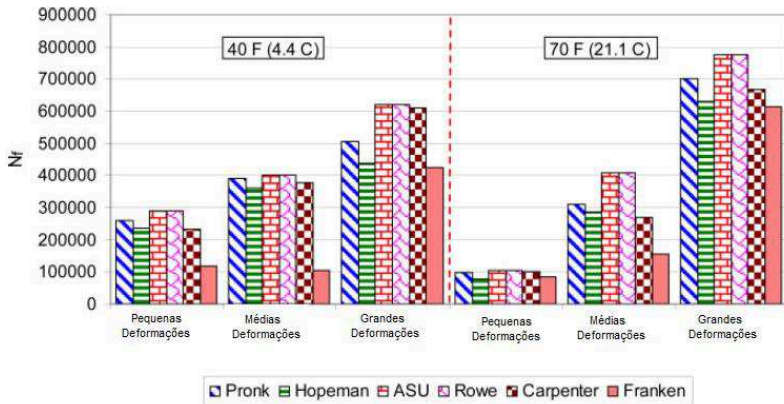
Nesta pesquisa foram aplicados três critérios baseados na energia dissipada: Pronk, Pronk e Hopman e Carpenter. No que se refere aos critérios de ruptura baseados na degradação da rigidez, foram calculados os pontos de falha para Rowe e Boudin, ASU e Franken. As Figuras 15 a 17 ilustram os resultados obtidos durante este estudo.

Figura 15 - Estimativa de N_f para a mistura asfáltica convencional em três diferentes temperaturas e diferentes níveis de deformação.



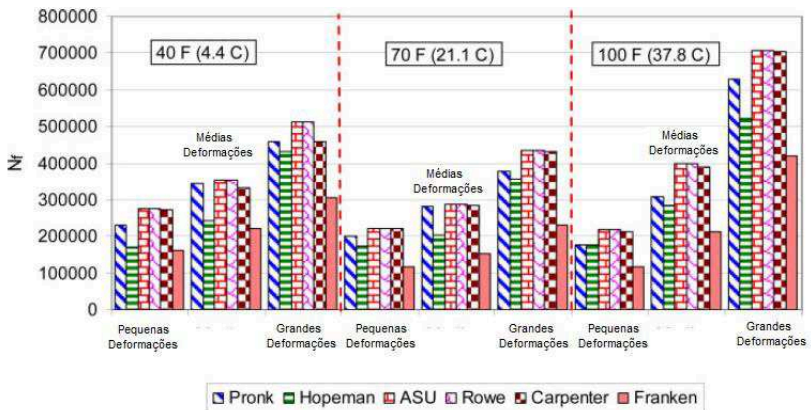
Fonte: SOULIMAN *et al.* (2012).

Figura 16 - Estimativa de N_f para a misturas asfáltica com borracha em duas diferentes temperaturas e diferentes níveis de deformação.



Fonte: SOULIMAN *et al.*, (2012).

Figura 17 - Estimativa de N_f para a mistura asfáltica reforçada com fibras em três diferentes temperaturas e diferentes níveis de deformação.



Fonte: SOULIMAN *et al.*, (2012).

Observando os resultados acima, pode-se constatar que os critérios de Rowe e da ASU produziram as maiores previsões para N_f , independentemente do tipo de mistura asfáltica e temperatura. Estes critérios produzem um mesmo N_f , uma vez que o critério da ASU apenas introduz uma normatização do critério de Rowe. Após os critérios de Rowe e da ASU, os critérios que apresentam maiores

previsões para N_f são o de Carpenter e o de Pronk. O critério de Franken tende a prever o menor valor de N_f entre todos os outros critérios adotados independentemente da temperatura e mistura asfáltica analisada. Após o critério de Franken, a menor previsão é verificada para o critério de Hopman (SOULIMAN *et al.*, 2012).

2.9.2 Estudo da Universidade de Nottingham (Cinzia Maggiore, Gordon Airey & James Grenfell, 2013)

Este estudo foi conduzido através de testes de flexão em 2 pontos para medição da resistência à fadiga, respeitando-se as recomendações da norma francesa do IFSTTAR. O padrão de carregamento foi do tipo senoidal contínuo, com uma frequência de aplicação de 15 e 25 Hz.

Os corpos de prova ensaiados foram de concreto asfáltico convencional, sendo submetidos a uma deformação controlada e temperatura de 20°C. A rigidez inicial dos corpos de prova foi definida entre os ciclos 50 e 100. As microdeformações aplicadas variaram entre 124 a 180 para os testes conduzidos a uma frequência de 15 Hz, e 142 a 190 para aqueles ensaios conduzidos a 25 Hz (MAGGIORE *et al.*, 2013).

Os critérios de ruptura analisados neste estudo foram: Pronk, Shen e Carpenter, Rowe e Bouldin e o critério convencional de redução de 50% da rigidez inicial. Os Quadros 2 e 3 ilustram os pontos de ruptura adquiridos para cada um dos diferentes critérios:

Quadro 2 - Teste de fadiga 2PB com frequência de 15 Hz para diferentes critérios de ruptura.

Teste de Fadiga 2PB – 20°C e 15 Hz						
Corpo de Prova	Microdeformação aplicada ($\mu\epsilon$)	Rigidez inicial (MPa)	Nf (50%)	Nf (Rowe e Bouldin)	Nf (Pronk)	Nf (Carpenter e Shen)
44	124	3756	953244	1677806	625322	957941
7	120	3759	681862	748704	437698	679511
46	140	4095	595498	588000	325000	592000
24	158	4332	399921	506342	337642	514365
38	145	7917	303400	325404	212580	341867
29	178	4051	172294	217165	115347	376777
37	180	3428	195630	306457	163452	321984

Fonte: MAGGIORE *et al.* (2013).

Quadro 3 - Teste de fadiga 2PB com frequência 25 Hz para diferentes critérios de ruptura.

Teste de Fadiga 2PB - 20°C e 25 Hz						
Corpo de Prova	Microdeformação aplicada ($\mu\epsilon$)	Rigidez inicial (MPa)	Nf (50%)	Nf (Rowe e Bouldin)	Nf (Pronk)	Nf (Carpenter e Shen)
9	142	4775	222437	222437	155072	198850
28	142	5013	187850	214091	150046	196134
8	160	4637	130307	130307	103411	192963
45	157	4620	121058	148095	112196	130307
21	185	4374	82147	131459	75402	74827
43	180	4732	76547	125629	65365	131459
6	187	4578	58407	85535	40009	85535
42	190	4640	94470	121058	49610	112196

Fonte: MAGGIORE *et al.* (2013).

Como pode ser notado, o critério energético de Pronk gerou pontos de ruptura menores que o critério convencional de 50% da redução da rigidez inicial em todas as amostras ensaiadas. Já o critério de Rowe e Bouldin, baseado na degradação da rigidez, de maneira geral, apresenta valores de vida útil à fadiga maior ao critério convencional de ruptura por fadiga. Por fim, o critério energético de Carpenter e Shen possui uma resistência à fadiga ligeiramente superior ao critério tradicional (em alguns corpos de prova) a níveis baixos de deformação e uma resistência maior a níveis de deformação mais elevados, independentemente da frequência de carregamento (MAGGIORE *et al.*, 2013).

Maggiore *et al.* (2013) comprovou neste estudo que os critérios de Shen e Carpenter definem bem a verdadeira ruptura por fadiga do material, onde as trincas começam a se propagar visivelmente. Estes pontos definem um número de ciclos de carregamento um pouco maior que aqueles adquiridos pelo critério convencional, mas por via de simplificação da obtenção destes valores pode-se correlacionar diretamente os testes realizados para definir a vida à fadiga do material (MAGGIORE *et al.*, 2013).

3 METODOLOGIA

Visando alcançar os objetivos propostos neste trabalho, a metodologia foi estruturada nas seguintes etapas:

Etapa 1 - Estudo de diferentes métodos de análise e critérios de ruptura por fadiga de misturas asfálticas: Esta etapa consistiu em estudar os diferentes métodos de análise e critérios de ruptura à fadiga por meio de uma revisão bibliográfica aprofundada.

Etapa 2 - Definição de uma mistura asfáltica a ser estudada e obtenção dos dados experimentais brutos de ensaios de fadiga da mistura asfáltica: O objetivo desta etapa foi selecionar uma mistura asfáltica já ensaiada à fadiga, junto ao Laboratório de Pavimentação da UFSC, e obter os resultados experimentais brutos dos ensaios de fadiga desta mistura asfáltica, para permitir o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso. Nesta etapa, foram também apresentadas as características da mistura asfáltica selecionada. Neste sentido, são apresentadas as propriedades dos materiais que foram utilizados para a produção da mistura asfáltica, a granulometria, a dosagem, assim como, todos os procedimentos laboratoriais seguidos para a produção dos corpos de prova prismáticos utilizados no ensaio de fadiga. Ao final desta etapa, também é relatada as condições de teste que foram empregadas no ensaio de resistência à fadiga que geraram os dados experimentais brutos utilizados neste trabalho.

Etapa 3 - Tratamento dos dados experimentais brutos obtidos em relação à diferentes critérios de ruptura por fadiga: Nesta etapa foram aplicados aos dados experimentais obtidos na etapa anterior, diferentes critérios de ruptura por fadiga.

Etapa 4 - Obtenção das curvas de fadiga para cada critério de ruptura estudado: Nesta etapa foram obtidos os modelos de fadiga para cada um dos critérios de ruptura definidos para este estudo. Duas abordagens de análise foram avaliadas, a abordagem fenomenológica e a abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada.

Etapa 5 - Modelização racional da estrutura do pavimento flexível: Na etapa final do trabalho, buscou-se a partir das diferentes curvas de fadiga obtidas, para as diferentes abordagens (métodos de análise), realizar o dimensionamento racional da estrutura de um pavimento com a utilização do *Software ViscoRoute*, que considera as propriedades viscoelásticas do revestimento asfáltico.

3.1 ESTUDO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ANÁLISE E CRITÉRIOS DE RUPTURA POR FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Esta etapa consistiu da revisão de literatura apresentada no capítulo anterior deste trabalho. Entretanto, nesta seção são apresentados os métodos de análise e os critérios de ruptura que foram utilizados neste trabalho e, conseqüentemente, aplicados aos dados experimentais brutos de ensaios de fadiga obtidos junto ao Laboratório de Pavimentação da UFSC.

Neste trabalho, foram estudados três diferentes critérios de ruptura: o critério de Pronk e Hopman, o critério da ASU e o critério convencional (redução da rigidez em 50% do módulo definido no 100º ciclo).

O critério de Pronk e Hopman consiste em considerar a taxa de energia dissipada por ciclo de carregamento. Já o critério da ASU e o critério convencional analisam a degradação do módulo complexo ao longo do ensaio para definir o número de ciclos em que ocorrerá a ruptura por fadiga. Os critérios de ruptura foram aplicados a dois métodos de análise, o fenomenológico e o da energia dissipada acumulada.

3.2 DEFINIÇÃO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA A SER ESTUDADA E OBTENÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS BRUTOS DE ENSAIOS DE FADIGA DA MISTURA ASFÁLTICA

Esta etapa teve como objetivo selecionar uma mistura asfáltica para o desenvolvimento do trabalho proposto e obter o conjunto de dados experimentais brutos dos ensaios de fadiga da mistura asfáltica selecionada. Para tanto, escolheu-se uma mistura asfáltica já avaliada na resistência à fadiga pelo Laboratório de Pavimentação da UFSC. A mistura asfáltica selecionada foi desenvolvida e testada por Melo (2014) em seu doutoramento, a qual foi modificada com nanoargila organofílica.

Quanto às características da mistura asfáltica, estas foram obtidas a partir da tese de doutoramento de Melo (2014), desde a caracterização dos materiais até a obtenção dos corpos de prova para os ensaios de fadiga. A seguir, são apresentados de forma resumida os procedimentos laboratoriais utilizados por Melo (2014).

Os agregados utilizados na produção da mistura asfáltica foram: brita ¾", pedrisco, pó de pedra e cal hidratada. As propriedades dos

materiais determinadas por Melo (2014), obedeceram às prescrições das seguintes normas:

- Angularidade do agregado graúdo: ASTM D 5821;
- Angularidade do agregado miúdo: ASTM C 1252;
- Partículas planas e alongadas: ABNT NBR 6954;
- Teor de argila: AASHTO T 176;
- Dureza: ASTM C 131;
- Sanidade: ASTM C 88;
- Materiais deletérios: AASHTO T 112;
- Massa específica real, aparente e absorção do agregado graúdo: ASTM C 127;
- Massa específica real do agregado miúdo: DNER-ME 084;
- Massa específica real do material pulverulento: DNER-ME 085.

A curva granulométrica foi formulada a partir da combinação dos agregados (brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e pó de pedra) e do filer (cal hidratada) em conformidade com os critérios Superpave para um tamanho nominal máximo de 19 mm.

Com finalidade de produzir a mistura asfáltica, Melo (2014), utilizou ligante asfáltico modificado com 3% de nanoargila organofílica. A modificação do ligante asfáltico (CAP 50-70) foi realizada com um misturador de alto cisalhamento, na temperatura de 150 °C, a 5.000 rpm e por um período de 90 min.

As características do ligante asfáltico nanomodificado foram avaliadas conforme as normas elencadas abaixo:

- Penetração: ASTM D 5;
- Ponto de amolecimento: ASTM D 36;
- Viscosidade aparente: ASTM D 4402.

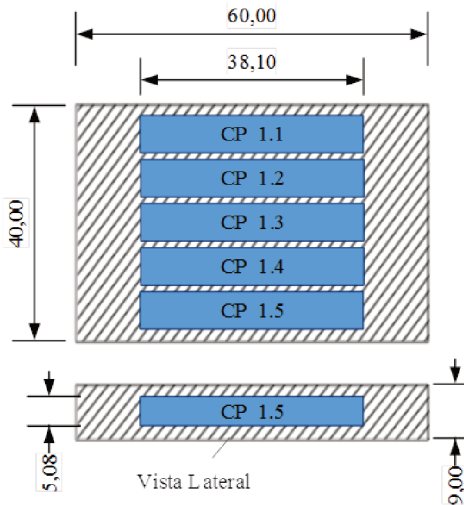
O procedimento de dosagem da mistura asfáltica atendeu aos critérios da metodologia Superpave. E foram seguidas as seguintes normativas:

- Produção das misturas asfálticas: AASHTO R 30;
- Dosagem Superpave: AASHTO M 323 e AASHTO R 35;
- Ensaio de Lottman modificado: AASHTO T 283.

Para os ensaios de desempenho (deformação permanente, módulo complexo e resistência à fadiga), Melo (2014) moldou placas de concreto asfáltico. A moldagem das placas foi realizada na mesa compactadora LCPC desenvolvida na França pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, atual IFSTTAR. A compactação das placas seguiu a especificação francesa AFNOR NF P 98-250-2. Melo (2014), moldou 2 placas de 50 x 18 x 5 cm, para os ensaios de deformação permanente, e 3 placas de concreto asfáltico de 60 x 40 x 9 cm para os ensaios de fadiga e módulo complexo (comportamento reológico).

Para a obtenção dos corpos de prova prismáticos para os ensaios de módulo complexo e fadiga, as placas de concreto asfáltico com as dimensões de 60 x 40 x 9 cm foram serradas, conforme o plano de corte da Figura 18, obtendo assim, os corpos de prova com dimensões de 5,08 x 6,35 x 38,1 cm. Foram gerados ao total 15 corpos de prova.

Figura 18 - Plano de corte (dimensões em cm).



Fonte: MELO (2014).

A avaliação do desempenho da mistura de concreto asfáltico realizada por Melo (2014) seguiu as seguintes normativas:

- Avaliação da deformação permanente: AFNOR NF P 98-253-1;
- Módulo complexo: EN 12697-26;
- Resistência à fadiga: EN 12697-24.

Para caracterização do comportamento reológico da mistura de concreto asfáltico, Melo (2014) conduziu o ensaio de módulo complexo a diversas frequências e temperaturas de teste (0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C). Os ensaios foram conduzidos sob deformação controlada de 50 µm/m com carregamento sinusoidal.

Melo (2014), utilizou para o ensaio de resistência à fadiga, o equipamento a quatro pontos, mesmo equipamento utilizado na condução dos ensaios de módulo complexo, sendo ensaiados para a mistura asfáltica selecionada, um total de 6 corpos de prova nas seguintes condições de ensaio:

- Ensaio conduzido sob carregamento sinusoidal contínuo e deformação controlada;
- Critério de ruptura convencional (redução de 50% do módulo complexo inicial, com módulo inicial determinado no centésimo ciclo);
- Temperatura de ensaio de 20 °C;
- Frequência de teste de 10 Hz, equivalente a velocidade de 72 km/h (CHABOT *et al.*, 2009 *apud* MELO, 2014).

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM RELAÇÃO À DIFERENTES CRITÉRIOS DE RUPTURA POR FADIGA

Esta etapa consistiu em fazer um tratamento dos dados experimentais brutos de resistência à fadiga da mistura asfáltica selecionada, os quais foram adquiridos por Melo (2014).

Durante a execução dos ensaios de fadiga, o *Software UTS018* faz a aquisição de diversos dados para cada ciclo de carregamento, entre eles: o módulo complexo, o ângulo de fase, a energia dissipada por ciclo, assim como a energia dissipada acumulada. Os dados são armazenados até o ciclo em que se atinge o critério de ruptura pré-determinado no início do ensaio. Neste sentido, com os dados experimentais armazenados nos arquivos do *Software UTS018*, fez-se a exportação destes para o *Software Excel*, a fim de realizar o tratamento dos dados e aplicar os diferentes critérios de ruptura por fadiga.

Os tratamentos dos dados experimentais brutos foram realizados para os critérios de Pronk e Hopman e para o critério da ASU, onde um

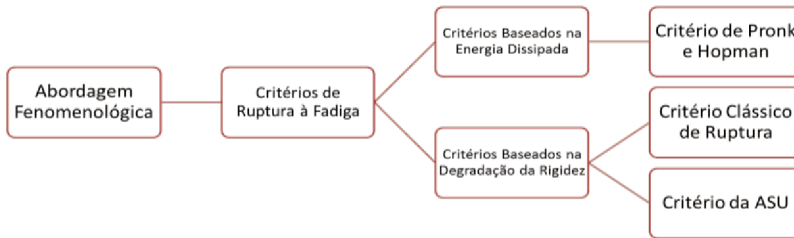
considera a dissipação de energia que ocorre com o avanço do número de ciclos de carregamento para definir a falha, e o outro relaciona a ruptura do corpo de prova com a degradação da rigidez do material ensaiado, conforme abordado na revisão de literatura.

3.4 OBTENÇÃO DAS CURVAS DE FADIGA PARA CADA CRITÉRIO DE RUPTURA ESTUDADO

Esta etapa consistiu em obter os modelos de fadiga para os diferentes critérios de ruptura, tanto para a abordagem fenomenológica, quanto para a abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada.

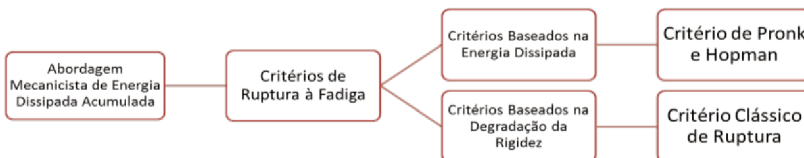
As Figuras 19 e 20 resumem através de um fluxograma os diferentes critérios de ruptura e abordagens (métodos de análise) avaliados neste trabalho.

Figura 19 - Critérios de ruptura utilizados na abordagem fenomenológica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Critérios de ruptura utilizados na abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pontos de referência para a elaboração das curvas de fadiga na abordagem fenomenológica são os pontos de falha adquiridos graficamente por meio dos procedimentos executados na etapa anterior e

as respectivas amplitudes de deformação no qual os diferentes corpos de prova foram ensaiados à fadiga.

Já para a abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada, correlacionou-se a energia dissipada acumulada final com o número de ciclos onde se ocorre a falha por fadiga. Este valor de energia dissipada acumulada foi obtido por meio do *Software UTS018* utilizado durante o ensaio de fadiga a quatro pontos. Portanto, para aplicar o critério de Pronk e Hopman na abordagem mecanicista, bastou apenas pegar a energia dissipada acumulada para o respectivo ponto de falha adquirido graficamente conforme a etapa anterior, e traçar uma curva de fadiga correlacionando o número de ciclos *versus* a energia acumulada na ruptura.

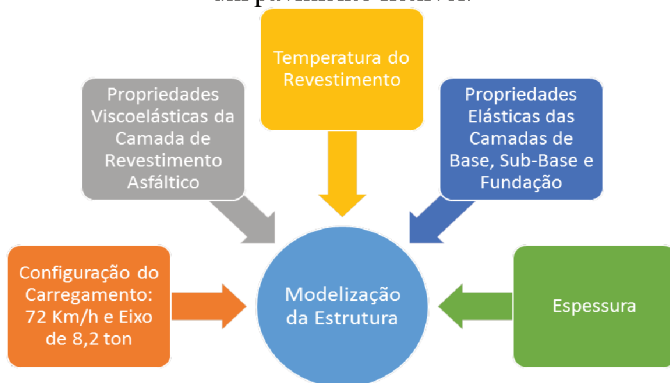
3.5 MODELIZAÇÃO RACIONAL DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

Na etapa final do trabalho, foi realizado o dimensionamento racional de uma estrutura de um pavimento flexível, sendo utilizada a mesma estrutura estudada por Melo (2014). O objetivo desta etapa foi evidenciar, de maneira prática, a influência dos diferentes critérios de ruptura à fadiga no dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico, assim como, a influência da abordagem fenomenológica e da abordagem mecanicista (energia dissipada acumulada).

Para tanto, fez-se uma aplicação numérica utilizando o *Software ViscoRoute* (desenvolvido pelo IFSTTAR/França), que leva em consideração os parâmetros viscoelásticos do revestimento asfáltico. O programa também inclui em seus dados de entrada a velocidade do carregamento e a temperatura da mistura asfáltica, para então efetuar o cálculo do módulo da mistura asfáltica através do modelo reológico de Huet-Sayegh.

A Figura 21 ilustra os dados de entrada para a modelização da estrutura de pavimento, com todas as propriedades, parâmetros e dados experimentais relevantes para concretização deste procedimento.

Figura 21 - Propriedades necessárias para modelização da estrutura de um pavimento flexível.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo após a modelização do pavimento flexível foi retirado como dado de saída da *Software ViscoRoute* a microdeformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico. Com isto, faz-se uso das curvas de fadiga obtidas neste estudo para verificar o número de ciclos que representaria a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico sobre diferentes critérios de ruptura e métodos de análise (abordagens).

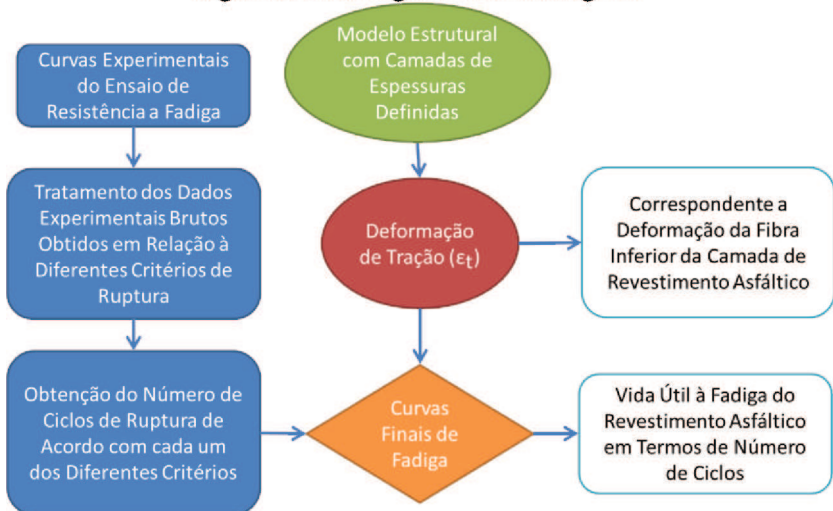
O procedimento de dimensionamento racional através abordagem fenomenológica é bastante simples: aplicam-se, diretamente, as microdeformações obtidas dentro das equações de fadiga adquiridas na etapa anterior.

No caso da abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada, o procedimento de dimensionamento foi realizado de outra forma. Primeiramente, foi adquirida por meio da Equação 13, a energia dissipada inicial ocasionada no revestimento asfáltico pelo eixo simples de roda dupla de 8,2 ton. O cálculo foi realizado, inserindo na Equação 13, a microdeformação de tração gerada na fibra inferior da camada asfáltica, o ângulo de fase e o módulo complexo do concreto asfáltico para a velocidade de carregamento e temperatura simulada no *Software ViscoRoute*. Com a energia dissipada inicial calculada obteve-se, por meio de um modelo matemático de correlação adquirido através dos dados experimentais de fadiga, a previsão da energia dissipada acumulada no momento da ruptura do revestimento asfáltico. Após este procedimento, faz-se a inserção da energia dissipada acumulada dentro da curva de fadiga obtida na etapa anterior, pelo método mecanicista,

resultando no número de ciclos de carregamento necessários para a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico.

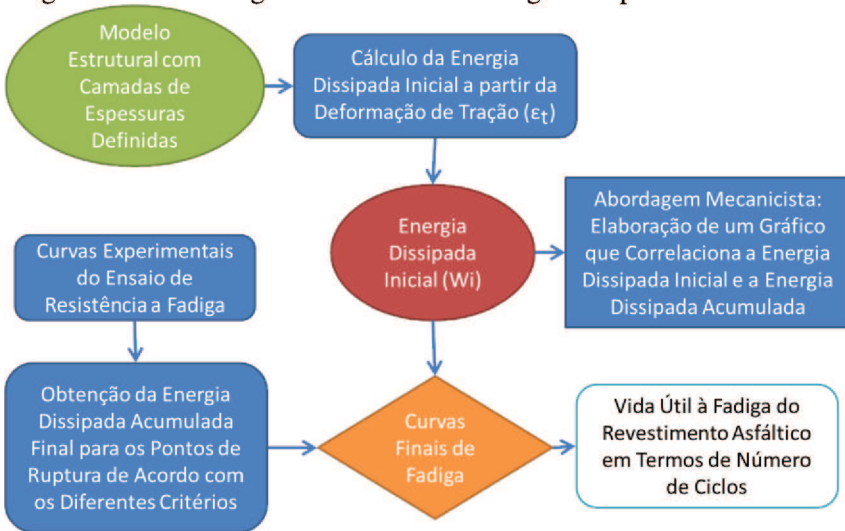
Os fluxogramas (Figuras 22 e 23) ilustram como foi realizado o dimensionamento racional do pavimento de acordo com ambas as abordagens, a fenomenológica e a mecanicista (energia dissipada acumulada):

Figura 22 - Fluxograma da modelização da estrutura de um pavimento segundo a abordagem fenomenológica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Fluxograma da modelização da estrutura de um pavimento segundo uma abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DEFINIÇÃO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA A SER ESTUDADA E OBTENÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS BRUTOS DE ENSAIOS DE FADIGA DA MISTURA ASFÁLTICA

Os dados brutos de fadiga obtidos para o desenvolvimento deste TCC são provenientes de uma mistura asfáltica desenvolvida e testada à fadiga por Melo (2014), em sua tese de doutoramento. Trata-se de uma mistura asfáltica nanomodificada com 3% de nanoargila organofílica incorporada no ligante asfáltico (CAP 50-70). O ligante asfáltico nanomodificado apresenta as seguintes características: penetração de 55 décimos de milímetro, ponto de amolecimento de 50,2 °C, viscosidade aparente de 4,12 poise a 135 °C, 2,07 poise a 150 °C e 0,85 poise a 175 °C (MELO, 2014).

Para a produção da mistura asfáltica, Melo (2014) utilizou agregados de origem basáltica e cal hidratada tipo CH-1 dolomítica. As propriedades dos agregados são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado da caracterização dos agregados.

Propriedades dos agregados	Resultados
Massa específica real do agregado graúdo	2,953 g/cm ³
Massa específica aparente do agregado graúdo	2,880 g/cm ³
Absorção do agregado graúdo	0,849%
Massa específica real do agregado miúdo	2,974 g/cm ³
Massa específica real do material pulverulento	2,804 g/cm ³
Angularidade do agregado graúdo	100%/100%
Angularidade do agregado miúdo	49,18%
Partículas planas e alongadas	9,59%
Teor de argila (Equivalente de areia)	61,2%
Dureza (Abrasão Los Angeles)	11,58%
Sanidade	2,14%
Materiais deletérios	0%

Fonte: MELO (2014).

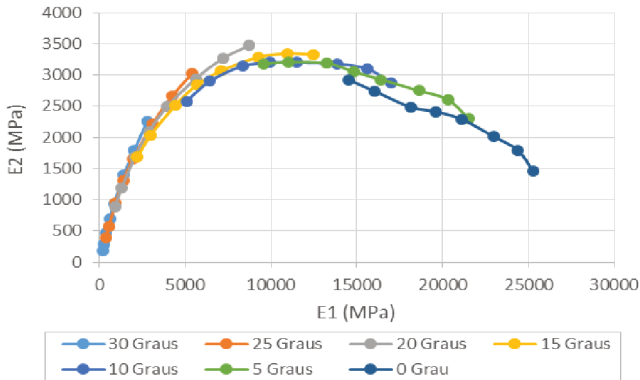
A curva granulométrica foi constituída de 56,7% de agregado graúdo (passante na # 3/4" e retido na # N^o 4), 37,9% de agregado miúdo (passante na # N^o 4 e retido na # N^o 200) e 5,4% de material pulverulento (passante na # N^o 200 e retido no fundo) (MELO, 2014).

O projeto da mistura asfáltica foi realizado segundo a metodologia Superpave, que conduziu a um teor de ligante asfáltico de 4,35%. Os resultados de deformação permanente para esta mistura asfáltica foram

de 6,7% aos 30000 ciclos. Quanto ao ensaio de Lottman modificado, a mistura asfáltica não apresentou redução de resistência após o condicionamento (MELO, 2014).

Os resultados de módulo complexo da mistura asfáltica nanomodificada, obtidos por Melo (2014) são retratados pelo plano Cole-Cole apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Plano Cole-Cole elaborado por Melo (2014).



Fonte: MELO (2014).

Os ensaios de resistência à fadiga, realizados por Melo (2014), na temperatura de 20 °C e 10 Hz são apresentados no Quadro 4. Conforme o estudo reológico apresentado na Figura 24, o módulo complexo para a temperatura de 20 °C e frequência de 10 Hz é igual a 7895 MPa com ângulo de fase de 24,4°.

Quadro 4 - Resultados finais do teste de fadiga conduzido por Melo (2014).

Teste de Resistência à Fadiga – NA 3%			
Temperatura de 20°C e Frequência de 10 Hz			
CP	Módulo Inicial	Microdeformação	Número de Ciclos
1.4	8288	100	1719490
3.4	8481	100	1483987
2.2	7867	150	202653
1.2	7959	150	204386
2.3	8246	200	44220
1.5	7474	200	63775

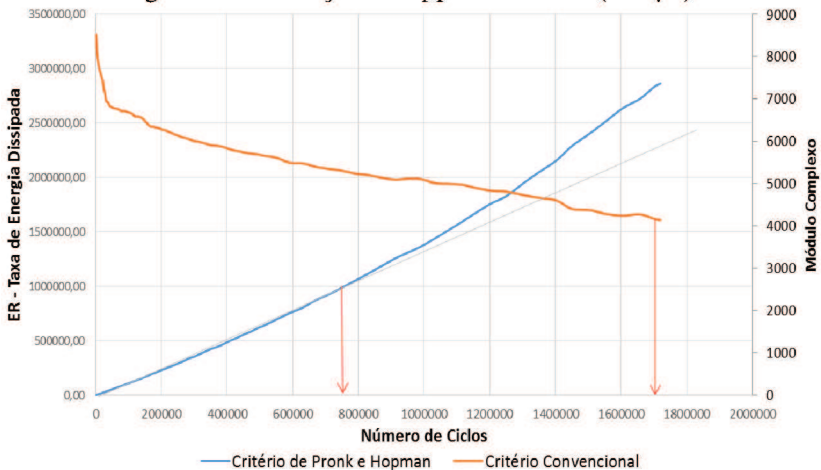
Fonte: Adaptado de MELO (2014).

4.2 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM RELAÇÃO À DIFERENTES CRITÉRIOS DE RUPTURA POR FADIGA

A partir dos dados experimentais brutos de fadiga obtidos por Melo (2014) realizou-se o tratamento dos dados e traçaram-se as curvas de ruptura por fadiga pelo critério de Pronk e Hopman. As Figuras 25 a 30 retratam, graficamente, um comparativo entre os pontos de ruptura gerados pelo critério convencional e o critério de Pronk e Hopman.

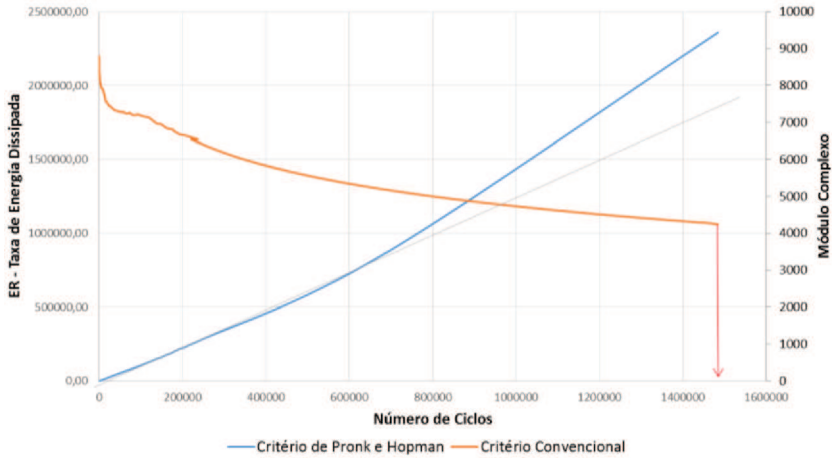
Vale lembrar que os pontos de falha obtidos pelo critério energético são uma estimativa aproximada do número de ciclos onde a curva da taxa de energia dissipada se desvia de uma linha tangente ao trecho inicial do gráfico. Já no critério convencional, assume-se a ruptura na redução de 50% da rigidez inicial definida no 100^o ciclo.

Figura 25 - Obtenção de N_f para o CP 1.4 (100 $\mu\epsilon$).



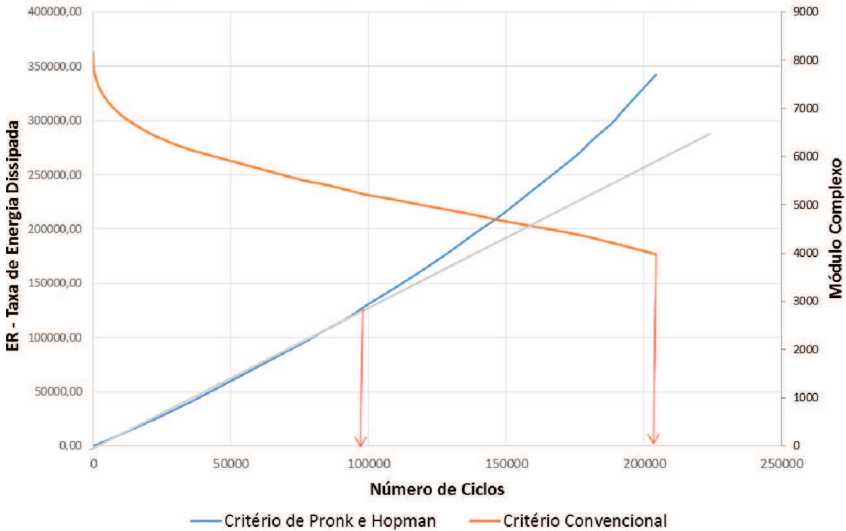
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Obtenção de N_f para o CP 3.4 (100 $\mu\epsilon$).



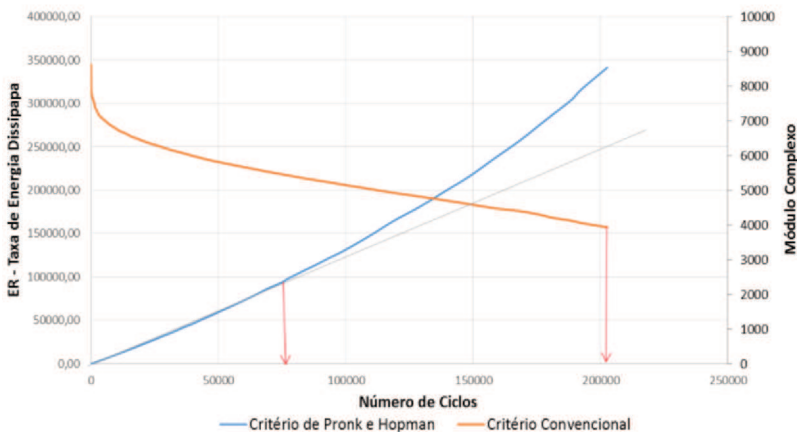
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Obtenção de N_f para o CP 1.2 (150 $\mu\epsilon$).



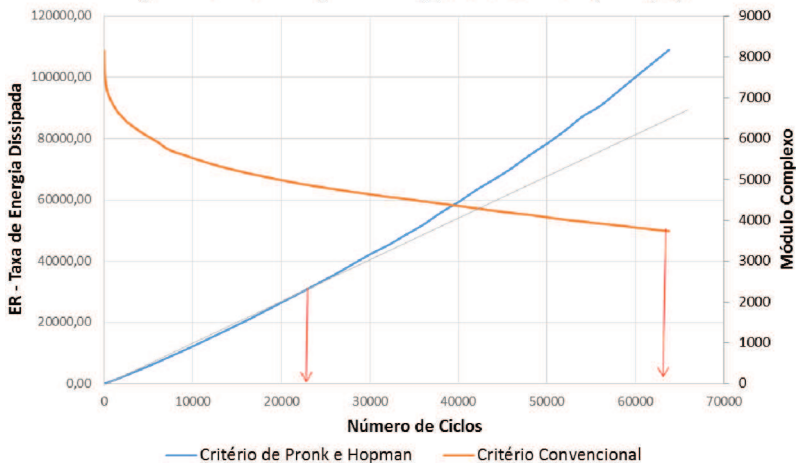
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Obtenção de N_f para o CP 2.2 ($150 \mu\epsilon$).



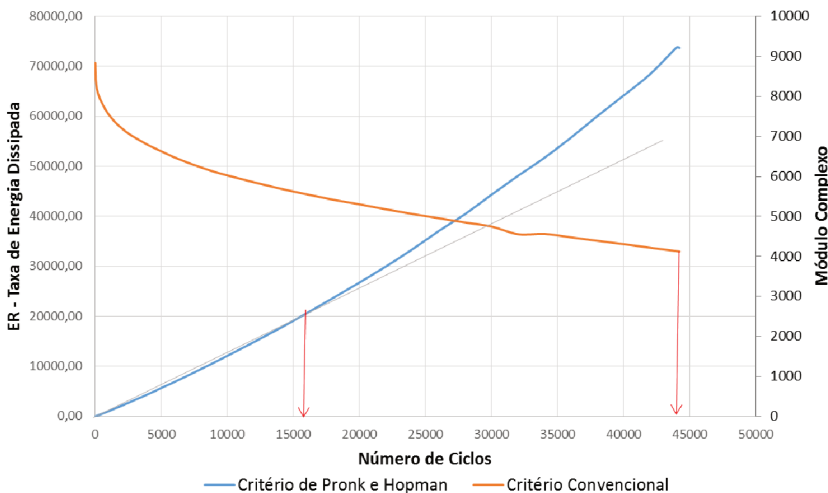
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Obtenção de N_f para o CP 1.5 ($200 \mu\epsilon$).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Obtenção de N_f para o CP 2.3 (200 $\mu\epsilon$).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 2 apresenta todos os pontos de ruptura adquiridos graficamente pelo critério de Pronk e Hopman comparados ao critério convencional.

Tabela 2 - Pontos de ruptura segundo diferentes critérios – Convencional e Pronk e Hopman.

CP	Critério Convencional	Critério Pronk e Hopman	Redução de N_f em %	Redução da Rigidez Inicial em %
CP 1.2	204386	93685	54,2	35,2
CP 1.4	1719490	750855	56,3	36,3
CP 1.5	63775	23000	63,9	40,2
CP 2.2	202653	75568	62,7	36,8
CP 2.3	44220	16000	63,8	37,2
CP 3.4	1483987	678393	54,3	40,9

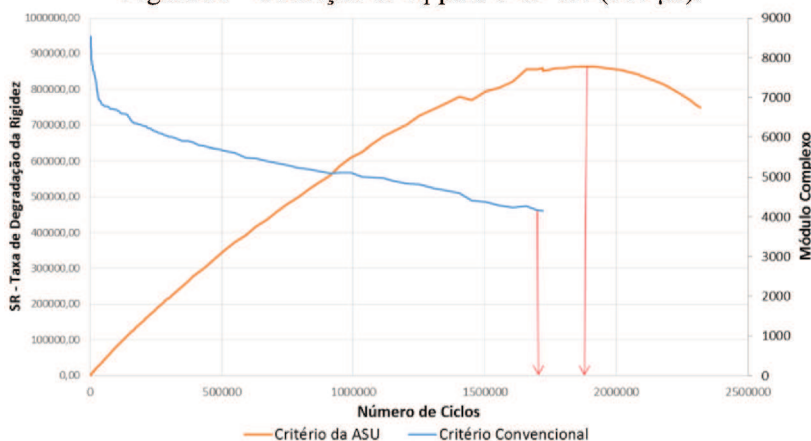
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conclui-se que todos os pontos de ruptura definidos pelo critério de Pronk e Hopman são muito mais conservadores que aqueles obtidos pelo critério convencional. A média, em porcentagem, da redução do número de ciclos necessários para romper material asfáltico avaliado

(ocasionar a falha por fadiga) é de 59,2%, ou seja, o critério energético apresenta pontos de ruptura muito menores que o critério convencional, reduzindo-os mais que a metade.

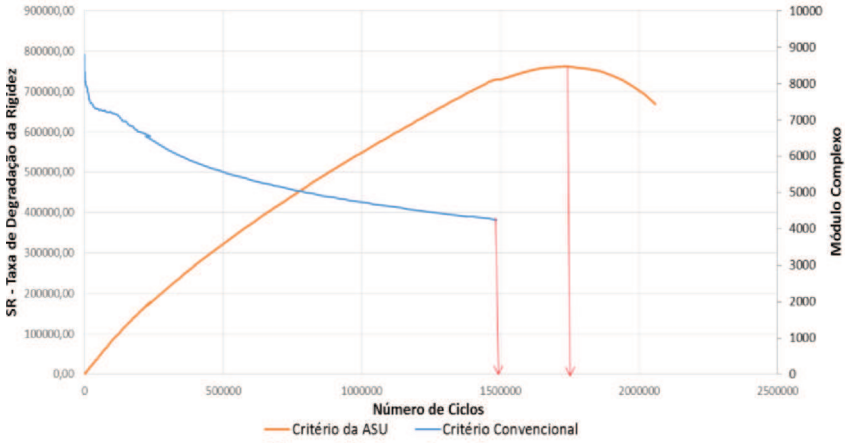
Assim como o critério anterior, o critério da ASU foi aplicado através dos dados brutos obtidos dos ensaios de fadiga realizados por Melo (2014). As Figuras 31 a 36 retratam, graficamente, um comparativo entre os pontos de ruptura gerados pelo critério convencional e o critério da ASU. Os pontos de ruptura foram adquiridos graficamente, apesar de existir a possibilidade de obtê-los com maior precisão matemática através da diferenciação das Equações que descrevem a taxa de degradação da rigidez.

Figura 31 - Obtenção de N_f para o CP 1.4 ($100 \mu\epsilon$).



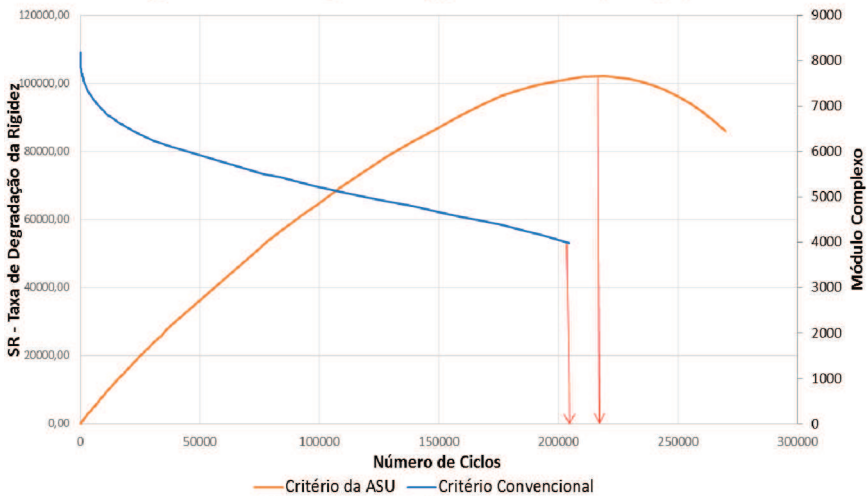
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Obtenção de N_f para o CP 3.4 (100 $\mu\epsilon$).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Obtenção de N_f para o CP 1.2 (150 $\mu\epsilon$).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Obtenção de N_f para o CP 2.2 ($150 \mu\epsilon$).

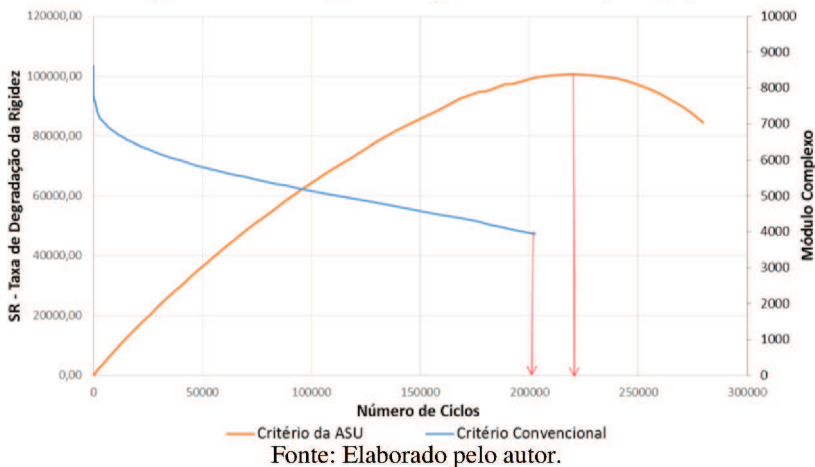


Figura 35 - Obtenção de N_f para o CP 1.5 ($200 \mu\epsilon$).

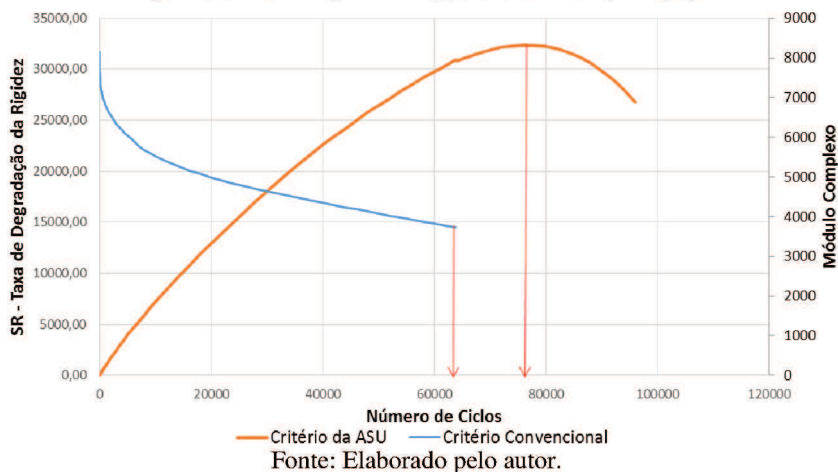
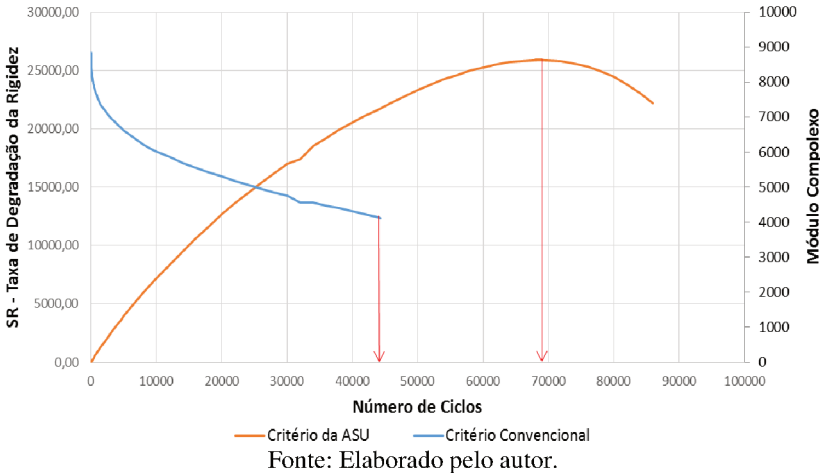


Figura 36 - Obtenção de N_f para o CP 2.3 (200 $\mu\epsilon$).



É interessante destacar o fato de que os ensaios de fadiga conduzidos por Melo (2014) são interrompidos assim que o número de carregamentos aplicados é suficiente para que a rigidez dos corpos de prova reduza em metade quando comparado ao seu valor inicial. Os pontos de ruptura adquiridos pelo critério da ASU apresentaram ciclos de carregamento maiores, ou seja, a rigidez das amostras é reduzida em valores maiores que 50%.

Por conta disto, fez-se uso de um modelo matemático para prolongar a degradação da rigidez promovida pelo teste à fadiga (considerando o critério de ruptura convencional). Os dados obtidos nesta estimativa (previsão do comportamento mecânico futuro) foram representados em função do número de ciclos e de sua respectiva rigidez, e com base nestas projeções se aplicou o critério da ASU.

A Tabela 3 apresenta todos os pontos de ruptura adquiridos graficamente pelo critério da ASU comparados ao critério convencional.

Tabela 3 - Pontos de ruptura segundo diferentes critérios – Convencional e ASU.

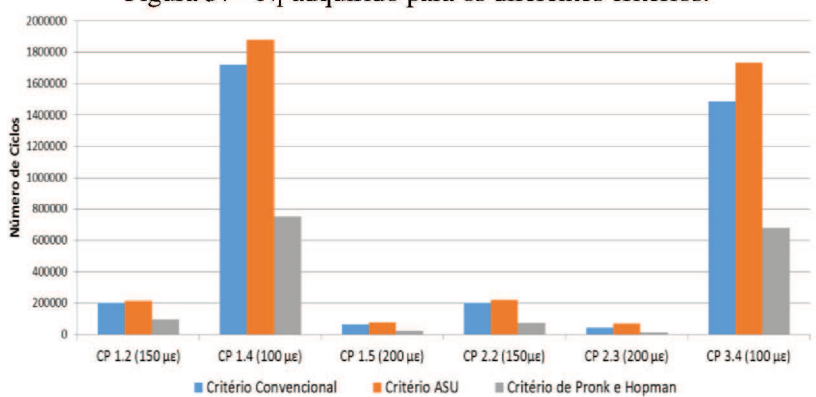
CP	Critério Convencional	Critério ASU	Ganho de N_f em %	Redução da Rigidez Inicial em %
CP 1.2	204386	217500	6,0	53,9
CP 1.4	1719490	1878500	8,5	54,3
CP 1.5	63775	76500	16,6	60,0
CP 2.2	202653	220000	7,9	57,5
CP 2.3	44220	69000	35,9	64,4
CP 3.4	1483987	1734000	14,4	56,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se concluir que o critério da ASU tende a apresentar um número de ciclos de carregamento para ruptura maior que o critério convencional, ou seja, consideram que o mesmo material asfáltico resiste mais ao fenômeno da fadiga. Quando comparados com o critério de Pronk e Hopman, os pontos de ruptura não se distanciam tanto daqueles obtidos por meio do critério convencional de ruptura. A média, em porcentagem, de acréscimo do número de ciclos necessários para romper com o material é de 14,9%.

A Figura 37 ilustra, por meio de um gráfico de barras, a diferença em magnitude de cada um dos pontos de ruptura obtidos de acordo com as microdeformações de controle aplicadas.

Figura 37 - N_f adquirido para os diferentes critérios.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que diz respeito à porcentagem de redução do módulo complexo inicial nos pontos de falha, o critério energético de Pronk e Hopman apresenta valores menores que 50% em todos os pontos de falha enquanto que o critério da ASU, que considera a taxa de degradação da rigidez, apresenta valores maiores. A Tabela 4 apresenta a média das porcentagens de redução da rigidez inicial de acordo com os critérios adotados e a sua variância, para descrever apropriadamente a dispersão dos pontos obtidos em cada um dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 4 - Porcentagem de redução da rigidez nos critérios avaliados.

Critério de Ruptura	Porcentagem de redução da rigidez inicial (%)	Variância
Pronk e Hopman	37,8	5,1
ASU	57,8	15,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Aqui se pode constatar que o critério da ASU possui uma maior dispersão do que o critério de Pronk e Hopman no que se refere à porcentagem de redução da rigidez inicial.

Os resultados obtidos nesta etapa do trabalho concordam com os resultados levantados pela Universidade do Arizona (SOULIMAN; ZEIADA; KALOUSH & MAMLOUK, 2012) e pela Universidade de Nottingham (MAGGIORE; GORDON & GRENFELL, 2013). Nos dois estudos citados, os critérios baseados na degradação da rigidez apresentaram pontos de falha com um número maior de ciclos solicitantes enquanto que os critérios baseados na dissipação de energia foram mais conservadores (com exceção do critério de Carpenter e Shen adotado pela Universidade de Nottingham, onde os resultados variaram consideravelmente dependendo da deformação aplicada).

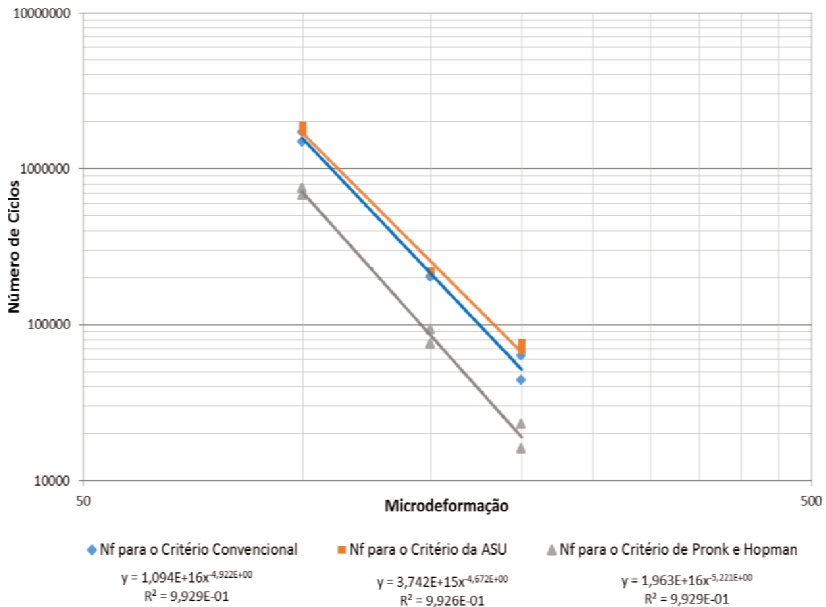
4.3 OBTENÇÃO DAS CURVAS DE FADIGA PARA CADA CRITÉRIO DE RUPTURA ESTUDADO

4.3.1 Abordagem Fenomenológica

Com os pontos de ruptura adquiridos por meio dos diferentes critérios de ruptura analisados, construiu-se a curva de fadiga final para definir o desempenho mecânico do material. Na abordagem fenomenológica, correlacionam-se diretamente as amplitudes das

microdeformações aplicadas para cada uma das amostras ensaiadas com os respectivos pontos de ruptura adquiridos. O gráfico final elaborado é plotado em escalas log-log. A Figura 38 demonstra a montagem da curva final de fadiga para a abordagem fenomenológica. Ressalta-se que a curva referente ao método convencional é de Melo (2016), as demais foram obtidas neste trabalho, através do tratamento dos dados gerados por Melo (2014).

Figura 38 - Curvas de fadiga: abordagem fenomenológica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 resume as informações que serviram de base para a modelização da curva de fadiga, com os pontos de ruptura calculados para cada um dos diferentes critérios de ruptura e as microdeformações atuantes em cada um dos corpos de prova.

Tabela 5 - Pontos de ruptura e microdeformações de controle.

CP	Critério Convencional	Critério ASU	Critério Pronk e Hopman	Microdeformação ($\mu\epsilon$)
CP 1.2	204386	217500	93685	150
CP 1.4	1719490	1878500	750855	100
CP 1.5	63775	76500	23000	200
CP 2.2	202653	220000	75568	150
CP 2.3	44220	69000	16000	200
CP 3.4	1483987	1734000	678393	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Tabela 6 demonstra as equações de fadiga obtidas para cada um dos critérios de ruptura e o coeficiente de correlação (R^2). Quando este coeficiente se aproxima do valor 1, o modelo tende a explicar com mais precisão os valores observados, ou seja, o ajustamento realizado para concepção da curva linear generalizada é representativo. Em todos os critérios adotados pelo método de análise fenomenológico foram adquiridos coeficientes de correlação elevados (acima de 0,9), indicando uma ótima correspondência entre todos os pontos de ruptura adquiridos.

Tabela 6 - Vida de fadiga na abordagem fenomenológica.

Critérios	Equação da Fadiga	R^2
Convencional	$N_f = 1,094 \times 10^{16} \epsilon_t^{-4,922}$	0,9929
ASU	$N_f = 3,742 \times 10^{15} \epsilon_t^{-4,672}$	0,9926
Pronk e Hopman	$N_f = 1,963 \times 10^{16} \epsilon_t^{-5,221}$	0,9929

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo os resultados obtidos, pode-se constatar que as curvas de fadiga adquiridas por meio dos critérios baseados na degradação da rigidez (convencional e ASU) são bastante semelhantes, com o critério da ASU apresentando aumento de desempenho à fadiga. Devido à diferença da inclinação entre estas duas curvas, para microdeformações elevadas (maiores que 200 $\mu\text{m/m}$), ou seja, revestimentos asfálticos com pouca espessura ou rigidez, o critério da ASU apresenta maior resistência à fadiga. Entretanto, para pavimentos flexíveis de maiores espessuras que apresentem pequenas microdeformações de tração na fibra inferior da camada asfáltica (menores que 100 $\mu\text{m/m}$), o critério convencional de ruptura apresenta melhores desempenhos à fadiga.

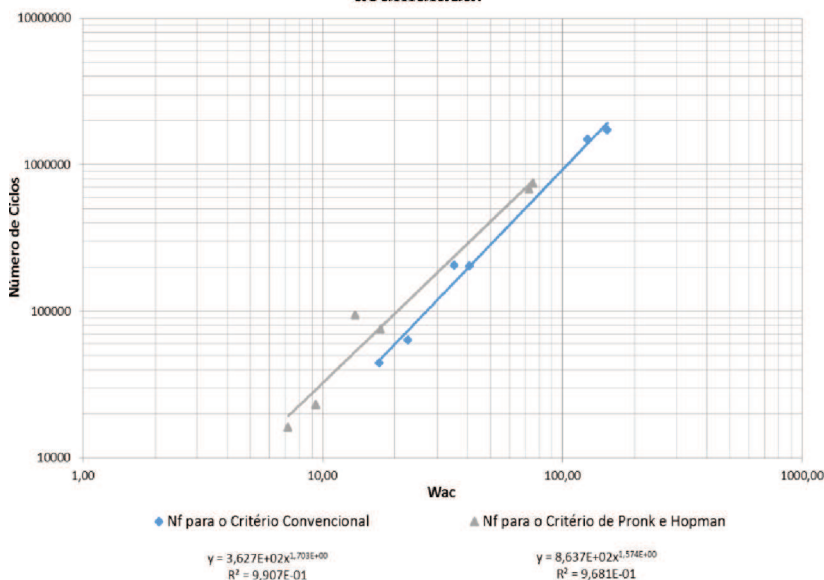
Em todos os casos o critério energético de Pronk e Hopman demonstra apresentar menor resistência à fadiga. Isto evidencia que é muito mais conservador avaliar a taxa de energia dissipada necessária para levar o material asfáltico à ruptura.

Vale salientar que todas estas conclusões foram baseadas na metodologia de análise fenomenológica, que simplifica o comportamento mecânico do material quando submetido à fadiga por carregamentos cíclicos.

4.3.2 Abordagem Mecanicista: Consideração da Energia Dissipada Acumulada

As curvas de fadiga elaboradas através da abordagem mecanicista de energia relacionam o desempenho à fadiga do material asfáltico com a energia dissipada acumulada na realização de trabalho, e conseqüentemente, na geração de danos. A Figura 39 apresenta as curvas de fadiga obtidas pela análise mecanicista, considerando o critério de ruptura convencional e o critério energético.

Figura 39 - Curvas de fadiga: abordagem da energia dissipada acumulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 resume as informações necessárias para a construção da curva de fadiga elaborada e ilustrada na Figura 39. Os valores de energia dissipada acumulada são pegos para os ciclos de carregamento onde ocorre a ruptura por fadiga de acordo com os diferentes critérios avaliados e estes dados são retirados diretamente do *Software UTS018* utilizado durante o ensaio de resistência à fadiga.

Tabela 7 - Pontos de ruptura e a respectiva energia dissipada acumulada (MJ/m^3).

CP	Critério Convencional	Critério de Pronk e Hopman	Energia Dissipada Acumulada (W_{ac} para Nf de 50%)	Energia Dissipada Acumulada (W_{ac} para Nf de Pronk e Hopman)
CP 1.2	204386	93685	35,34	13,65
CP 1.4	1719490	750855	154,15	75,45
CP 1.5	63775	23000	22,67	9,34
CP 2.2	202653	75568	41,07	17,48
CP 2.3	44220	16000	17,28	7,18
CP 3.4	1483987	678393	127,67	72,59

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 retrata as equações de fadiga para os diferentes critérios de ruptura avaliados nesta abordagem, juntamente com os coeficientes de correlação (R^2). Em todos os critérios adotados pelo método de análise mecanicista foram adquiridos coeficientes de correlação elevados (acima de 0,9), indicando uma ótima correspondência entre todos os pontos de ruptura adquiridos.

Tabela 8 - Vida de fadiga na abordagem de energia dissipada acumulada.

Critérios	Equação da Fadiga	R^2
Convencional	$N_f = 3,627 \times 10^2 W_{ac}^{1,703}$	0,9907
Pronk e Hopman	$N_f = 8,637 \times 10^2 W_{ac}^{1,574}$	0,9681

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da metodologia de análise mecanicista que envolve a energia dissipada acumulada para explicar os processos de deterioração por fadiga no material asfáltico, as curvas geradas pelo critério

energético de Pronk e Hopman apresentam um maior desempenho à fadiga para um mesmo valor de energia dissipada acumulada. Entretanto, devido à inclinação das curvas obtidas, para valores energéticos acumulados maiores que 840 MJ/m^3 , o critério convencional de ruptura tende a apresentar uma resistência à fadiga maior que o critério de Pronk e Hopman.

Vale salientar que, durante o estudo realizado segundo esta abordagem, não são inseridos diretamente nas equações de fadiga um mesmo valor de energia dissipada acumulada, pois esta é adquirida através de um modelo matemático que correlaciona a energia dissipada inicial com a final acumulada para cada um dos pontos de ruptura obtidos e este valor varia de acordo com os diferentes critérios. Portanto, durante a modelização do pavimento, podem-se adquirir resultados bem distintos no que diz respeito a qual critério é mais ou menos conservador, ou seja, que apresenta um desempenho à fadiga maior ou menor.

4.4 MODELIZAÇÃO RACIONAL DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

Esta última fase do trabalho teve como objetivo primordial a modelização da estrutura de um pavimento flexível, utilizando os diferentes modelos de fadiga obtidos por diferentes critérios de ruptura e métodos/abordagens de análise.

A estrutura do pavimento simulado foi igual àquela utilizada na tese de doutoramento de Melo (2014), e diz respeito a um segmento monitorado na BR-101/SC, coordenado pela Rede Temática de Tecnologia do Asfalto/Petrobras. Sua localização fica entre os km 411,5 e 412,5, no contorno viário da cidade de Araranguá/SC.

A seguir é apresentada a constituição do pavimento flexível analisado simulado:

- Camada do revestimento asfáltico com 18 cm de espessura;
- Camada de base com 18 cm de espessura em brita graduada;
- Camada da sub-base em macadame seco com 20 cm de espessura;
- Camada de fundação ou camada final de terraplanagem em páleo duna (jazida).

Os parâmetros elásticos inseridos no *Software ViscoRoute* foram adquiridos por meio de uma retroanálise da estrutura do pavimento. Melo (2014) realizou este procedimento através do programa BAKFAA – FAA backcalculation, apresentando os seguintes resultados, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros elásticos inseridos para modelização do pavimento flexível.

Parâmetros Elásticos	Camada da Base (Brita Graduada)	Camada da Sub-Base (Macadame Seco)	Camada da Fundação (Páleo Duna)
E (MPa)	260	210	180
ν	0,35	0,35	0,35

Fonte: MELO (2014).

Já para a camada asfáltica, o módulo é calculado pelo próprio programa a partir do modelo reológico de Huet-Sayegh, em função da velocidade do eixo de 8,2 ton e da temperatura do revestimento asfáltico. A Tabela 10 apresenta os parâmetros deste modelo reológico para a mistura asfáltica estudada, os quais foram determinados por Melo (2014).

Tabela 10 - Parâmetros viscoelásticos do modelo reológico de Huet-Sayegh e inseridos no *Software ViscoRoute*.

Parâmetros Viscoelásticos de Entrada	Mistura Avaliada
E_{∞} (MPa)	33864,1
E_0 (MPa)	1,23756
ν	0,3
A_0	3,2907
A_1	-0,487376
A_2	0,0034478
Δ	1483987
K	0,56079
H	0,166642

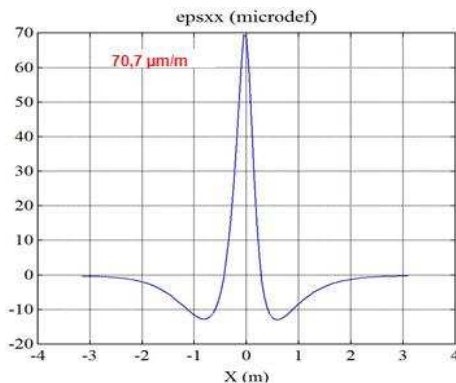
Fonte: MELO (2014).

A partir dos parâmetros elásticos e viscoelásticos das camadas do pavimento, e com as espessuras iniciais adotadas, conseguiu-se preencher todas as informações necessárias no que diz respeito à estrutura a ser simulada. Contudo, ainda foi necessário definir o carregamento sobre a estrutura.

Quanto ao carregamento, foi considerado o eixo simples de roda dupla de 8,2 ton, com as seguintes características: distância entre rodas de 32 cm, carga por roda de 2050 kgf, área de contato circular com raio de 10,8 cm (366 cm²) e pressão de contato pneu/pavimento de 5,6 kgf/cm². A velocidade do veículo foi definida em 20 m/s (72 km/h), ou seja, a uma frequência aproximada de 10 Hz.

Por fim, determinou-se a maior microdeformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica. A Figura 40 ilustra os resultados apresentados pelo *Software Viscoroute*, onde o eixo das abcissas retrata a distância do semieixo de roda dupla com relação a um ponto central entre as duas cargas aplicadas pelos pneus e o eixo das ordenadas representa a própria microdeformação de tração.

Figura 40 - Variação da deformação na fibra inferior da camada asfáltica analisada.



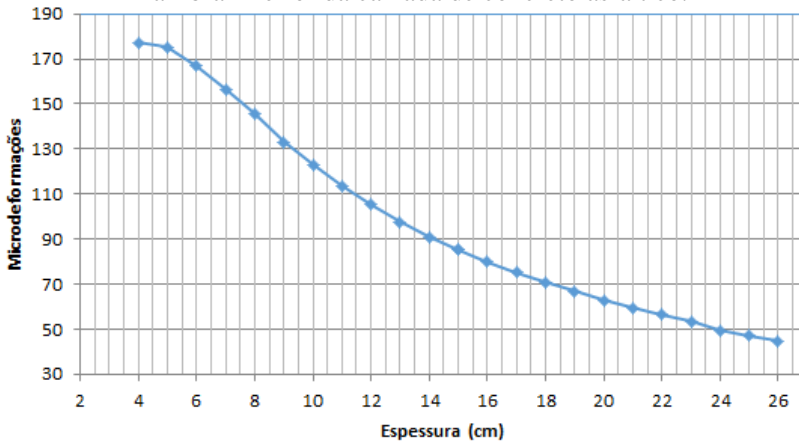
Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico apresentado condiz com as análises realizadas por Perret (2003), ou seja, existe uma alternância entre as deformações de compressão e tração com relação ao ponto crítico central. A camada de concreto asfáltico passa a se deformar quando a carga solicitante está a 3 metros do ponto em análise: inicialmente se comprimindo com a aproximação dos esforços solicitantes, depois adquirindo um valor

máximo de pico de tração, e por fim voltando ao estado de compressão, conforme a carga se afasta. Não existe relação de proporcionalidade entre as mudanças de sinal das microdeformações adquiridas, conforme já verificado por Melo (2014).

O dimensionamento racional do pavimento flexível depende da relação entre a espessura adotada na camada asfáltica e a microdeformação de tração máxima da fibra inferior da mesma camada. Portanto, deve-se elaborar um gráfico representativo que sirva de base para a modelização do pavimento flexível. Este gráfico, retratado na Figura 41, é adquirido mudando-se a espessura do revestimento asfáltico durante a inserção dos dados no *Software Viscoroute*, mantendo todas as outras condições inalteradas.

Figura 41 - Relação entre a espessura e as microdeformações de tração na fibra inferior da camada de concreto asfáltico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a elaboração deste gráfico, pode-se estimar finalmente o desempenho em serviço do material asfáltico com o uso das equações de fadiga adquiridas na etapa anterior deste trabalho. A vida útil à fadiga do revestimento asfáltico depende de quantos ciclos de carregamento este revestimento consegue resistir até que se alcance a ruptura. Como já mencionado anteriormente, este valor necessário para levar o pavimento à ruptura varia de acordo com diferentes critérios e abordagens de análise. A Tabela 11 representa a vida à fadiga do mesmo revestimento asfáltico com 18 cm de espessura e 70,7 $\mu\text{m/m}$ de deformação na fibra

inferior da camada asfáltica, mas considerando as diferentes equações de fadiga elaboradas para cada critério de ruptura.

Tabela 11 - Desempenho mecânico de vida à fadiga para a abordagem fenomenológica.

Crítérios	Equação da Fadiga	$\epsilon_t = 70,7 \mu\text{m/m}$
Convencional	$N_f = 1,094 \times 10^{16} \epsilon_t^{-4,922}$	$8,633 \times 10^6$
ASU	$N_f = 3,742 \times 10^{15} \epsilon_t^{-4,672}$	$8,563 \times 10^6$
Pronk e Hopman	$N_f = 1,963 \times 10^{16} \epsilon_t^{-5,221}$	$4,336 \times 10^6$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se constatar, segundo os resultados apresentados, que o critério convencional de ruptura apresenta maior vida útil à fadiga para uma microdeformação de $70,70 \mu\text{m/m}$, seguido do critério da ASU e de Pronk e Hopman. Isto relata que é mais conservador considerar a falha por fadiga segundo critérios baseados na energia dissipada.

Transformando os diferentes N_f adquiridos pelos critérios da ASU e de Pronk e Hopman no N_f obtido pelo critério convencional de ruptura, têm-se valores distintos de microdeformações de tração agindo na fibra inferior da camada de concreto asfáltico. Enquanto que no critério convencional foi utilizada uma microdeformação de $70,70 \mu\text{m/m}$, para uma mesma vida útil à fadiga, o critério da ASU apresentaria uma microdeformação de $70,58 \mu\text{m/m}$ e o critério de Pronk e Hopman de $61,96 \mu\text{m/m}$. Em termos de espessura de pavimento, a primeira coluna da Tabela 12 resume o dimensionamento realizado para estas microdeformações com base na Figura 41.

Tabela 12 - Dimensionamento racional de pavimentos flexíveis adotando-se diferentes critérios de ruptura por fadiga (abordagem fenomenológica).

Crítérios	Espessura do revestimento para um mesmo N_f - $70,70 \mu\text{m/m}$ calculado a partir do critério convencional (cm)	Espessura do revestimento para um mesmo N_f - $145,69 \mu\text{m/m}$ calculado a partir do critério convencional (cm)
Convencional	18,00	8,00
ASU	18,02	7,49
Pronk e Hopman	20,29	10,04

Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda coluna da Tabela 12 busca igualar a vida útil à fadiga de camadas asfálticas mais delgadas, ou seja, considerou como base um N_f calculado a partir do critério convencional de ruptura com uma microdeformação de 145,69 $\mu\text{m/m}$. Os critérios da ASU e de Pronk e Hopman apresentariam microdeformações de 151,17 $\mu\text{m/m}$ e 122,51 $\mu\text{m/m}$, respectivamente, para adquirirem um mesmo N_f que o critério convencional. A comparação dos resultados é feita em termos de espessura de pavimento.

Conclui-se que, segundo uma abordagem fenomenológica de análise, para pavimentos asfálticos flexíveis de maior espessura, o critério convencional apresenta valores menos conservadores, enquanto que, para pavimentos mais delgados, o critério da ASU ocupa esta posição. Isto ocorre porque as curvas de fadiga adquiridas pelos critérios baseados na degradação da rigidez estão muito próximas entre si, com o critério da ASU apresentando um posicionamento menos conservador para microdeformações maiores (100 $\mu\text{m/m}$, 150 $\mu\text{m/m}$ e 200 $\mu\text{m/m}$), porém, devido à inclinação da curva de fadiga, apresenta valores mais conservadores para microdeformações menores que 100 $\mu\text{m/m}$.

Em termos de porcentagem, tem-se um acréscimo de 0,11% da espessura do pavimento para o critério da ASU e de 12,72% para o critério de Pronk e Hopman, tendo como base uma espessura de 18 cm e vida útil à fadiga de $8,633 \times 10^6$ ciclos (critério convencional). Já em pavimentos delgados, tem-se um acréscimo de 25,50% para o critério de Pronk e Hopman e redução de 6,38% para o critério da ASU, com relação a uma espessura de 8 cm e vida útil à fadiga de $2,458 \times 10^5$ ciclos (critério convencional).

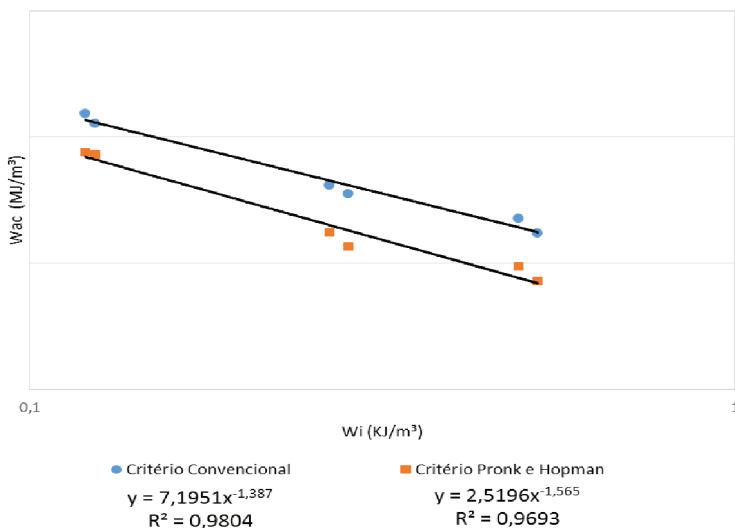
É interessante apontar que todos os cálculos foram elaborados em cima da relação espessura/microdeformação máxima de tração atuante na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, e o cálculo da vida útil à fadiga é feita de forma bastante simplificada inserindo os valores de deformações nas equações de fadiga obtidas por meio da abordagem fenomenológica. As condições de temperatura, espessuras das camadas elásticas, parâmetros elásticos e viscoelásticos e o tipo de carregamento imposto (semieixo de roda dupla) se mantém inalterados em todas as análises realizadas.

Na abordagem de energia dissipada acumulada, deve-se primeiro transformar as microdeformações de tração em energia dissipada inicial, conforme a Equação 13. Esta equação depende também dos valores do módulo complexo e de ângulo de fase, que são obtidos por meio de diferentes temperaturas e frequências de carregamento atuantes no revestimento asfáltico. Melo (2014) compilou estes valores através de

testes realizados para adquirir o módulo complexo da amostra estudada. Uma temperatura de 20 °C e frequência de carregamento de 10 Hz (20 m/s ou 72 km/h, conforme solicitação do semieixo de roda dupla) apresenta um ângulo de fase de 24,4° e módulo complexo de 7895 MPa.

Logo após adquirir o valor de energia dissipada inicial, busca-se relacionar graficamente este parâmetro com a energia dissipada acumulada para obtenção do número de ciclos onde ocorrerá a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico (utilizando diferentes critérios de ruptura). A Figura 42 ilustra estas correlações para os diferentes critérios adotados nesta abordagem.

Figura 42 - Relação gráfica entre a energia dissipada inicial e a energia dissipada acumulada para os diferentes critérios de ruptura abordados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale lembrar que este gráfico foi construído através de uma relação entre a energia dissipada inicial para o ciclo número 50 em cada um dos corpos de prova e a energia dissipada acumulada final no ponto de ruptura por fadiga (segundo o critério adotado).

Convertendo a microdeformação de tração de 70,7 $\mu\text{m/m}$ em energia dissipada inicial (W_i) através da Equação 13 e utilizando a função esquematizada na Figura 42, obteve-se um valor de 443,7 MJ/m³ de energia dissipada acumulada para o critério convencional e 263,7

MJ/m³ para o critério de Pronk e Hopman. Com isto, faz-se uso da equação da fadiga para a abordagem mecanicista de energia dissipada acumulada para avaliar a vida útil à fadiga do revestimento asfáltico considerando os diferentes critérios de ruptura. A Tabela 13 ilustra esta etapa da análise realizada.

Tabela 13 - Desempenho mecânico de vida à fadiga para os critérios abordados – Análise mecanicista de energia dissipada acumulada.

Crítérios	Equação da Fadiga	W_{ac} (MJ/m³) = 443,7 (Conv.) e 263,7 (Pronk e Hopman)
Convencional	$N_f = 3,627 \times 10^2 W_{ac}^{1,703}$	$1,168 \times 10^7$
Pronk e Hopman	$N_f = 8,637 \times 10^2 W_{ac}^{1,574}$	$5,587 \times 10^6$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já se pode concluir com os valores da Tabela 13 que o critério de Pronk e Hopman baseado na energia dissipada continua a ser mais conservador do que o critério convencional de redução de 50% da rigidez inicial do material asfáltico, mesmo com uma concepção distinta das curvas de fadiga. Comparando as abordagens mecanicista e fenomenológica, existe uma diferença de 26,10% na vida útil à fadiga para os critérios convencionais de ruptura e de 22,39% na vida útil para os critérios de Pronk e Hopman.

Isto evidencia que a abordagem mecanicista de energia dissipada acumulada tende a apresentar valores de resistência à fadiga maiores do que a abordagem fenomenológica que considera diretamente as microdeformações de tração máximas atuantes na fibra inferior da camada asfáltica.

A Tabela 14 foi elaborada da mesma forma que a Tabela 12: compara-se a espessura do revestimento asfáltico para o mesmo N_f adquirido para o critério convencional de ruptura com microdeformação de tração de 70,7 $\mu\text{m/m}$. A diferença é na obtenção deste N_f : converte-se os valores de microdeformação, ângulo de fase e módulo complexo em energia dissipada inicial, logo após a energia dissipada inicial é convertida em energia dissipada acumulada (uso da correlação da Figura 42) e por fim adquire-se o N_f com base nesta energia dissipada acumulada calculada. Todas as condições de carregamento, temperatura e dimensões adotadas nas camadas elásticas se mantém inalteradas.

Tabela 14 - Dimensionamento racional de pavimentos flexíveis adotando-se diferentes critérios de ruptura por fadiga (abordagem mecanicista de energia dissipada acumulada).

Crítérios	Espessura do pavimento para um mesmo N_f - 70,7 $\mu\text{m}/\text{m}$ calculado a partir do critério convencional (cm)	Espessura do pavimento para um mesmo N_f - 145,69 $\mu\text{m}/\text{m}$ calculado a partir do critério convencional (cm)
Convencional	18,00	8,00
Pronk e Hopman	20,62	10,11

Fonte: Elaborado pelo autor.

É interessante destacar que a espessura do pavimento está correlacionada com a microdeformação de tração e esta microdeformação é equivalente a um determinado valor de vida útil a fadiga, ou seja, de desempenho mecânico com relação à solicitação de cargas cíclicas. Percebe-se que, apesar da vida útil à fadiga se alterar consideravelmente entre as diferentes metodologias, as espessuras de revestimento possuem diferenças bem irrelevantes, como é evidenciado no critério de Pronk e Hopman: 20,29 cm na abordagem fenomenológica e 20,62 cm na abordagem mecanicista.

Em termos de porcentagem de acréscimo dentro da abordagem mecanicista, o critério de Pronk e Hopman aumentou em 14,56% a espessura do revestimento, com relação a um pavimento de 18 cm de espessura e 70,7 $\mu\text{m}/\text{m}$ de deformação, e em 26,38% para camadas asfálticas mais delgadas, com 8 cm de espessura e 145,69 $\mu\text{m}/\text{m}$ de deformação.

A conclusão final destas análises de dimensionamento racional elaboradas é que a abordagem fenomenológica é muito mais simples para se adquirir o desempenho em serviço à fadiga, mesmo adotando-se diferentes critérios de ruptura. Também é interessante destacar o fato de que a abordagem mecanicista para obtenção do fim da vida útil do revestimento, não apresenta valores de N_f consideravelmente maiores do que aqueles adquiridos pela abordagem fenomenológica em termos de espessura do revestimento.

No que se refere aos critérios de falha analisados, o critério de Pronk e Hopman apresenta, em todos os estudos elaborados, o pavimento mais espesso, ou seja, mais conservador em termos de resistência à fadiga. O critério da ASU e convencional são bastante semelhantes entre si, variando, no que diz respeito de qual deles é mais

conservador ou não conservador de acordo com o pico da microdeformação de tração resultante dos esforços solicitantes, ou seja, de acordo com a espessura de execução adotada para o revestimento asfáltico. Em termos teóricos, apesar do critério de ruptura convencional ainda ser o mais simplista para se adquirir os pontos de ruptura por fadiga, ainda deixa a desejar por sua subjetividade e desconsideração dos processos internos da degradação da rigidez.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos conduzidos neste trabalho constataram que os critérios avaliados de ruptura por fadiga apresentam algumas diferenças peculiares quanto à vida útil ou desempenho em serviço do pavimento.

As análises foram conduzidas através das abordagens fenomenológica e mecanicista, ambas considerando parâmetros distintos na concepção da curva de fadiga. Enquanto que na abordagem fenomenológica são adotadas as microdeformações de tração na fibra inferior do concreto asfáltico para definir a vida útil à fadiga do revestimento, na abordagem mecanicista considera-se a energia dissipada acumulada necessária para que a amostra entre em ruptura pelo número de ciclos solicitante.

A abordagem fenomenológica é amplamente utilizada para definir o comportamento mecânico de resistência à fadiga no concreto asfáltico, mas tem como uma das principais desvantagens a sua concepção empírica que limita a sua aplicação em modelos mais complexos de carregamento e níveis de tensões muito baixas.

A abordagem mecanicista de energia dissipada acumulada é bastante interessante para explicar a redução gradativa das propriedades mecânicas do concreto asfáltico, mas tem como principal desvantagem a consideração de toda a energia dissipada na concepção das curvas de fadiga, inclusive aquela consumida pelo processo de amortecimento que só produz calor e não contribui para a evolução dos danos por fadiga.

Comparando-se o comportamento mecânico de um pavimento flexível perante estes dois métodos de análise considerados, a abordagem de energia dissipada acumulada apresentou revestimentos asfálticos mais resistentes com relação à fadiga, ou seja, com um número de ciclos mais elevado para alcançar a ruptura. Contudo, os revestimentos asfálticos não possuíram grandes diferenças em termos de espessura.

Os procedimentos necessários para concepção das curvas de fadiga pela abordagem mecanicista foram muito mais complexos, sendo sujeitos a uma gama maior de variáveis. Quando avaliados pavimentos com uma espessura delgada de revestimento asfáltico, ambas as abordagens apresentaram, novamente, resultados semelhantes em termos de espessura.

O critério de ruptura baseado na energia dissipada (Pronk e Hopman) foi sem dúvida o que produziu menores pontos de ruptura se comparados aos outros dois critérios. Neste sentido, conclui-se que a aplicação deste critério de ruptura por fadiga é muito mais conservadora

e apresenta maior consumo de material no que diz respeito à execução do revestimento asfáltico.

Os critérios baseados na degradação da rigidez, tais como o critério convencional de redução em 50% da rigidez inicial e o critério da ASU, apresentaram curvas de fadiga bastante semelhantes na abordagem fenomenológica. Ambos se diferenciaram muito pouco no que diz respeito à resistência a fadiga e espessura do revestimento asfáltico. Em deformações menores que 100 $\mu\text{m/m}$, o critério convencional de ruptura apresenta valores menos conservadores, ou seja, de maior resistência à fadiga. Em níveis de deformações maiores que 100 $\mu\text{m/m}$, o critério da ASU passa a ser o menos conservador (espessuras menores de revestimento) e com maior vida útil à fadiga.

Apesar de ser bastante muito simples para determinação dos pontos de ruptura, o critério convencional usado para avaliar a resistência à fadiga ainda é considerado muito subjetivo quanto à descrição dos processos de deterioração da rigidez do material asfáltico. Por conta deste requisito, o critério da ASU de ruptura tende a ter uma melhor confiabilidade no que diz respeito à aplicação em temperaturas e frequências de carregamento mais elevadas, além de ser independentemente do modo como os ensaios de fadiga são realizados (modo de deformação ou tensão controlada).

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar análises estatísticas mais aprofundadas nos diferentes critérios de ruptura abordados, tais como o teste t de Student, que valida ou não hipóteses nulas com base em conceitos probabilísticos da distribuição dos valores de ruptura adquiridos;
- Aplicar outros critérios de ruptura por fadiga, tais como o critério de Shen e Carpenter e o critério de Franken, e comparar os resultados adquiridos no que diz respeito à resistência à fadiga e dimensionamento racional de revestimentos asfálticos;
- Considerar outras formas de abordagens mecanicistas na concepção de novos pavimentos asfálticos que envolvam a consideração da mecânica da fratura ou projeção do dano contínuo;
- Comparar as influências exercidas pela diferença de frequência e temperatura em um mesmo critério de ruptura não convencional;
- Avaliar a vida útil de um pavimento asfáltico quando considerados critérios de ruptura semelhantes, mas com parâmetros de controle diferentes aplicados nos ensaios de fadiga (amplitudes constantes de deformação ou tensão).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO M 323: Standard specification for Superpave volumetric mix design.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2013.

_____. **AASHTO R 30: Standard practice for mixture conditioning of hot-mix asphalt (HMA).** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2010.

_____. **AASHTO R 35: Standard practice for superpave volumetric design for hot-mix asphalt (HMA).** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.

_____. **AASHTO T 112: Standard method of test for clay lumps and friable particles in aggregate.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.

_____. **AASHTO T 176: Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2008.

_____. **AASHTO T 283: Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2011.

_____. **AASHTO T 321: Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2014.

ABOJARADEH, M.; WITCZAK, M.; MAMLOUK, M.; KALOUSH, K. **Validation of Initial and Failure Stiffness Definitions in Flexure**

Fatigue Test for Hot-Mix Asphalt. Journal of Testing and Evaluation, c. 35. p. 95-102. USA. 2007.

ABOJARADEH, Mohammad. **Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio.** Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 7, No. 1. 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6954: Lastro-Padrão- Determinação da forma do material.** 1989.

AFNOR – Association Française de Normalisation; **AFNOR NF P 98-253-1: Préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 1: essai d’orniérage.** Association Française de Normalisation. AFNOR. 1993.

AL-KHATEEB, Ghazi; SHENOY, Aroon. **A Distinctive Fatigue Failure Criteria.** Journal of the AAPT, Vol 3. p. 21. Jordan. 2004.

ALMEIDA, Adosindro Joaquim de. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Aplicação dos Aditivos *PR Plast S* e *PR Plast 20* no Módulo Complexo e na Fadiga.** Tese (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p. 25-27 e 67-81. 2013.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM C 88: Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate.** USA. 2013.

_____. **ASTM C 127: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.** USA. 2012.

_____. **ASTM C 131: Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine.** USA. 2006.

_____. **ASTM C 1252: Standard test methods for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture and grading).** USA. 2006.

_____. **ASTM D 5: Standard test method for penetration of bituminous materials.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 36: Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus).** USA. 2014.

_____. **ASTM D 3497: Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures.** USA. 1995.

_____. **ASTM D 4402: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 5821: Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 7460: Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending.** USA. 2010.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro. 504 f. 2008.

COLPO, Gracieli Bordin. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. p. 38-48. 2014.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2016:** relatório geral. 20ª ed. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2016.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 084: Agregado miúdo – Determinação da densidade real.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1995.

_____. **DNER-ME 085: Material finamente pulverizado – Determinação da massa específica real.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT – IPR -719: Manual de Pavimentação**. 3º Edição. Rio de Janeiro. 2006.

EN – European Standard. **EN 12697:24: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt, part 24: Resistance to fatigue**. CEN, Brussels. 2004.

_____. **EN 12697-26: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 26: Stiffness**. CEN, Brussels. 2004.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese (Doutorado). Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina. p. 91-99. 2009.

KHALID, H. A. **Comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials**. *Materials & Structures*, v.33, n 231, p. 457. 2000

KHIAVI, A. Khavandi; AMERI, Mahmoud. **Laboratory Evaluation of Strain Controlled Fatigue Criteria in Hot Mix Asphalt**. *Construction and Building Materials*. Department of Civil Engineering, Zanjan University and Iran University of Science and Technology. Iran. 2013.

MAGGIORE, Cinzia; AIREY, Gordon; GRENFELL, James. **Evaluation of Different Fatigue Failure Criteria for Asphalt Material Using Laboratory Tests**. Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom. 2013.

MAGGIORE, Cinzia; AIREY, Gordon; MARSAC, Paul. **A Dissipated Energy Comparison to Evaluate Fatigue Resistance Using 2-Point Bending**. Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom. IFSTTAR, Nantes, France. 2014.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. 1º Ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 1997.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e Estudo do Comportamento Reológico e Desempenho Mecânico de Concretos Asfálticos Modificados com Nanocompósitos**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2014.

MINHOTO, Manuel Joaquim da Costa. **Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia, Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal. p. 100-106. 2005.

PERRET, J. **Déformation des Couches Bitumineuses au Passage d'une Charge de Trafic**. Tese (Doutorado). École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Lausanne, France. 2003.

PINTO, Salomão. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. p. 49. 1991.

QUINTERO, Carlos Fernando Quintero. **Influência da Temperatura e da Consistência do Ligante na Fadiga e no Módulo Complexo de Misturas Asfálticas**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p. 57-69. 2016.

ROSA, Edison da. **Análise de Resistência Mecânica (Mecânica da Fratura e Fadiga)**. Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p. 223-226. 2002.

SHRP, A-312. **Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures**. Strategic Highway Research Program, National Research Council. p. 18 e p. 36-54. 1990.

SIMM, Guido Paulo J. **Estudo do Comportamento de Estruturas de Pavimentos com Materiais Alternativos Visando a Redução dos Custos de Pavimentação no Estado de Santa Catarina**. Tese (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p. 8-10. 2007.

SOULIMAN, M. I.; ZEIADA, W. A.; KALOUSH, K. E.; MAMLOUK, M. S. **Assessment of Different Flexure Fatigue Failure Analysis Methods to Estimate the Number of Cycles to Failure of Asphalt Mixtures.** Four Point Bending, Chapter 3. 2012.

SYBILSKI, Dariusz; BANKOWSKI, Wojciech. **Energetic Method as an Alternative for Conventional Method in Fatigue Life Analysis of Bituminous Mixtures.** Pavement Technology Division, Road and Bridge Research Institute , Poland. 2007.