

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GEORGIA GEOVANIA PEREIRA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À
FADIGA DA MISTURA ASFÁLTICA E NA ESTIMATIVA DA
VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO: ABORDAGEM DA ENERGIA
DISSIPADA ACUMULADA E FENOMENOLÓGICA**

Florianópolis
2017

GEORGIA GEOVANIA PEREIRA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À
FADIGA DA MISTURA ASFÁLTICA E NA ESTIMATIVA DA
VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO: ABORDAGEM DA ENERGIA
DISSIPADA ACUMULADA E FENOMENOLÓGICA**

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

Orientador: 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.

Pereira, Georgia Geovania

Influência da temperatura na resistência à fadiga da mistura asfáltica e na estimativa da vida útil do pavimento : abordagem da energia dissipada acumulada e fenomenológica / Georgia Geovania Pereira ; orientador, João Victor Staub de Melo, 2017.

122 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. Engenharia Civil. 3. Pavimentação. 4. Revestimento asfáltico . 5. Fadiga. I. Melo, João Victor Staub de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

GEORGIA GEOVANIA PEREIRA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À
FADIGA DA MISTURA ASFÁLTICA E NA ESTIMATIVA DA
VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO: ABORDAGEM DA ENERGIA
DISSIPADA ACUMULADA E FENOMENOLÓGICA**

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, 5 de dezembro de 2017.

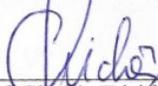


Prof.ª Luciana Rohde, Dr.ª
Coordenadora do Curso

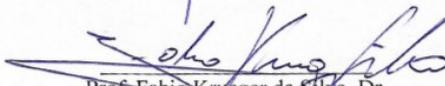
Banca Examinadora:



Prof. João Victor Staub de Melo, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Glicerio Trichês, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Fabio Krueger da Silva, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha mãe,
Vânia Claudia Kreusch.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Vânia, por nunca deixar de me apoiar e batalhar pela minha formação.

Ao meu orientador, professor Dr. João Victor Staub de Melo, pela paciência, disponibilidade e generosidade em compartilhar seus conhecimentos durante a execução desse trabalho.

Ao professor Glicério Trichês e ao professor Fabio Krueger da Silva, por aceitarem participar desta banca.

À Rede Temática do Asfalto/Petrobras pelos investimentos realizados no Laboratório de Pavimentação da UFSC.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por me proporcionar não só uma excelente graduação em Engenharia Civil, mas uma evolução como ser humano em todos esses anos.

A todos os professores que participaram dessa caminhada. Muito obrigada por mostrar a beleza dessa profissão e por colaborarem com a minha formação.

Ao Lucas, pelo amor, companheirismo e incentivo em toda essa jornada.

Aos meus amigos, que se tornaram minha família desde que cheguei aqui.

Muito obrigada!

RESUMO

O sistema rodoviário é o principal meio de transporte de cargas e passageiros no Brasil e 12,3% dessas estradas são pavimentadas. Apesar disso, as condições de tráfego estão muito abaixo do esperado para uma utilização segura e confortável. O trincamento por fadiga gerado pela repetição de cargas sobre o pavimento é um dos principais defeitos encontrados, logo, faz-se necessário um aprofundamento no assunto. Esse trabalho apresenta um estudo sobre um dos principais influenciadores da resistência à fadiga do material: a temperatura. O objetivo principal proposto é a avaliação da influência que a temperatura exerce sobre a resistência à fadiga do revestimento asfáltico, sob a ótica de duas abordagens diferentes: a abordagem da energia dissipada acumulada e a fenomenológica. Fez-se uso de ensaios laboratoriais no aparato de flexão a quatro pontos nas temperaturas de 4, 15 e 20 °C. Com a aplicação dos dados brutos dos ensaios nos critérios de ruptura de Pronk e Hopman (energia dissipada) e convencional (fenomenológica), constatou-se que a abordagem que considera a degradação da rigidez apresenta valores menos conservadores para o número de ciclos necessários para levar a amostra à ruptura. Na obtenção das curvas de fadiga e posterior estimativa de vida útil, constatou-se que as temperaturas mais baixas são melhores para o revestimento asfáltico, independente da abordagem utilizada. A temperatura de 4 °C apresenta uma vida útil da ordem de 4 a 5 vezes maior que a temperatura de 15 °C e de 6 a 7 vezes maior que a de 20 °C, sob ambas as perspectivas. O procedimento utilizado para determinar a temperatura e frequência críticas para o material analisa apenas a parcela viscosa do módulo complexo, porém, concluiu-se que essa componente não pode ser avaliada isoladamente. É preciso levar em conta a microdeformação de tração atuante no pavimento. Por isso, a energia dissipada inicial é um parâmetro tido como ideal para realizar essa predição, visto que considera ambos os valores em seu cálculo. Após o estudo, constatou-se que a temperatura de 4 °C apresentou os melhores resultados para a vida à fadiga. Quanto maior a temperatura, piores foram os resultados.

Palavras-chave: Temperatura. Revestimento asfáltico. Fadiga.

ABSTRACT

Roadways are the main mean of transport of cargo and passengers in Brazil and 12.3% of these roads are paved. Despite this, traffic conditions are far below expected for safe and comfortable use. The fatigue cracking generated by repetitions of loads on the pavement is one of the main defect found, therefore, a deepening of the subject is necessary. This paper presents a research about one of the main influencers of material fatigue resistance: temperature. The main objective proposed is to evaluate the influence of temperature on the fatigue resistance of the asphalt coating, throughout two different optic approaches: the phenomenological approach and accumulated dissipated energy. Laboratory tests were performed on the four point flexural apparatus at the temperatures of 4, 15, and 20 °C. With the application of the raw data of the tests in the rupture criteria of Pronk and Hopman (dissipated energy) and conventional (phenomenological approach), it was found that the approach considering the degradation of stiffness presents less conservative values for the number of cycles required to bring the sample to rupture. In obtaining the fatigue curves and subsequent estimate of useful life, it was found that lower temperatures are better for asphalt coating, regardless of the approach. The temperature of 4 °C presents 4 to 5 times bigger useful life than the temperature of 15 °C and 6 to 7 times more than the temperature of 20 °C, through both perspectives. The procedure used to determine the temperature and critical frequency for the material uses only the viscous portion of the complex module, although, it was concluded that this component cannot be evaluated alone. It is necessary to take into account the microdeformation of traction acting on the pavement. Therefore, the initial dissipated energy is an ideal parameter to carry out this prediction, since it considers both of the values in its calculations. After the study, it was found that the temperature of 4 °C presented the best results for the life to the fatigue. The higher the temperature, the worse the results.

Key words: Temperature. Asphaltic Coating. Fatigue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fenômeno da fluência.....	37
Figura 2: Fenômeno da relaxação	37
Figura 3: Ângulo de fase entre a tensão e a deformação	38
Figura 4: Modelo de Huet-Sayegh	40
Figura 5: Estágios do processo de fadiga	42
Figura 6: Características geométricas dos ensaios à fadiga.....	44
Figura 7: Ensaio de compressão diametral.....	45
Figura 8: Seções da amostra no ensaio a quatro pontos em viga	46
Figura 9: Aparato para teste de quatro pontos.....	47
Figura 10: Esforços gerados no corpo de prova durante o ensaio	47
Figura 11: Ensaio sob o controle de tensão.....	48
Figura 12: Ensaio sob o controle de deformação	49
Figura 13: Tipos de solitação empregados em ensaios de fadiga.....	50
Figura 14: Loop de histerese	54
Figura 15: Critério de ruptura de Pronk e Hopman.....	55
Figura 16: Critério de ruptura convencional	56
Figura 17: Fluxograma para o dimensionamento racional de um pavimento proposto por Motta (1991).....	58
Figura 18: Misturador de alto cisalhamento	64
Figura 19: Projeção dos corpos de prova sobre a placa de concreto	66
Figura 20: Fluxograma para a elaboração das curvas de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada.....	68
Figura 21: Fluxograma para a elaboração das curvas de fadiga segundo a abordagem fenomenológica	69
Figura 22: Composição granulométrica elaborada por Melo (2014).....	74
Figura 23: Aspecto final da placa com dimensões de 60 cm x 40 cm x 9 cm.....	76
Figura 24: Corpos de prova prismáticos.....	77
Figura 25: Plano Cole-Cole elaborado por Melo (2014).....	78
Figura 26: CP1 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C.....	82
Figura 27: CP2 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C.....	83
Figura 28: CP3 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C.....	83
Figura 29: CP4 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C.....	84
Figura 30: CP5 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C.....	84

Figura 31: CP6 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C.....	85
Figura 32: CP7 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C.....	85
Figura 33: CP8 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C.....	86
Figura 34: CP9 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C.....	86
Figura 35: CP10 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C.....	87
Figura 36: CP11 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C.....	87
Figura 37: CP13 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C.....	88
Figura 38: CP14 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C.....	88
Figura 39: CP15 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C.....	89
Figura 40: CP16 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C.....	89
Figura 41: CP18 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C.....	90
Figura 42: CP19 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C.....	90
Figura 43: CP20 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C.....	91
Figura 44: CP21 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C.....	91
Figura 45: CP22 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C.....	92
Figura 46: Modelo de fadiga segundo a abordagem fenomenológica...	94
Figura 47: Modelo de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada	97
Figura 48: Dados da estrutura do pavimento no <i>Software ViscoRoute 2.0</i>	100
Figura 49: Dados do carregamento do pavimento no <i>Software ViscoRoute 2.0</i>	100
Figura 50: Apresentação de resultados do <i>ViscoRoute 2.0</i>	101
Figura 51: Variação da deformação na camada de revestimento à 4 °C	102

Figura 52: Variação da deformação na camada de revestimento à 15 °C	103
Figura 53: Variação da deformação na camada de revestimento à 20 °C	103
Figura 54: Relação entre energia dissipada inicial (W_i) e energia dissipada acumulada na ruptura (W_{ac})	107
Figura 55: Relação entre temperatura, vida de fadiga e E_2 segundo a abordagem da energia dissipada acumulada.....	110
Figura 56: Relação entre temperatura, vida de fadiga e E_2 segundo a abordagem fenomenológica	111
Figura 57: Relação entre temperatura, vida de fadiga e energia dissipada inicial para a abordagem da energia dissipada acumulada	112
Figura 58: Relação entre temperatura, vida de fadiga e energia dissipada inicial para a abordagem fenomenológica	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características da estrutura do pavimento	69
Tabela 2: Propriedades dos agregados minerais.....	73
Tabela 3: Características da nanoargila.....	75
Tabela 4: Resultado dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico	75
Tabela 5: Características da dosagem com teor de ligante de 4,35%....	76
Tabela 6: Parâmetros viscoelásticos do modelo de Huet-Sayegh	78
Tabela 7: Dados brutos dos ensaios de resistência à fadiga em 15 e 20 °C	79
Tabela 8: Dados brutos dos ensaios de resistência à fadiga em 4 °C	80
Tabela 9: Determinação da ruptura segundo os critérios de Pronk e Hopman e o convencional.....	81
Tabela 10: Valores de R^2 para o modelo de fadiga segundo a abordagem fenomenológica	95
Tabela 11: Valores de R^2 para o modelo de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada	98
Tabela 12: Microdeformações atuantes na fibra inferior do revestimento para cada temperatura.....	102
Tabela 13: Vida de fadiga segundo a abordagem fenomenológica	105
Tabela 14: Dados necessários ao cálculo da energia dissipada inicial	105
Tabela 15: Dados necessários para a confecção do gráfico W_i versus W_{ac}	106
Tabela 16: Valores de R^2 para o gráfico energia dissipada inicial versus energia dissipada acumulada	108
Tabela 17: Vida de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada	108
Tabela 18: Parcelas viscosas do material para cada temperatura e vida de fadiga segundo cada abordagem.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
BR 101 – Rodovia Governador Mário Covas
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT – Confederação Nacional de Transportes
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EN – *Europäische Norm*
IFSTTAR – *Institut français des sciences et Technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux*
LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
NBR – Norma Brasileira
Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A.
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	OBJETIVOS.....	30
1.1.1	Objetivo geral.....	30
1.1.2	Objetivos específicos	30
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	33
2.2	REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	34
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	34
2.4	RIGIDEZ DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	35
2.5	VISCOELASTICIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS	36
2.5.1	Domínio temporal	36
2.5.2	Domínio frequencial e o módulo complexo	37
2.5.3	Modelos viscoelásticos.....	39
2.5.3.1	Modelo análogo de Huet-Sayegh	40
2.6	FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS	41
2.6.1	Principais ensaios de fadiga em misturas asfálticas	43
2.6.1.1	Ensaio de compressão diametral	44
2.6.1.2	Ensaio de flexão em amostras trapezoidais	45
2.6.1.3	Ensaio de flexão em viga quatro pontos.....	46
2.6.2	Modos de sollicitação.....	48
2.6.2.1	Fadiga à tensão controlada	48
2.6.2.2	Fadiga à deformação controlada	48
2.6.3	Tipos de sollicitação.....	49
2.6.4	Fatores que influenciam nos resultados	51
2.6.5	Métodos de análise do comportamento à fadiga	52
2.6.5.1	Abordagem fenomenológica	52

2.6.5.2	Abordagem mecanicista.....	53
2.6.5.2.1	Abordagem da energia dissipada acumulada.....	53
2.6.6	Critérios de ruptura.....	54
2.6.6.1	Critério de Pronk e Hopman.....	55
2.6.6.2	Critério convencional.....	56
2.7	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	56
3	METODOLOGIA.....	61
3.1	DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA.....	62
3.1.1	Propriedades dos agregados minerais.....	62
3.1.2	Composição granulométrica.....	63
3.1.3	Ligante asfáltico.....	63
3.1.4	Dosagem da mistura asfáltica.....	65
3.1.5	Produção, moldagem e caracterização das placas de mistura asfáltica	65
3.1.6	Avaliação da resistência à fadiga e do comportamento reológico da mistura asfáltica (MELO, 2014).....	66
3.2	REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FADIGA A 4 °C NO APARATO DE FLEXÃO A 4 PONTOS.....	67
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA.....	67
3.4	OBTENÇÃO DAS CURVAS DE FADIGA PARA AS DIFERENTES TEMPERATURAS DE ENSAIO.....	68
3.5	ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL À FADIGA DO REVESTIMENTO NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO.....	69
3.6	AVALIAÇÃO DA COMPONENTE VISCOSA (E₂) DO MÓDULO COMPLEXO DO MATERIAL NA PREDIÇÃO À FADIGA DO REVESTIMENTO.....	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1	ETAPA 1: DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA.....	73
4.1.1	Propriedade dos agregados minerais.....	73

4.1.2	Composição granulométrica.....	74
4.1.3	Ligante asfáltico	75
4.1.4	Dosagem da mistura asfáltica.....	75
4.1.5	Produção, moldagem e caracterização das placas de mistura asfáltica	76
4.1.6	Avaliação da resistência à fadiga e do comportamento reológico da mistura asfáltica (MELO, 2014).....	77
4.2	ETAPA 2: REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FADIGA A 4 °C NO APARATO DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS.....	79
4.3	ETAPA 3: TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA	80
4.4	ETAPA 4: OBTENÇÃO DAS CURVAS DE FADIGA PARA AS DIFERENTES TEMPERATURAS DE ENSAIO	92
4.4.1	Abordagem fenomenológica	92
4.4.2	Abordagem mecanicista: Energia dissipada acumulada.....	96
4.5	ETAPA 5: ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL À FADIGA DO REVESTIMENTO NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO	99
4.5.1	Vida de fadiga segundo a abordagem fenomenológica.....	104
4.5.2	Vida de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada	105
4.6	ETAPA 6: AVALIAÇÃO DA COMPONENTE VISCOSA (E₂) DO MÓDULO COMPLEXO DO MATERIAL NA PREDIÇÃO À FADIGA DO REVESTIMENTO.....	109
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	115
5.1	CONCLUSÕES	115
5.2	RECOMENDAÇÕES	116
	REFERÊNCIAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

Dentre os modais de transporte no Brasil, o rodoviário é o principal meio de locomoção de cargas e passageiros, tendo uma grande importância no desenvolvimento econômico do país. O Brasil possui 1.720.756 km de rodovias, sendo apenas 12,3% desse valor (211.468 km) pavimentados. O pavimento no país é projetado para durar, em média, entre 8 e 12 anos e 99% dessa malha é composta por pavimento flexível (CNT, 2016).

Entre os maiores problemas encontrados cita-se a destinação insuficiente de recursos; problemas na manutenção preventiva; gastos excessivos com correções decorrentes da má execução da obra; uso de métodos e técnicas obsoletas na construção das rodovias, entre outros (CNT, 2016). Além disso, os métodos de dimensionamento utilizados estão ultrapassados se comparados com outros países. Faz-se necessário a criação de um método de dimensionamento mecanicista, que possibilite a correta compreensão dos mecanismos de ruptura do revestimento asfáltico, permitindo a construção de pavimentos mais duráveis e mais adequados à realidade brasileira.

No Brasil, os dois principais defeitos encontrados em pavimentos flexíveis são o trincamento por fadiga e a deformação permanente (trilha de rodas). As cargas cíclicas, geradoras do trincamento por fadiga, produzem danos intermitentes e a falha do material se dá em valores de tensão mais baixos. Essas cargas não parecem críticas por si só, se comparadas com cargas estáticas, porém, são decisivas para a vida útil do material (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Melo (2014), diversos equipamentos e protocolos tem sido utilizados em laboratório para determinar a resistência à fadiga dos concretos asfálticos. No que tange os equipamentos, cita-se o de flexão a quatro pontos, flexão a dois pontos, tração-compressão uniaxial, compressão diametral, entre outros. Quanto aos principais protocolos, pode-se citar as normas ASTM D7460, AASHTO T321 e a EN 12697-24.

Não há uma uniformidade e consenso entre essas normas quanto as condições de ensaio para a realização dos testes de fadiga no que concerne a temperatura, a frequência de carregamento, ao critério de ruptura, ao modo de carregamento, ao tipo de onda aplicada no ensaio (*haversine* ou senoidal) e a abordagem de análise (PINTARELLI, 2017).

Especialmente no que se refere à temperatura, as normas americanas (ASTM D7460 e AASHTO T321) prescrevem a realização de

ensaios a $20 \pm 0,5$ °C. Em contrapartida, a norma europeia (EN 12697 24) especifica uma faixa de temperatura de 0 a 20 °C ($\pm 0,5$ °C).

Para Melo (2014) e outros autores, a temperatura em que o ensaio de resistência à fadiga da mistura asfáltica é realizado tem grande influência no comportamento reológico do material e, por conseguinte, na vida à fadiga. Segundo o autor, a temperatura altera o estado térmico do material e a energia que este dissipa a cada ciclo de carregamento, afetando o resultado.

Neste sentido, no âmbito de um dimensionamento racional da estrutura do pavimento, os resultados de resistência à fadiga do concreto asfáltico são de extrema importância para a correta concepção da estrutura. Portanto, a compreensão da influência da temperatura no desempenho à fadiga do material é primordial e indispensável para que se possa definir as condições de ensaio mais adequadas para a obtenção de modelos de fadiga em laboratório.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência da temperatura na resistência à fadiga da mistura asfáltica sob a ótica da abordagem da energia dissipada acumulada e da abordagem fenomenológica.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- Obter os dados de resistência à fadiga brutos de uma mistura asfáltica selecionada nas temperaturas de 15 °C e 20 °C;
- Realizar ensaios de resistência à fadiga no aparato de flexão a quatro pontos na temperatura de 4 °C;
- Aplicar o critério de ruptura da energia dissipada (Pronk e Hopman) e o critério de ruptura convencional aos ensaios de resistência à fadiga para cada temperatura analisada na pesquisa;
- Plotar as curvas de fadiga para as diferentes temperaturas segundo a abordagem da energia dissipada acumulada (com o critério de ruptura de Pronk e Hopman) e a abordagem fenomenológica (com o critério de ruptura convencional);

- Fazer a estimativa de vida útil do revestimento asfáltico para cada temperatura estudada, utilizando *Software ViscoRoute 2.0* e as equações de fadiga;
- Avaliar a eficiência da componente viscosa (E_2) do módulo complexo do material na predição a vida à fadiga do revestimento asfáltico na estrutura do pavimento.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em capítulos. Os conteúdos presentes em cada um deles estão explicitados abaixo:

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Designado a fazer a apresentação, o capítulo de introdução expõe um parâmetro geral dos assuntos que serão abordados no trabalho. Também apresenta os objetivos gerais e específicos do estudo, situando a intenção da pesquisa. Ainda no capítulo de introdução, são apresentadas a organização do trabalho e o conteúdo presente em cada capítulo.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa é realizada uma revisão de literatura acerca dos temas: revestimentos asfálticos; propriedades mecânicas; rigidez, viscoelasticidade, fadiga e dimensionamento das misturas asfálticas.

É neste capítulo que são apresentados e descritos os ensaios laboratoriais de resistência à fadiga; as análises do comportamento à fadiga segundo as abordagens da energia dissipada acumulada e a abordagem fenomenológica, bem como os critérios de ruptura relacionados a elas.

Também são apresentados estudos e considerações feitos por outros pesquisadores acerca dos temas estudados.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Neste capítulo são explanadas as etapas necessárias para a elaboração da pesquisa e obtenção de resultados.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui são apresentados e discutidos os resultados encontrados durante as etapas realizadas no capítulo anterior.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Para finalizar, neste capítulo são feitas as conclusões do estudo. Também é no capítulo de conclusão que são apresentadas as recomendações para novas pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A ação de pavimentar uma via de circulação de veículos busca uma melhora na operação de tráfego, conquistando uma superfície mais regular, aderente e menos ruidosa aos usuários. Além disso, há a necessidade de que o pavimento suporte os esforços oriundos de cargas e ações climáticas, sem que apresente deterioração prematura, garantindo um bom desempenho em termos de custos operacionais e de manutenção ao longo dos anos de serviço (BALBO, 2007).

Um pavimento é um sistema de múltiplas camadas com espessuras finitas, assentes sobre um semiespaço, denominado subleito (BRASIL, 2006; BERNUCCI *et al.*, 2010). Cada camada é responsável por atender a uma função específica, já que as cargas aplicadas geram um estado de tensão na estrutura, devendo esse ser resistido individualmente pela camada e também pelo seu conjunto (BALBO, 2007).

Ligantes asfálticos e os agregados minerais, quando misturados, geram o revestimento que compõe o pavimento asfáltico. Ele é destinado a resistir aos esforços impostos pelas cargas do tráfego de veículos e pelas variações climáticas, proporcionando ao usuário uma melhor condição de rolamento (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A classificação geral dos pavimentos asfálticos é segmentada e pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos, de acordo, principalmente, com o tipo de revestimento e com a maneira que a tensão será distribuída nas camadas inferiores. A definição completa desses três tipos de pavimento é fornecida no Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (BRASIL, 2006), conforme segue:

Flexível: aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.

Semirrígido: caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

Rígido: aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas

as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo típico: pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

Para Balbo (2007), é importante salientar que os termos rígido e flexível levam em conta, principalmente, a estrutura do pavimento como um todo. Porém, se a avaliação for feita apenas do revestimento, essas classificações tornam-se inadequadas, visto que, dependendo da sua formulação e das condições climáticas, um mesmo pavimento pode ser bastante rígido ou bastante flexível.

2.2 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Conforme indicado por Medina (1997, p. 15), a NBR 7207 (1982) define revestimento como “camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação de rolamento dos veículos”. Já para Bernucci *et al.* (2010), também é preciso levar em conta que é o revestimento quem irá sofrer diretamente a ação climática, além de ser o responsável por resistir ao contato pneu-pavimento, com suas variações de carga e velocidade.

Os concretos asfálticos são usualmente obtidos por mistura, a frio ou a quente, de agregados e ligante asfáltico, havendo a possibilidade de adição de produtos especiais, caso alguma característica específica seja necessária (MELO, 2014).

As misturas utilizadas nos revestimentos brasileiros devem possuir um ligante asfáltico que dê flexibilidade, impermeabilidade, estabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o tráfego previsto para o local (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Além disso, através do que foi visto em Roberts *et al.* (1996 *apud* FONTES, 2009) é essencial compreender que o projeto de uma mistura asfáltica visa buscar o volume ideal de ligante asfáltico e agregados, para que se tenha um correto desempenho do material em campo.

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para Bernucci *et al.* (2010), a caracterização dos materiais de pavimentação é uma tarefa complexa dadas as suas propriedades. Essas são influenciadas por muitos fatores externos de difícil controle, como: meio ambiente; magnitude, tempo de aplicação, frequência e o estado de tensões ocasionado pelas cargas impostas pelo tráfego. Para as misturas asfálticas, outro problema ainda mais acentuado também está presente: o

envelhecimento gradativo devido à oxidação do ligante. Sabendo disso, a caracterização das misturas requer uma análise que busque os fatores mais relevantes para que se faça a previsão do comportamento da mistura asfáltica em campo.

Os resultados obtidos com a análise das propriedades mecânicas do material devem ser comparados com critérios de dimensionamento predefinidos, de modo que se evite a ocorrência dos principais tipos de defeito cabíveis aos revestimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Conforme Melo (2014), o comportamento mecânico e reológico da mistura asfáltica é definido em laboratório, através de ensaios.

Os ensaios mecânicos mais comumente utilizados para a obtenção de dados da mistura asfáltica são (BERNUCCI *et al.*, 2010):

- Ensaios convencionais: estabilidade Marshall;
- Ensaios de módulo: módulo de resiliência e módulo complexo;
- Ensaios de ruptura: resistência à tração indireta; resistência à fadiga;
- Ensaio de deformação permanente: simulador de tráfego de laboratório; tração axial estática; compressão de carga repetida;
- Ensaios complementares: Cântabro; dano por umidade induzida.

Rudensky (1997) e Domec (2005 *apud* BARRA, 2009) relatam que, dentre os fenômenos avaliados nos ensaios, a fadiga é o principal defeito que conduz as camadas asfálticas ao colapso, por isso é de fundamental importância compreendê-lo.

2.4 RIGIDEZ DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Um projeto de pavimento deve combinar materiais e espessuras de camadas conforme a rigidez de cada uma destas, buscando um conjunto harmônico e resistente às solicitações de tráfego. Diferentes parâmetros de rigidez são utilizados para definir a vida útil do sistema, bem como para analisar a estrutura do pavimento como um todo (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A rigidez da mistura asfáltica é considerada uma propriedade única do material pois seus valores independem da maneira com que a mistura é testada, do tamanho da amostra ou de sua geometria (KIM, 2009 *apud* MELO, 2014).

Apesar disso, diversos fatores externos como temperatura e tempo de aplicação da carga podem afetar significativamente os resultados encontrados para materiais asfálticos (FONTES, 2009).

A temperatura é um ponto determinante para o comportamento da mistura. Se for muito baixa, o material irá comportar-se de maneira frágil, pois possuirá uma rigidez elevada. Em temperaturas elevadas, o material disporá de uma baixa rigidez, apresentando grandes valores de deformabilidade (OTTO, 2009).

Quanto à aplicação de cargas, a mistura asfáltica pode deformar-se lenta e permanentemente se for carregado lentamente. Se for carregado com mais rapidez, a rigidez encontrada será maior e o material poderá fraturar-se (KIM, 2009 *apud* MELO, 2014).

Conforme Melo (2014), outros fatores afetam esse parâmetro, tais como natureza e teor do ligante asfáltico; umidade e energia superficial; forma dos agregados; adequação dos finos à mistura; compactação e índice de vazios, entre outros.

2.5 VISCOELASTICIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Os materiais asfálticos possuem características tanto viscosas quanto elásticas quando submetidos à deformação. Esse comportamento é influenciado fortemente pela temperatura e velocidade de aplicação da sollicitação e é resultado das propriedades dos ligantes asfálticos (PERRET, 2003 *apud* QUINTERO, 2011).

Existem duas maneiras de caracterizar as misturas asfálticas de acordo com suas propriedades termossuscetíveis e viscoelásticas: temporal e frequencial (BARRA, 2009).

2.5.1 Domínio temporal

Conforme Quintero (2011), os materiais asfálticos são conhecidos por apresentarem resultados em função do tempo. Essa resposta é diferenciada apenas pela maneira com a qual o material será testado: se com tensão ou deformação mantidos constantes. Essa escolha resulta na caracterização dos fenômenos de fluência e relaxação.

A fluência consiste na aplicação de um carregamento constante no material. Essa aplicação induz a uma resposta elástica instantânea. A deformação irá aumentar ao longo do tempo, produzindo um escoamento viscoso do material, de acordo com a Figura 1.

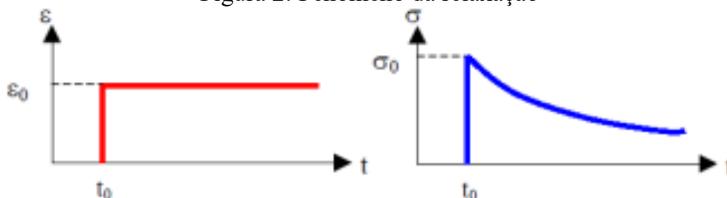
Figura 1: Fenômeno da fluência



Fonte: Olard (2003 *apud* QUINTERO, 2011)

Já a relaxação acontece quando a deformação do material é mantida constante no tempo, o que acarreta em uma relaxação da mistura e uma diminuição lenta da tensão, conforme Figura 2 (QUINTERO, 2011).

Figura 2: Fenômeno da relaxação



Fonte: Olard (2003 *apud* QUINTERO, 2011)

2.5.2 Domínio frequencial e o módulo complexo

O módulo complexo (E^*) e o ângulo de fase (δ) são responsáveis pela caracterização dos materiais viscoelásticos (COLPO, 2014).

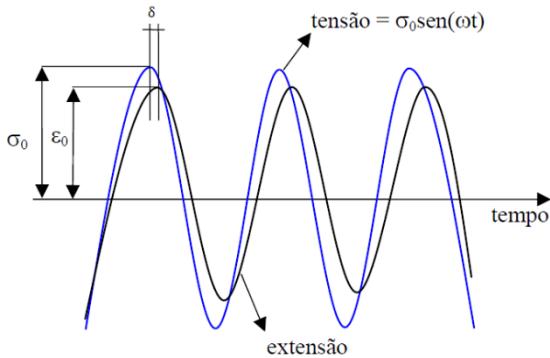
Para Melo (2014), o módulo complexo irá substituir o módulo de resiliência utilizado atualmente para o dimensionamento dos pavimentos, visto que é um dos parâmetros de rigidez mais amplamente empregados na concepção estrutural de pavimentos asfálticos.

O módulo complexo é determinado no domínio frequencial de solicitação e é expresso pela relação entre a amplitude da tensão senoidal (Equação 1) aplicada ao material e a amplitude complexa da deformação (Equação 2), resultando em um regime estável. Como o material é viscoelástico, há um atraso da deformação em relação à tensão. Isso é o chamado ângulo de fase entre os dois sinais, indicado na Figura 3, e fornece indicativos da predominância viscosa ou elástica do material (RIVIERE, 1996 *apud* MELO, 2014).

Como as misturas asfálticas possuem um comportamento muito dependente das variações de temperatura e tempo de carregamento, é necessário realizar uma análise criteriosa de frequências e temperaturas a

serem utilizadas, pois essas precisam representar exatamente as condições que se deseja simular no campo (COLPO, 2014).

Figura 3: Ângulo de fase entre a tensão e a deformação



Fonte: Fontes (2009)

As equações que descrevem o cálculo da tensão e da deformação senoidais são as seguintes:

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

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \times \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

Onde:

$\sigma(t)$ é a tensão em um determinado instante;

σ_0 é a amplitude de tensão;

ω é a velocidade angular aplicada;

t é o tempo;

δ é o ângulo de fase;

$\epsilon(t)$ é a deformação em um determinado instante; e,

ϵ_0 é a amplitude de deformação.

O módulo complexo, definido na Equação 5, é dividido em duas componentes E_1 e E_2 , que representam a energia armazenada no material e a energia dissipada. E_1 , determinado pela Equação 3, é denominado módulo elástico real do material, ou módulo de armazenagem, e é associada ao comportamento elástico. Já E_2 , da Equação 4, é a parte imaginária do módulo, ou módulo de perda, e está relacionada ao

comportamento viscoso irreversível do material devido à dissipação de energia (MINHOTO, 2005 *apud* COLPO, 2014).

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} x \cos \delta \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} x \sin \delta \quad (4)$$

Onde:

E_1 é o módulo de armazenamento;

E_2 é o módulo de perda;

E^* é o módulo complexo.

O valor absoluto do módulo complexo é representado por um outro parâmetro, chamado módulo dinâmico $|E^*|$, que nada mais é do que a relação entre tensão σ_0 e deformação ε_0 já explícita nas Equações 3 e 4. Esse parâmetro também pode ser representado pelas Equações 5 e 6 abaixo.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (5)$$

$$\delta = \arctg \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (6)$$

O cálculo do módulo complexo implica na determinação das componentes $|E^*|$ e δ para diferentes valores de temperatura e frequência. Com esses dados, é possível obter os seguintes gráficos: curvas isotérmicas; espaço ou diagrama de Black; curvas isócronas; plano Cole-Cole; curva de equivalência frequência-temperatura ou *master-curve* (PARTL & FRANCKEN, 1998 *apud* FONTES, 2009).

2.5.3 Modelos viscoelásticos

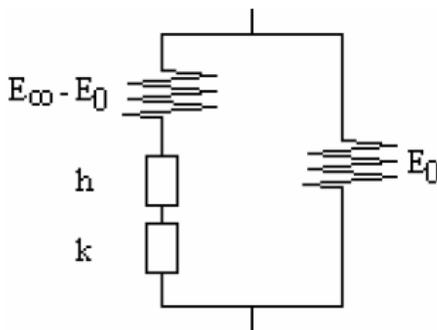
Para a representação físico-matemática do comportamento viscoelástico do material, a literatura apresenta modelos de cálculo baseados em molas e amortecedores e modelos analógicos com elementos parabólicos (MELO, 2014). Os principais tipos já descritos para esse fim são: modelo de Maxwell; modelo de Kevin-Voigt; modelo generalizado de Maxwell; modelo generalizado de Kevin-Voigt; modelo analógico de Huet e Huet-Sayegh.

A abordagem utilizada neste trabalho é a de Huet-Sayegh, brevemente descrito abaixo.

2.5.3.1 Modelo analógico de Huet-Sayegh

Esse modelo consiste na inserção de uma mola de pouca rigidez (E_0) para que seja observado o comportamento do material quando solicitado a baixas frequências e altas temperaturas, ou seja, o módulo elástico (CASTAÑEDA, 2004; HECK, 2001; MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996; RIVIÈRE, 1996 *apud* BARRA, 2009).

Figura 4: Modelo de Huet-Sayegh



Fonte: Barra (2009)

O módulo complexo segundo essa abordagem pode ser descrito pela seguinte equação:

$$|E^*| = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (7)$$

Onde:

$|E^*|$ é o módulo complexo;

E_∞ é o módulo complexo infinito;

E_0 é o módulo estático;

i é o número complexo definido por $i^2 = -1$;

τ é o tempo de relaxação dos amortecedores, que é um parâmetro em função do tempo, o qual se assemelha a um tempo de retardo e varia em função da temperatura (θ);

ω é a frequência angular da solitação ($\omega = 2\pi f$);

f é a frequência do carregamento;

k e h são os parâmetros dos elementos parabólicos, os quais estão situados no intervalo entre $0 < k < h < 1$;

δ é a constante adimensional, função da natureza do ligante asfáltico e da granulometria da mistura asfáltica.

2.6 FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas são submetidas a repetidas solicitações de curta duração em cada passagem de eixo de carregamento. O pavimento, que trabalha à flexão, sofre deformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica a cada passagem de rodado (OTTO, 2009).

Esses efeitos são simulados através da flexão alternada de camadas do pavimento. A parte acima do eixo neutro da amostra trabalha à compressão, enquanto que a parte inferior sofre tração. Essas circunstâncias podem ser simuladas em laboratório com ensaios à tensão ou deformação controlada (QUINTERO, 2011).

Quando esse material é solicitado sucessivas vezes a níveis de tensão inferiores às tensões de ruptura, sofre alteração em sua estrutura interna a passa a gerar uma microfissuração, que resulta na perda das características originais do pavimento (BALBO, 1997).

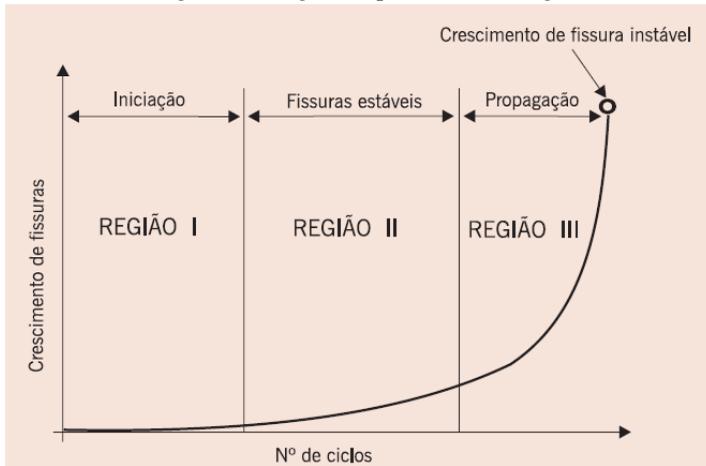
De acordo com Bernucci *et al.* (2010), as cargas cíclicas produzem danos intermitentes, ou seja, na fase de carregamento o dano cresce, enquanto na fase de descarregamento o dano mantém-se constante.

A propagação de microfissuras gerada pela fadiga não poupa nenhum tipo de pavimento. A microfissuração pode ter origens diferentes segundo o tipo de estrutura considerada, porém, a fadiga é a causa majoritária do surgimento delas na superfície dos pavimentos (LAVEISSIÈRE, 2003).

Quanto ao processo de ocorrência do dano, duas fases de degradação são observadas: a primeira fase é delineada por uma manifestação de microfissuras que resulta em uma diminuição da rigidez da amostra. A segunda etapa abrange a coalescência dessas fissuras, gerando uma propagação de microfissuras na mistura asfáltica (DI BENEDETTO *et al.*, 2004).

A fadiga ocorre através de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si, mas são decisivas na vida útil do material. Em uma estrutura sujeita a carregamento cíclico, diversos estágios podem ser diferenciados durante o processo, conforme a Figura 5 (BERNUCCI *et al.*, 2010):

Figura 5: Estágios do processo de fadiga



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

A região I, de adaptação, corresponde às primeiras mudanças microestruturais e a formação das primeiras microfissuras do revestimento. A atuação de algumas variáveis pertinentes como tixotropia e aquecimento interno do material, somadas às acomodações que ocorrem no sistema também tem um significado importante na etapa. Nesse estágio iniciam-se as zonas de danos irreversíveis. A região II, estacionária, caracteriza-se pelas microfissuras que surgem em detrimento das microfissuras já existentes, ou seja, danos que surgem devido a junção das microfissuras. O comportamento do material é quase linear e há um aumento muito pequeno de temperatura. Já na região III, ou fase de falência, ocorre o aumento das microfissuras, levando ao colapso total da estrutura no final da fase (BERNUCCI *et al.*, 2010; DI BENEDETTO *et al.*, 2004; BARRA, 2009).

Tendo conhecimento disso, é indispensável considerar as repetições de carregamento que o pavimento suporta quando solicitado a esforços mecânicos em condições ambientais variadas. Essa simulação deve ser feita em laboratório e deve ser capaz de reproduzir as mais diversas solicitações observadas em campo (BARRA, 2009).

Para Otto (2009), entretanto, reproduzir esse fenômeno em laboratório não é simples, posto que na natureza são muitas as variáveis que podem influenciar o comportamento real dos materiais. Tem-se então que limitar as condições de contorno para conhecer as variáveis de interesse.

2.6.1 Principais ensaios de fadiga em misturas asfálticas

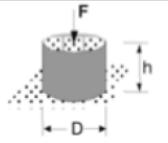
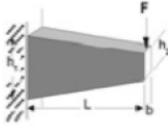
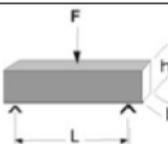
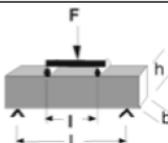
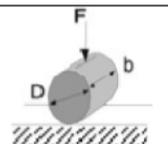
Os ensaios geralmente utilizados para determinação da vida de fadiga consistem na aplicação de repetidas solicitações na amostra da mistura asfáltica analisada, registrando o número de ciclos até que seja atingida a ruptura do material. A análise desses resultados pode ser feita considerando tensões e deformações iniciais ou energia dissipada (COLPO, 2014).

A determinação da solicitação mecânica dos pavimentos e do subleito é difícil, visto que a simulação de cargas de diferentes intensidades e frequências ao longo do dia é complexa (MEDINA, 1997).

A opção por qualquer um dos métodos disponíveis depende do grau de precisão, do carregamento, dos apoios, do estado de tensão e do meio ambiente que se quer simular. Além disso, o custo e a disponibilidade de equipamentos precisam ser levados em conta na decisão (MELO, 2014).

De acordo com Di Benedetto *et al.* (2004 *apud* COLPO, 2014), para os métodos disponíveis, apresentados na Figura 6, deve-se perceber que ensaios uniaxiais/homogêneos geram estados de tensão uniformes. Caso o ensaio seja considerado não homogêneo, o estado de tensão não será constante.

Figura 6: Características geométricas dos ensaios 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: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (2004 *apud* COLPO, 2014)

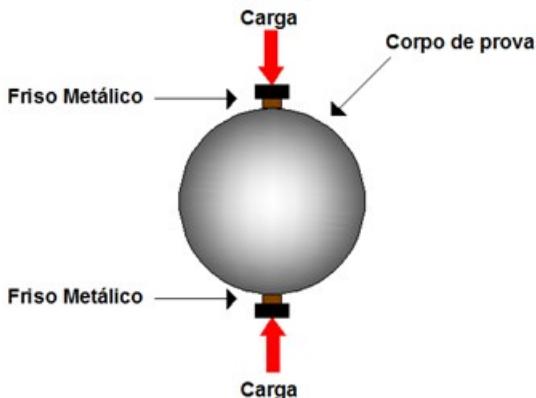
2.6.1.1 Ensaio de compressão diametral

O ensaio de fadiga por compressão diametral mede, indiretamente, a tensão de tração aplicando um carregamento compressivo no plano vertical de uma amostra cilíndrica. A tensão gerada é razoavelmente uniforme na amostra. Por ser um teste simples, é utilizado principalmente quando se almeja o conhecimento de características fundamentais da amostra (TANGELLA *et al.*, 1990).

Segundo Medina (1997), a facilidade de execução, moldagem e sistema de carregamento levaram o ensaio de compressão diametral a ser o mais usual em pesquisas sobre fadiga. A despeito disso, para Colpo

(2014), o surgimento de deformação permanente junto aos frisos de carregamento durante o ensaio faz com que a vida de fadiga encontrada utilizando esse tipo de carregamento seja subestimada.

Figura 7: Ensaio de compressão diametral



Fonte: Colpo (2014)

Segundo Monismith (1998 *apud* LOUREIRO, 2003), o ensaio à tensão controlada realizado com compressão diametral não é satisfatório devido a alguns problemas, como: o aparecimento de diversos tipos de fratura dependendo do ensaio; tensões concentradas nos frisos onde se aplica a carga; dificuldades para executar o carregamento à tensão controlada; a inconstância do estado de tensão gerado e a influência que as deformações permanentes causam na resistência do corpo de prova durante o ensaio.

2.6.1.2 Ensaio de flexão em amostras trapezoidais

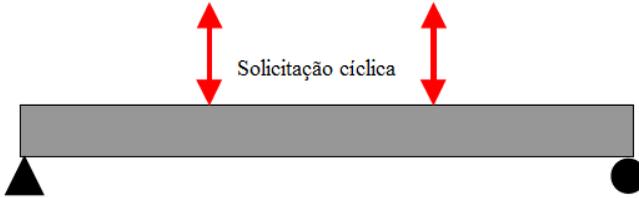
Comumente utilizado na França, o ensaio de flexão em amostras trapezoidais consiste na aplicação de força na menor extremidade do corpo de prova, enquanto a base maior e oposta encontra-se engastada. A deformação elástica é facilmente controlada (BALBO, 2000; OTTO, 2009).

O critério de ruptura para esse tipo de ensaio é atingido quando a força aplicada inicialmente é reduzida pela metade. Assim, pode-se finalizar o ensaio e determinar a vida de fadiga do material com a análise do número de aplicações de carga até a ruptura (LOUREIRO, 2003).

2.6.1.3 Ensaio de flexão em viga quatro pontos

O teste de flexão no aparato de quatro pontos foi criado para evitar a concentração de tensões passível de ocorrer no centro da viga em ensaios a três pontos. Conforme mostra a Figura 8, a amostra fica dividida em três seções (BAAJ, 2002).

Figura 8: Seções da amostra no ensaio a quatro pontos em viga



Fonte: Adaptado de Baaj (2002)

O equipamento necessário para a realização do ensaio de flexão em viga quatro pontos deve atender todos os requisitos necessários da norma vigente (COLPO, 2014). Nesse trabalho, será realizado pela vigência da norma EN 12697:24.

O equipamento mostrado na Figura 9 é utilizado para esse ensaio. Ele aplica um carregamento composto de duas cargas verticais afastadas entre si por um terço do vão da viga, promovendo a flexão do corpo de prova prismático. O terço médio é o trecho que sofre com os maiores deslocamentos e momentos fletores, sendo o mais suscetível à microfissuração (MELO, 2014).

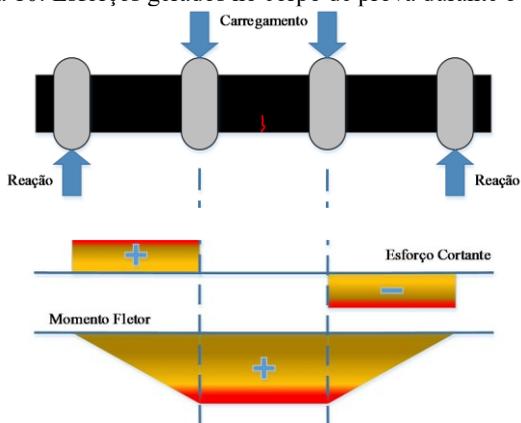
Figura 9: Aparato para teste de quatro pontos



Fonte: Melo (2014)

Segundo Fontes (2009), a ruptura do corpo de prova submetido ao ensaio de flexão em quatro pontos ocorre em uma zona de tensão uniforme, com a ausência de tensões de cisalhamento, conforme mostra a Figura 10. Isso faz com que o comportamento do ensaio seja mais próximo ao comportamento em campo da amostra, posto que reduz o coeficiente de variação dos resultados obtidos.

Figura 10: Esforços gerados no corpo de prova durante o ensaio



Fonte: Melo (2014)

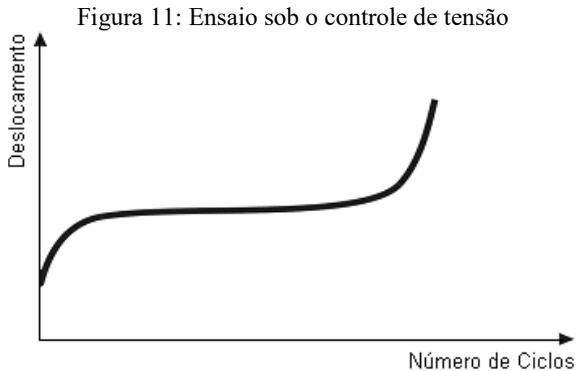
2.6.2 Modos de solitação

Os ensaios de fadiga podem ser realizados com duas formas de solitação: à tensão controlada ou à deformação controlada.

2.6.2.1 Fadiga à tensão controlada

Nos ensaios com tensão controlada, a carga aplicada é mantida constante por todo o ensaio. Isso faz com que a deformação da mistura asfáltica aumente progressivamente, conforme a rigidez da amostra vá diminuindo. A deformação aumenta fortemente no início do ensaio, como está apresentado na Figura 11. Posteriormente, a deformação passa a ocorrer de forma lenta e gradativa até os momentos finais do ensaio. Quando chega próximo ao colapso, a mistura asfáltica sofre, novamente, um brusco aumento de deformação, até a ruptura completa (SOULIMAN, 2012).

O término do ensaio é bastante visível nesse caso, uma vez que ocorre a ruptura do corpo de prova (FONTES, 2009).

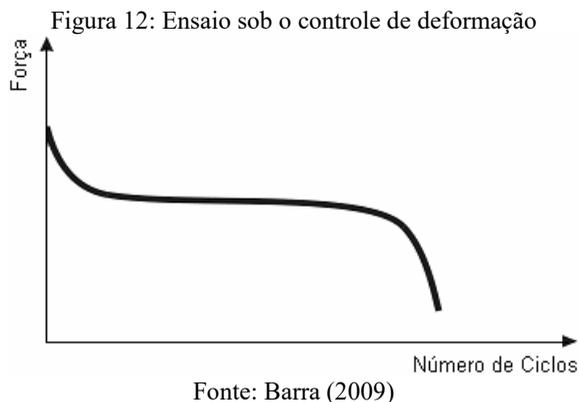


Fonte: Barra (2009)

2.6.2.2 Fadiga à deformação controlada

Nos ensaios com o controle de deformação, tem-se uma variação de tensão durante todo o ensaio, para que a deformação transcorrida no material permaneça constante. Com isso, há uma queda acentuada da força de solitação no início do ensaio. Semelhante ao que ocorre no outro modo de carregamento, a tensão estabiliza-se no decorrer do teste,

tendo uma diminuição lenta e gradativa. No término do ensaio há, novamente, uma queda brusca de força aplicada na amostra (SOULIMAN, 2012).



Como há um decréscimo na tensão solicitante, a amostra não sofre deformações significativas o suficiente para apresentar um ponto claro de ruína. Define-se, então, o término do ensaio quando a amostra atinge 50% do seu módulo de rigidez inicial (FONTES, 2009; LOUREIRO, 2003).

Segundo Zeiada (2012), camadas de pavimento menos espessas são, geralmente, ensaiadas sob deformação controlada. Isso acontece pois, nesses casos, a camada de pavimento não será a principal componente da resistência. A tensão na camada de asfalto será suportada pelas camadas adjacentes, não sendo a resistência tão afetada pela rigidez do revestimento asfáltico.

2.6.3 Tipos de solicitação

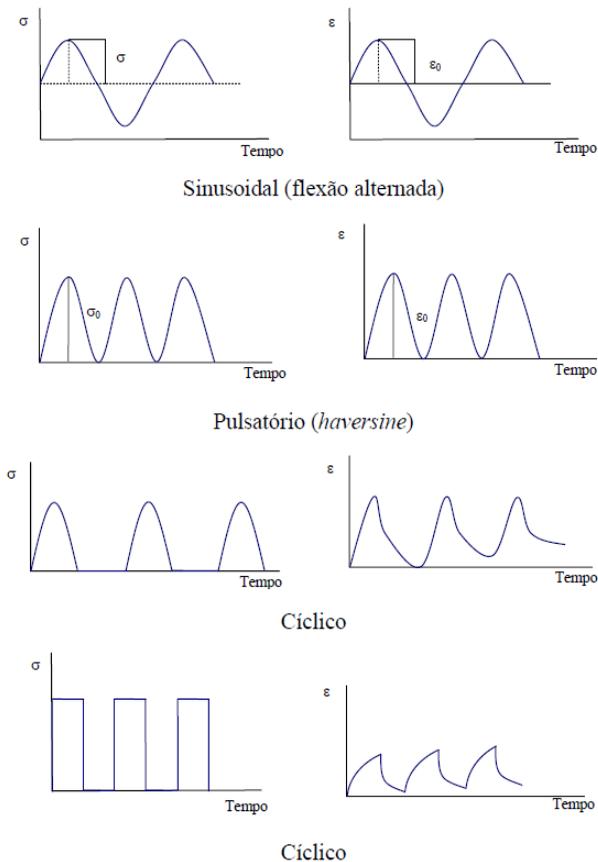
Para Baaj (2002), a determinação do tipo de solicitação a ser aplicada nos ensaios de fadiga é difícil. Isso se dá pelo fato de que a solicitação depende de diversos parâmetros, como características dos veículos, do pavimento e do ambiente. Tais fatores influenciam na amplitude de solicitação, na distribuição de tensões, nas deformações e na aplicação da carga.

De acordo com Capitão (2003 *apud* FONTES, 2009), quando um veículo circula sobre um pavimento, as tensões tangenciais mudam de sentido. Em laboratório não são reproduzidos exatamente as condições

reais, pois os ciclos de carga aplicados mantêm-se iguais ao longo do tempo, embora seja possível aplicar ciclos com ondas variadas.

As principais formas de carregamento utilizadas nos ensaios de são do tipo sinusoidal ou *haversine*. Na Figura 13, são apresentados os tipos de carregamento possíveis.

Figura 13: Tipos de solitação empregados em ensaios de fadiga



Fonte: Adaptado de Said (1998 *apud* FONTES, 2009)

O carregamento sinusoidal faz com que o equipamento aplique o mesmo deslocamento para ambos os lados da linha neutra da peça. As amplitudes e os deslocamentos são constantes e alternados com o tempo.

Já o carregamento do tipo *haversine* aplica o carregamento em apenas um sentido da peça, inferior ou superior (COLPO, 2014).

2.6.4 Fatores que influenciam nos resultados

Segundo Tangella *et al.* (1990), os principais fatores responsáveis pelas variações nos resultados são a fabricação dos corpos de prova; o modo de solicitação; as variáveis da mistura; o carregamento e as variáveis ambientais.

Como relação à composição das misturas asfálticas, pode-se afirmar que a porcentagem de ligante asfáltico e a porosidade são os índices com maior influência nos resultados obtidos. Também há de se considerar o tipo de agregado, apesar de esse ter uma menor influência. Quanto maior for a porcentagem de ligante, maior será a capacidade de resistência à fadiga apresentada pela mistura asfáltica (FONTES, 2009).

Para Chiangmai (2010 *apud* MELO, 2014), os principais fatores que afetam a vida de fadiga da mistura asfáltica são os seguintes:

- Variáveis de mistura: origem, tipo e teor de ligante asfáltico; composição granulométrica; tipo, forma e origem dos agregados; volume de vazios da mistura;
- Variáveis ambientais: temperatura e umidade;
- Variáveis de carga: magnitude do carregamento; modo de carregamento; forma de carregamento; frequência de ensaio; existência de tempos de repouso.

Fontes (2009) faz algumas observações sobre a maneira com a qual algum desses itens acima influenciam nos resultados de resistência à fadiga, conforme segue:

- Ligantes mais duros são menos suscetíveis às variações de temperatura, logo, possuem maior vida de fadiga;
- Ensaio que permitem um período de repouso tendem a ter uma vida de fadiga maior, pois há o fenômeno de autorreparação do material;
- A forma dos agregados possui uma influência indireta sobre os resultados, porém, a porosidade é mais importante;
- Ensaio à deformação controlada tem um ganho na vida de fadiga conforme a temperatura é elevada. Já com ensaios à tensão controlada, ocorre o oposto;

- Com a frequência acontece o contrário, ou seja, quando há um aumento de frequência em tensão controlada há um aumento da vida de fadiga e diminuição da vida para ensaios com deformação controlada.

2.6.5 Métodos de análise do comportamento à fadiga

Os ensaios clássicos consistem em submeter amostras da mistura asfáltica à solicitações repetidas e registrar o número de ciclos necessários para que a amostra rompa (FONTES, 2009).

Alguns métodos de análise podem ser utilizados para a determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas, no que diz respeito, principalmente, à concepção das curvas de fadiga. Os principais modelos encontrados são: abordagem fenomenológicas que relacionam tensões ou deformações aplicadas ao número de ciclos até a ruptura; abordagem mecanicista da mecânica de fratura; abordagem mecanicista da energia dissipada, entre outros (MELO, 2014).

2.6.5.1 Abordagem fenomenológica

Para esse tipo de abordagem, considerado o modelo geral de fadiga, são relacionados o número de ciclos que levou a amostra à ruptura com o nível de tensão ou deformação imposto inicialmente (BERNUCCI *et al.*, 2008; ZEIADA, 2012).

O modelo de cálculo utilizado para ensaios com tensão controlada é indicado na Equação 8, e o modelo para ensaios com deformação controlada é mostrado na Equação 9.

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{n_1} \quad (8)$$

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{n_3} \quad (9)$$

Onde:

N é o número de repetições necessárias para levar à ruptura da amostra;

σ_t é a tensão de tração solicitante;

k_1 , k_3 , n_1 e n_3 são constantes obtidas de regressão linear dos pares $N \times \sigma_t$ obtidos nos ensaios.

Esse tipo de abordagem é essencialmente empírica e não proporciona uma relação entre carga e acumulação de danos na mistura. Também não é útil para representar carregamentos reais observados em campo. Além disso, a relação resistência à fadiga e deformação é tratada linearmente, algo que é considerado inadequado para valores baixos de tensão (CARPENTER *et al.*, 2003 *apud* MELO, 2014).

Para Shen (2006 *apud* ZEIADA, 2012), essa abordagem também não leva em conta a complexidade do mecanismo de mistura asfáltica, como a redistribuição de tensões, que possui um efeito significativo no comportamento à fadiga.

2.6.5.2 Abordagem mecanicista

Esse tipo de abordagem faz uma análise mais fundamental do que a abordagem fenomenológica. As abordagens da energia dissipada, da mecânica da fratura e da mecânica de dano contínuo podem ser classificadas como mecanicistas (ZEIADA, 2012).

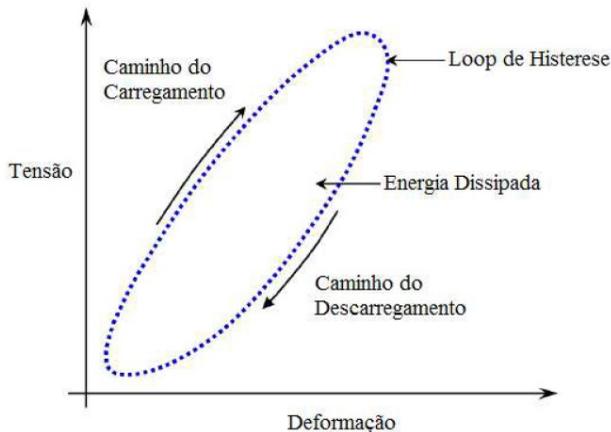
2.6.5.2.1 Abordagem da energia dissipada acumulada

Essa abordagem pode ser definida como a perda de energia registrada em cada ciclo de carregamento de um teste dinâmico (SOULIMAN, 2012; ZEIADA, 2012).

A maneira com a qual ela é aplicada atualmente assume que toda a energia dissipada prejudica o material (GHUZLAN, 2001 *apud* ZEIADA, 2012). Porém, sabe-se que para materiais asfálticos essa máxima não é válida devido à viscoelasticidade do material, mesmo que não haja danos na amostra. A energia pode ser dissipada como energia térmica, o que não deveria ser considerado para fins de falha por fadiga, visto que a liberação acontece através do processo de amortecimento, o que acaba reduzindo os danos por fadiga do material (GHUZLAN, 2001 *apud* MELO, 2014).

Durante a análise, tem-se que a energia dissipada durante o carregamento é igual a área da curva tensão *versus* deformação da Figura 14. Para misturas asfálticas, que não são puramente elásticas, os caminhos de carga e descarga do material não se sobrepõem, o que caracteriza um fenômeno chamado de histerese (DIEFENDERFER, 2009; FONTES, 2009).

Figura 14: Loop de histerese



Fonte: Adaptado de Zeiada (2012 *apud* MELO, 2014)

A energia dissipada por unidade de ciclo pode ser determinada pela Equação 10 e a energia total dissipada durante todo o ensaio pode ser calculada através do somatório das energias de cada ciclo, conforme a Equação 11.

$$W_i = \pi \times \sigma_i \times \varepsilon_i \times \sin \delta \quad (10)$$

$$W_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^N W_i \quad (11)$$

Onde:

W_i é a energia dissipada em cada ciclo i ;

σ_i é a tensão aplicada em cada ciclo i ;

ε_i é a deformação de tração em cada ciclo i ;

δ é o ângulo de fase entre os sinais de tensão e deformação;

W_{tot} é a energia total dissipada no momento da ruptura.

2.6.6 Critérios de ruptura

Os critérios de ruptura utilizados para a mistura asfáltica podem ser baseados na dissipação de energia ou na degradação da rigidez.

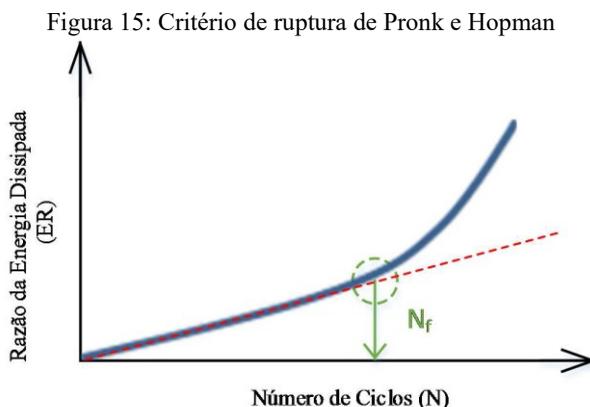
Os que se baseiam na energia dissipada são: critério de Carpenter; critério de Pronk; critério de Pronk e Hopman e critério de Rowe.

Já os fundamentados na degradação da rigidez dividem-se em: critério convencional; critério de Rowe e Bouldin; critério da ASU e critério de Franken.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso serão abordados apenas os critérios de Pronk e Hopman e o convencional.

2.6.6.1 Critério de Pronk e Hopman

Para essa abordagem, o ponto de falha (N_f) da amostra é o ponto de transição entre a fase de iniciação e a fase de propagação de fissuras. Deve-se traçar uma linha reta partindo do início. O ciclo crítico é observado quando há um desvio dessa linha, indicando a transição para a fase de ruptura, conforme Figura 15 (BAAJ, 2002).



Fonte: Hopman e Pronk (1990 *apud* MELO, 2014)

O gráfico é plotado com o número de ciclos *versus* a razão da energia dissipada. A razão entre as energias dissipadas iniciais e no ciclo n_i é a seguinte:

$$ER = n_i \times \frac{W_0}{W_n} \quad (12)$$

Onde:

ER é a razão da energia dissipada;

n_i é o ciclo de carga;

W_0 é a energia dissipada inicial, medida no 50º ciclo; e,

W_n é a energia dissipada no ciclo n_i .

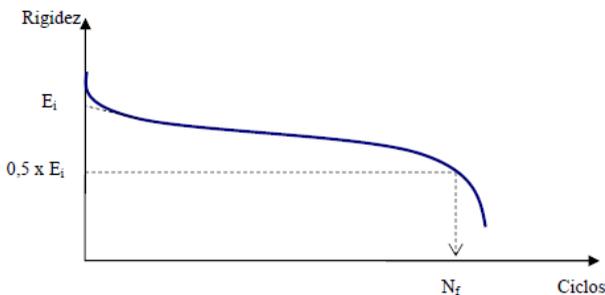
2.6.6.2 Critério convencional

A rigidez dos corpos de prova diminui na medida em que as solicitações são acumuladas (OTTO, 2009). Nos ensaios à deformação controlada, a ruptura do corpo de prova não é visível, portanto, o critério convencional determina que a falha deve ser considerada quando a amostra atinge 50% da sua rigidez inicial, conforme Figura 16 (FONTES, 2009; OTTO, 2009).

A evolução das solicitações pode ser subdividida em três fases (OTTO, 2009):

1. **Aquecimento:** Essa fase caracteriza-se por uma queda acentuada da tensão e, conseqüentemente da rigidez;
2. **Estabilização:** Apresenta uma evolução quase estável e uma lenta progressão da deterioração;
3. **Ruptura:** Ocorre uma concentração de tensões que acaba ocasionando a ruptura do corpo de prova.

Figura 16: Critério de ruptura convencional



Fonte: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (1997 *apud* FONTES, 2009)

2.7 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Um pavimento asfáltico deve ser projetado para que possua uma operação adequada ao longo do período de projeto estabelecido para àquela rodovia. Essa condição de operação vai, ao longo do tempo, sofrendo com a passagem de cargas a ações climáticas. A degradação gerada na estrutura faz com que as condições de uso sejam diminuídas e uma intervenção de manutenção, conservação ou reabilitação seja necessária para que a condição se mantenha satisfatória por mais tempo, e mantenha o ciclo de vida do pavimento, conforme o especificado em

projeto. O dimensionamento do pavimento deve garantir que ele não sofra colapso durante o tempo de vida estimado (FRANCO, 2007).

A maioria dos métodos de dimensionamento é composta de uma forte dose de empirismo. Técnicas computacionais e teorias mais avançadas permitem a utilização de modelos mais racionais, porém, a complexidade envolvida na obtenção dos dados em campo faz com que seja necessária uma calibração de informações previamente à composição da estrutura do pavimento (MOTTA, 1991).

Os métodos empíricos, tal como o Método do DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), baseados na experiência de pesquisadores, são de fácil entendimento e aplicação. Os ensaios de caracterização exigidos são simples e não requerem equipamentos elaborados. Entretanto, esse tipo de dimensionamento é bastante limitado pelas condições do ambiente em que o pavimento será inserido, uma vez que não são levadas em conta variáveis específicas de cada região e o principal mecanismo de ruptura dos pavimentos flexíveis, a fadiga (BEZERRA NETO, 2004; MELO, 2014).

Segundo Huang (2003), a maior desvantagem dos métodos empíricos é que, assim que as condições de contorno são deliberadas, a estrutura de pavimento definida só pode ser aplicada nessa configuração de materiais e carregamento. Se essas condições forem alteradas, o design proposto não é mais válido e precisa ser refeito acordo com os novos termos.

Já para Motta (1991), um método de dimensionamento é considerado mecanístico (ou analítico; ou racional) quando emprega teorias e métodos de cálculo para prever tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima que atuam na estrutura do pavimento. Fazendo isso, pode-se estimar os esforços atuantes e compatibilizá-los com as tensões resistentes.

Estudos realizados na área de pavimentação asfáltica visam criar um método moderno para o dimensionamento dos pavimentos asfálticos. Contudo, antes de dimensioná-lo de uma maneira racional, é necessário o conhecimento de variáveis de difícil determinação, tais como características dos materiais de pavimentação; o comportamento que eles apresentam quando colocados em carga; o carregamento que será aplicado na estrutura; a resistência no que diz respeito à aplicação de cargas e variações climáticas durante o período de interesse (FRANCO, 2007).

Segundo Bezerra Neto (2004), analisando um pavimento dessa maneira, é possível ter uma visão geral do funcionamento da estrutura

quando solicitada. Isso permite que se façam alterações nos materiais constituintes, bem como na espessura das camadas, possibilitando, assim, um desempenho adequado do conjunto e impedindo a ruptura precoce de alguma das partes constituintes.

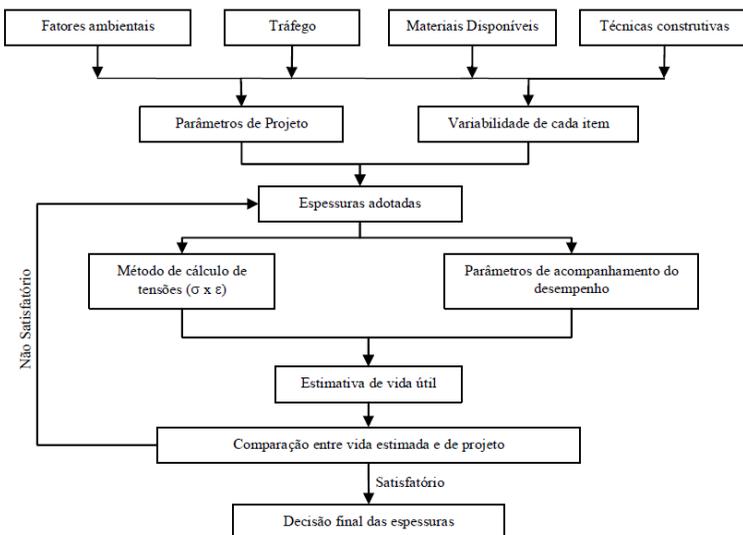
Franco (2007) considera a calibração entre campo e laboratório o elo mais fraco do dimensionamento, pois é a fonte de empirismo ainda empregada no método mecanístico, já que os modelos matemáticos utilizados traduzem para danos no pavimento as tensões, deformações e deslocamentos encontrados em laboratório.

O guia da *American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO* (1993) cita alguns dos benefícios da utilização de métodos mecanísticos:

- Melhor confiabilidade no projeto;
- Capacidade de prever defeitos específicos;
- Possibilidade de extrapolação dos resultados de laboratório e campo.

Motta (1991) desenvolveu a proposta de um fluxograma ao qual um dimensionamento mecanístico de pavimentos flexíveis deveria seguir. A Figura 17 apresenta essa proposta.

Figura 17: Fluxograma para o dimensionamento racional de um pavimento proposto por Motta (1991)



Fonte: Motta (1991 *apud* FRANCO, 2007)

O guia de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO (1993) apresenta um processo de dimensionamento muito semelhante ao proposto por Motta (1991). Em ambos, a sequência de raciocínio a ser seguida é a seguinte:

- a) os materiais disponíveis devem ser estudados e ensaiados e deve-se coletar os dados referentes aos materiais, ao tráfego e às condições ambientais;
- b) correlacionar os dados obtidos com a temperatura média esperada do revestimento devidas às sazonalidades do local, para que se obtenham informações referentes à mistura;
- c) adotar uma estrutura inicial, definindo espessuras para as camadas;
- d) calcular o estado de tensões e deformações da estrutura adotada;
- e) comparar as tensões-deformações calculadas com os valores de ruptura previamente definidos;
- f) verificar se as espessuras definidas no item c) satisfazem às condições admissíveis da estrutura. Caso positivo, o dimensionamento está concluído. Caso negativo, deve-se alterar as espessuras até que as condições sejam satisfeitas.

Cabe ressaltar que atualmente está em desenvolvimento um novo método de dimensionamento de pavimentos para as condições do Brasil. Este novo método está sendo coordenado pela Rede Temática de Tecnologia do Asfalto/Petrobras.

3 METODOLOGIA

O método utilizado para alcançar os objetivos propostos no trabalho é apresentado neste capítulo. A metodologia foi separada nas seguintes etapas:

ETAPA 1 – Definição e caracterização da mistura asfáltica: Juntamente ao Laboratório de Pavimentação da UFSC, foi selecionada uma mistura asfáltica a ser estudada.

A mistura asfáltica selecionada foi desenvolvida por Melo (2014), a qual já havia sido ensaiada à fadiga, pelo autor, nas temperaturas de 15 °C e 20 °C. Os dados brutos de resistência à fadiga referentes aos ensaios foram utilizados neste trabalho.

Nesta etapa também são apresentadas as características dos agregados utilizados para a produção da mistura asfáltica; os resultados do estudo da dosagem; a moldagem de placas; a obtenção dos corpos de prova prismáticos e os dados do comportamento reológico da mistura. Enfatiza-se que todas essas informações foram obtidas por Melo (2014).

ETAPA 2 – Realização do ensaio de resistência à fadiga a 4 °C no aparato de flexão a quatro pontos: Para desenvolver o estudo a que se propõe este trabalho, foram realizados ensaios de resistência à fadiga da mistura asfáltica selecionada na temperatura de 4 °C e frequência de 10 Hz em um total de 9 corpos de prova. Os corpos de prova foram obtidos a partir de placas da mistura asfáltica selecionada, placas remanescentes do estudo conduzido por Melo (2014).

ETAPA 3 – Tratamento dos dados obtidos nos ensaios de resistência à fadiga: Nesta fase do estudo foram aplicados a todos os resultados de resistência à fadiga, o critério de ruptura baseado na energia dissipada de Pronk e Hopman e o critério de ruptura convencional relacionado à degradação da rigidez. Ambos critérios foram aplicados aos ensaios realizados à 4 °C, 15 °C e 20 °C.

ETAPA 4 – Obtenção das curvas de fadiga para as diferentes temperaturas de ensaio: Duas curvas de fadiga foram geradas para cada temperatura ensaiada. Uma curva fundamentada na abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada, que constitui a plotagem do gráfico de número de ciclos *versus* a energia dissipada acumulada na ruptura, considerando o critério de Pronk e Hopman. A outra curva, baseada na abordagem fenomenológica, que consistiu em relacionar a

microdeformação de tração *versus* o número de ciclos, levando em conta o critério de ruptura convencional.

ETAPA 5 – Estimativa da vida de útil à fadiga do revestimento na estrutura do pavimento: Nesta fase, partindo de uma estrutura de pavimento existente, e através do *Software ViscoRoute 2.0*, estimou-se, utilizando as curvas de fadiga obtidas para cada temperatura e para cada abordagem considerada, o número de eixos padrão de 8,2 toneladas que levaria o revestimento asfáltico à ruptura por fadiga.

ETAPA 6 – Avaliação da componente viscosa (E_2) do módulo complexo do material na predição à fadiga do revestimento: A última etapa deste trabalho consistiu em avaliar a eficiência da componente viscosa (E_2) do módulo complexo do material na predição à vida à fadiga do revestimento asfáltico na estrutura do pavimento.

3.1 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

Na primeira fase do trabalho foi realizada a seleção de uma mistura asfáltica, de modo a obter-se dados relacionados ao comportamento reológico e a resistência à fadiga do material nas temperaturas de 15 e 20 °C. A mistura escolhida foi desenvolvida e estudada na tese de doutorado de Melo (2014) e tem a incorporação de 3% de nanoargila organofílica no ligante asfáltico (CAP 50-70).

Através de Melo (2014) pode-se obter informações sobre as características dos materiais utilizados na mistura, conforme as subseções a seguir.

3.1.1 Propriedades dos agregados minerais

Os agregados utilizados (brita ¾”, pedrisco e pó de pedra), foram caracterizados por Melo (2014) segundo as seguintes normativas:

- a) **ASTM D 5821** – *Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate* para a determinação da angularidade do agregado graúdo;
- b) **ASTM C 1252** – *Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate* para a determinação da angularidade do agregado miúdo;

- c) **ABNT NBR 6954** – *Lastro-padrão: Determinação da Forma do Material* para as partículas planas e alongadas;
- d) **AASHTO T 176** – *Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test* para o teor de argila;
- e) **ASTM C 131** – *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine* para a caracterização quanto à dureza;
- f) **ASTM C 88** – *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate* para a classificação quanto à sanidade;
- g) **AASHTO T 112** – *Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates* para os materiais deletérios;
- h) **ASTM C 127** – *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate* para a determinação de massa específica real, aparente e absorção do agregado graúdo;
- i) **DNER-ME 084** – *Agregado Miúdo: Determinação da Densidade Real* para a massa específica real do agregado miúdo; e,
- j) **DNER-ME 085** – *Material Finamente Pulverizado: Determinação da Massa Específica Real* para a massa específica real do material pulverulento.

3.1.2 Composição granulométrica

A composição dos agregados foi realizada através da metodologia Superpave para tamanhos nominais máximos de 19 mm. Para esta mistura, foram utilizados os agregados brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e pó de pedra, além de cal hidratada, empregada como filer.

3.1.3 Ligante asfáltico

Melo (2014) definiu para essa mistura uma porcentagem de incorporação de 3% de nanoargila organofílica na matriz de ligante asfáltico (CAP 50-70).

O nanocompósito asfáltico foi preparado no misturador de alto cisalhamento, modelo L5M-A Silverson, conforme mostra a Figura 18. A temperatura de incorporação foi de 150 °C, com cisalhamento ocorrendo a 5.000 rpm e duração de 1h40min. Essas condições de contorno foram determinadas previamente através dos ensaios de termogravimetria e difratometria de raios X.

As características do nanomaterial são provenientes do fabricante, tais como: densidade, superfície específica, tamanho, forma e do modificador orgânico (surfactante).

Figura 18: Misturador de alto cisalhamento



Fonte: Melo (2014)

O ligante asfáltico nanomodificado foi caracterizado por Melo (2014), algumas das principais características foram determinadas segundo as seguintes normativas:

- a) **ASTM D 4402** – *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer* para a determinação da viscosidade aparente;
- b) **ASTM D 5** – *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Material* para os ensaios de penetração;
- c) **ASTM D 36** – *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen: Ring-an-ball Apparatus* para a determinação do ponto de amolecimento.

3.1.4 Dosagem da mistura asfáltica

Melo (2014), formulou a mistura asfáltica conforme as prescrições da metodologia Superpave, utilizando o compactador giratório *Superpave Gyrotory Compaction* (SGP). A dosagem seguiu o que recomendam as normas AASHTO M 323 - *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design* e AASHTO R 35 - *Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt* (HMA).

Para a validação da dosagem da mistura asfáltica foi empregado o ensaio de Lottman modificado, segundo a norma AASHTO T 283.

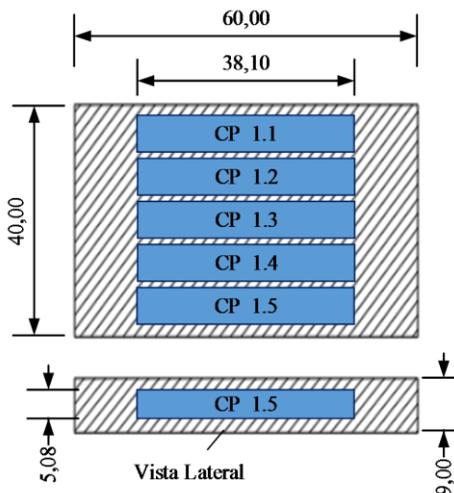
3.1.5 Produção, moldagem e caracterização das placas de mistura asfáltica

A mistura foi produzida através de um misturador mecânico. Os materiais utilizados foram aquecidos previamente, conforme as recomendações da norma AASHTO R 30 – *Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt*.

Visando o estudo do módulo complexo e da resistência à fadiga, foram compactadas na mesa compactadora LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), atual IFSTTAR (*Institut français des sciences et Technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux*), placas de concreto asfáltico de 60 cm x 40 cm x 9 cm.

Para a obtenção dos corpos de prova a serem ensaiados à fadiga e ao comportamento reológico no aparato de flexão a 4 pontos, as placas foram serradas em formato prismático (5,08cm x 6,35cm x 38,1cm), conforme mostra a Figura 19.

Figura 19: Projeção dos corpos de prova sobre a placa de concreto



Fonte: Melo (2014)

3.1.6 Avaliação da resistência à fadiga e do comportamento reológico da mistura asfáltica (MELO, 2014)

Melo (2014) avaliou a mistura asfáltica segundo o módulo complexo, em várias temperaturas e frequências de carregamento, e na resistência à fadiga a 15 e 20 °C. O mesmo equipamento foi utilizado tanto para os ensaios de módulo complexo, quanto para os testes de resistência à fadiga. Trata-se do equipamento australiano *Pneumatic 4 Point Bending Apparatus*, já apresentado na revisão bibliográfica desta pesquisa. O aparato de testes a quatro pontos é capaz de aplicar cargas cíclicas, mantendo a deformação controlada, a frequência e temperatura designada para o teste, bem como o tipo de carregamento escolhido.

O ensaio de módulo complexo, destinado a avaliar o comportamento reológico da mistura, realizado em diversas temperaturas e frequências, foi conduzido em deformação controlada e carregamento sinusoidal alternado, com amplitude máxima de deformação de 50 $\mu\text{m/m}$ (ensaio não destrutivo). A partir dos dados reológicos, Melo (2014) obteve os parâmetros do modelo de Huet e Sayegh.

Os ensaios de resistência à fadiga foram conduzidos sobre seis corpos de prova para a temperatura de 15 °C e sobre seis amostras para a temperatura de 20 °C. Seguiu-se, em ambos os casos, as diretrizes da

norma europeia EN 12697-24 - *Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 24: Resistance to Fatigue*.

Por tratar-se de um ensaio destrutivo, a frequência, amplitude de deformação e temperatura são mantidas constantes durante o ensaio. As seguintes condições de teste foram aplicadas:

- Ensaio à deformação controlada e carregamento sinusoidal;
- Critério de ruptura como sendo a redução de 50% do módulo de rigidez inicial, sendo esse valor definido no centésimo ciclo;
- Temperaturas de 15 °C e 20 °C;
- Frequência de carregamento de 10 Hz.

3.2 REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FADIGA A 4 °C NO APARATO DE FLEXÃO A 4 PONTOS

Para o desenvolvimento deste TCC, foram realizados no Laboratório de Pavimentação da UFSC os ensaios de resistência à fadiga de nove corpos de prova no aparato de flexão a 4 pontos, na temperatura de 4 °C. Ressalta-se que estes corpos de prova são remanescentes do trabalho desenvolvido por Melo (2014).

A execução dos testes obedeceu ao que preconiza a norma europeia EN 12697-24 e sob as mesmas condições adotada por Melo (2014), exceto a temperatura. Assim, os ensaios foram realizados à deformação controlada, com carregamento do tipo sinusoidal, frequência de aplicação de cargas de 10 Hz, temperatura de 4 °C e critério de ruptura como sendo a redução de 50% do módulo de rigidez inicial, valor esse definido no centésimo ciclo.

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA

Durante a execução dos ensaios no equipamento de flexão a quatro pontos, este fica conectado a um microcomputador responsável pela aquisição dos dados por meio de um *Software*. Como a norma utilizada foi a europeia, utilizou-se nesse microcomputador o *Software* UTS018, que faz a leitura instantânea dos dados durante a realização do ensaio, além de armazenar estes no microcomputador para posterior tratamento, caso o usuário necessite.

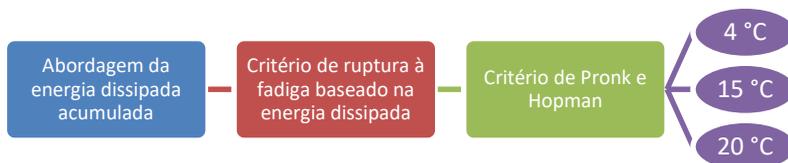
Desta forma, após a etapa de realização dos ensaios no equipamento de fadiga, foram coletados os dados brutos dos ensaios, os

quais receberam dois tipos de tratamentos. O primeiro aplicando o critério de ruptura de Pronk e Hopman e o segundo aplicando o critério de ruptura convencional. Para o primeiro, de Pronk e Hopman, utilizou-se a taxa da energia dissipada e o número de ciclos, onde plotou-se para cada corpo de prova ensaiado a taxa da energia dissipada *versus* o número de ciclos. Neste caso, o ponto de falha foi determinado quando a taxa da energia dissipada se desviou de uma linha tangente ao trecho inicial do gráfico. Para o segundo critério, a análise de dados feita levou em conta o módulo complexo e o número de ciclos, onde plotou-se para cada corpo de prova ensaiado, o módulo complexo *versus* o número de ciclos. Para este caso, a falha foi definida quando a amostra reduziu em 50% o seu módulo complexo inicial, medido no centésimo ciclo. Ressalta-se, que este foi o mesmo critério de entrada no *Software*.

3.4 OBTENÇÃO DAS CURVAS DE FADIGA PARA AS DIFERENTES TEMPERATURAS DE ENSAIO

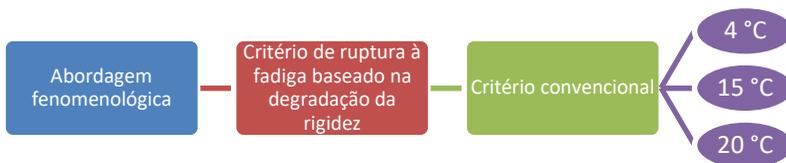
Com base na etapa anterior, pode-se plotar as curvas de fadiga do material de acordo com a abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada e da abordagem fenomenológica. Para a abordagem mecanicista foi considerado o critério de Pronk e Hopman e para a abordagem fenomenológica foi considerado o critério de ruptura convencional. Desta forma, foram obtidas duas curvas de fadiga para cada uma das três temperaturas estudadas neste Trabalho de Conclusão de Curso, ou seja, para cada temperatura obteve-se uma curva de fadiga pela abordagem mecanicista e outra pela abordagem fenomenológica, conforme esquematizado na Figura 20 e na Figura 21.

Figura 20: Fluxograma para a elaboração das curvas de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada



Fonte: Autor (2017)

Figura 21: Fluxograma para a elaboração das curvas de fadiga segundo a abordagem fenomenológica



Fonte: Autor (2017)

3.5 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL À FADIGA DO REVESTIMENTO NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO

A fim de ressaltar o efeito da temperatura no desempenho do revestimento asfáltico na estrutura do pavimento, foi realizada uma simulação numérica.

A simulação numérica, feita no *Software ViscoRoute 2.0*, foi realizada com os mesmos parâmetros utilizados no ensaio à fadiga, ou seja, velocidade de carregamento de 72 km/h (20 m/s) (equivalente a 10 Hz), temperaturas do revestimento de 4 °C, 15 °C e 20 °C e eixo padrão de 8,2 toneladas. Este, um eixo simples de roda dupla, com distância entre rodas de 32 cm, carga por roda de 2050 kgf, área de contato pneu-pavimento de 366 cm² e pressão de contato de 5,6 kgf/cm².

A estrutura de pavimento adotada para a modelização é de um segmento monitorado na BR 101, no contorno de Araranguá/SC e foi a mesma utilizada por Melo (2014) em sua tese de doutoramento. Os dados relativos às camadas estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Características da estrutura do pavimento

Espessura (cm)	Camada	Característica da camada	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
18,00	Concreto asfáltico	Viscoelástica	*	0,30
18,00	Brita graduada	Elástica	260	0,35
20,00	Macadame seco	Elástica	210	0,35
Infinito	Páleo duna	Elástica	180	0,35

*Calculado pelo programa, a partir dos parâmetros do modelo de Huet e Sayegh.

Fonte: Adaptado de Melo (2014)

Três simulações foram avaliadas para este trabalho, sendo diferenciadas pela temperatura do revestimento asfáltico. A primeira considerou o revestimento na temperatura de 20 °C, a segunda na temperatura de 15 °C e a terceira na temperatura de 4 °C. Para cada uma das simulações foram obtidas duas informações:

- a) A microdeformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento; e,
- b) A energia dissipada inicial devido ao carregamento do eixo padrão de 8,2 toneladas, calculada pela equação a seguir:

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

Onde:

W_i é a energia dissipada no ciclo de carga i ;

ε_0 é a amplitude de deformação inicial;

$|E_i^*|$ é o módulo complexo no ciclo de carga i ; e,

δ_i é o ângulo de fase no ciclo de carga i .

Para o cálculo da energia dissipada inicial gerada pelo eixo padrão de 8,2 toneladas, foram considerados os seguintes aspectos: a microdeformação de tração na fibra inferior do revestimento, gerada pelo eixo padrão; e, o módulo complexo e o ângulo de fase da mistura asfáltica na temperatura da simulação, obtidos a partir dos parâmetros do modelo de Huet e Sayegh.

De posse dessas informações e através das curvas de fadiga obtidas anteriormente, foi possível estimar o número máximo de passagens do eixo padrão de 8,2 toneladas para que o revestimento sofra ruptura por fadiga para cada uma das abordagens. Para a abordagem fenomenológica foi utilizada a microdeformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento e para a abordagem da energia dissipada acumulada foi utilizada a energia dissipada inicial, que também leva em conta a microdeformação de tração obtida na modelização.

3.6 AVALIAÇÃO DA COMPONENTE VISCOSA (E_2) DO MÓDULO COMPLEXO DO MATERIAL NA PREDIÇÃO À FADIGA DO REVESTIMENTO

A última etapa do trabalho, consistiu na avaliação da eficiência da componente viscosa E_2 na predição à fadiga do material. Segundo diversos autores, essa componente é a responsável pelos danos

irreversíveis que ocorrem no material durante o fenômeno de fadiga. Deste modo, esta etapa procurou correlacionar, para cada abordagem, a parcela viscosa do material na temperatura (20, 15 ou 4 °C) e frequência (10 Hz) de análise com a vida à fadiga do revestimento asfáltico na estrutura do pavimento. Para tanto, a parcela viscosa do módulo foi calculada a partir da Equação 14, com base nos parâmetros do modelo de Huet e Sayegh.

$$E_2 = |E^*| \operatorname{sen} \delta \quad (14)$$

Onde:

E_2 é a componente viscosa do módulo complexo;

$|E^*|$ é o módulo complexo; e,

δ é o ângulo de fase.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada uma das etapas da pesquisa.

4.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

A seleção da mistura asfáltica a ser estudada foi feita juntamente ao Laboratório de Pavimentação da UFSC. Os dados referentes à etapa 1 foram adquiridos na tese de doutoramento de Melo (2014), onde a mistura asfáltica nanomodificada com argila organofílica, designada por NA-3%, foi desenvolvida e estudada.

4.1.1 Propriedade dos agregados minerais

Os resultados apresentados na Tabela 2 referem-se às propriedades dos agregados utilizados na mistura asfáltica e foram determinadas através de ensaios, sob o que preconizam as normas citadas em 3.1.1.

Tabela 2: Propriedades dos agregados minerais

Propriedades dos agregados	Resultados	Crítérios Superpave
Massa específica real do agregado graúdo	2,953 g/cm ³	n/a
Massa específica aparente do agregado graúdo	2,880 g/cm ³	n/a
Absorção do agregado graúdo	0,849%	n/a
Massa específica real do agregado miúdo	2,974 g/cm ³	n/a
Massa específica real do material pulverulento	2,804 g/cm ³	n/a
Angularidade do agregado graúdo	100%/100%	*100%/100% min.
Angularidade do agregado miúdo	49,18%	45% min.
Partículas planas e alongadas	9,59%	10% máx.
Teor de argila (Equivalente de areia)	61,2%	50% min.
Dureza (Abrasão Los Angeles)	11,58%	35-45% máx.
Sanidade	2,14%	10-20% máx.
Materiais deletérios	0%	0,2-10% máx.

Fonte: Melo (2014)

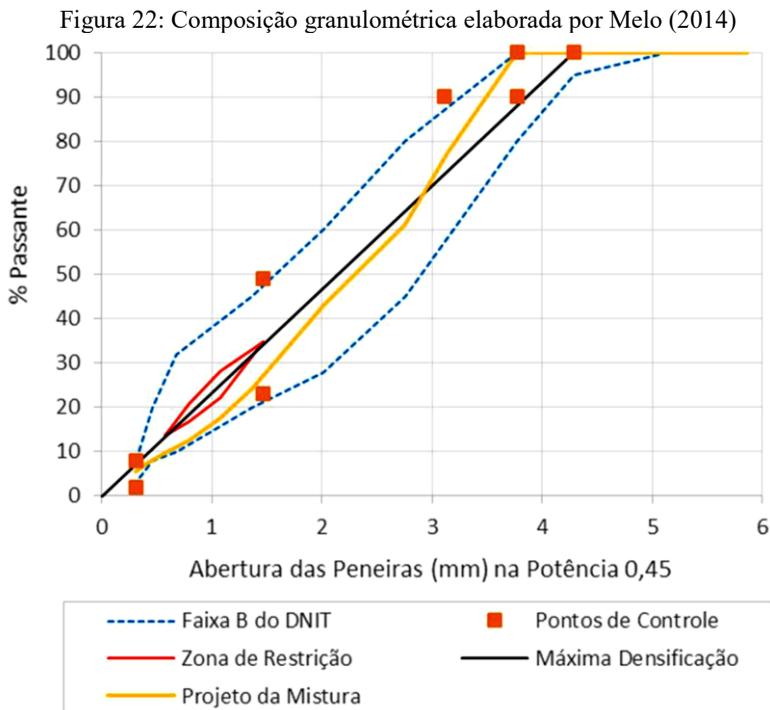
Uma cal dolomítica do tipo CH-1 foi utilizada como filer na produção mistura asfáltica.

4.1.2 Composição granulométrica

A composição granulométrica elaborada por Melo (2014) em sua pesquisa seguiu a metodologia Superpave. É composta de brita ¾”, pedrisco, pó de pedra e filer (cal hidratada).

A curva adotada para a mistura é constituída de 56,7% de agregado graúdo (passante na peneira ¾” e retido na peneira nº 4), 37,9% de agregado miúdo (passante na peneira nº 4 e retido na peneira nº 200), além de 5,4% de material pulverulento (passante na peneira nº 200 e retido no fundo).

A Figura 22 apresenta o projeto da mistura de agregados formulada.



Fonte: Melo (2014)

4.1.3 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado é o CAP 50-70 com a incorporação de 3% de nanoargila modificada. As características desse nanomaterial são apresentadas na Tabela 3, conforme especificações do fabricante.

Tabela 3: Características da nanoargila

Propriedades da nanoargila	Resultado
Tamanho da partícula (seca)	7-9 μm
Tamanho da partícula após a dispersão	1x500 nm
Densidade	1,7 g/cm^3
Componentes químicos	Resultado
Carbono	45,50%
Silício	33,42%
Alumínio	16,08%
Ferro	3,60%
Cloro	0,80%
Titânio	0,31%
Potássio	0,27%
Estrôncio	0,02%

Fonte: Adaptado de Melo (2014)

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com o ligante asfáltico. As normativas dos ensaios se encontram na seção 3.1.3.

Tabela 4: Resultado dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico

Propriedade	Resultado
Penetração (1/10 mm)	55,00
Ponto de amolecimento ($^{\circ}\text{C}$)	50,20
Suscetibilidade térmica	-0,92
Viscosidade aparente a 135 $^{\circ}\text{C}$ (Pa.s)	0,40
Viscosidade aparente a 150 $^{\circ}\text{C}$ (Pa.s)	0,20
Viscosidade aparente a 175 $^{\circ}\text{C}$ (Pa.s)	0,09

Fonte: Adaptado de Melo (2014)

4.1.4 Dosagem da mistura asfáltica

Com os dados obtidos do ensaio de compactação giratória, Melo (2014) definiu para a mistura com nanocompósito NA-3% um teor ótimo

de ligante de 4,35%. As principais características da dosagem estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Características da dosagem com teor de ligante de 4,35%

Propriedade	Resultado
Massa específica máxima (g/cm ³)	2,685
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,577
Volume de vazios (%)	4,01
Relação betume/vazios (%)	71,57
Vazios do agregado mineral (%)	14,12
Relação finos/betume efetivo	1,37

Fonte: Adaptado de Melo (2014)

A resistência da mistura ao efeito da água foi avaliada pelo ensaio de Lottman modificado. Melo (2014), verificou que não houve dano ocasionado pela umidade induzida maior que 30%.

4.1.5 Produção, moldagem e caracterização das placas de mistura asfáltica

O processo de compactação das placas (60 cm x 40 cm x 9 cm) necessárias para a confecção das amostras a serem testadas à fadiga e módulo complexo foi realizado por Melo (2014) na mesa compactadora LCPC (atual IFSTTAR), até que se atingisse a altura de 9 cm. O resultado final da compactação é apresentado na Figura 23.

Figura 23: Aspecto final da placa com dimensões de 60 cm x 40 cm x 9 cm



Fonte: Melo (2014)

Progredindo com a aquisição das amostras finais, as placas foram serradas até que se obtivessem os corpos de prova prismáticos (5,08 cm x 6,35 cm x 38,1 cm). A Figura 24 contempla o resultado final.

Figura 24: Corpos de prova prismáticos



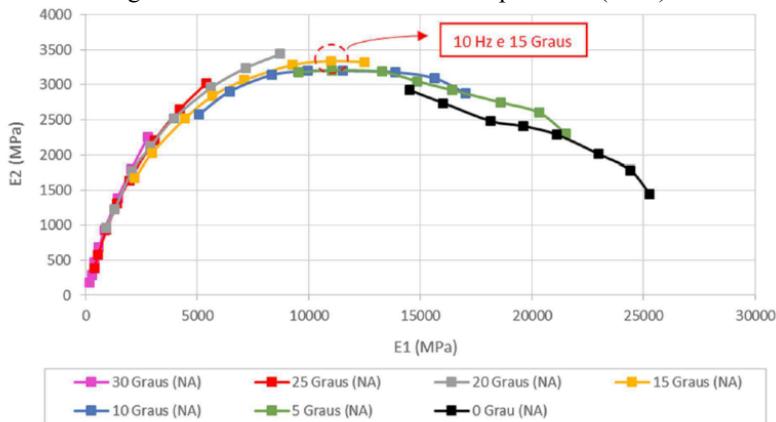
Fonte: Melo (2014)

Cada placa gerou 5 amostras prismáticas a serem caracterizadas em relação ao volume de vazios. As amostras de NA-3% obtiveram uma média de 3,85% de volume de vazios com um desvio padrão de 0,38%.

4.1.6 Avaliação da resistência à fadiga e do comportamento reológico da mistura asfáltica (MELO, 2014)

Os ensaios de módulo complexo, realizados em diversas temperaturas e frequências, foram executados por Melo (2014). O plano complexo Cole-Cole, apresentado na Figura 25 demonstra, através da relação entre as componentes E_1 (componente elástica) e E_2 (componente plástica), o comportamento reológico do material. Esse tipo de representação é criado para que se possa avaliar as temperaturas e frequências críticas, isto é, as variáveis que geram uma maior parcela de componente viscosa (E_2). Os testes são realizados em sete diferentes temperaturas e cada temperatura é ensaiada sob oito variações de frequência. Segundo o plano Cole-Cole, a temperatura de 15 °C com 10 Hz de carregamento seria crítica para o material, levando em conta apenas a componente E_2 , pois é o ponto que apresenta o maior valor da componente viscosa, quando comparada com as demais.

Figura 25: Plano Cole-Cole elaborado por Melo (2014)



Fonte: Melo (2014)

O modelo matemático de Huet-Sayegh foi usado para representar o conjunto de dados experimentais, expresso pelo plano Cole-Cole. Através do *Software Viscoanalyse*, foram encontrados os parâmetros do modelo, que são apresentados na Tabela 6. Essas grandezas serão necessárias para a simulação numérica do pavimento. A partir desses parâmetros, o *Software ViscoRoute 2.0* pode calcular o módulo da mistura asfáltica para qualquer temperatura e frequência de carregamento. O cálculo é realizado através da Equação 7.

Tabela 6: Parâmetros viscoelásticos do modelo de Huet-Sayegh

Parâmetros viscoelásticos	
E_{∞}	33864,1
ν	0,3
E_0	1,23756
k	0,166642
h	0,56079
δ	1,76482
A_0	3,2907
A_1	-0,487376
A_2	0,0034478

Fonte: Adaptado de Melo (2014)

Quanto aos ensaios de fadiga nas temperaturas de 20 e 15 °C, a Tabela 7 apresenta os dados obtidos por Melo (2014) após a realização dos

testes. As informações apresentadas abrangem o principal parâmetro inserido no programa UTS018 (microdeformação) e os dados resultantes (módulo inicial, módulo final e número de ciclos até o término do teste). O término do teste foi definido quando há a redução de 50% do módulo inicial.

Tabela 7: Dados brutos dos ensaios de resistência à fadiga em 15 e 20 °C

CP	Microdeformação inicial	Módulo inicial (100° ciclo) (MPa)	Módulo final (MPa)	Número total de ciclos
Temperatura de 15°C				
10	150	12520	6259	103997
11	100	11621	5809	929186
13	200	12221	6110	34582
14	150	11370	5684	117539
15	150	12535	6266	165773
16	200	11249	5713	32164
Temperatura de 20°C				
18	150	7959	3980	204386
19	100	8288	4143	1719490
20	200	7474	3736	63775
21	150	7867	3933	202653
22	200	8246	4123	44220
23	100	8481	4240	1483987

Fonte: Adaptado de Melo (2014)

4.2 ETAPA 2: REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FADIGA A 4 °C NO APARATO DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS

Os ensaios de fadiga que buscam complementar a avaliação almejada por esse trabalho foram realizados no Laboratório de Pavimentação da UFSC durante o primeiro semestre de 2017.

O teste é realizado no aparato de flexão a quatro pontos, sob deformação controlada, carregamento sinusoidal, temperatura de 4 °C e frequência de carregamento de 10 Hz. Essa frequência foi admitida por ter sido a utilizada nos ensaios realizados por Melo (2014), de 15 °C e 20

°C. Como o objetivo da pesquisa é avaliar a variação da temperatura, não há justificativa para a alteração dessa grandeza, a frequência. O critério para o término de cada ensaio foi definido como a redução de metade do módulo complexo inicial, medido no centésimo ciclo.

No total, 9 corpos de prova foram ensaiados a 4 °C sob diferentes microdeformações. Os valores escolhidos visaram a elaboração de uma curva de fadiga representativa do material. Os resultados obtidos com os ensaios estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Dados brutos dos ensaios de resistência à fadiga em 4 °C

CP	Microdeformação inicial	Módulo inicial (100° ciclo) (MPa)	Módulo final (MPa)	Número total de ciclos
Temperatura de 4°C				
1	138	22813	11405	174757
2	145	27083	13541	86390
3	204	28183	14090	28954
4	113	26938	13467	574196
5	157	24077	12033	58243
6	158	23662	11826	57373
7	115	26532	13264	829623
8	125	24705	12351	199642
9	215	25572	12779	32810

Fonte: Autor (2017)

4.3 ETAPA 3: TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA

Após a execução dos ensaios, os dados brutos coletados pelo programa UTS018 foram levados para o programa Excel para que o critério de ruptura de Pronk e Hopman fosse determinado. No caso do critério convencional, os dados foram gerados automaticamente pelo programa UTS018, uma vez que foi o critério de ruptura selecionado para a realização do teste.

A Tabela 9 apresenta o N_f determinado pelos dois critérios, de Pronk e Hopman e o convencional. O primeiro é definido quando há uma mudança no comportamento da amostra, observada através do gráfico. Para realizar essa determinação, uma reta tangente à curva obtida no

ensaio é plotada. Quando essa reta descola da curva, ou seja, quando a representação da taxa de energia dissipada *versus* número de ciclos deixa de ser linear, é então determinada a ruptura do material. Já o critério convencional, conforme mencionado anteriormente, tem seu colapso quando a amostra reduz 50% do seu módulo inicial. Como para esse critério o ponto de ruptura é o mesmo do término do ensaio, precisa-se apenas coletar do programa o número de ciclos medido ao fim do teste.

Tabela 9: Determinação da ruptura segundo os critérios de Pronk e Hopman e o convencional

CP	Microdeformação inicial	Critério de Pronk e Hopman	Critério Convencional
Temperatura de 4°C			
1	138	98900	174757
2	145	62614	86390
3	204	23805	28954
4	113	305102	574196
5	157	29400	58243
6	158	31502	57373
7	115	398108	829623
8	125	149816	199642
9	215	18982	32810
Temperatura de 15°C			
10	150	50505	103997
11	100	445932	929186
13	200	12933	34582
14	150	47680	117539
15	150	77625	165773
16	200	14126	32164
Temperatura de 20°C			
18	150	93685	204386
19	100	750855	1719490
20	200	23000	63775
21	150	75586	202653
22	200	16000	44220
23	100	678393	1483987

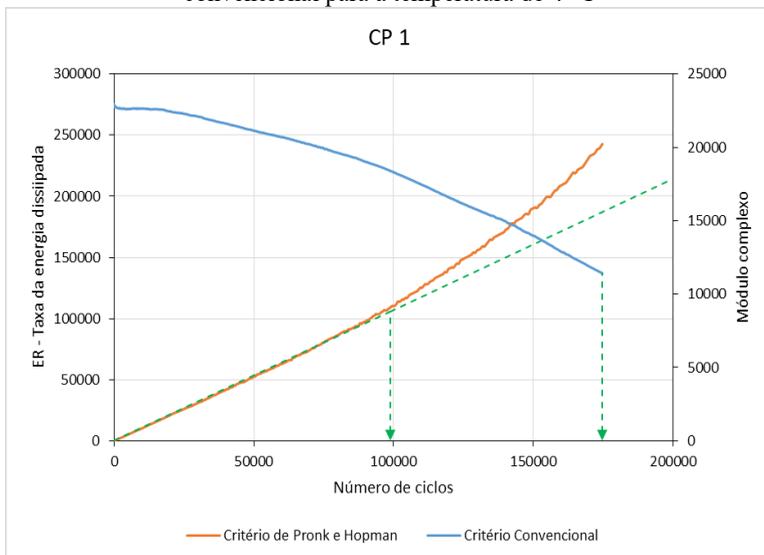
Fonte: Autor (2017)

As Figuras abaixo apresentam, concomitantemente, a representação gráfica dos dois critérios utilizados para cada corpo de

prova ensaiado. Elas foram elaboradas visando identificar a maneira com a qual o número de ciclos que levou a amostra ao colapso (N_f) é obtida. Da Figura 26 até a Figura 34 são apresentados os resultados dos ensaios na temperatura de 4 °C. Da Figura 35 até a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, estão relacionados os gráficos referentes a 15 °C e, portanto, da Figura 41 até a Figura 45, os que dizem respeito a 20 °C.

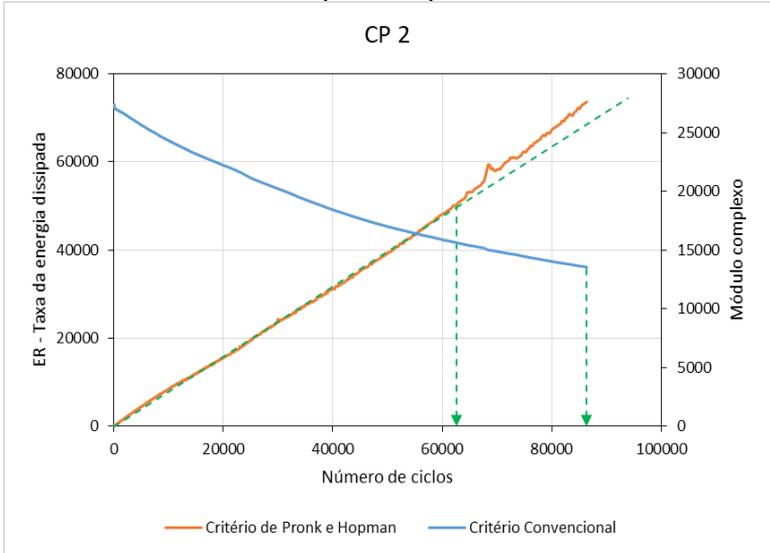
Observa-se, em todos os gráficos, o conservadorismo do critério de Pronk e Hopman em relação ao convencional. Isso se dá, pois, esse critério considera o dano sofrido pela amostra antes de romper. O critério convencional não leva isso em conta, logo, gera um resultado mais superficial e menos conservador.

Figura 26: CP1 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C



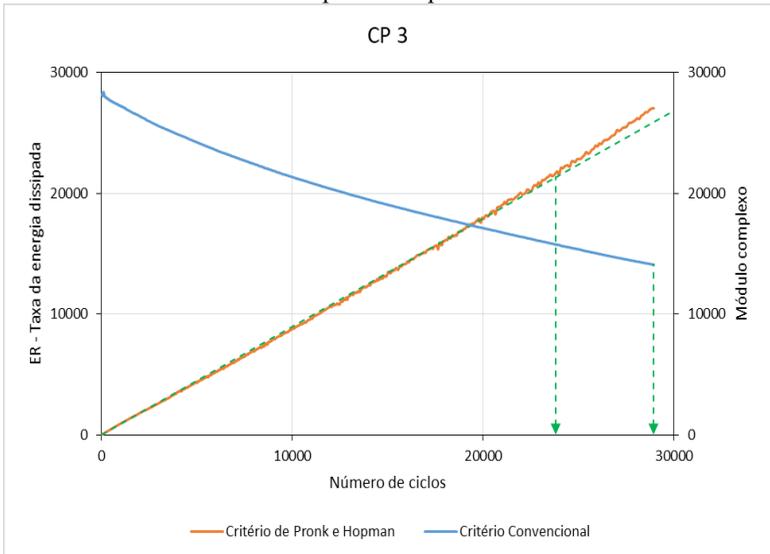
Fonte: Autor (2017)

Figura 27: CP2 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C



Fonte: Autor (2017)

Figura 28: CP3 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C



Fonte: Autor (2017)

Figura 29: CP4 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C

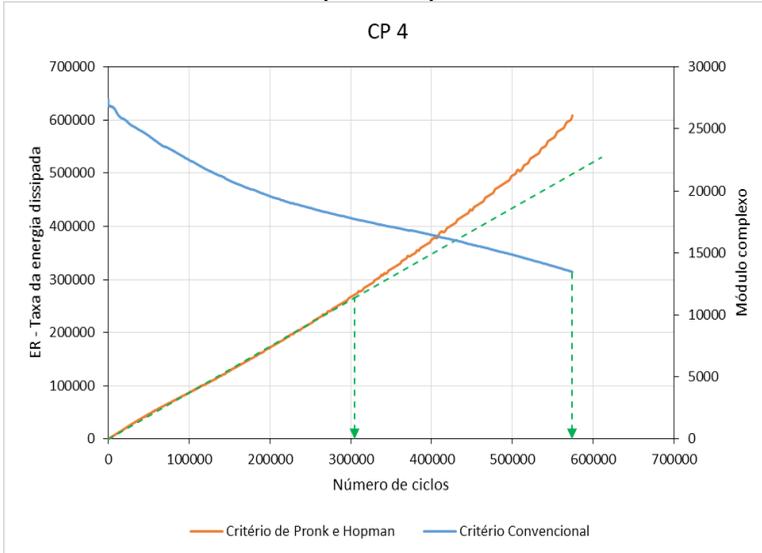


Figura 30: CP5 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C

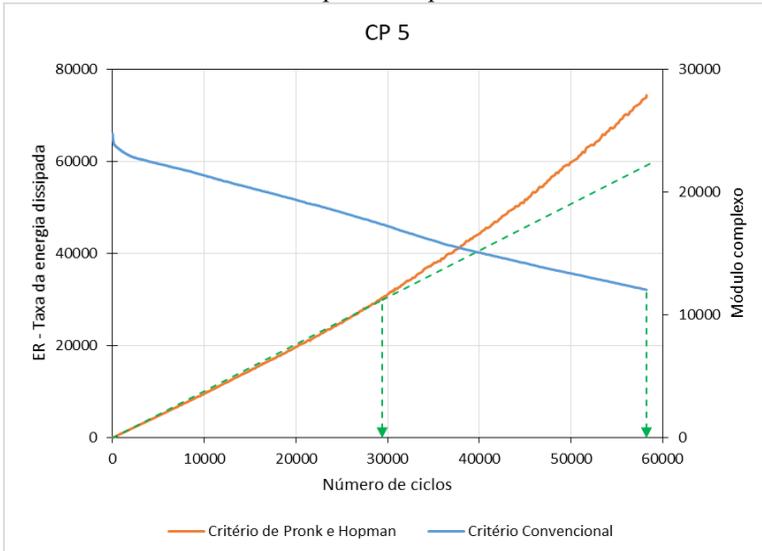


Figura 31: CP6 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C

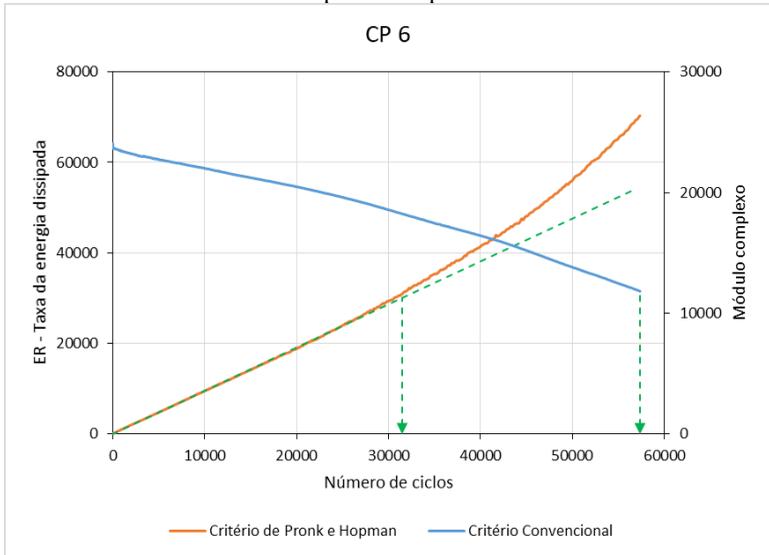


Figura 32: CP7 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C

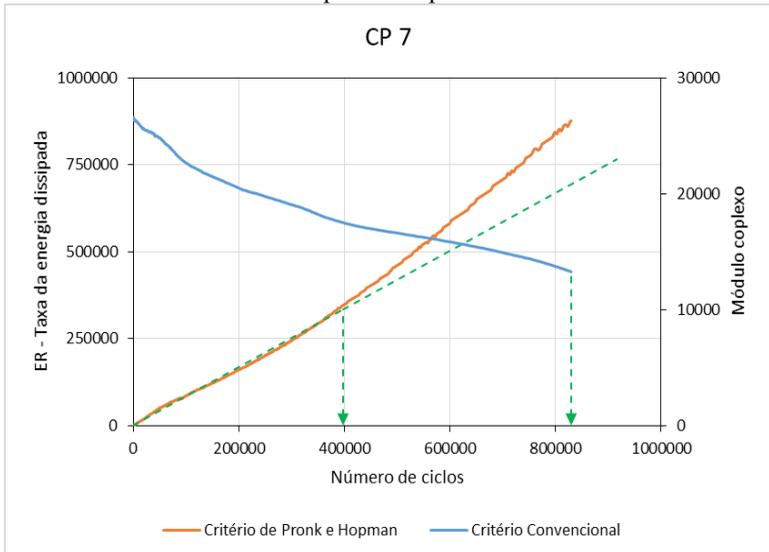


Figura 33: CP8 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C

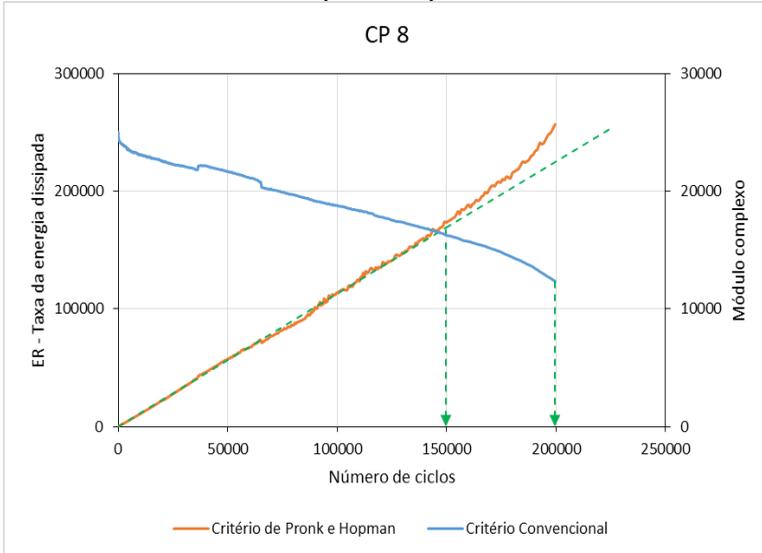


Figura 34: CP9 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 4 °C

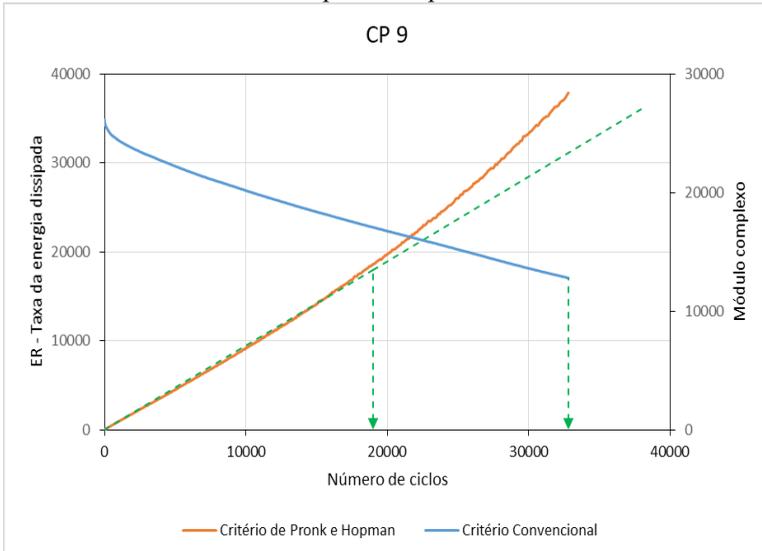


Figura 35: CP10 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C

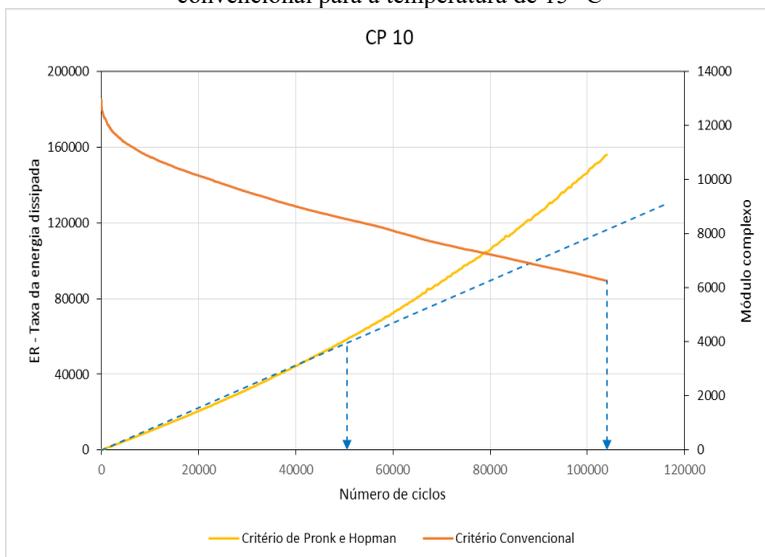


Figura 36: CP11 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C

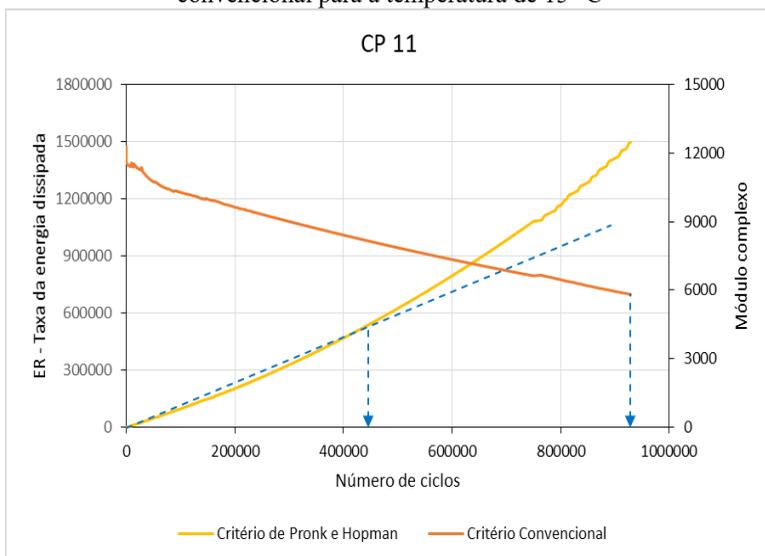
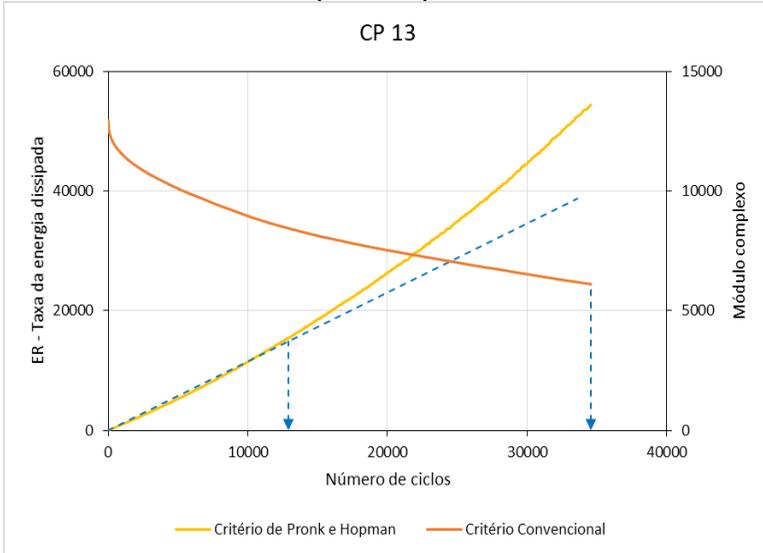
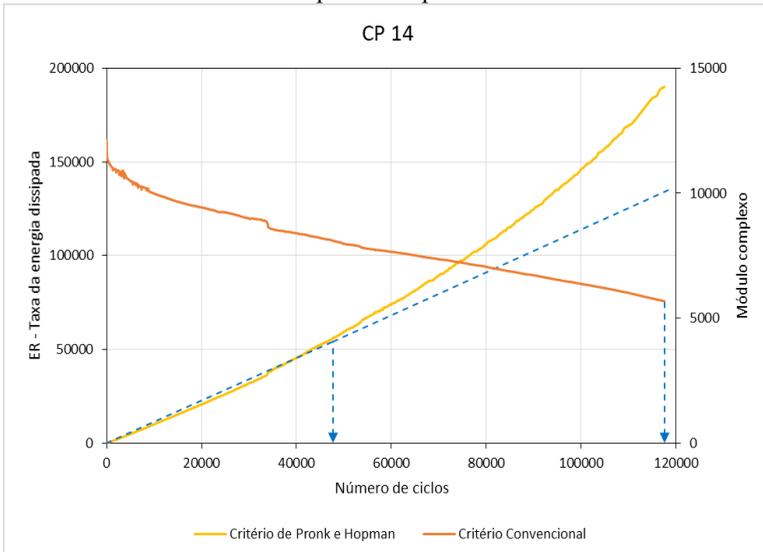


Figura 37: CP13 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C



Fonte: Autor (2017)

Figura 38: CP14 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C



Fonte: Autor (2017)

Figura 39: CP15 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C

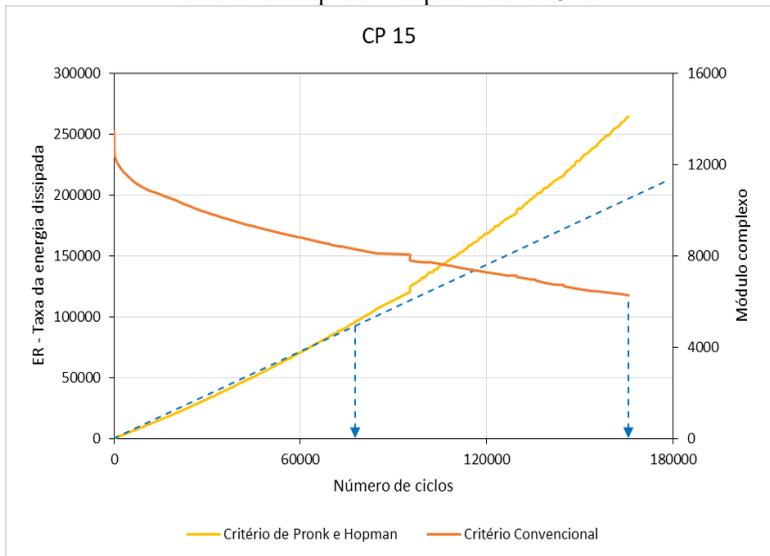


Figura 40: CP16 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 15 °C

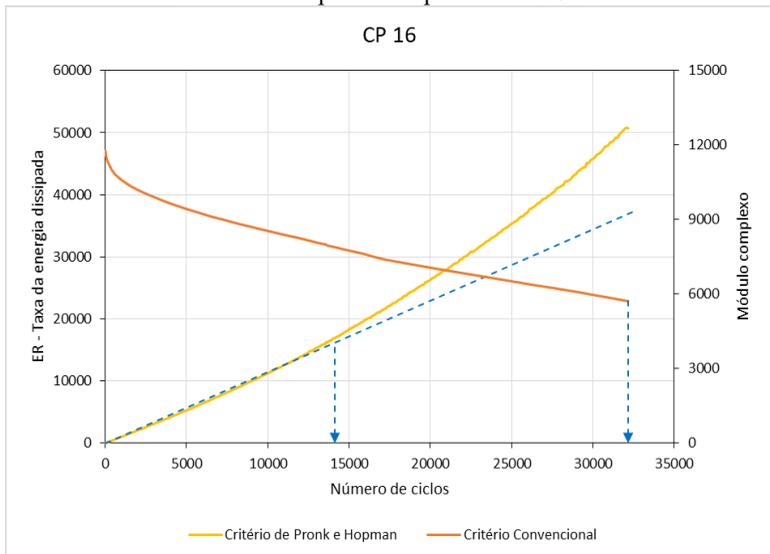
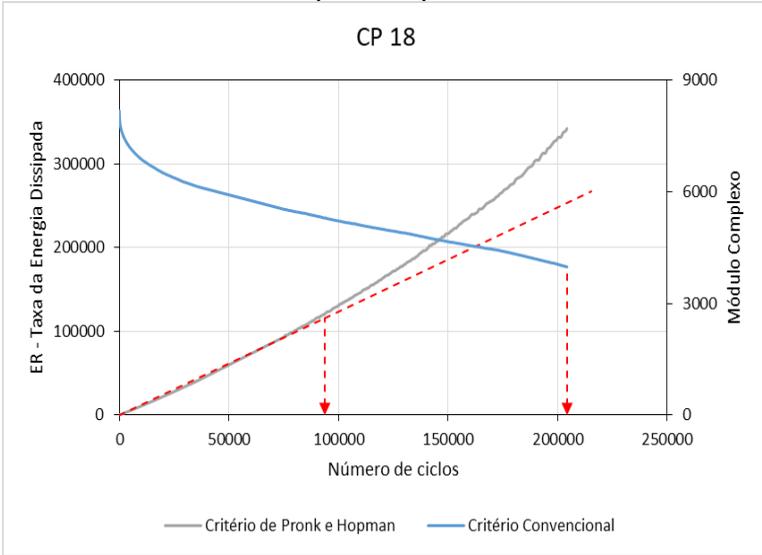
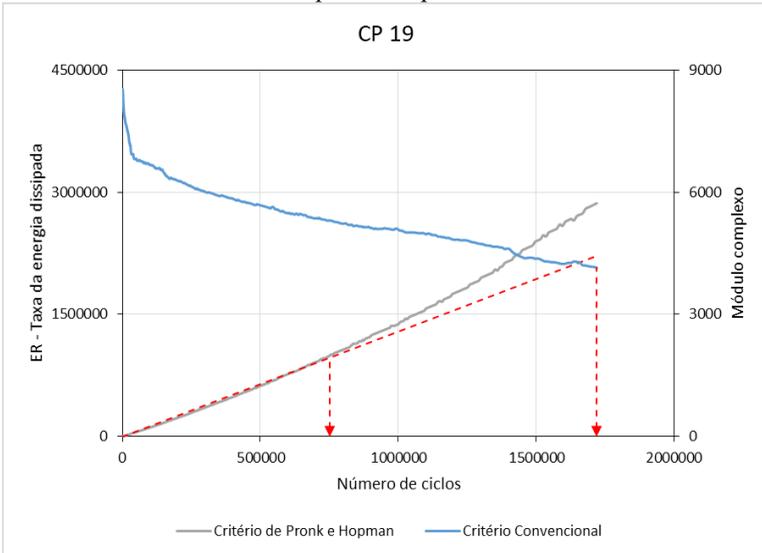


Figura 41: CP18 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C



Fonte: Autor (2017)

Figura 42: CP19 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C



Fonte: Autor (2017)

Figura 43: CP20 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C

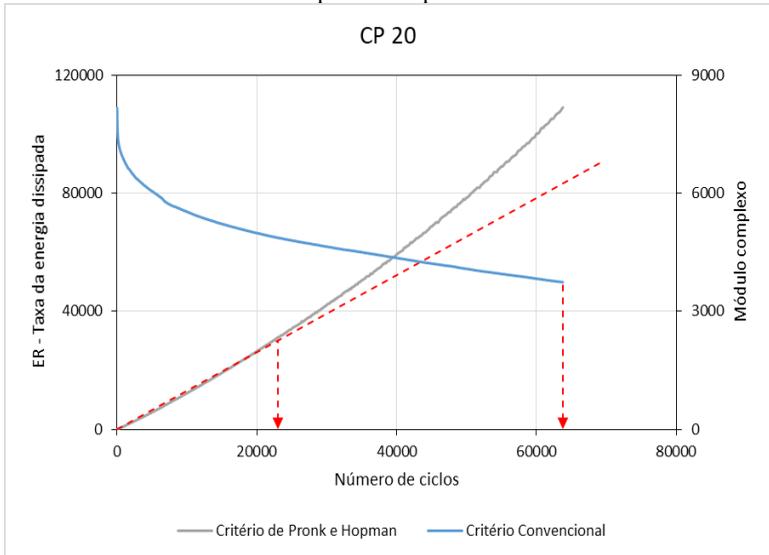


Figura 44: CP21 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C

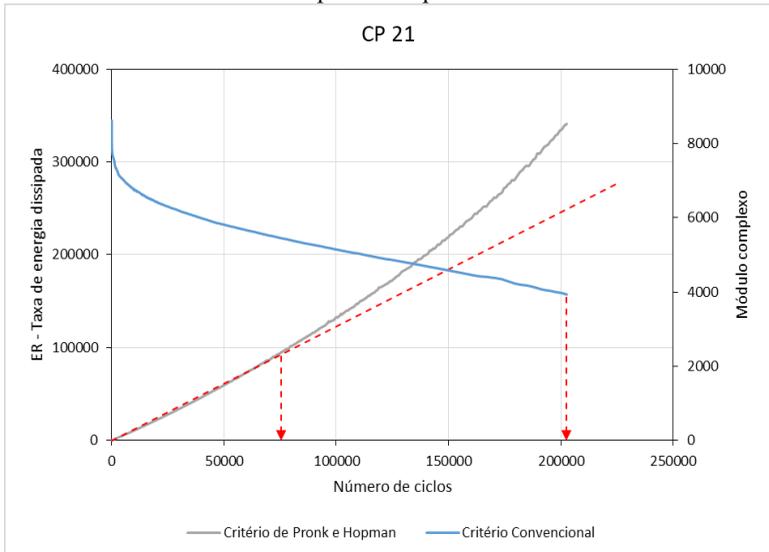
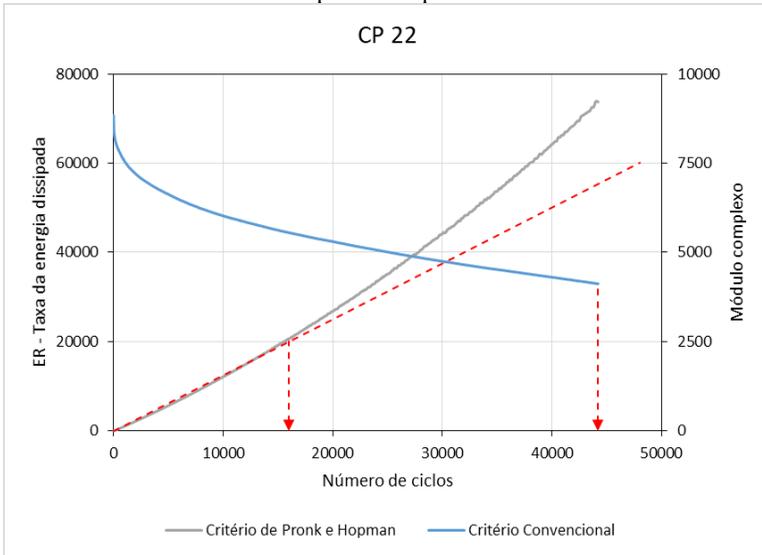


Figura 45: CP22 - Definição do N_f para os critérios de Pronk e Hopman e convencional para a temperatura de 20 °C



Fonte: Autor (2017)

4.4 ETAPA 4: OBTENÇÃO DAS CURVAS DE FADIGA PARA AS DIFERENTES TEMPERATURAS DE ENSAIO

Essa etapa consistiu em obter um modelo de fadiga para cada temperatura e abordagem estudada. Ou seja, cada abordagem disporá de três equações de fadiga, uma para cada temperatura analisada.

Nas seções a seguir são apresentadas as equações obtidas. Cabe salientar que as equações de fadiga da abordagem fenomenológica, para as temperaturas de 15 e 20 °C foram desenvolvidas por Melo (2014). As demais são fruto deste trabalho.

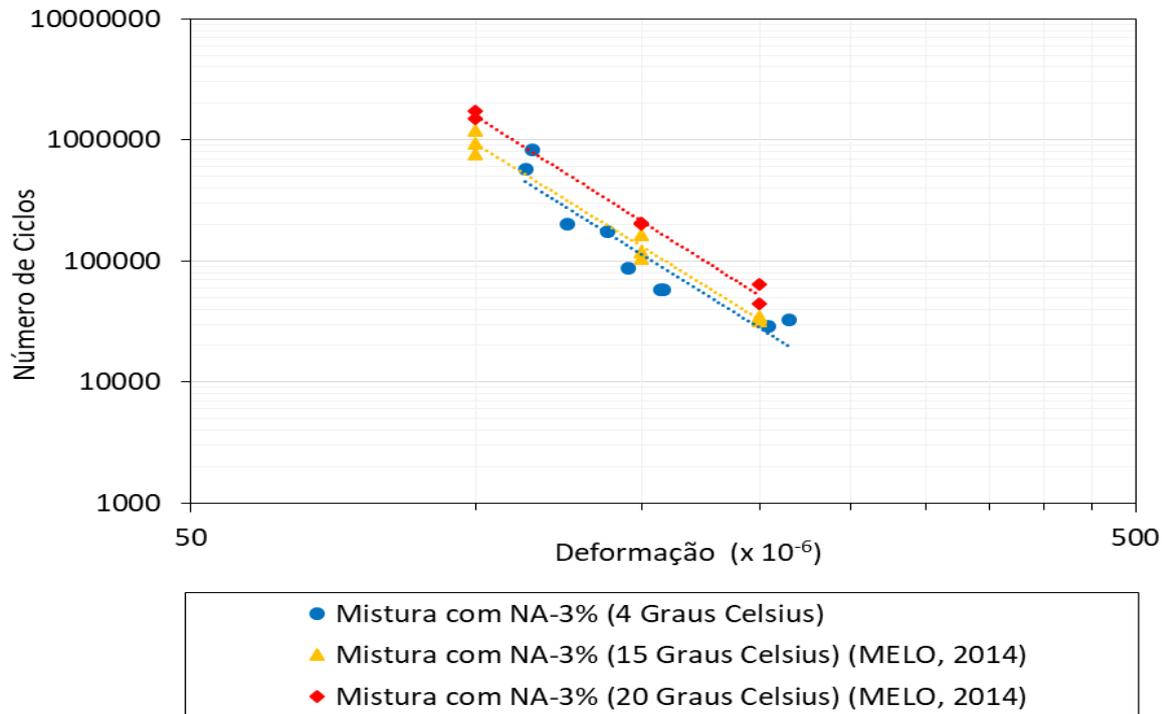
4.4.1 Abordagem fenomenológica

A abordagem fenomenológica gera um modelo não mecanicista de fadiga, pois consiste apenas em plotar a microdeformação *versus* o número de ciclos quando atingido o critério de ruptura convencional, que é o mesmo critério adotado para o término do ensaio no *Software* UTS018. O modelo é a equação matemática que representa os dados experimentais. Cada ponto experimental no gráfico representa um corpo de prova ensaiado sob uma determinada microdeformação, na frequência

de 10 Hz, solicitação sinusoidal e na temperatura a que se refere a curva de fadiga.

A Figura 46 apresenta as três curvas de fadiga obtidas segundo essa abordagem. Sendo as curvas de 15 e 20 °C de Melo (2014).

Figura 46: Modelo de fadiga segundo a abordagem fenomenológica



Fonte: Autor (2017)

Segundo a Figura 46, independente da temperatura, quanto maior a microdeformação imposta ao corpo de prova, menor é a vida de fadiga encontrada. O que já era esperado, pois, se a amostra sofrer uma maior deformação a cada ciclo de carga aplicado pelo teste, a resistência à fadiga do material tende a ser menor e a falha é esperada mais cedo.

Nota-se que, quando apenas o modelo de fadiga é avaliado, as maiores temperaturas apresentam uma maior vida de fadiga, considerando uma mesma microdeformação. No geral, quando se analisa apenas as curvas, a temperatura de 4 °C é a que produz os piores resultados.

É importante salientar que a vida de fadiga não deve ser avaliada apenas pelas curvas obtidas, uma vez que para a criação delas não são levados em conta a estrutura do pavimento e o carregamento atuante, portanto, elas são apenas uma parte do processo para a obtenção da estimativa da vida útil do revestimento asfáltico.

Os modelos de fadiga gerados para cada temperatura têm como variáveis a microdeformação e o número de ciclos para ruptura. Sendo assim, ao inserir qualquer microdeformação desejada na equação gerada, tem-se, imediatamente, a vida de fadiga relacionada a essa grandeza.

O coeficiente de correlação R^2 , apresentado na Tabela 10, indica o quão fortemente relacionados estão as variáveis e o quão representativo o modelo é dos dados experimentais. Quanto mais próximo de 1, mais forte é a correlação e melhor o modelo representa os dados experimentais.

Tabela 10: Valores de R^2 para o modelo de fadiga segundo a abordagem fenomenológica

Temperatura	Coefficiente R^2 das equações de fadiga
4°C	0,869
15°C	0,987
20°C	0,993

Fonte: Autor (2017)

Conforme a Tabela 10, para todas as equações de fadiga, o grau de correlação é considerado forte ($> 0,8$) segundo a classificação de Karl Pearson.

As equações matemáticas que representam a resistência à fadiga do material estão elencadas nas Equações 14, 15 e 16, para as temperaturas de 4 °C, 15 °C e 20 °C, respectivamente.

$$N_f = 4,46 \times 10^{15} \times \varepsilon^{-4,87} \quad (14)$$

$$N_f = 4,15 \times 10^{15} \times \varepsilon^{-4,83} \quad (15)$$

$$N_f = 1,09 \times 10^{16} \times \varepsilon^{-4,92} \quad (16)$$

Onde:

N_f é a vida de fadiga do material; e,

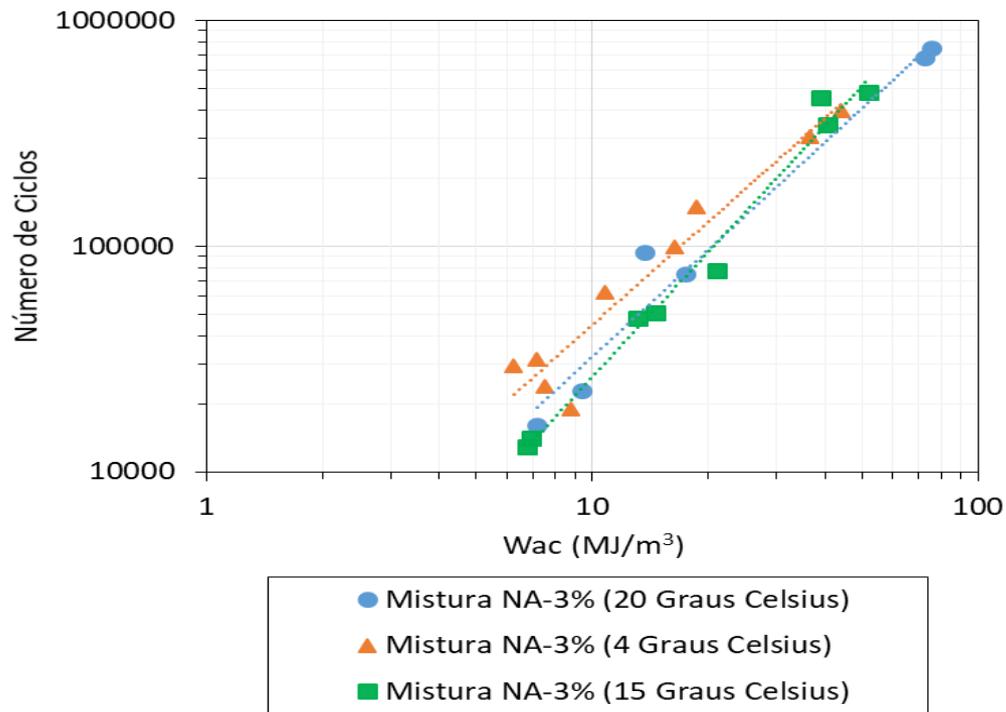
ε é a microdeformação atuante.

4.4.2 Abordagem mecanicista da energia dissipada acumulada

Para conceber o modelo de fadiga segundo essa abordagem, é preciso conhecer a energia dissipada acumulada no momento da ruptura, ou seja, a soma da energia dissipada em cada ciclo de carregamento até o ponto de falha. A energia dissipada acumulada é um dado armazenado pelo próprio programa UTS018 ao longo do ensaio.

A elaboração das curvas de fadiga segundo essa abordagem consiste na plotagem da energia dissipada acumulada *versus* o número de ciclos quando atingido o critério de ruptura de Pronk e Hopman. Cada ponto inserido representa um corpo de prova ensaiado sob as condições anteriormente descritas. Após isso, o modelo matemático é adicionado aos pontos para que seja possível criar uma equação representativa e, por conseguinte, encontrar a vida de fadiga em qualquer outra situação, baseado nos dados experimentais obtidos em laboratório. Esse modelo é apresentado na Figura 47.

Figura 47: Modelo de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada



Fonte: Autor (2017)

Através da Figura 47 percebe-se que, quando observado apenas o modelo de fadiga, a temperatura mais baixa (4 °C) apresenta os melhores resultados de vida de fadiga quando analisadas as mesmas energias dissipadas acumuladas. Porém, as curvas estão muito mais parecidas entre si, ressaltando a importância de não as avaliar isoladamente, pois a vida de fadiga não deve ser avaliada apenas pelas curvas obtidas, uma vez que, para a criação delas não são levados em conta a estrutura do pavimento e o carregamento atuante.

Ao contrário do observado na abordagem anterior, em que a vida de fadiga era maior quanto menor era a deformação, aqui quanto maior a energia dissipada acumulada no momento da ruptura, maior é a vida de fadiga encontrada. Considerando que, quanto mais tempo a amostra leva para romper, mais ciclos de dissipação de energia ela tem, pode-se assumir que esse resultado era esperado.

Conforme a Tabela 11, o valor de R^2 é considerado muito forte ($>0,9$), segundo a classificação de Karl Pearson. Isso demonstra que os dados obtidos segundo essa abordagem possuem grande correlação entre si e representam bem os valores obtidos em laboratório.

Tabela 11: Valores de R^2 para o modelo de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada

Temperatura	Coefficiente R^2 das equações de fadiga
4 °C	0,9292
15 °C	0,9856
20 °C	0,9681

Fonte: Autor (2017)

A representação das curvas de fadiga é dada através das equações 17, 18 e 19, para as temperaturas de 4 °C, 15 °C e 20 °C, respectivamente.

Da mesma forma que nas curvas de fadiga, se as equações forem analisadas de forma avulsa, também apresentam uma maior vida de fadiga para as temperaturas inferiores. Nesse caso, porém, a temperatura intermediária de 15 °C tem o pior desempenho, algo que não era perceptível pela curva.

$$N_f = 1358,8 \times W_{ac}^{1,5187} \quad (17)$$

$$N_f = 380,54 \times W_{ac}^{1,8417} \quad (18)$$

$$N_f = 863,7 \times W_{ac}^{1,5744} \quad (19)$$

Onde:

N_f é a vida de fadiga; e,

W_{ac} é a energia dissipada acumulada.

4.5 ETAPA 5: ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL À FADIGA DO REVESTIMENTO NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO

Após a definição das equações de fadiga, parte-se para a designação da vida útil à fadiga do revestimento na estrutura do pavimento. Para tanto, é preciso determinar a microdeformação de tração atuante na superfície inferior da camada de revestimento através do *Software ViscoRoute 2.0*.

A simulação numérica necessita de dois grupos de informação distintos: estrutura do pavimento e carregamento atuante. As características da estrutura do pavimento foram definidas conforme a Tabela 1 e mediante a inserção de parâmetros viscoelásticos da mistura asfáltica, apresentados na Tabela 6, definidos pela modelização de Huet-Sayegh, além da definição da temperatura do revestimento asfáltico na simulação. Como o objetivo da pesquisa é avaliar o efeito da temperatura, as demais condições, exceto essa, permanecem inalteradas nas três simulações realizadas (vide seção 3.5). Quanto ao carregamento, foi considerado o eixo padrão de 8,2 toneladas.

A Figura 48 e a Figura 49 apresentam, respectivamente, os dados da estrutura e do carregamento, inseridos no *ViscoRoute 2.0*.

Figura 48: Dados da estrutura do pavimento no *Software ViscoRoute 2.0*

Structure | Chargement | Résultats

C:\Users\Geórgia\Downloads\Modelagem no ViscoRoute Mistura NA.str

Nb de couches



	Z (m)	Epais. (m)	Module E (MPa)	Coef. de Poisson	Mas. Vol. (kg/m3)	Type de matériau	Comport.	Type de liaison	Module E0 (MPa)	T (°C)	k (loi H-S)	h (loi H-S)	delta (loi H-S)	A0	A1	A2
1	0.180	0.180	33864.10000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	1.23756	4.000	0.167	0.561	1.765	3.291	-0.487	0.003448
2	0.360	0.180	260.00000	0.350	2480.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
3	0.560	0.200	210.00000	0.350	2200.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
4		infini	180.00000	0.350	1850.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000

Fonte: *ViscoRoute 2.0*Figura 49: Dados do carregamento do pavimento no *Software ViscoRoute 2.0*

Structure | Chargement | Résultats

C:\Users\Geórgia\Downloads\Configuração do Carregamento.cha

Vitesse de charge (m/s) Nombre de charges

Nb cas d'observation



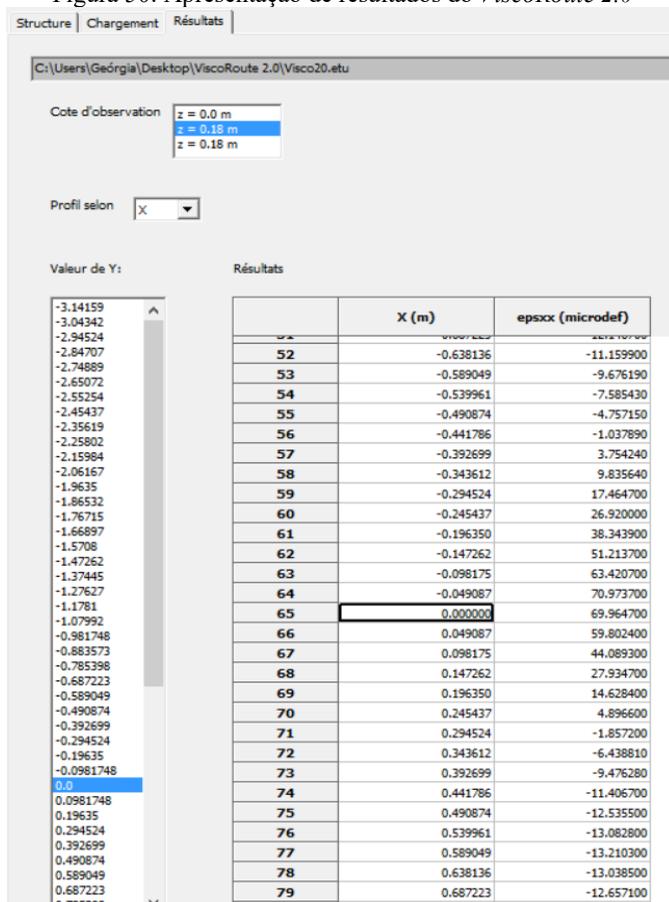
	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Type de charge	a (m)	b (m)	x (m)	y (m)
1	0.000	0.000	20500.000	Ellipse	0.108	0.108	0.000	-0.160
2	0.000	0.000	20500.000	Ellipse	0.108	0.108	0.000	0.160

	Cote (m)	Sortie
1	0.00000	uz (m)
2	0.18000	epsxx (microdef)
3	0.18000	epszz (microdef)

Fonte: *ViscoRoute 2.0*

Conforme a Figura 50, o valor crítico da microdeformação de tração foi adotado no ponto (0,0), que corresponde ao ponto central entre as duas rodas e, local que ocorre a sobreposição dos efeitos causados por elas. No que tange à profundidade, a deformação de tração é tomada na fibra inferior da camada de revestimento, que tem 18 cm de espessura. A Figura 50 apresenta a obtenção do resultado para 20 °C.

Figura 50: Apresentação de resultados do *ViscoRoute 2.0*



Fonte: *ViscoRoute 2.0*

De acordo com a Figura 50, a microdeformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico a 20 °C, ocasionada pelo eixo padrão de 8,2 toneladas, é da ordem de 70 $\mu\text{m}/\text{m}$. Os valores apresentados na

Tabela 12 são os resultados obtidos pelo programa para as temperaturas de 4 °C, 15 °C e 20 °C.

Tabela 12: Microdeformações atuantes na fibra inferior do revestimento para cada temperatura

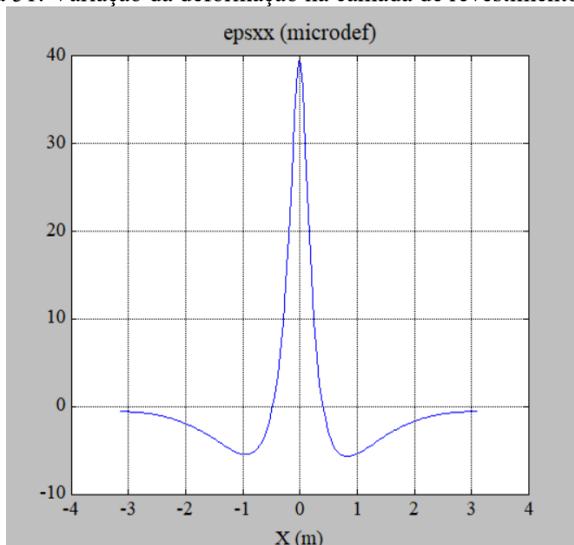
Temperatura (°C)	Microdeformação (µm/m)
4 °C	40
15 °C	56
20 °C	70

Fonte: Adaptado de *ViscoRoute 2.0*

Percebe-se, através dos resultados apresentados na Tabela 12, que a microdeformação resultante para 4 °C é 1,4 vezes menor que a encontrada para 15 °C e 1,75 vezes menor que a de 20 °C.

A simulação numérica também gera os resultados de maneira gráfica (Figura 51, Figura 52 e Figura 53). O eixo das abcissas apresenta a distância a que se encontra o eixo padrão do ponto (0,0), utilizado para definição da deformação crítica. Já o eixo das ordenadas apresenta a amplitude da deformação que o revestimento está sofrendo com a passagem do eixo a 72 km/h (20 m/s).

Figura 51: Variação da deformação na camada de revestimento a 4 °C



Fonte: *ViscoRoute 2.0*

Figura 52: Variação da deformação na camada de revestimento a 15 °C

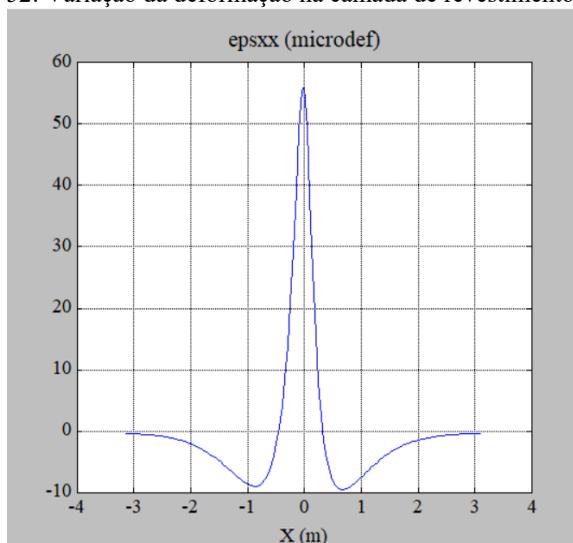
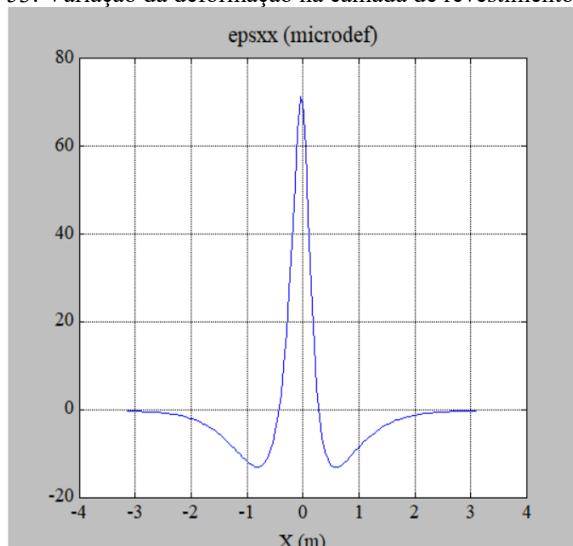
Fonte: *ViscoRoute 2.0*

Figura 53: Variação da deformação na camada de revestimento a 20 °C

Fonte: *ViscoRoute 2.0*

Observa-se, através da Figura 51, Figura 52 e Figura 53, que a fibra inferior do revestimento asfáltico sofre uma deformação de compressão

antes e depois de ter seu pico de tração no ponto analisado. Esse efeito é causado pela passagem do rodado sobre o revestimento e é essa alternância de sentidos que faz o revestimento asfáltico falhar por fadiga.

Por meio dos dados relacionados é possível perceber que, quanto menor a temperatura a que o material está submetido, menores são as microdeformações encontradas na fibra inferior da camada. Quanto mais baixa a temperatura, mais rígido o material é, portanto, menor sua deformação.

Após a obtenção das microdeformações de tração na fibra inferior do pavimento, partiu-se para a estimativa da vida útil do revestimento, para cada temperatura (4, 15 e 20 °C) e abordagem (energética e fenomenológica).

Para a determinação da vida útil segundo a abordagem fenomenológica, a microdeformação atuante na estrutura é inserida diretamente nas equações de fadiga obtidas (Equações 14, 15 e 16). Com isso é possível determinar o número de repetições admissíveis ao pavimento do eixo padrão de 8,2 toneladas em velocidade de 20 m/s (72 km/h).

Já para a abordagem da energia dissipada acumulada, a microdeformação encontrada é utilizada para a determinação da energia dissipada inicial ocasionada no revestimento pelo eixo padrão, segundo a Equação 13. Em seguida, utiliza-se o resultado obtido para encontrar a energia dissipada acumulada no momento da ruptura, através dos modelos matemáticos adquiridos nos gráficos que correlacionam a energia dissipada inicial e a energia dissipada acumulada na ruptura. Dispondo desse valor, as equações de fadiga (Equações 17, 18 e 19) são empregadas para determinar o número de repetições admissíveis ao pavimento do eixo padrão de 8,2 toneladas em velocidade de 20 m/s (72 km/h).

4.5.1 Vida de fadiga segundo a abordagem fenomenológica

Seguindo a abordagem que considera a falha do material pela degradação da rigidez, e de acordo com as Equações 14, 15 e 16, obtidas na etapa anterior, pode-se encontrar a vida de fadiga do revestimento asfáltico. A Tabela 13 apresenta os resultados da estimativa de vida útil do revestimento asfáltico para as três situações avaliadas neste TCC.

Tabela 13: Vida de fadiga segundo a abordagem fenomenológica

Temperatura (°C)	Microdeformação (µm/m)	N _r
4	40	7,04E+07
15	56	1,49E+07
20	70	9,11E+06

Fonte: Autor (2017)

Mediante esses resultados, afirma-se que a vida de fadiga é maior para as temperaturas mais baixas. No que tange uma abordagem que considera a degradação da rigidez como critério de ruptura, a estimativa de vida útil para a temperatura de 4 °C é 4,7 vezes maior que a estimativa para 15 °C e 7,7 vezes maior que a estimativa de vida útil para 20 °C.

4.5.2 Vida de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada

Para a obtenção da vida útil segundo a abordagem da energia dissipada acumulada, o primeiro cálculo a ser feito é o da energia dissipada inicial (W_i) através da Equação 13, mediante a inserção da microdeformação atuante encontrada com o *Software ViscoRoute 2.0*, apresentada na Tabela 12 e Tabela 14, do módulo complexo do material e do ângulo de fase, sendo esses obtidos pelo modelo de Huet-Sayegh (Equação 7). A Tabela 14 apresenta os dados necessários para o cálculo da energia dissipada inicial (W_i) ocasionada pelo eixo padrão de 8,2 toneladas.

Tabela 14: Dados necessários ao cálculo da energia dissipada inicial

Temperatura (°C)	**E* (MPa) (10 Hz)	**Ângulo de fase (°)	*Microdeformação de tração
4	19692,3	7,2	40
15	11364,6	16,8	56
20	7584,4	24,3	70

*Dados obtidos através do *Software ViscoRoute 2.0*.

**Dados obtidos do modelo de Huet-Sayegh, a partir dos parâmetros reológicos da mistura asfáltica (Tabela 6).

Fonte: Adaptado de Melo (2014)

Após esse procedimento é necessário obter a energia dissipada acumulada (W_{ac}) na ruptura, ocasionada pela passagem do eixo padrão. Para isso, plota-se um gráfico W_i versus W_{ac} , confeccionado com os

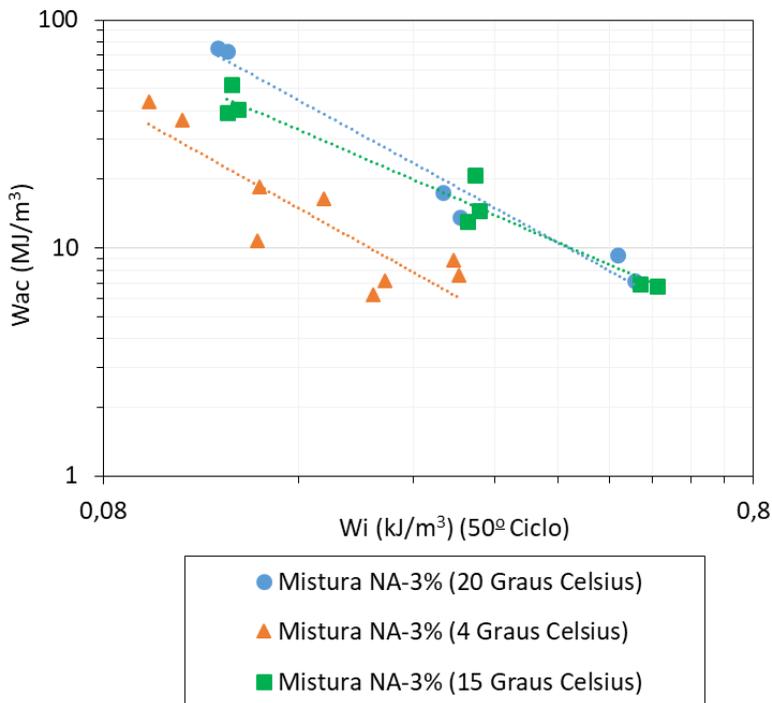
dados experimentais obtidos diretamente do programa UTS018. Esse gráfico permite estimar qualquer energia dissipada acumulada sob a inserção de uma energia dissipada inicial. Os dados necessários à execução estão apresentados na Tabela 15 e o gráfico está apresentado na Figura 54.

Tabela 15: Dados necessários para a confecção do gráfico W_i versus W_{ac}

CP	W_i (kJ/m ³)	W_{ac} (MJ/m ³)
Temperatura de 4 °C		
1	0,175	16,35
2	0,138	10,73
3	0,282	7,54
4	0,106	36,46
5	0,208	6,26
6	0,217	7,15
7	0,094	43,95
8	0,139	18,57
9	0,276	8,78
Temperatura de 15 °C		
10	0,303	14,51
11	0,124	39,12
13	0,568	6,78
14	0,291	13,09
15	0,298	20,92
16	0,536	6,96
Temperatura de 20 °C		
18	0,283	13,65
19	0,120	75,45
20	0,494	9,34
21	0,266	17,48
22	0,525	7,18
23	0,124	72,59

Fonte: Autor (2017)

Figura 54: Relação entre energia dissipada inicial (W_i) e energia dissipada acumulada na ruptura (W_{ac})



Fonte: Autor (2017)

A modelização matemática inserida nos pontos experimentais plotados na Figura 54, implica na geração das Equações 20, 21 e 22, para as temperaturas de 4 °C, 15 °C e 20 °C, respectivamente. Esses são os modelos necessários para encontrar a energia dissipada acumulada sob a inserção de qualquer energia dissipada inicialmente.

$$W_{ac} = 0,8033 \times W_i^{-1,594} \quad (20)$$

$$W_{ac} = 3,4001 \times W_i^{-1,239} \quad (21)$$

$$W_{ac} = 2,5196 \times W_i^{-1,565} \quad (22)$$

Onde:

W_{ac} é a energia dissipada acumulada; e,

W_i é a energia dissipada inicial.

O grau de correlação R^2 gerado por essas curvas, apresentado na Tabela 16, é considerado forte ($>0,7$) para a temperatura de 4 °C e muito forte ($>0,9$) para 15 e 20 °C, segundo a classificação de Karl Pearson.

Tabela 16: Valores de R^2 para o gráfico energia dissipada inicial *versus* energia dissipada acumulada

Temperatura	Correlação R^2
4 °C	0,7766
15 °C	0,9574
20 °C	0,9693

Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 17 é apresentada a energia dissipada inicial ocasionada pelo eixo padrão de 8,2 toneladas, calculada pela Equação 13. Inserindo este valor nas Equações 20, 21 e 22, é possível é encontrar a energia dissipada acumulada no momento da ruptura pela passagem de eixos padrão. Então, através das Equações 17, 18 e 19, obtidas na subseção 4.4.2, tem-se a vida de fadiga referente a cada temperatura analisada segundo a abordagem da energia dissipada acumulada. Esses resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Vida de fadiga segundo a abordagem da energia dissipada acumulada

Temperatura (°C)	W_i (kJ/m ³)	W_{ac} (MJ/m ³)	N_f
4	0,0124	878,27	4,01E+07
15	0,0324	238,54	9,10E+06
20	0,0480	291,44	6,55E+06

Fonte: Autor (2017)

Analisando os resultados conclui-se que menores temperaturas apresentam uma maior vida de fadiga e dissipam menos energia inicialmente. A temperatura de 4 °C apresenta uma vida de fadiga 4,4 vezes maior que a temperatura de 15 °C e 6,1 vezes maior que vida de fadiga estimada para 20 °C. Nas temperaturas mais baixas, a maior parcela do módulo complexo é constituída pela parcela elástica, caracterizado pelo menor ângulo de fase. Deste modo, a energia dissipada

a cada solicitação é menor e o número de solicitações para levar a ruptura é maior.

4.6 ETAPA 6: AVALIAÇÃO DA COMPONENTE VISCOSA (E_2) DO MÓDULO COMPLEXO DO MATERIAL NA PREDIÇÃO À FADIGA DO REVESTIMENTO

O concreto asfáltico é um material viscoelástico, ou seja, seu módulo complexo é composto de uma parcela elástica (E_1) e uma viscosa (E_2). O comportamento de uma amostra quando se avalia a energia dissipada é apresentado na Figura 14 através do loop de histerese. Esse loop evidencia que, em se tratando de materiais que não são puramente elásticos, o descarregamento da amostra nunca se dará pelo mesmo caminho que o carregamento, pois uma parte do dano causado tornou-se irreversível, devido ao módulo de perda ou parcela viscosa (E_2) do módulo complexo.

Sabendo disso, quando o módulo complexo do material é avaliado, há um maior interesse em analisar exclusivamente a parte viscosa. É esperado que, quanto maior essa componente, mais dano irreversível a amostra sofrerá a cada ciclo de carregamento e, portanto, terá um desempenho pior no que tange à resistência à fadiga.

O plano Cole-Cole, apresentado na Figura 25 é responsável por determinar a temperatura e a frequência críticas para o material, baseado na parcela viscosa do módulo (E_2). Para essa mistura asfáltica os valores críticos encontrados foram de 15 °C para ensaios realizados a 10 Hz (região relativa ao cume do gráfico – pico máximo encontrado para 10 Hz).

Neste sentido, para verificar a predição da parcela E_2 na vida à fadiga do revestimento asfáltico, foram plotadas a Figura 55 e a Figura 56, com base na Tabela 18, que correlaciona a parcela E_2 com a vida à fadiga do revestimento asfáltico na estrutura do pavimento. A Figura 55 é em relação a abordagem da energia dissipada acumulada e a Figura 56 está relacionada a abordagem fenomenológica.

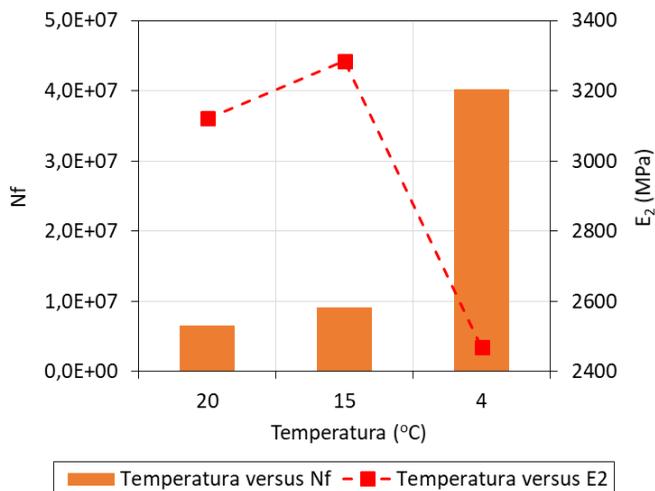
Tabela 18: Parcelas viscosas do material para cada temperatura e vida de fadiga segundo cada abordagem

Temperatura (°C)	*E ₂ (MPa)	N _f segundo a abordagem da energia dissipada	N _f segundo a abordagem fenomenológica
4	3121,1	4,01E+07	7,04E+07
15	3284,7	9,10E+06	1,49E+07
20	2468,1	6,55E+06	9,11E+06

*Parcela E₂ calculada pelo modelo de Huet-Sayegh (Equação 7), a partir dos parâmetros reológicos da mistura asfáltica (Tabela 6).

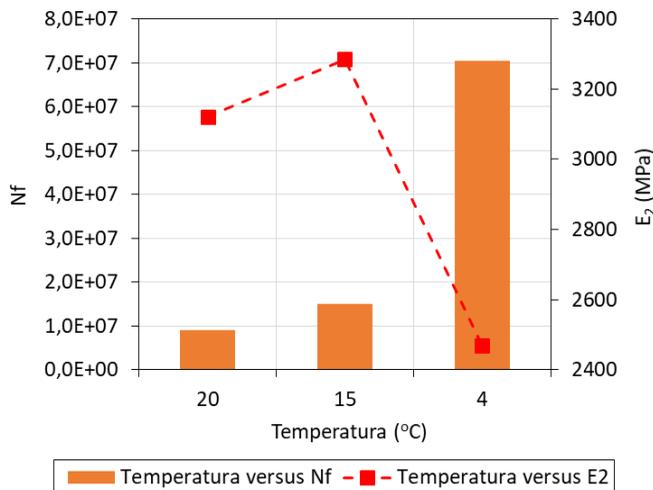
Fonte: Autor (2017)

Figura 55: Relação entre temperatura, vida de fadiga e E₂ segundo a abordagem da energia dissipada acumulada



Fonte: Autor (2017)

Figura 56: Relação entre temperatura, vida de fadiga e E_2 segundo a abordagem fenomenológica



Fonte: Autor (2017)

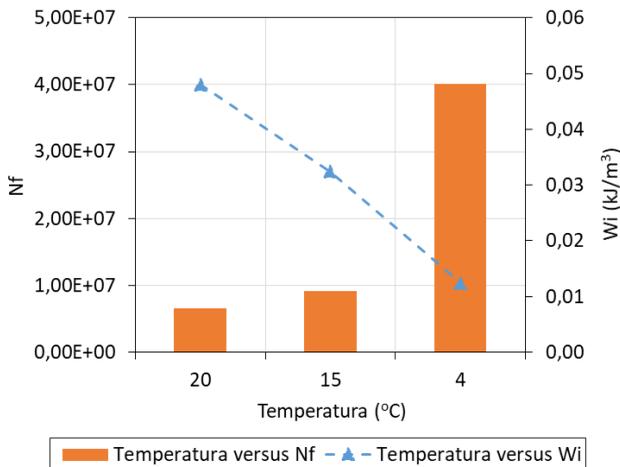
Era esperado que a temperatura de 15 °C entregasse, na simulação numérica, os piores resultados para a vida à fadiga do revestimento asfáltico. Contudo, ao analisar a Figura 55 e a Figura 56, verifica-se que essa máxima não se confirma, pois, apesar de ter a maior parcela de E_2 (maiores valores), a temperatura de 15 °C não é a que apresenta a menor vida à fadiga sob nenhuma das perspectivas.

Essa diferença de resultados acontece porque o plano Cole-Cole analisa o comportamento reológico do material, ou seja, apenas as parcelas que compõem o módulo complexo, porém, em se tratando de vida à fadiga, a microdeformação atuante na parte inferior da camada de revestimento precisa ser levada em consideração, uma vez que é diretamente proporcional à energia dissipada por ciclo de carregamento e elevada a potência 2 (ver Equação 13).

A partir da constatação de que a componente E_2 do módulo complexo não pode por si prever o comportamento à fadiga da mistura asfáltica na estrutura do pavimento, pelos aspectos mencionados no parágrafo anterior, fez-se necessário avaliar a predição da equação da energia dissipada inicial (Equação 13) na vida à fadiga do revestimento asfáltico. Para tanto, foram plotadas as Figura 57 e Figura 58, que correlacionam a energia dissipada inicial ocasionada no revestimento pelo eixo padrão (W_i) com a vida à fadiga do revestimento asfáltico na

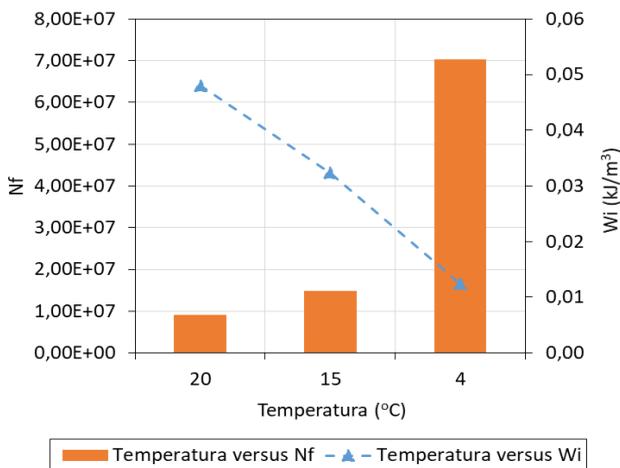
estrutura do pavimento (N_f). A Figura 57 é em relação a abordagem da energia dissipada acumulada e a Figura 58 está relacionada a abordagem fenomenológica.

Figura 57: Relação entre temperatura, vida de fadiga e energia dissipada inicial para a abordagem da energia dissipada acumulada



Fonte: Autor (2017)

Figura 58: Relação entre temperatura, vida de fadiga e energia dissipada inicial para a abordagem fenomenológica



Fonte: Autor (2017)

A Figura 57 e a Figura 58 apresentam, graficamente, a relação entre temperatura, energia dissipada inicial e vida à fadiga. Tem-se, para as duas abordagens que, tanto menor é a energia dissipada inicial quanto menor é a temperatura e, conseqüentemente, maior é a vida à fadiga encontrada para o revestimento asfáltico. Isso de se dá pois, quanto menor a energia dissipada inicialmente, menores são as parcelas de microdeformação e componente viscosa, fatores que são fundamentais no desempenho do revestimento asfáltico à fadiga.

A partir dessas análises é possível afirmar que a energia dissipada inicial é o melhor parâmetro disponível quando deseja-se fazer uma predição da vida à fadiga, pois considera em seu cálculo os principais fatores responsáveis pela ruptura: microdeformação de tração e componente viscosa do módulo complexo.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse capítulo apresenta as conclusões e considerações obtidas acerca dos objetivos propostos inicialmente.

5.1 CONCLUSÕES

As conclusões a seguir elencadas, basearam-se no estudo realizado e nas discussões apresentadas no capítulo de resultados, são elas:

- O critério de ruptura de Pronk e Hopman é mais conservador que o critério de ruptura convencional, indiferente da temperatura analisada;
- A abordagem da energia dissipada acumulada com o critério de ruptura de Pronk e Hopman, é mais conservadora que a abordagem fenomenológica com o critério de ruptura convencional;
- Não se pode analisar as curvas de fadiga isoladamente, pois elas são apenas uma parte do processo para a estimativa de vida útil do revestimento asfáltico e não consideram a estrutura do pavimento e o carregamento atuante;
- Através da simulação numérica, realizada no *Software ViscoRoute 2.0*, comprova-se que a deformação de tração atuante na fibra inferior do revestimento asfáltico aumenta com o incremento da temperatura. O aumento da temperatura do revestimento de 4 °C para 15 °C elevou a microdeformação de tração em 29% e de 4 °C para 20 °C elevou em 43%;
- Para a faixa de temperatura estudada, a vida útil do revestimento asfáltico quanto à fadiga, tanto é maior quanto menor é a sua temperatura, independente da abordagem utilizada;
- A componente viscosa do módulo complexo não deve ser avaliada isoladamente quando busca-se determinar as condições críticas para o material. É importante que a microdeformação atuante no pavimento seja considerada concomitantemente para que se obtenha uma simulação da realidade, por isso, ao realizar uma predição da vida útil do revestimento, deve-se utilizar a energia dissipada inicial, pois considera esses dois fatores em seu cálculo;
- Por fim, concluindo o objetivo principal da pesquisa, a temperatura de 4 °C, a mais baixa estudada, apresentou os melhores resultados de vida à fadiga para ambas as abordagens. Quanto mais alta foi a temperatura, piores foram os resultados.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Seguem alguns assuntos que não fizeram parte do tema dessa pesquisa, mas que são considerados importantes para o estudo envolvendo as temperaturas:

- Fazer uma análise de cada temperatura sob diferentes frequências de carregamento, considerando a abordagem da energia dissipada acumulada; e,
- Fazer a análise em outras faixas de temperaturas, abaixo de 4 °C e acima de 20 °C.

REFERÊNCIAS

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.

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

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 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.

BAAJ, Hassan. **Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés.** Thèse (Docteur). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos asfálticos: patologias e manutenção.** São Paulo: Plêiade, 1997. 103 p.

BALBO, José Tadeu. **Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga.** In: Reunião Anual de Pavimentação, 32ª reunião. Brasília: ABPV, 2000. p. 391-404.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BARRA, Breno Salgado. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2009. 327 p.

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. 2010. 504 f.

BEZERRA NETO, Rogério Silveira. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004. 169p.

BRASIL. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, Brasil: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de planejamento e pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006.

CNT – Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de rodovias 2016: relatório gerencial**. 20 ed. CNT. SEST. SENAT. Brasília, 2016.

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

_____. **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.

EN - European Standard. **EN 12697-24: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 24: Resistance to fatigue**. 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, Portugal, 2009.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. Tese (Doutorado). Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 294 f.

HUANG, Yang H. **Pavements analysis and design**. 2nd ed. Prentice Hall Inc. New Jersey, 2003.

LAVEISSIÈRE, Delphine. **Modélisation de la remontée de fissure em fatigue dans les structures routières par endommagement et macro fissuration: de l'expérimentation a l'outil de dimensionnement pour l'estimation de la durée de vie**. Thèse (Docteur). Faculté des Sciences de l'Université de Limoges. France, 2002.

LOUREIRO, Thiago Grangeiro. **Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003. 98fl.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos pavimentos**. 1^a ed. Rio de Janeiro: Ed. da UFRJ, 1997. 380p.

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.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.

OTTO, Gustavo Garcia. **Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PINTARELLI, Mariana Gaertner. **Comportamento de misturas asfálticas com relação ao fenômeno de fadiga: estudo de comparação entre as normas ASTM D7460, AASHTO T321 e EN 12697-24.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

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, 2016.

SOULIMAN, Mena. **Integrated predictive model for healing and fatigue endurance limit for asphalt concrete.** Tese (Doutorado). Arizona State University, Arizona, 2012. 235 f.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** 3ª ed., Rio de Janeiro, DNIT, IPR, 1981.

TANGELLA, S. C. S. R.; CRAUS, J.; DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L. **Summary report on fatigue response of asphalt mixtures.** Prepared for strategic highway research program, project A-003-A. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1990.

ZEIADA, Waleed. **Endurance limit for HMA based on healing phenomenon using viscoelastic continuum damage analysis.** Tese (Doutorado). Arizona State University, 2012. 439f.