

MARIANA GAERTNER PINTARELLI

**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
submetido ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Orientador: Prof. Dr. João Victor Staub
de Melo

Florianópolis
2017

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

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 / Mariana Gaertner Pintarelli ; orientador, João Victor Satub de Melo, 2017.

131 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. Pavimentação. 3. Misturas Asfálticas. 4. Fadiga. I. Melo, João Victor Satub de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

MARIANA GAERTNER PINTARELLI

**COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM
RELAÇÃO AO FENÔMENO DE FADIGA – ESTUDO DE
COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS ASTM D7460, AASHTO
T321 E EN 12697-24**

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.

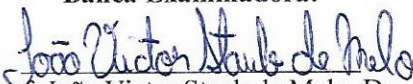
Florianópolis, 23 de junho de 2017.



Prof.ª. Luciana Rohde, Dr.ª.

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:



Prof. João Victor Staub de Melo, Dr.


Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Glicério Trichês, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina


Eng. Ramon Mendes Knabben, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que me acompanharam nesta jornada e, à sua maneira, contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Em especial, aos meus pais, Sérgio e Dorotéia, e ao meu irmão, Gabriel, melhores amigos que a vida poderia me dar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Sérgio e Dorotéia, por toda a dedicação devotada à minha formação. Ao meu pai, meu exemplo de engenheiro, por todo o esforço despendido para me ajudar com questões de qualquer disciplina que eu estivesse com dificuldade, sendo um excelente professor. À minha mãe, pelo apoio incondicional nesses anos morando longe de casa e pelo ombro amigo sempre disponível para me ouvir e me aconselhar.

Ao meu irmão Gabriel, pela amizade e companheirismo durante estes anos de faculdade.

Ao meu professor orientador João Victor Staub de Melo, pela dedicação na orientação deste Trabalho de Conclusão de Curso, sempre disponível, solícito, muito prestativo e paciente em compartilhar seus conhecimentos comigo. Foi um período de muito aprendizado.

Ao bolsista do Laboratório de Pavimentação da UFSC, Danilo Panetta, pelo auxílio na organização dos dados laboratoriais e montagem dos gráficos e tabelas deste trabalho, sua ajuda foi de grande serventia.

Ao Professor Glicério Trichês e ao Engenheiro Ramon Mendes Knabben, por aceitarem o convite para participar desta banca.

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

A todos os professores e profissionais da área que colaboraram de alguma maneira para minha formação.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de estudar numa escola de engenharia considerada uma das melhores do país.

A todos os amigos que eu fiz durante a minha graduação, que tornaram meus dias nesta cidade muito mais felizes e que estarão guardados para sempre no meu coração. E ainda, àqueles amigos que já faziam parte da minha vida antes desta jornada começar, e que estão sempre ao meu lado para o que der e vier.

Muito obrigada!

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Atualmente, as estradas brasileiras são os principais corredores de transporte de cargas e pessoas no Brasil. Cerca de 60% da matriz cargueira e 95% dos passageiros trafegam pelas estradas brasileiras diariamente. Apesar da expressiva utilização, a condição destas vias apresenta-se muito aquém do esperado para garantir segurança e conforto aos usuários. O trincamento dos pavimentos asfálticos devido ao fenômeno da fadiga é um dos principais danos recorrentes na malha rodoviária do país. Entretanto, não há uma normatização brasileira que estabeleça diretrizes para ensaios de vida à fadiga de misturas asfálticas em laboratório. Este trabalho apresenta o estudo de três normas internacionalmente reconhecidas para determinação da vida à fadiga de misturas asfálticas em equipamentos de flexão a quatro pontos: as americanas ASTM D7460 e AASHTO T321 e a europeia EN 12697-24. O objetivo central do mesmo consiste na análise tanto dos procedimentos, como dos resultados obtidos a partir de cada normativa, por meio de ensaios laboratoriais, a fim de adquirir uma visão crítica para a criação de um procedimento normativo brasileiro no futuro. Constatou-se que a principal diferença entre as normas consiste no tipo de onda utilizada para aplicação dos pulsos de carga no equipamento de ensaio. O procedimento realizado com carregamento do tipo haversine apresentou vida de fadiga significativamente maior que aqueles realizados com carregamento sinusoidal, da ordem de 60 a 80 vezes maior. Confirmou-se também a teoria já apontada por outros autores, de que o número de ciclos correspondente à vida de fadiga da mistura asfáltica obtido a partir de ensaios com ondas haversine se equipara àquele obtido em ensaios realizados com ondas sinusoidais com metade da deformação inicial estabelecida para os primeiros. Concluiu-se que ensaios realizados com ondas haversine resultam em valores errôneos e superestimados de vida à fadiga de misturas asfálticas. A aplicação destes resultados equivocados ao dimensionamento de pavimentos pode implicar em camadas de revestimento que não suportarão o tráfego previsto sem apresentar danos relativos ao fenômeno da fadiga. Após o estudo, considerou-se a normativa EN 12697-24 como o método mais adequado para a realização de ensaios de vida à fadiga em equipamentos de flexão a quatro pontos, devido à alta correlação dos dados em todos os aspectos analisados.

Palavras-chave: Revestimentos asfálticos. Fadiga. Equipamento de flexão a quatro pontos. Normatização.

ABSTRACT

Nowadays, the Brazilian roads are the main way for the cargo and people transportation in Brazil. Around 60% of the transported load and 95% of all passengers travel through these roads daily. Although the large importance of this modal's infrastructure, the state of the roads in the country are far away from what it was expected to be. The hasty failure of the pavements and lack of maintenance result in unsafety and uncomfortable highways for the users. Among all defects that can be usually seen in Brazilian roads, the fatigue of the pavement is considered one of the main causes of re-vestment failure. Even though, there is actually no Brazilian laboratory test method to determine the fatigue life of asphalt mixes in the country. In order to stimulate the discussion over this theme, this research study presents the analysis of three international test methods for fatigue using the Four Point Bending Apparatus: the American ASTM D7460 and AASHTO T321 and the European EN 12697-24. The foremost objective of this paper consists in the review of the procedures and its results, obtained through laboratory tests, looking for the development of a critical view of them, that could base the future creation of a Brazilian test method. The main difference between the procedures is the shape of the wave, in which the load is applied to the beam. It was verified that haversine displacement controlled loading tests led to fatigue life results far bigger than the sinusoidal displacement controlled loading tests, around 60 to 80 times bigger. The theory developed by previous authors that indicates that haversine displacement controlled testing results in a sinusoidal strain response of half the intended amplitude was also confirmed by the tests conducted in this paper. Due to these facts, it was concluded that the haversine displacement controlled test guides the user to incorrect and overestimated results of fatigue life, which can influence the pavement design and produce an asphalt mix that will not be able to bear the load of traffic. Finally, it is highly recommended the use of the European method EN 12697-24 for fatigue life tests using the Four Point Bending Apparatus, due to the high correlation of data in all analyzed aspects of the procedure.

Keywords: Asphalt pavement. Fatigue. Four Point Bending Apparatus. Proceeding norm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da Estrutura de um Pavimento Rígido.....	30
Figura 2 - Representação da Estrutura de um Pavimento Flexível	31
Figura 3 - Modelo Reológico de Huet-Sayegh	35
Figura 4 - Modelo Complexo no Plano Cole-Cole sob o Modelo de Huet-Sayegh	37
Figura 5 - Sinal de Deformação Longitudinal Medido na Base da Camada de Revestimento Asfáltico sob a Passagem de Carregamento	38
Figura 6 - Desenvolvimento do Fenômeno de Fadiga em Pavimentos	39
Figura 7 - Trincas Couro de Jacaré	41
Figura 8 - Buraco Tipo Panela no Pavimento	41
Figura 9 - Representação de Diversos Ensaios de Vida à Fadiga em Misturas Asfálticas	42
Figura 10 - Representação das Variáveis Tensão e Deformação em (a) Ensaios a Tensão Controlada e (b) Deformação Controlada	43
Figura 11 - Formas de Carregamento mais Utilizadas nos Ensaios de Fadiga...45	
Figura 12 - Equipamento para Ensaio de Fadiga por Tração Indireta.....	47
Figura 13 - Ensaio de Fadiga em Corpos de Prova Trapezoidais	48
Figura 14 - Esforços Internos no Corpo de Prova Advindos do Carregamento .49	
Figura 15 - Equipamento para Ensaio de Flexão a Quatro Pontos.....	50
Figura 16 - Representação do Carregamento Haversine	53
Figura 17 - Critério de Ruptura Segundo a ASTM D7460 (2010).....	53
Figura 18 - Representação do Carregamento Senoidal	54
Figura 19 - Critério de Ruptura Segundo a EN12697-24 (2004).....	55
Figura 20 - Critério de Ruptura Segundo a AASHTO T321 (2007)	56
Figura 21 - Representação do Pulso Haversine Aplicado com Deformação Controlada Máxima de 400 $\mu\text{m/m}$	59
Figura 22 - Representação do Pulso Sinusoidal Resultante com Deformação Controlada Máxima de 200 $\mu\text{m/m}$	59
Figura 23 - Posição Neutra do Corpo de Prova em ensaios sob Pulso de Carregamento (a) sinusoidal e (b) haversine.....	60
Figura 24 - Comportamento da Viga no Ensaio de Fadiga a Quatro Pontos sob Carregamento (a) sinusoidal e (b) haversine.....	61
Figura 25 - Fluxograma das Etapas da Pesquisa.	62
Figura 26 - Mesa Compactadora IFSTTAR.....	66
Figura 27 - Plano de Serragem das Placas Moldadas (em cm)	67
Figura 28 - <i>Four Point Bending Apparatus</i>	68
Figura 29 - Localização do Município de Itapoá no Estado de Santa Catarina..71	
Figura 30 - Estrutura do Pavimento do Segmento Monitorado de Itapoá-SC....72	
Figura 31 - Etapas de Construção do Segmento Monitorado de Itapoá	73
Figura 32 - Curva Granulométrica da Mistura Asfáltica e Faixa de Trabalho ...75	
Figura 33 - Fases da Produção dos Corpos de Prova em Laboratório.....	78
Figura 34 - Corpos de Prova da Mistura Asfáltica.....	78

Figura 35 - Grupo 1: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (EN 12697-24).....	81
Figura 36 - Grupo 2: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (EN 12697-24).....	82
Figura 37 - Grupo 3: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (EN 12697-24).....	83
Figura 38 - Representação do Modelo de Fadiga Segundo a EN 12697-24	84
Figura 39 - Grupo 1: Módulo Normalizado Versus Número de Ciclos (ASTM D7460).....	87
Figura 40 - Grupo 2: Módulo Normalizado Versus Número de Ciclos (ASTM D7460).....	88
Figura 41 - Grupo 3: Módulo Normalizado Versus Número de Ciclos (ASTM D7460).....	89
Figura 42 - Representação do Modelo de Fadiga Segundo a ASTM D7460	90
Figura 43 - Grupo 1: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (AASHTO T321)	93
Figura 44 - Grupo 2: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (AASHTO T321)	94
Figura 45 - Grupo 3: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (AASHTO T321)	95
Figura 46 - Representação do Modelo de Fadiga Segundo a AASHTO T321 ..	96
Figura 47 - Grupo 1: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (Dados da ASTM D7460 Sob Critério de Ruptura da EN 12697-24).....	99
Figura 48 - Grupo 2: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (Dados da ASTM D7460 Sob Critério de Ruptura da EN 12697-24).....	100
Figura 49 - Grupo 3: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (Dados da ASTM D7460 Sob Critério de Ruptura da EN 12697-24).....	101
Figura 50 - Modelo de Fadiga Comparativo: Dados da ASTM D7460 e Critério de Ruptura da EN 12697-24	102
Figura 51 - Análise da Escolha da Onda de Pulso de Aplicação de Carregamento	103
Figura 52 - Definição do Fator de Translação Entre as Curvas sob Carregamento Haversine e Sinusoidal	104
Figura 53 - Comparação entre Modelos de Fadiga das Normas ASTM D7460 e EN12697-14	106
Figura 54 - Comparação entre Modelos de Fadiga das Normas EN 12697-24 e AASHTO T321	107
Figura 55 - Características da Simulação Numérica.....	110
Figura 56 - Plano Cartesiano da Simulação no <i>Software</i> ViscoRoute 2.0	111
Figura 57 - Dados de Entrada da Estrutura do Pavimento	112
Figura 58 - Dados de Entrada da Carga Aplicada.....	112
Figura 59 - Microdeformação no Ponto P (0,0) no Sentido xx	113
Figura 60 - Microdeformação no Ponto P (0,0) no Sentido yy	114
Figura 61 - Microdeformação no Ponto P (0,0) no Sentido zz	114

Figura 62 - Microdeformação nos Pontos P (0,16) e/ou P (0,-16) no Sentido xx	115
Figura 63 - Microdeformação nos Pontos P (0,16) e/ou P (0,-16) no Sentido yy	116
Figura 64 - Microdeformação nos Pontos P (0,16) e/ou P (0,-16) no Sentido zz	116
Figura 65 - Vida Útil Prevista Pelas Normas Versus Previsão de Tráfego	118
Figura 66 - Microdeformação de Tração Máxima em Função da Espessura do Revestimento Asfáltico	120
Figura 67 - Vida de Fadiga em Função da Espessura do Revestimento Asfáltico Segundo a EN 12697-24	120
Figura 68 - Vida de Fadiga em Função da Espessura do Revestimento Asfáltico Segundo a ASTM D7460	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferenças Entre Ensaio à Tensão ou à Deformação Controlada em Testes de Fadiga	44
Quadro 2 - Resumo das Principais Características das Normas.....	57
Quadro 3 - Caracterização dos Agregados Minerais.....	74
Quadro 4 - Composição da Fração de Agregados Minerais Utilizados na Mistura Asfáltica.....	74
Quadro 5 - Composição Granulométrica da Mistura Asfáltica.....	75
Quadro 6 - Caracterização do Ligante Asfáltico Utilizado	76
Quadro 7 - Características Volumétricas da Dosagem da Mistura Asfáltica	77
Quadro 8 - Quadro Resumo dos Corpos de Prova Ensaaiados sob a Norma Europeia EN 12697-24	80
Quadro 9 - Quadro Resumo dos Corpos de Prova Ensaaiados sob a Norma Americana ASTM D7460.....	86
Quadro 10 - Quadro Resumo dos Corpos de Prova Ensaaiados sob a Norma Americana AASHTO T321	92
Quadro 11 - Quadro Resumo dos Corpos de Prova Ensaaiados Segundo as Diretrizes da Norma ASTM D7460 e Avaliados com o Critério de Ruptura da Norma EN 12697-24.....	98
Quadro 12 - Parâmetros Viscoelásticos da Mistura Asfáltica.....	109
Quadro 13 - Parâmetros Elásticos Estimados do Segmento Monitorado de Itapoá	109
Quadro 14 - Características Básicas das Camadas.....	110
Quadro 15 - Resultados Obtidos em P (0,0)	113
Quadro 16 - Resultados Obtidos em P (0,16) ou P (0,-16)	115
Quadro 17 - Vida de Fadiga do Segmento Monitorado de Itapoá Segundo as Normas Estudadas	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAPA	<i>Australian Asphalt Pavement Association</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BR-101	Rodovia Governador Mário Covas
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EN	<i>Europäische Norm</i>
ENPC	<i>École Nationale des Ponts et Chaussées</i>
EUA	Estados Unidos da América
IFSTTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux</i>
Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>

SUMÁRIO

SUMÁRIO	23
1 INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVOS	28
1.1.1 Objetivo Geral.....	28
1.1.2 Objetivos Específicos	28
1.2 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
2.1 PAVIMENTOS E MISTURAS ASFÁLTICAS	30
2.2 COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	33
2.2.1 Módulo Complexo.....	34
2.2.2 Modelo de Huet-Sayegh.....	35
2.3 FENÔMENO DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	37
2.3.1 Defeitos Associados ao Fenômeno de Fadiga.....	40
2.4 ENSAIOS DE FADIGA PARA MISTURAS ASFÁLTICAS.....	41
2.4.1 Ensaio à Tensão Controlada ou à Deformação Controlada.....	42
2.4.2 Formas de Carregamento.....	45
2.4.3 Ensaio de Compressão Diametral.....	46
2.4.4 Ensaio de Flexão em Corpos de Prova Trapezoidais	47
2.4.5 Ensaio de Flexão a Quatro Pontos.....	48
2.5 CARACTERIZAÇÃO DA VIDA DE FADIGA: MÉTODOS DE ANÁLISE	50
2.5.1 Análise Fenomenológica: Modelo Geral de Fadiga.....	51
2.6 PRINCIPAIS NORMAS DE ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	52
2.6.1 Normativa ASTM D7460 (2010)	52
2.6.2 Normativa EN 12697-24 (2004).....	54
2.6.3 Normativa AASHTO T321 (2007)	55
2.6.4 Quadro Resumo das Normativas.....	56

2.7 FATOR LABORATÓRIO-CAMPO	57
2.8 ESTUDOS JÁ CONDUZIDOS SOBRE O TEMA	58
3 MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O ESTUDO	63
3.2 ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA	63
3.2.1 Agregados Minerais.....	63
3.2.2 Composição Granulométrica	64
3.2.3 Ligante Asfáltico	64
3.2.4 Dosagem da Mistura Asfáltica.....	65
3.3 ETAPA 3: PRODUÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA EM LABORATÓRIO: PLACAS E CORPOS DE PROVA.....	65
3.3.1 Produção da Mistura Asfáltica em Laboratório	65
3.3.2 Moldagem das placas e corpos de prova.....	65
3.4 ETAPA 4: ENSAIOS DE VIDA À FADIGA: OBTENÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE FADIGA OBTIDOS POR DIFERENTES NORMATIVAS.....	67
3.5 ETAPA 5: APLICAÇÃO DOS RESULTADOS NO DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO.....	70
4 RESULTADOS	71
4.1 DEFINIÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O ESTUDO	71
4.1.1 Informações gerais.....	71
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA.....	73
4.2.1 Agregados Minerais.....	73
4.2.2 Composição Granulométrica	74
4.2.3 Ligante Asfáltico	76
4.2.4 Dosagem da Mistura.....	77
4.3 PRODUÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA EM LABORATÓRIO: PLACAS E CORPOS DE PROVA	77

4.4 ENSAIOS DE VIDA À FADIGA: OBTENÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE FADIGA OBTIDOS POR DIFERENTES NORMATIVAS...	79
4.4.1 Resultados do Ensaio de Fadiga Segundo a EN 12697-24	80
4.4.2 Resultados do Ensaio de Fadiga Segundo a ASTM D7460.....	85
4.4.3 Resultados do Ensaio de Fadiga Segundo a AASHTO T321.....	91
4.4.4 Resultados do Ensaio de Fadiga Segundo a Norma ASTM D7460 com Critério de Ruptura da Norma EN 12697-24	97
4.4.5 Considerações Sobre os Modelos de Fadiga Gerados	103
<i>4.4.5.1 Comparação entre o tipo de onda utilizado.....</i>	<i>103</i>
<i>4.4.5.2 Comparação Entre as Normas ASTM D7460 e EN 12697-24.....</i>	<i>105</i>
<i>4.4.5.3 Comparação Entre AASHTO T321 e EN 12697-24.....</i>	<i>107</i>
4.5 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO	108
4.5.1 Análise da Resistência à Fadiga do Pavimento do Segmento Monitorado de Itapoá.....	117
4.5.2 Definição da Espessura de Revestimento Asfáltico Necessária Segundo as Normas	119
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	123
5.1 CONCLUSÕES	123
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
REFERÊNCIAS	127

1 INTRODUÇÃO

Entre os meios de transporte existentes, o modo rodoviário é o que possui maior representatividade atualmente no Brasil. São 1.720.756 km de rodovias, que formam a quarta maior rede rodoviária do mundo. Esta malha é o principal meio de transporte de pessoas e cargas no país. Cerca de 95% da matriz de transporte de passageiros e 61,1% da matriz do transporte de carga trafegam pelas rodovias brasileiras, sendo assim, a rede rodoviária constitui elemento fundamental nas cadeias produtivas, promovendo o desenvolvimento socioeconômico do país, unindo mercados e promovendo a integração de regiões e estados (CNT, 2016).

Com base no cenário atual das rodovias pavimentadas brasileiras, verifica-se que a metodologia utilizada no Brasil para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, para vias de médio a elevado volume de tráfego, é pouco eficiente e desatualizada, quando comparada a métodos utilizados em outros países, como Estados Unidos da América (EUA) e França. Portanto, percebe-se a necessidade do desenvolvimento de um novo método de dimensionamento, que leve em consideração uma análise mecanicista da estrutura do pavimento, a fim de se obter um dimensionamento mais eficiente e estradas pavimentadas de maior qualidade e durabilidade.

O estudo dos mecanismos ou fenômenos que levam a perda da integridade estrutural e funcional dos pavimentos é de extrema importância para que se possa dimensionar pavimentos com maior resistência, durabilidade, qualidade e que ofereçam segurança e conforto aos usuários. No caso dos pavimentos asfálticos, pode-se relacionar o surgimento de defeitos no revestimento a dois principais mecanismos e/ou fenômenos: a fadiga do material e as deformações permanentes.

Segundo Pinto (1991), a repetição das cargas do tráfego, associada à elevada flexibilidade das camadas de base e sub-base granulares, tem caracterizado o trincamento por fadiga como o principal defeito recorrente nos pavimentos rodoviários brasileiros.

O fenômeno da fadiga pode ser definido, segundo a ASTM - *American Society for Testing and Materials* (1979) como: “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos”. O entendimento deste mecanismo e o controle de seus efeitos deletérios sobre os pavimentos são de grande serventia para projetar estruturas com prolongada vida útil.

Mesmo sendo este mecanismo o maior causador de danos aos pavimentos flexíveis atualmente no Brasil, ainda não se utilizam métodos de dimensionamento que levem em consideração a lei de fadiga do material que compõe o revestimento, bem como, não existe uma normatização brasileira consolidada para realização de ensaios de vida à fadiga em misturas asfálticas. Destaca-se, que esta realidade não é advinda da falta de procedimentos laboratoriais para a caracterização do material, visto que existem diferentes equipamentos para a avaliação da vida de fadiga de misturas asfálticas, dentre eles, o aparato a quatro pontos, um dos equipamentos mais utilizados na Europa e América do Norte. Na Europa a normatização deste ensaio é preconizada pela norma EN 12697-24 (2004) e nos EUA pelas normas ASTM D7460 (2010) e pela AASHTO T321 (2014).

Neste contexto, para um dimensionamento adequado da estrutura dos pavimentos, é imprescindível a utilização de modelos de fadiga das misturas asfálticas e o entendimento das normatizações para a obtenção destes, assim como, a influência destes modelos na concepção final da estrutura do pavimento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar os resultados de resistência à fadiga de uma mistura asfáltica, obtidos através do procedimento previsto em três normas internacionalmente conhecidas, a ASTM D7460, a AASHTO T321 e a norma europeia EN 12697-24, a fim de adquirir uma visão crítica para a futura criação de um procedimento normativo brasileiro.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Submeter corpos de prova de uma mistura asfáltica a ensaios de vida à fadiga a quatro pontos, segundo procedimento descrito pelas normas ASTM D7460, AASHTO T321 e EN 12697-24;
- Obter curvas de fadiga do material segundo as normas ASTM D7460, AASHTO T321 e EN 12697-24;
- Avaliar os diferentes aspectos das normas em relação à vida de fadiga do material;

- Aplicar os resultados obtidos a partir das diferentes normas ao dimensionamento de um pavimento flexível existente e analisar a vida de fadiga de projeto do mesmo sob a perspectiva de cada norma.

1.2 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso está estruturado em 5 capítulos, conforme apresentado abaixo:

Capítulo 1 – Introdução

Neste primeiro capítulo é apresentada uma introdução geral do tema que será discutido ao longo do trabalho, seu objetivo geral e objetivos específicos, além do conteúdo e estruturação do mesmo.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

No segundo capítulo será desenvolvida a revisão literária relacionada à temática do trabalho, abordando temas como: classificação e estrutura de pavimentos, caracterização do fenômeno de fadiga em misturas asfálticas e danos relacionados a ele, ensaios conceituados para determinação da vida de fadiga em laboratório, descrição das normas internacionais ASTM D 7460, AASHTO T321 e EN 12697-24 e suas principais diferenças, além da apresentação de estudos já conduzidos sobre o tema.

Capítulo 3 – Materiais e Método

O capítulo três abordará a caracterização dos materiais ensaiados para o desenvolvimento deste trabalho, além da descrição do método utilizado para realização das análises.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões

O quarto capítulo contém os resultados obtidos através das análises descritas no capítulo anterior e pertinentes discussões destes resultados.

Capítulo 5 – Conclusões

O último capítulo do Trabalho de Conclusão de Curso apresenta as conclusões obtidas com o estudo e sugestões para trabalhos futuros que possam vir a ser desenvolvidos sobre o tema. Por fim, são listadas as referências utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAVIMENTOS E MISTURAS ASFÁLTICAS

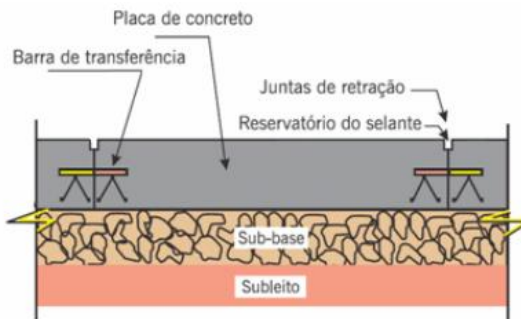
Segundo Balbo (2007), o pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.

Para atender a esses requisitos, a estrutura do pavimento é particularmente importante. Ela deve ser constituída por camadas que distribuam as solicitações de carga, limitando as tensões e as deformações de maneira a garantir um desempenho adequado da via durante o horizonte de projeto. Nesse sentido, os pavimentos são divididos em camadas, para minimizar os esforços verticais produzidos pela ação do tráfego e, conseqüentemente, oferecer proteção ao subleito (CNT, 2016).

Pode-se dividir os pavimentos utilizados no modal rodoviário em dois grandes grupos: pavimentos rígidos e pavimentos flexíveis. Contudo, pode-se ter ainda uma classificação intermediária, os pavimentos semirrígidos.

Os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland, conforme a Figura 1, que possui elevada rigidez em relação às camadas inferiores, e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (BRASIL, 2006).

Figura 1 - Representação da Estrutura de um Pavimento Rígido



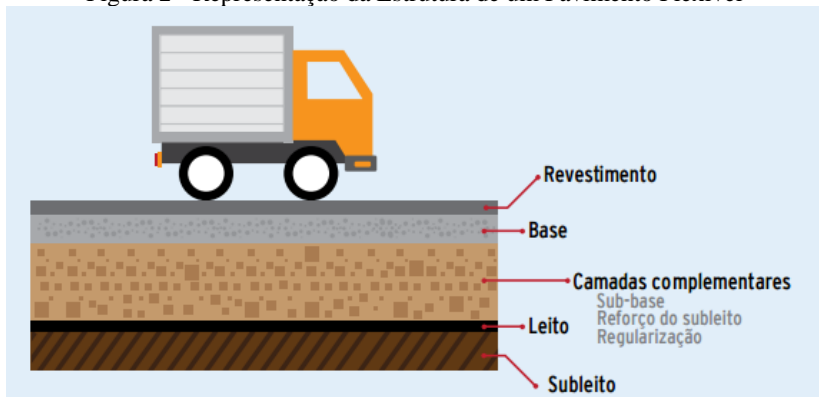
Fonte: adaptado de Bernucci *et al.* (2008)

Nesses pavimentos, a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço. É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os pavimentos semirrígidos, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (BRASIL, 2006), caracterizam-se por apresentar uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

Os pavimentos flexíveis ou asfálticos, são estruturas compostas basicamente por camadas de solo (materiais granulares ou finos, tratados ou não) cobertos por uma camada de revestimento em concreto asfáltico. A característica principal deste tipo de estrutura, é o fato de todas as camadas sofrerem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (BRASIL, 2006). Segundo Bernucci *et al.* (2008), são geralmente organizados em quatro camadas principais: camada de rolamento em revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Dependendo do tráfego, da capacidade de suporte do subleito e dos materiais disponíveis, pode-se ter a ausência de algumas camadas. Um exemplo desta estrutura é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Representação da Estrutura de um Pavimento Flexível



Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias (2016)

Segundo Ceratti *et al.* (2011), cerca de 97% das rodovias brasileiras pavimentadas possuem revestimento flexível, sendo o ligante

asfáltico o componente principal das camadas de rolamento e, às vezes, de camadas intermediárias da estrutura. De acordo com o autor, há diversas razões para o uso intensivo do asfalto em pavimentação, sendo as principais: proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante; é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido, diluído em solventes de petróleo ou emulsionado em água. Como o foco deste trabalho é, justamente, o comportamento à fadiga de pavimentos flexíveis, dar-se-á maior ênfase para as características deste tipo de revestimento.

Na maioria dos pavimentos flexíveis brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à origem, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local (BERNUCCI *et al.*, 2008). Estas misturas podem ser realizadas a frio ou a quente. A sua principal aplicação é em camadas superiores de pavimentos flexíveis ou semirrígidos, recebendo diretamente a ação do tráfego e do clima (MELO, 2014).

Os agregados podem ser entendidos como conjuntos de grãos minerais, dentro de determinados limites de dimensões, naturais ou artificiais, britados ou não, utilizados na construção civil, notavelmente na fabricação de argamassas, concretos asfálticos e de cimento Portland, misturas estabilizadas com ligantes, etc. (BALBO, 2007).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), o asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. No Brasil utiliza-se a denominação CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) para designar esse produto sólido a temperaturas baixas, semissólido à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas.

Segundo Colpo (2014), do ponto de vista funcional, a camada de revestimento de um pavimento flexível deve apresentar características que possibilitem conforto e segurança aos usuários. Já do ponto de vista estrutural, esta camada tem a função de resistir e transmitir as tensões geradas pelos veículos às camadas inferiores, além de possibilitar a impermeabilização do pavimento, evitando assim a percolação de água nas camadas. Neste contexto, as misturas asfálticas que compõem a camada de revestimento devem apresentar diversas características, dentre

as quais se destacam a estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade, tanto durante a construção do pavimento como após sua liberação ao tráfego.

2.2 COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas, devido à presença de ligantes betuminosos em sua composição, adquirem um comportamento viscoelástico e termosuscetível, ou seja, sensíveis ao tempo de aplicação das cargas solicitantes aliadas às variações de temperatura em que ocorrem estas solicitações (RIVIÈRE, 1996; HUET, 1963 *apud* BARRA, 2009). Devido a estas características, não é simples prever o comportamento deste tipo de material quando submetido a uma solicitação qualquer. Por não se comportarem como a maioria dos materiais elásticos, os revestimentos asfálticos exigem modelos mais complexos para representar toda a diversidade de variáveis que regem seu comportamento.

É necessário ter um bom conhecimento da natureza das solicitações, do tipo de resposta, bem como a maneira com que as deteriorações evoluem no tempo para compreender como se comporta a estrutura do pavimento, selecionando o melhor modelo de análise e cálculo (SETRA-LCPC, 1997 *apud* QUINTERO, 2011).

Segundo Quintero (2011), a deformação específica rege o comportamento dos concretos asfálticos. A resposta da camada de concreto asfáltico à passagem de uma carga em movimento na fibra inferior da camada é de contração-distensão-contração, ou seja, existe uma alternância do sinal de deformação específica. Esta alternância do sinal varia com a velocidade do veículo (frequência de aplicação da carga), pressão de insuflagem dos pneus, tipos de eixos e temperatura.

Existem diversas maneiras de estudar a viscoelasticidade das misturas asfálticas, como por exemplo: no domínio viscoelástico linear mediante carregamento quase estático (modo temporal) ou mediante carregamento sinusoidal (modo frequencial). No domínio temporal não é simulada a inversão do sinal de deformação que se produz na estrutura do pavimento com a passagem da carga em movimento. Já no domínio frequencial é simulada a inversão do sinal de deformação, tornando este modo mais próximo ao comportamento real destes materiais sob carga em movimento. No domínio frequencial, pode-se citar os ensaios de módulo complexo, que permitem conhecer a rigidez do material para um amplo espectro de temperaturas e frequências, e os ensaios de fadiga (a dois

pontos ou quatro pontos) que permitem avaliar a deformação para um determinado número de ciclos de solitação (QUINTERO, 2011).

2.2.1 Módulo Complexo

A caracterização dos materiais viscoelásticos pode ser realizada através do módulo complexo (E^*) e do ângulo de fase (φ). Estas propriedades estabelecem respostas mecânicas sob condições de solitações harmônicas em regime constante. Em função das misturas asfálticas possuem um comportamento variável em relação à temperatura e ao tempo de carregamento, para a caracterização reológica de um material que apresenta parte elástica e viscosa é necessária uma varredura de frequências e temperaturas representativas das condições de temperatura e velocidade de aplicação do carregamento em campo (COLPO, 2014).

A importância de se considerar a viscoelasticidade das misturas, bem como a possibilidade de contabilizar os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento, faz com que o módulo complexo venha sendo usado preferencialmente no exterior. O ensaio de módulo complexo pode ser usado para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares do material (CHRISTENSEN, 1982 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008).

A determinação do módulo complexo consiste na aplicação de uma sequência de solitações harmônicas com diferentes frequências, podendo apresentar uma variação entre 0,1 e 30 Hz e, também diferentes temperaturas, geralmente no intervalo entre -15°C e 40°C , em função da metodologia de ensaio utilizada (BRITO, 2006 *apud* COLPO, 2014). O procedimento é repetido para diferentes temperaturas e frequências de carregamento com o intuito de se construir uma curva mestra que incorpore os efeitos das duas variáveis citadas, tempo e temperatura (FRANCKEN E PARTL, 1996 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008).

O módulo complexo foi estudado no âmbito dos concretos asfálticos por Huet nos anos 60, o qual formulou leis de comportamento reológico dos concretos asfálticos. As deduções das equações do módulo complexo fundamentam-se na relação da tensão complexa e deformação no domínio frequencial. Estas são resolvidas com ajuda do cálculo operacional a partir da transformação de Laplace-Carson, onde o problema integro-diferencial da função de relaxação para um sólido viscoelástico é transformado em um sistema de equações algébricas que são análogas às de elasticidade. A solução final resulta da inversão da solução (QUINTERO, 2011).

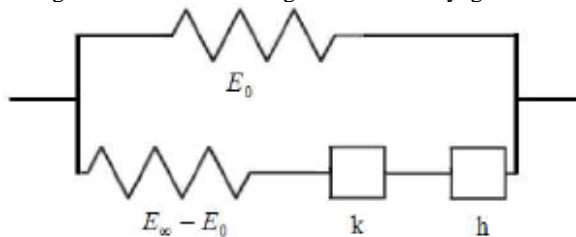
2.2.2 Modelo de Huet-Sayegh

Para representar os efeitos viscosos e elásticos presentes nos materiais viscoelásticos, diversos modelos físico-matemáticos são encontrados na literatura e geralmente são constituídos por diferentes arranjos geométricos de molas (representando a parcela elástica) e amortecedores (representando a parcela viscosa). A mola linear representa a elasticidade instantânea do material no carregamento e no descarregamento. O amortecedor viscoso linear representa a dependência no tempo do material, tanto no carregamento quanto no descarregamento (MELO, 2014).

Variados são os modelos existentes para explicar este comportamento dos materiais asfálticos. Contudo, será apresentado neste trabalho apenas o Modelo de Huet-Sayegh. Considerando que, foi este o modelo utilizado em trabalhos anteriores para definição dos parâmetros viscoelásticos referentes à mistura asfáltica também estudada neste trabalho e que serão utilizados na etapa de modelagem da estrutura. Além do fato de que, segundo Melo (2014), o modelo de Huet-Sayegh (1965) é geralmente proposto para representar o comportamento viscoelástico de misturas asfálticas, pois descreve de forma mais precisa o comportamento viscoelástico linear das misturas para qualquer faixa de temperatura e frequência de carregamento.

Este modelo (Figura 3) corresponde a uma evolução do modelo proposto por Huet, em 1963, a partir da inserção de uma mola em paralelo de pouca rigidez (E_0), permitindo levar em conta o comportamento reológico das misturas asfálticas quando solicitadas a baixas frequências e elevadas temperaturas, ou seja, o comportamento estático das misturas, por isso, E_0 é denominado de módulo estático (CASTANEDA, 2004; HECK, 2001; MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996; RIVIÉRE, 1996 *apud* BRAGA, 2009).

Figura 3 - Modelo Reológico de Huet-Sayegh



Fonte: Pronk, 2005 *apud* Melo, 2014

No modelo de Huet-Sayegh, o módulo complexo do sistema pode ser determinado através da Equação 1:

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

Onde:

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

E_∞ = módulo instantâneo do modelo, obtido quando $\omega\tau$ tende ao infinito, para as elevadas frequências e para as baixas temperaturas;

E_0 = módulo estático, para as situações de baixas frequências e de elevadas temperaturas;

τ = é o tempo de relaxação dos amortecedores, portanto, um parâmetro em função do tempo e que se assemelha a um tempo de retardo, em que o valor varia com a temperatura;

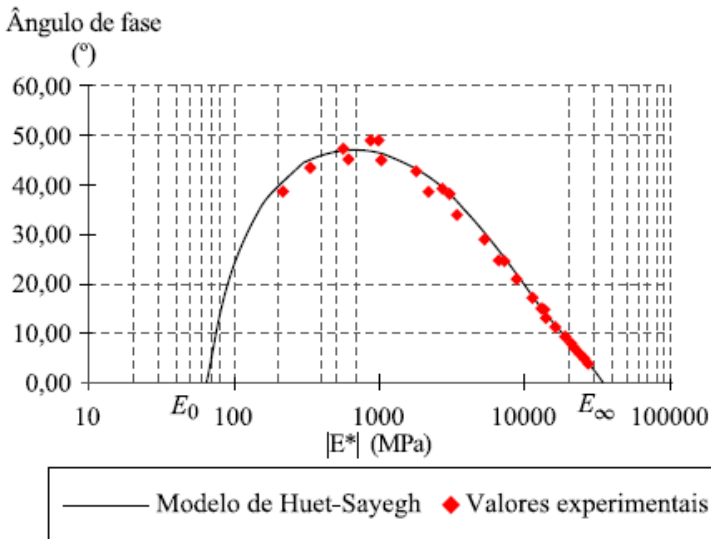
h, k = os parâmetros dos elementos parabólicos do modelo e, para os materiais betuminosos e misturas asfálticas, estão situados no intervalo entre $0 < k < h < 1$;

δ = constante adimensional, função da natureza do betume e da curva granulométrica;

$\omega = 2\pi f$; em que f = frequência de solitação; pulsação.

Segundo Almeida (2013), a representação no Plano Cole-Cole do modelo de Huet-Sayegh permite descrever adequadamente o comportamento das misturas de concreto asfáltico sobre um espectro de frequência e temperatura, tanto com baixa frequência e elevada temperatura, quanto com alta frequência e baixa temperatura (Figura 5).

Figura 4 - Modelo Complexo no Plano Cole-Cole sob o Modelo de Huet-Sayegh



Fonte: HECK, 2001 *apud* Almeida, 2014

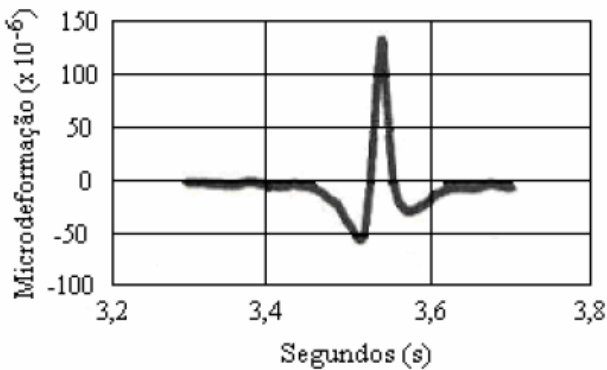
2.3 FENÔMENO DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Os materiais de construção, no decorrer de sua vida de serviço, apresentam processos de danificação e deterioração inevitáveis que, paulatinamente, implicam a alteração de suas propriedades mecânicas, ou seja, aquelas que governam seu comportamento sob ações de cargas de diversas naturezas. Portanto, as propriedades dos materiais alteram-se após a construção, piorando pouco a pouco. Tal fato se traduz nos materiais de camadas de pavimentos, sendo sua degradação motivada por cargas de veículos, produtos químicos e ações ambientais, como temperatura, umidade, etc. (BALBO, 2007).

O fenômeno de fadiga é considerado um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em trincamento do revestimento, ou até mesmo a sua ruptura, após um número suficiente de repetições de carregamento; ou seja, é a perda de resistência do material quando solicitado por uma carga repetida (PREUSSLER *et al.*, 1981 *apud* MELO, 2014).

No campo, as misturas asfálticas são submetidas a solicitações de curta duração a cada passagem do eixo de um veículo pesado. Assim, o pavimento que se encontra apoiado sobre um suporte deformável, é submetido a esforços de flexão alternada (Figura 5) no sentido longitudinal do carregamento. As tensões de tração, então, surgem na base das camadas que o compõe e se repetem a cada passagem dos pneumáticos. Estes carregamentos não provocam imediatamente a ruptura do material, mas a sua repetição pode levar, em longo prazo, a uma fissuração por fadiga (MAILLARD, 2005; BAAJ, 2002; De La ROCHE e ODEON, 1993 *apud* BARRA, 2009).

Figura 5 - Sinal de Deformação Longitudinal Medido na Base da Camada de Revestimento Asfáltico sob a Passagem de Carregamento



Fonte: De La Roche e Odeon, 1993 *apud* Barra, 2009

A fadiga é o principal fenômeno causador de deterioração dos pavimentos, que se inicia no nível microscópico devido aos carregamentos repetidos e finaliza com a aparição de macro-fissuras (VAN ROMPU *et al.*, 2012 *apud* QUINTERO, 2016).

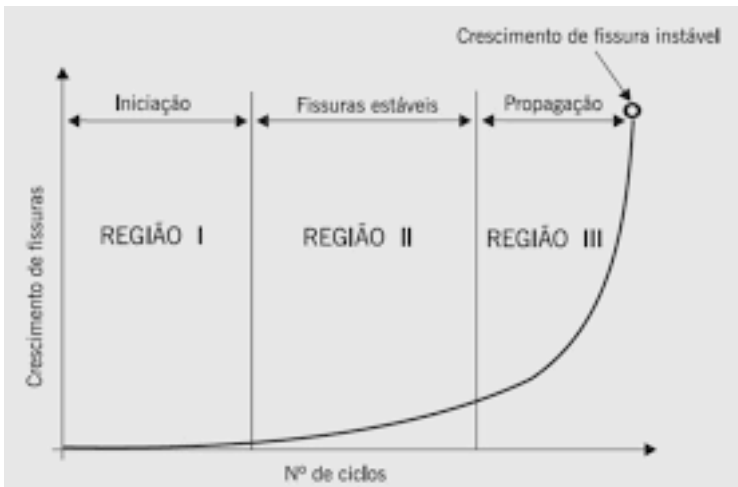
Neste âmbito, percebe-se a importância do conhecimento da resistência à fadiga de misturas asfálticas, principalmente, na etapa de formulação das misturas, no dimensionamento de uma estrutura ou na escolha de uma solução adequada para uma obra de recuperação do pavimento de uma rodovia (COLPO, 2014). Contudo, uma dificuldade encontrada no estudo da vida à fadiga das misturas asfálticas reside no fato de ser difícil reproduzir em laboratório os esforços que realmente atuarão sobre a estrutura em campo. A grande variabilidade de carregamento e também da frequência com que ele age sobre o pavimento, constituem uma barreira para que os resultados obtidos em

ensaios laboratoriais reflitam a vida de fadiga do material *in situ*. Conforme Balbo (2007), ao observar-se os veículos rodoviários, verifica-se sua grande diversidade em termos de tipos de eixos, de distância entre eixos isolados, dimensões de pneumáticos, entre outros, o que naturalmente nos leva a acreditar que cada carga aplicada exerce pressões diferentes, resultando em estados de tensão distintas nas camadas dos pavimentos.

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material. Em uma estrutura sujeita a carregamento cíclico, diversos estágios (regiões) convencionalmente divididos podem ser diferenciados durante o processo de fadiga, conforme ilustra a Figura 6.

- Região I: onde as primeiras mudanças microestruturais ocorrem, formam-se microfissuras, a densidade dos deslocamentos cresce e as zonas de danos irreversíveis se iniciam;
- Região II: caracterizada pelas microfissuras originadas da coalescência das microfissuras;
- Região III: crescimento das microfissuras, conduzindo rapidamente ao colapso total.

Figura 6 - Desenvolvimento do Fenômeno de Fadiga em Pavimentos



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Pode-se perceber pela Figura 6, que, uma vez que o fenômeno se inicia e as fissuras começam a surgir, a curva de crescimento das mesmas sobe rapidamente, podendo causar patologias mais sérias no pavimento. Portanto, conhecer a vida de fadiga do material e saber como ele se comportará após a abertura ao tráfego é de suma importância para que se previnam danos nas rodovias, garantindo segurança e conforto ao usuário.

De acordo com Speight (2016), apesar da ruptura por fadiga das misturas asfálticas ainda não ter sido completamente compreendida, é de comum acordo que existem muitas maneiras da composição da mistura afetar a resistência à fadiga do material. Um dos principais fatores que afetam a resistência à fadiga das misturas asfálticas é a quantidade de ligante que a mesma contém. Por exemplo, uma mistura com baixo teor de ligante tende a ser menos resistente ao fenômeno de fadiga do que uma mistura mais rica em ligante asfáltico. Além disso, baixos graus de compactação das misturas também contribuem significativamente para falhas nos pavimentos, pois reduzem sua resistência superficial. Um elevado volume de vazios na mistura (em geral resultante de baixo grau de compactação) também aumenta a permeabilidade do pavimento, o que permitirá que a água percole, aumentando o dano causado pela solicitação do tráfego.

2.3.1 Defeitos Associados ao Fenômeno de Fadiga

Como citado, a ruptura por fadiga se inicia a partir de trincas geralmente na face inferior dos revestimentos e podem gerar danos sérios ao pavimento e à segurança do usuário. Pinto (1991) cita que o trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões e de deformação do sistema estratificado e, assim, o seu desempenho.

De acordo com Silva (2008), as trincas superficiais nos revestimentos asfálticos causadas pela fadiga podem ser isoladas (trincas transversais ou longitudinais) ou interligadas (couro de jacaré). As trincas couro de jacaré representam estágio atual avançado de fadiga e caracterizam-se por uma série de rachaduras interconectadas, cujo aspecto se parece com a pele de um jacaré (Figura 7).

Figura 7 - Trincas Couro de Jacaré



Fonte: Bernucci *et al*, (2008)

Geralmente, áreas atingidas por este tipo de defeito, devido apenas a uma base fraca não são muito extensas. Porém, quando associadas a altas cargas passantes, elas podem atingir seções inteiras do pavimento. Em camadas delgadas de asfalto (inferiores a 100 mm de profundidade) este defeito pode rapidamente evoluir para outros defeitos, como os buracos tipo panela (Figura 8) (SPEIGHT, 2016).

Figura 8 - Buraco Tipo Panela no Pavimento



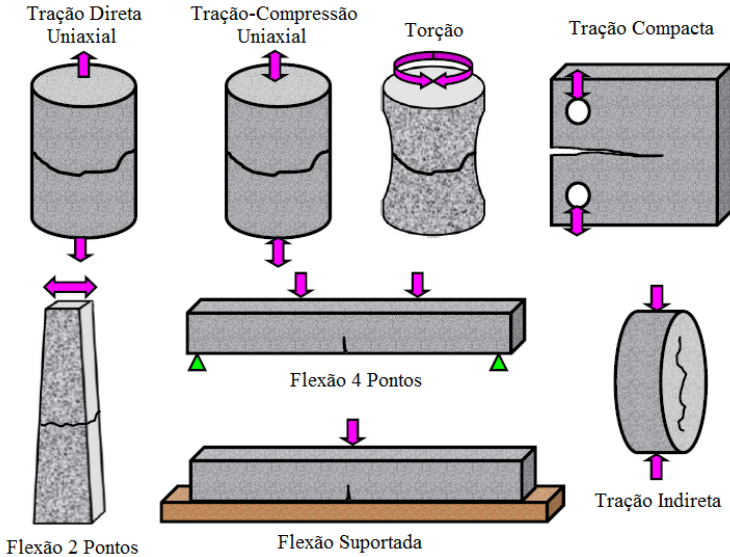
Fonte: Bernucci *et al*, (2008)

2.4 ENSAIOS DE FADIGA PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

Diversos ensaios podem ser realizados a fim de determinar a vida de fadiga das misturas asfálticas (Figura 9). Segundo Melo (2014), a qualidade de predição da resistência à fadiga utilizando qualquer um destes métodos de ensaio depende do grau de precisão em que o ensaio simula o estado de carregamento, os apoios, o estado de tensão e o meio

ambiente. Além disso, a seleção de qualquer método de teste pode ser influenciada pela disponibilidade e custo do equipamento, para além da facilidade de utilização.

Figura 9 - Representação de Diversos Ensaios de Vida à Fadiga em Misturas Asfálticas



Fonte: Zeiada (2012 *apud* Melo, 2014)

O ensaio de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos ou de tração indireta (bastante difundido no Brasil), o ensaio em flexão de corpos de prova trapezoidais (comum na França) e o ensaio de flexão a quatro pontos em vigotas prismáticas são alguns exemplos de ensaios utilizados em laboratórios brasileiros.

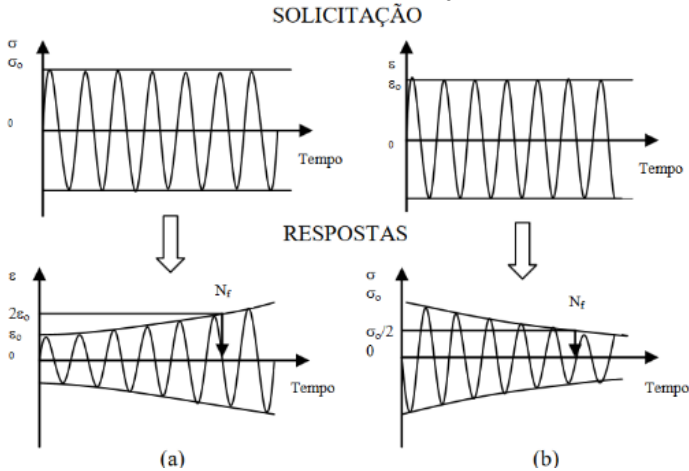
Além das diferenças na execução e de qualidade dos resultados dos diferentes ensaios, podem-se realizar ensaios tanto à tensão controlada ou à deformação controlada. Estes dois métodos de execução de ensaios serão abordados no item 2.4.1. Variadas formas de carregamento podem ser aplicadas aos corpos de prova durante os ensaios, algumas das formas são abordadas no item 2.4.2.

2.4.1 Ensaio à Tensão Controlada ou à Deformação Controlada

De acordo com Pinto (1991), no ensaio de tensão controlada (TC), a carga aplicada é mantida constante e as deformações resultantes

aumentam no decorrer do ensaio (Figura 10a). O ensaio de deformação controlada (DC), por sua vez, envolve a aplicação de cargas repetidas que produzam uma deformação constante ao longo do ensaio, o que conduz a uma diminuição da carga aplicada, para manter a deformação constante (Figura 10b). Em ambos os ensaios há uma redução da rigidez inicial do material a um nível que pode ser pré-estabelecido, no sentido de definir o fim do ensaio, ou seja, um critério de ruptura.

Figura 10 - Representação das Variáveis Tensão e Deformação em (a) Ensaios a Tensão Controlada e (b) Deformação Controlada



Fonte: BAAJ (2002)

O ensaio de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos é um exemplo de ensaio realizado à tensão controlada, isto é, a tensão σ_t é repetidamente aplicada e induzida pela força vertical distribuída no friso da geratriz e não se altera até a ruptura do corpo-de-prova (MEDINA, 1997).

O ensaio a tensão controlada é mais adequado para pavimentos com revestimentos com espessuras superiores a 15 cm, pois a mistura asfáltica vai perdendo sua rigidez com o número de aplicações de carga e, portanto, sofrendo maiores deformações com o tempo. A deformação aumenta fortemente no início do ensaio, estabiliza-se ao longo do seu transcurso com um aumento lento e progressivo e nos instantes que antecedem a ruptura, ocorre um aumento forte da deformação até a ruptura. Os ensaios dão resultados mais pessimistas que os de deformação controlada, apresentando também, resultados mais dispersos (MOMM, 2001 *apud* IWANAGA, 2007).

Segundo Medina (1997), a modalidade de deformação controlada é de execução mais difícil se não se dispuser de um servo-mecanismo retroalimentador que permita ajustar a força aplicada em função dos desvios da deformação medida. Esse tipo de ensaio é mais aplicável a pavimentos com revestimentos menos espessos, pois as deformações são regidas pelas camadas subjacentes e a diminuição no módulo de rigidez do revestimento não é considerável no dimensionamento (IWANAGA, 2007). Normalmente, se encerra o ensaio quando houver uma queda pré-estabelecida da rigidez inicial do corpo de prova.

O critério de ruptura mais utilizado tem sido a redução em 50% da carga inicial aplicada, 50% do módulo de rigidez inicial por flexão ou 50% da tensão inicial.

O Quadro 1 apresenta um resumo das principais diferenças entre os ensaios à tensão e à deformação controlada.

Quadro 1 - Diferenças Entre Ensaio à Tensão ou à Deformação Controlada em Testes de Fadiga

Variáveis	Tensão Controlada	Deformação Controlada
Espessura da camada de concreto asfáltico	Vinculada a camadas relativamente espessas	Vinculada a camadas mais finas
Definição de falha (número de ciclos)	Bem definido a partir de fraturas no corpo de prova	Arbitrária, o ensaio é interrompido quando o nível de carga for reduzido, em certa proporção do seu valor inicial
Dispersão dos resultados	Maior dispersão	Menor dispersão
Número necessário de corpos de prova	Menor número	Maior número
Magnitude da vida à fadiga	Vida geralmente menor	Vida geralmente maior
Efeito das variáveis da mistura	Mais sensível	Menos sensível
Taxa de dissipação de energia	Mais rápida	Mais lenta
Taxa de propagação de trincas	Mais rápido do que ocorre em campo	Mais representativos das condições de campo
Efeitos benéficos de períodos de repouso	Maiores efeitos benéficos	Menores efeitos benéficos

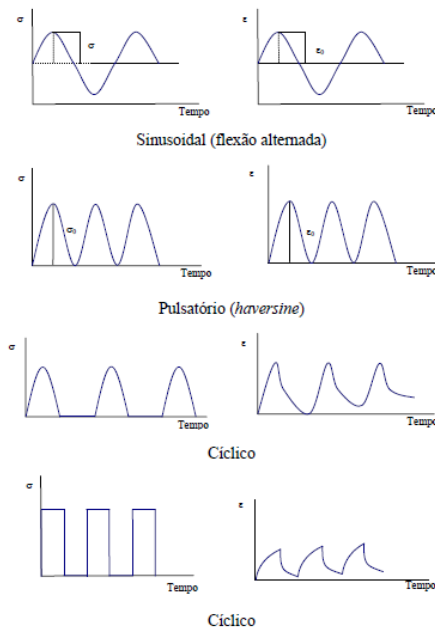
Fonte: Adaptado de Souliman (2012 *apud* Melo, 2014)

2.4.2 Formas de Carregamento

O tipo de carregamento que incide no pavimento em função da ação do tráfego não é simples de ser reproduzido em laboratório. No momento em que um veículo trafega sobre o pavimento as tensões tangenciais mudam de sentido. Em contraponto, no laboratório, os ciclos de carga aplicados são mantidos iguais ao longo de todo o período do ensaio, embora seja possível aplicar pulsos de carga com formas variadas através do controle da tensão ou da deformação que são aplicadas em cada ciclo. Isto implica que a maioria dos carregamentos aplicados não reproduz fielmente as condições do pavimento em campo. Apesar disso, é possível analisar os módulos e as características de fadiga através de diferentes condições de carregamento (CAPITÃO, 2003 *apud* COLPO, 2014).

As principais formas de carregamento utilizadas em ensaios de fadiga em misturas asfálticas são: senoidal (sinusoidal), semi-seno-verso (haversine), cíclica e retangular. Suas configurações em relação à tensão e à deformação em função do tempo são demonstradas na Figura 11.

Figura 11 - Formas de Carregamento mais Utilizadas nos Ensaios de Fadiga



Fonte: adaptado de Said (1988 *apud* Fontes, 2009)

Segundo Colpo (2014), a forma de carregamento senoidal (sinusoidal) ocorre quando o equipamento empregado nos ensaios à flexão possibilita aplicar o mesmo nível de deslocamento tanto para o lado inferior quanto para o superior, com amplitudes de deslocamentos constantes e alternadas com o tempo. Em contraponto, o carregamento semi-seno-verso, ou haversine, ocorre quando o equipamento aplica uma mesma amplitude de deslocamento em um único sentido, inferior ou superior.

Apesar da dificuldade de reprodução em laboratório do sinal real de carregamento observado no campo, o sinal senoidal obtido nos ensaios executados à flexão alternada é o que mais se aproxima das condições observadas no campo durante as solicitações. Esta condição foi demonstrada por Perret, a partir da superposição do sinal medido em campo a um sinal senoidal constituído com o uso de modelos elástico-lineares e viscoelástico lineares, aplicando Séries de Fourier (PERRET, 2003 *apud* BARRA, 2009).

2.4.3 Ensaio de Compressão Diametral

No Brasil, o ensaio laboratorial comumente empregado para analisar a vida de fadiga das misturas asfálticas tem sido o de tração indireta por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos. Este ensaio é realizado a tensão controlada com uma frequência de carregamento geralmente igual a 1 Hz e temperatura de 25°C. As principais vantagens deste ensaio são a simplicidade na preparação de amostras e a rapidez do método. Entretanto, durante o ensaio são geradas tensões cisalhantes junto aos frisos e tem-se um acúmulo de deformação permanente em cada aplicação do carregamento, com isso, o corpo de prova acaba rompendo por excesso de deformação permanente e não propriamente por fadiga (TAYEBALLI, 1994 *apud* COLPO, 2014). Além disso, o ensaio de fadiga por compressão diametral não pode ser realizado a deformação controlada, e em função de uma série de simplificações do ensaio e de suas características executivas, há um maior distanciamento laboratório-campo que outros ensaios (COLPO, 2014).

O equipamento utilizado para este ensaio (Figura 12) é o mesmo utilizado para determinação do módulo de resiliência das misturas asfálticas.

Figura 12 - Equipamento para Ensaio de Fadiga por Tração Indireta



Fonte: Autoria própria (2017)

2.4.4 Ensaio de Flexão em Corpos de Prova Trapezoidais

Também chamado de ensaio de fadiga a dois pontos, este ensaio foi desenvolvido na França e normalizado na Europa através da norma NF P 98-261-1 (1993). Segundo Loureiro (2003), o procedimento caracteriza-se pela aplicação de uma força na menor extremidade do corpo de prova através de um sistema eletromagnético capaz de gerar uma deformação elástica constante.

O critério de ruptura convencional é definido quando a força inicial é reduzida pela metade, sendo a vida de fadiga da mistura equivalente ao número de aplicações de carga (ciclos) correspondente ao final do ensaio (LOUREIRO, 2003).

Neste ensaio, a extremidade maior da amostra é engastada, mantendo-se estática durante todo o ensaio. Na extremidade menor é aplicado um deslocamento capaz de produzir no terço médio central uma deformação de tração constante (COLPO, 2014). A Figura 13 retrata o corpo de prova trapezoidal e o equipamento utilizado para este ensaio.

Figura 13 - Ensaio de Fadiga em Corpos de Prova Trapezoidais



Fonte: Autoria própria (2017)

As amostras de formato trapezoidal, apresentam as seguintes dimensões: 56 mm na base maior; 25 mm na base menor; 250 mm de altura e 25 mm de espessura. Este ensaio normalmente é realizado sob o regime de deformação controlada, a frequência de 25 Hz e temperatura de 10 °C (MOMM, 1998 *apud* ROSSATO, 2015).

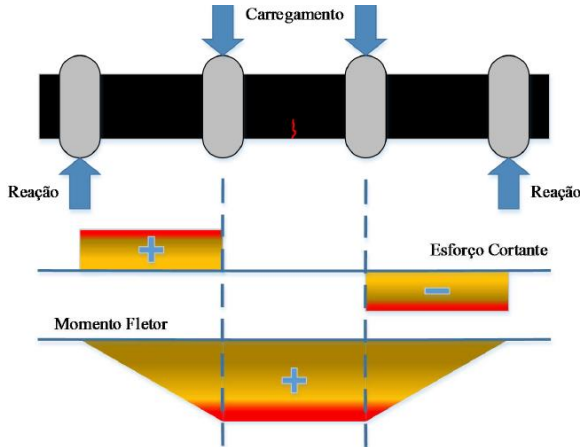
2.4.5 Ensaio de Flexão a Quatro Pontos

Recentemente, no Brasil, vem se popularizando o emprego do ensaio de flexão a quatro pontos em vigas prismáticas para determinação da vida à fadiga dos revestimentos asfálticos.

Nesse ensaio, uma viga prismática é sujeita a uma carga ou deformação constante ao longo do ensaio. O equipamento aplica um carregamento composto por duas cargas verticais afastadas entre si por um terço do vão da viga, promovendo a flexão do corpo de prova prismático quer no sentido descendente quer no sentido ascendente, medindo a força máxima aplicada e o deslocamento máximo no meio do vão. Verifica-se a existência de uma zona central de momento fletor constante e esforço cortante nulo, onde a ruptura da viga tende a ocorrer, sem a presença de tensões de cisalhamento, sendo o mais indicado para determinação da resistência à fadiga em misturas asfálticas (Figura 14).

Em contraponto, o estado de tensão é essencialmente de tração na flexão, sendo diferente do que ocorre na estrutura de um pavimento (MELO, 2014; COLPO, 2014).

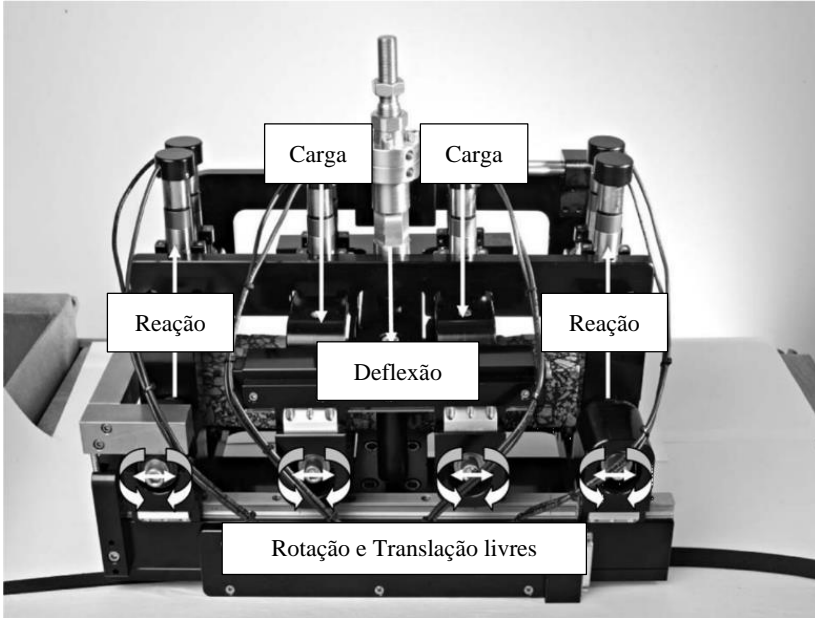
Figura 14 - Esforços Internos no Corpo de Prova Advindos do Carregamento



Fonte: Melo (2014)

O ensaio de flexão a quatro pontos pode ser um ensaio do tipo deformação controlada ou tensão controlada. Segundo Colpo (2014), no ensaio, a cada ciclo de carga, o sistema de controle e aquisição de dados deve medir o deslocamento no centro da viga, registrando sua deformação e ajustando a carga aplicada assim que a amostra atingir um nível de deformação constante em cada ciclo. Além disso, o sistema de aquisição de dados deve ser capaz de registrar os ciclos de carga, as cargas aplicadas e os deslocamentos da viga, bem como calcular e gravar as tensões de tração máxima, deformações de tração máxima, ângulo de fase, a rigidez da amostra, energia dissipada e a energia dissipada acumulada para cada intervalo de ciclo de carga especificado. A leitura do deslocamento no centro da viga é realizada através de um sensor do tipo LVDT que se encontra acoplado na parte superior do equipamento, sendo ele posicionado no início do ensaio em cima do corpo de prova, devendo estar marcando uma leitura próxima ao zero. A Figura 15 retrata o equipamento para ensaios de flexão a quatro pontos.

Figura 15 - Equipamento para Ensaio de Flexão a Quatro Pontos



Fonte: adaptado de ASTM D7460 (2010)

De acordo com Fontes (2009), dentre as principais vantagens deste tipo de ensaio, pode-se citar:

- É um ensaio conhecido em vários países e de fácil compreensão;
- Os resultados podem ser usados diretamente (com um fator laboratório-campo apropriado) no dimensionamento estrutural de pavimentos;
- Dado que a ruptura do corpo de prova ocorre numa zona de tensão uniforme e sem tensões de cisalhamento, os resultados são menos dispersos, exigindo menor quantidade de corpos de prova testados.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DA VIDA DE FADIGA: MÉTODOS DE ANÁLISE

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura (N_f) ou vida de serviço (N_s). A primeira se refere ao número total de aplicações de uma certa carga necessária à fratura

completa da amostra e a segunda ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Inúmeros métodos têm sido utilizados para a mensuração da vida de fadiga de misturas asfálticas. Será abordada neste trabalho apenas a abordagem fenomenológica do problema, que será utilizada nos capítulos seguintes para obtenção dos modelos de fadiga.

2.5.1 Análise Fenomenológica: Modelo Geral de Fadiga

A resistência à fadiga de uma mistura asfáltica é geralmente expressa como uma relação entre a tensão ou deformação inicial e o número de repetições de carga que produzem a ruptura. Este número é habitualmente determinado usando ensaios de flexão repetida, tração direta ou ensaios diametrais realizados a determinados níveis de tensão ou deformação (PAIS, 1999 *apud* FONTES, 2009). Segundo Medina (1997), os modelos fenomenológicos destes ensaios são apresentados conforme as equações 2 e 3.

Para ensaios a tensão controlada:

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\sigma_i} \right)^{n_1} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

N_f = vida à fadiga expressa em número de solicitações de carga;

σ_i = tensão inicial do ensaio;

K_1, n_1 = parâmetros de fadiga determinados no ensaio.

Para ensaios a deformação controlada:

$$N_f = K_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_2} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

N_f = vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga;

ε_i = deformação inicial do ensaio;

K_2, n_2 = parâmetros de fadiga determinados no ensaio.

Embora amplamente utilizada, a abordagem fenomenológica é essencialmente uma abordagem empírica e não proporciona uma relação entre a carga e qualquer forma de acumulação de danos na mistura asfáltica. A abordagem também não pode ser diretamente aplicada a

cenários de carregamento complexo, tais como aqueles normalmente observados em campo. Como resultado, tem sido aplicado as abordagens mais fundamentais, como: a mecânica do dano contínuo, a mecânica da fratura e a abordagem da energia dissipada. Estas abordagens procuram mais a fundo capturar as respostas complexas envolvidas na resistência à fadiga (CARPENTER *et.al*, 2003 *apud* MELO, 2014).

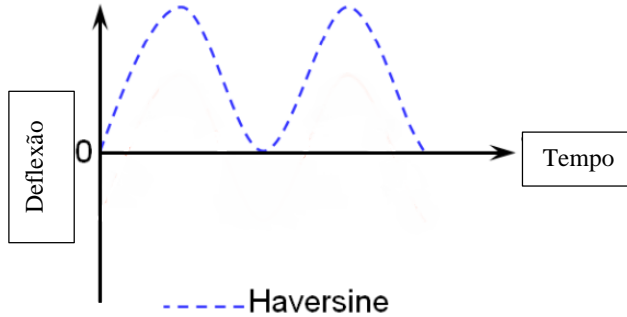
2.6 PRINCIPAIS NORMAS DE ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

No Brasil, atualmente, não há uma normatização para realização do ensaio de fadiga a flexão em vigotas a quatro pontos, portanto faz-se necessário a utilização de procedimentos descritos em normas internacionais para realização deste tipo de ensaio. O objetivo deste trabalho, é obter uma comparação entre os resultados obtidos em ensaios realizados segundo os procedimentos descritos pelas normas ASTM D7460 (2010) “*Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending*” e aqueles que seguem a diretriz europeia EN 12697-24 (2004) “*Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue*”. Além disso, far-se-á também a análise do procedimento descrito pela norma americana da AASHTO T321 (2007) “*Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*”. Segue abaixo uma breve descrição destas normativas internacionalmente consolidadas.

2.6.1 Normativa ASTM D7460 (2010)

Na norma ASTM D7460 (2010), “*Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending*”, o ensaio deve ser realizado com pulso de carregamento de formato haversine (Figura 16) à temperatura controlada de $20 \pm 0,5$ °C e com frequência podendo variar entre 5 a 10 Hz. No ensaio em deformação controlada, recomenda-se que a deformação inicial escolhida apresente uma variação entre 50 a 3000 microdeformações, sendo 200 a 800 microdeformações para concreto asfáltico convencional; 70 a 150 microdeformações para alto volume de tráfego, mas baixas condições de deformação; 1500 a 3000 para camadas intermediárias. O critério de ruptura corresponde ao máximo valor do módulo normalizado quando plotado versus o número de ciclos (Figura 17) (COLPO, 2014).

Figura 16 - Representação do Carregamento Haversine



Fonte: Adaptado de Mamlouk, Souliman e Zeiada (2012)

O módulo normalizado (NM) é determinado, segundo a ASTM D7460 (2010), pela equação 4:

$$NM = \frac{S_i \times N_i}{S_0 \times N_0} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

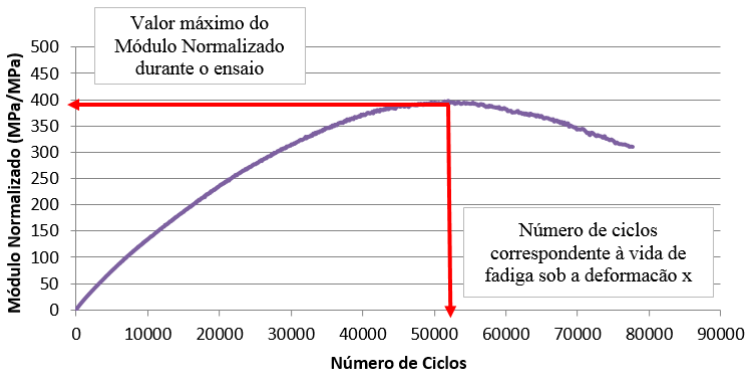
S_i = rigidez à flexão da viga para o ciclo i , em Pa;

N_i = ciclo i ;

S_0 = rigidez à flexão inicial da viga, em Pa, estimada no ciclo 50,;

N_0 = real número onde a rigidez à flexão inicial da viga é determinada.

Figura 17 - Critério de Ruptura Segundo a ASTM D7460 (2010)



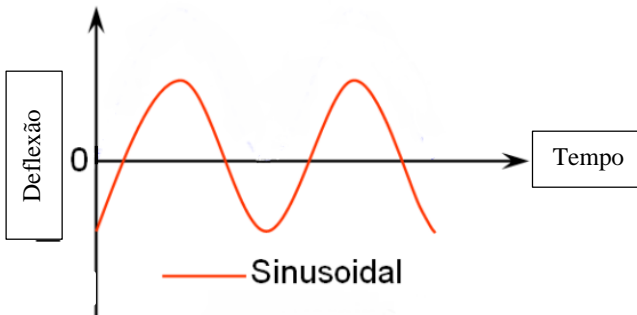
Fonte: Elaboração própria.

Segundo a norma americana, deve-se facear todos os lados da amostra compactada em no mínimo 6 mm ficando as dimensões finais requeridas de 380 ± 6 mm de comprimento, 50 ± 2 mm de altura e 63 ± 2 mm de largura. Devem ser moldadas nove vigas idênticas, das quais, no mínimo, seis devem ser ensaiadas a diferentes níveis de deformação a fim de desenvolver a curva de fadiga. As demais amostras podem ser usadas em caso de discrepância de dados ou rompimento de algum corpo de prova diretamente nos fixadores. Ainda, os corpos de prova devem ser mantidos em câmara climática a temperatura de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ por um período de 1,5 horas a 2 horas antes de serem ensaiados.

2.6.2 Normativa EN 12697-24 (2004)

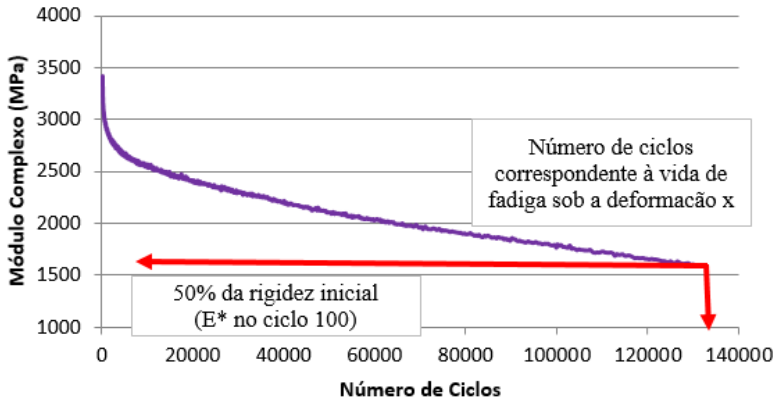
Para a realização do ensaio de fadiga a quatro pontos em vigas prismáticas, recomenda-se o uso de carregamento de forma senoidal (Figura 18) à temperatura controlada entre 0°C a 20°C e com frequência entre 5 a 60 Hz. Os ensaios podem ser realizados a tensão ou deformação controlada, onde devem ser estipulados três diferentes níveis de tensão ou deformação, dependendo do modo de carregamento escolhido. Além disso, recomenda-se o ensaio de seis amostras para cada nível, sendo que os níveis de deformação e/ou tensão devem ser escolhidos de maneira que a vida de fadiga fique entre 10^4 a 2×10^6 ciclos. O critério de ruptura depende do modo de carregamento, podendo corresponder à redução de 50% da rigidez inicial ou quando ocorre o rompimento total do corpo de prova (Figura 19), sendo que a rigidez à flexão inicial é determinada no ciclo de carga número 100 (EN 12697-24, 2004).

Figura 18 - Representação do Carregamento Senoidal



Fonte: Adpatado de Mamlouk, Souliman e Zeiada (2012)

Figura 19 - Critério de Ruptura Segundo a EN12697-24 (2004)



Fonte: Elaboração própria.

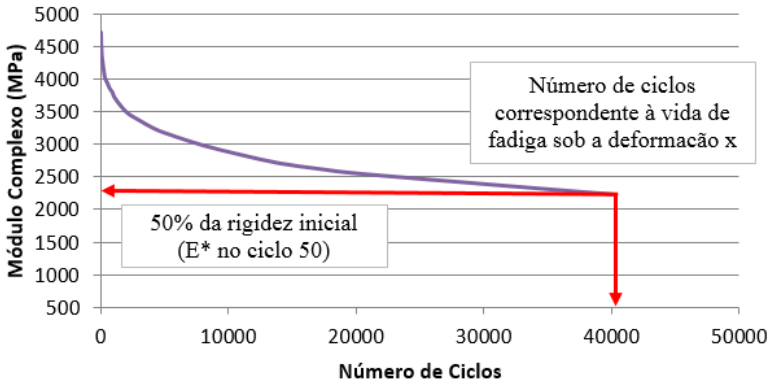
A norma europeia EN 12697-24 (2004), preconiza que a altura e largura dos corpos de prova devem ser no mínimo três vezes a dimensão máxima do agregado, já o seu comprimento efetivo, distância entre os fixadores externos, deve ser, no mínimo, seis vezes o maior valor entre a altura ou a largura, e ainda, recomenda que o comprimento total não deva exceder o comprimento efetivo em mais de 10%. Os corpos de prova devem ser serrados de placas moldadas em laboratório ou em campo, deixando um espaço mínimo de 20 mm entre a viga e a borda da placa, sendo recomendado serrá-las no mesmo sentido de compactação. As amostras, após o processo de corte, precisam ser secas ao ar até massa constante, a uma umidade relativa do ar inferior a 80% e a uma temperatura entre 15 e 25 °C, sendo consideradas secas quando duas pesagens realizadas em intervalos de 24 horas diferirem em menos de 0,25%. Para ensaios realizados a 20 °C, as amostras devem permanecer por, no mínimo, 1 hora na câmara climática antes do início do procedimento. Salienta-se que este período não deve durar mais do que 6 horas.

2.6.3 Normativa AASHTO T321 (2007)

Segundo a norma AASHTO T321 (2007), o ensaio no equipamento de fadiga a quatro pontos deve ocorrer à temperatura controlada de $20 \pm 0,5$ °C e o carregamento deve ser aplicado com

frequência variando entre 5 e 10 Hz. O pulso de carregamento aplicado é do tipo sinusoidal (Figura 18) e a ruptura é definida como o instante em que a rigidez inicial, medida no 50º ciclo, é reduzida à metade do seu valor inicial, conforme Figura 20.

Figura 20 - Critério de Ruptura Segundo a AASHTO T321 (2007)



Fonte: Elaboração própria.

O ensaio pode ser realizado sob deformação controlada ou tensão controlada. Para a primeira opção, é recomendado pela norma que a deformação inicial escolhida esteja entre 250 e 750 microdeformações.

Todos os lados da amostra devem ser faceados no mínimo 6 mm proporcionando superfícies paralelas e, com isso, busca-se a eliminação de elevados volumes de vazios nas amostras originados no contato com o molde. Após o faceamento, a norma preconiza que as amostras apresentem dimensões de 380 ± 6 mm de comprimento, 50 ± 6 mm de altura e 63 ± 6 mm de largura. Recomenda ainda a confecção de três vigas extraídas de placas compactadas por rolo vibratório, pois o tipo de compactação pode influenciar nos resultados do ensaio. As amostras devem ser colocadas em uma câmara climática a $20 \pm 0,5$ °C duas horas antes do início do ensaio para garantir a estabilidade de temperatura (AASHTO T321, 2007).

2.6.4 Quadro Resumo das Normativas

O Quadro 2 apresenta um resumo e comparativo das principais características das normas apresentadas anteriormente.

Quadro 2 - Resumo das Principais Características das Normas

Critérios/Normas	ASTM D7460	EN 12697-24	AASHTO T321
Tipo de onda	Haversine (Semi-seno-verso)	Senoidal (Sinusoidal)	Senoidal (Sinusoidal)
Critério de ruptura	Valor máximo da curva: módulo normalizado <i>versus</i> número de ciclos.	Redução da rigidez à flexão inicial da viga à 50%.	Redução da rigidez à flexão inicial da viga à 50%.
Modo de carregamento	Deformação controlada	Deformação/ Tensão controlada	Deformação/ Tensão controlada
Limites de deformação controlada	50 $\mu\epsilon$ - 3000 $\mu\epsilon$	Níveis de deformação em que a vida de fadiga fique entre 10^4 e 2×10^6	250 $\mu\epsilon$ - 750 $\mu\epsilon$
Rigidez à flexão inicial da viga	Medida no ciclo 50	Medida no ciclo 100	Medida no ciclo 50
Controle de temperatura	20°C \pm 0,5°C	0°C a 20°C	20°C \pm 0,5°C
Frequência	5 a 10 Hz	5 a 60 Hz	5 a 10 Hz

Fonte: Adaptado de Colpo (2014)

2.7 FATOR LABORATÓRIO-CAMPO

É quase impossível que testes de fadiga no âmbito laboratorial simulem completamente as condições de campo, pois há muitas variáveis que não são consideradas, tais como: fabricação das amostras, carregamento composto, períodos aleatórios de descanso, ação do meio ambiente e multiestados de tensão. Portanto, há diferença na resistência à fadiga obtida com base em condições de campo e de laboratório. Para considerar esta diferença na resistência à fadiga, um fator é normalmente utilizado para transladar o desempenho do laboratório para o campo. A magnitude do fator de desvio é variável e depende de muitos fatores, tais como: a espessura da camada de concreto asfáltico, as propriedades da mistura, o volume e a composição do tráfego, as condições ambientais, critério de falha à fadiga e do tipo de ensaio de fadiga (ZEIADA, 2012 *apud* MELO, 2014).

2.8 ESTUDOS JÁ CONDUZIDOS SOBRE O TEMA

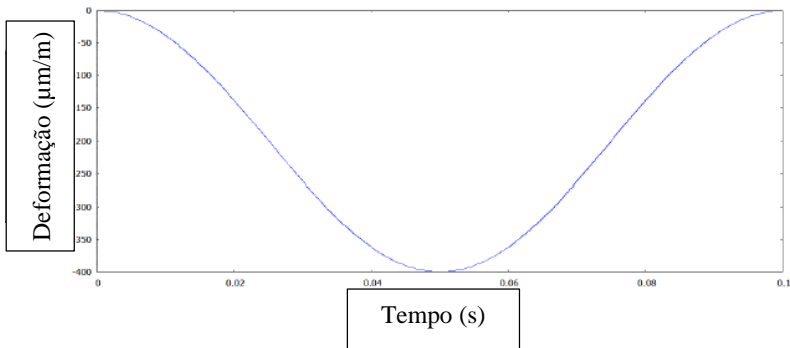
Em setembro de 2013, Erik Denneman escreveu um artigo para a décima quinta edição da Conferência Internacional de Pavimentos Flexíveis organizada pela AAPA (*Australian Asphalt Pavement Association*) que aborda um tema bastante similar ao objetivo a que este trabalho se propõe. O artigo trata da comparação entre o procedimento descrito no protocolo australiano AG/PT 233 (2006) para ensaio de fadiga em pavimentos flexíveis e demais normativas internacionalmente conhecidas para ensaios de vida à fadiga, entre elas a norma americana ASTM D7460 (2010) e a europeia EN 12697-26 (2004). O protocolo australiano prevê o uso de equipamento de fadiga a quatro pontos e formato de onda haversine, bastante semelhante ao modelo americano da ASTM.

O autor, inicialmente, faz uma breve revisão literária dos estudos já conduzidos sobre o assunto e expõe que as evidências sugerem que a carga aplicada em formato de onda haversine, durante o decorrer do ensaio acaba mudando de formato e se transformando em uma onda sinusoidal.

Pronk *et al.* (2010 *apud* DENNEMAN, 2013) mostraram que não é possível aplicar constantemente a carga em formato haversine no ensaio com aparato de fadiga a quatro pontos. No início da aplicação da carga (primeiros ciclos) a viga se deforma segundo o pulso de carga haversine, porém, o próprio deslocamento para um único lado da viga começa a causar uma reação sinusoidal no corpo de prova. Por fim, o resultado do ensaio é a aplicação de uma carga sinusoidal com metade da amplitude aplicada inicialmente como carregamento haversine (PRONK *et al.*, 2010, MATEOS *et al.*, 2011 *apud* DENEMMAN, 2013).

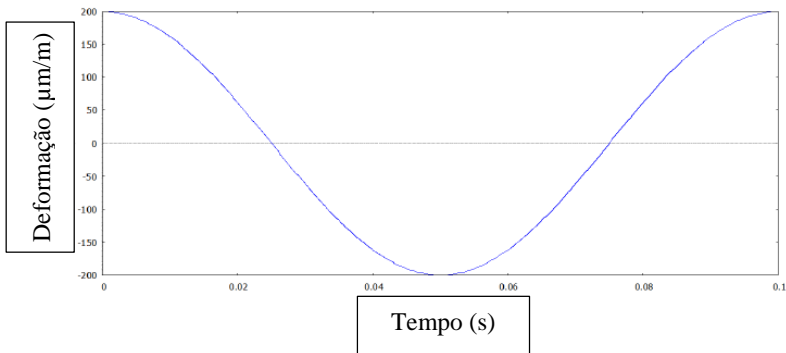
Exemplificando, a Figura 21 representa a carga inicialmente aplicada na viga em formato haversine com deformação controlada, enquanto a Figura 22 representa a onda sinusoidal em que o pulso se transforma, com metade da amplitude inicial.

Figura 21 - Representação do Pulso Haversine Aplicado com Deformação Controlada Máxima de 400 $\mu\text{m/m}$



Fonte: adaptado de Denneman (2013)

Figura 22 - Representação do Pulso Sinusoidal Resultante com Deformação Controlada Máxima de 200 $\mu\text{m/m}$



Fonte: adaptado de Denneman (2013)

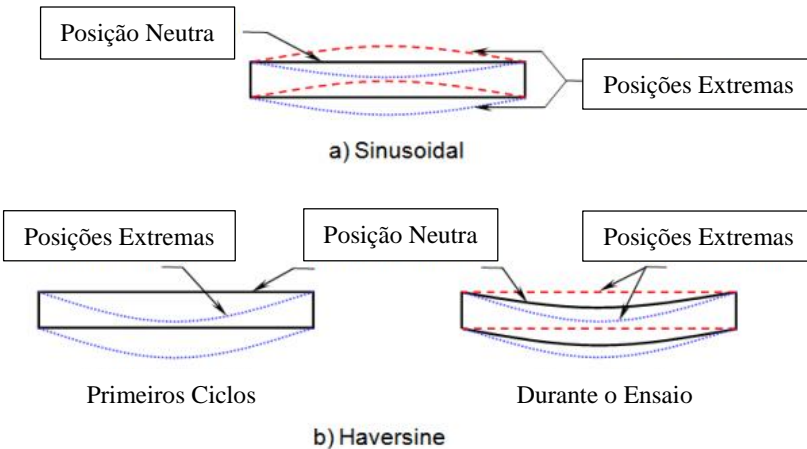
Foram conduzidos ainda ensaios experimentais segundo o protocolo australiano e a norma europeia e o resultado obtido foi o mesmo descrito acima. A microdeformação para determinado número de ciclos obtida na normativa australiana é aproximadamente o dobro da obtida para o mesmo número de ciclos no procedimento europeu.

Por fim, Denneman (2013) conclui que é preciso muita cautela na comparação entre os resultados de vida de fadiga obtidos pelo protocolo AG/PT 233 (2006), ou segundo demais normativas que utilizam o carregamento haversine, e normas que utilizem carregamento de forma sinusoidal, uma vez que os resultados serão diferentes para uma mesma

deformação considerada. Sendo assim, o dimensionamento do pavimento em si também será diferente. O autor ainda recomenda, que se abandone o uso de carregamento em formato haversine para ensaios em equipamento de flexão a quatro pontos, pois não é possível reproduzi-lo em laboratório e sugere para a comunidade técnica australiana a adoção da norma europeia por apresentar um procedimento bastante claro e facilmente compreensível.

Mamlouk, Souliman e Zeiada chegaram a conclusões muito parecidas em um artigo desenvolvido para o encontro anual do TRB (*Transportation Research Board*) em 2012. Segundo os autores, no ensaio realizado com pulso sinusoidal, a vigota se deforma nos dois sentidos, e a posição neutra da mesma não muda, localizando-se no meio do caminho entre as posições extremas (Figura 23a). No ensaio com ondas Haversine, por outro lado, o corpo de prova inicialmente é flexionado em apenas uma direção, com a mesma deformação inicial do ensaio sinusoidal. Dado comportamento viscoso do material, a viga acaba sofrendo uma deformação permanente e sua posição neutra é rapidamente deslocada para baixo. Como o sinal de deformação não se altera e tende a trazer a vigota para a posição neutra inicial, o pulso acaba se transformando em sinusoidal, com metade da amplitude inicial estabelecida (Figura 23b).

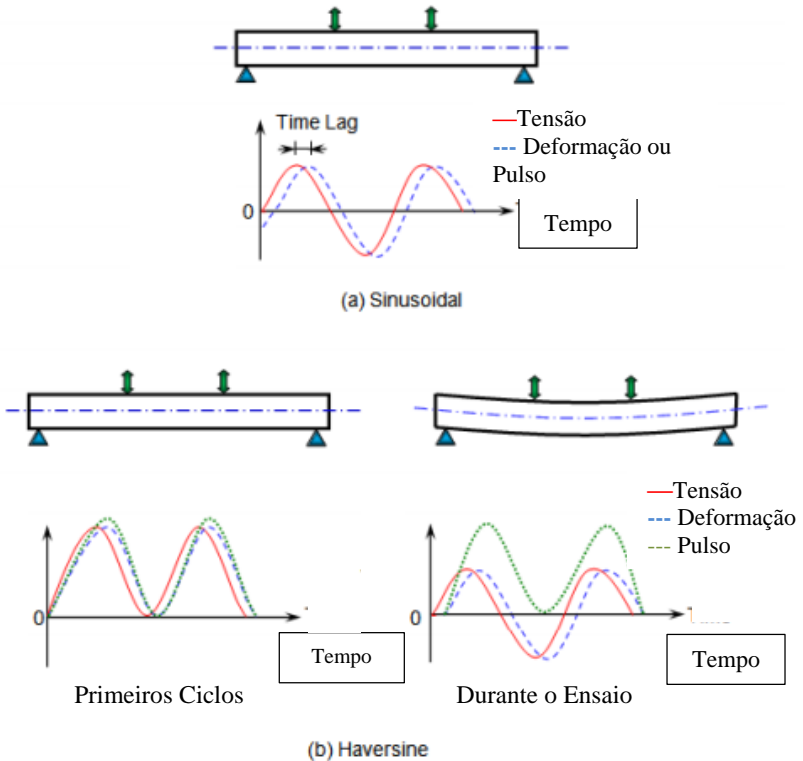
Figura 23 - Posição Neutra do Corpo de Prova em ensaios sob Pulso de Carregamento (a) sinusoidal e (b) haversine



Fonte: adaptado de Mamlouk, Souliman e Zeiada (2012)

De acordo com Mamlouk, Souliman e Zeiada (2012), ao fim do ensaio, com a retirada da carga, os corpos de prova testados com carregamento de formato haversine continuam curvados, apresentando efeitos da deformação permanente. A Figura 24 mostra o comportamento do corpo de prova prismático submetido ao ensaio de fadiga a quatro pontos sob carregamento sinusoidal e haversine, bem como o comportamento das variáveis: tensão, deformação e pulso de deslocamento ao longo do ensaio.

Figura 24 - Comportamento da Viga no Ensaio de Fadiga a Quatro Pontos sob Carregamento (a) sinusoidal e (b) haversine

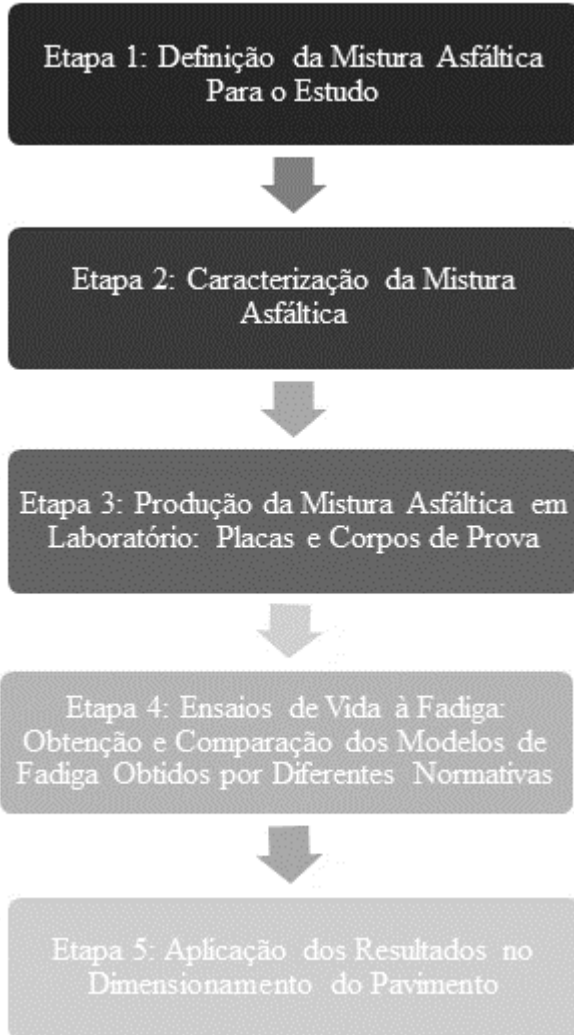


Fonte: adaptado de Mamlouk, Souliman e Zeiada (2012)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de atingir os objetivos propostos neste estudo, o trabalho foi estruturado em cinco etapas a serem desenvolvidas, conforme esquema apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Fluxograma das Etapas da Pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O ESTUDO

Nesta primeira etapa, definiu-se a mistura asfáltica a ser estudada e consequentemente utilizada para confecção dos corpos de prova do trabalho. Optou-se por utilizar uma mistura asfáltica integrante de uma pesquisa que está sendo conduzida desde o ano de 2012 pelo Laboratório de Ligantes e Misturas Asfálticas da UFSC ligado à Rede Temática do Asfalto (Petrobras), cujo objeto de estudo são segmentos experimentais distribuídos no estado de Santa Catarina. Também nesta etapa são apresentadas as informações gerais do segmento monitorado onde esta mistura foi aplicada, tais como: localização, clima, extensão, tipo e seção do pavimento e solicitação do tráfego no local.

3.2 ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

Nesta etapa, é apresentada a caracterização dos materiais e o projeto de dosagem da mistura asfáltica. Para a constituição da mistura do estudo, foram utilizados os seguintes materiais: agregados minerais, cal hidratada CH-1 e ligante asfáltico do tipo CAP FLEX-B (os mesmos utilizados em campo no segmento selecionado). A composição granulométrica da mistura moldada em laboratório foi definida a partir da curva granulométrica da mistura asfáltica aplicada no segmento monitorado. A metodologia de dosagem utilizada foi a Dosagem *Marshall*.

3.2.1 Agregados Minererais

Os agregados minerais empregados para produção da mistura asfáltica foram coletados diretamente na pedreira da obra, localizada em Itapoá-SC e podem ser divididos em: Brita 3/4”, Brita 3/8” e pó de pedra. O material granular é proveniente de uma formação rochosa metamórfica, tipo Gnaisse, resultante da deformação de sedimentos arcóscicos ou de granitos.

A caracterização tecnológica dos agregados minerais foi obtida através do relatório *As Built* (2012) da obra, cuja responsável foi a empresa SOTEP. Segundo o relatório, os ensaios de caracterização foram conduzidos segundo as seguintes normativas:

- I. Ensaio de resistência à abrasão: DNER-ME 035/98 - Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”;

- II. Ensaio de sanidade: DNER-ME 089/94 - Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio;
- III. Ensaio de absorção e densidades: DNER-ME 081/98 - Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo;
- IV. Ensaio de densidades: DNER-ME 084/95 - Agregado miúdo - determinação da densidade real;
- V. Forma das partículas: ABNT NBR 7809/08 - Agregado graúdo - determinação do índice de forma.

3.2.2 Composição Granulométrica

A curva granulométrica utilizada neste estudo foi a mesma utilizada no campo, sendo formulada através da combinação dos agregados (Brita 3/4”, Brita 3/8” e pó de pedra) e da cal hidratada CH-1. A curva granulométrica se enquadra na faixa IV-B do Instituto do Asfalto.

3.2.3 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado na produção da mistura foi um asfalto-borracha do tipo CAP FLEX-B. Os resultados de caracterização do material foram obtidos segundo o relatório *As Built* (2012) da empresa ENGEVIX. De acordo com o relatório, o ligante foi caracterizado segundo os ensaios especificados a seguir:

- I. Ensaio de viscosidade aparente: ABNT NBR 15184/04 - Materiais betuminosos - determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional;
- II. Ensaio de ponto de amolecimento: ABNT NBR 6560/08 - Materiais betuminosos - determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola;
- III. Ensaio de penetração: ABNT NBR 6576/07 - Materiais asfálticos - determinação da penetração;
- IV. Ensaio de recuperação elástica: ABNT NBR 15086/06 - Materiais betuminosos - determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro.

3.2.4 Dosagem da Mistura Asfáltica

O projeto da mistura seguiu as prescrições da norma DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. O teor de ligante e demais parâmetros volumétricos foram obtidos através do relatório *As Built* (2012) da obra.

3.3 ETAPA 3: PRODUÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA EM LABORATÓRIO: PLACAS E CORPOS DE PROVA

3.3.1 Produção da Mistura Asfáltica em Laboratório

Para a preparação da mistura, os agregados foram fracionados em nove peneiras, de modo a compor a curva granulométrica empregada em campo de forma precisa. As peneiras utilizadas neste procedimento foram: $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", n° 4, n° 8, n° 30, n° 50, n° 100 e n° 200 (série da ASTM). Este fracionamento teve por objetivo obter uma baixa dispersão dos resultados experimentais e eliminar fatores que não são objetos de investigação na pesquisa.

O teor de ligante utilizado para a moldagem das placas em laboratório foi aquele determinado no projeto de dosagem da mistura, ou seja, o mesmo empregado no campo.

A mistura asfáltica foi preparada em laboratório através de um misturador mecânico, com prévio aquecimento dos materiais em estufa. Os materiais foram aquecidos nas temperaturas preconizadas pela normativa DNIT-ES 112/2009 – Pavimentos flexíveis - concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending”. Neste sentido, o ligante asfáltico foi aquecido a temperatura de 170 °C e os agregados a uma temperatura de 10 °C acima da temperatura do ligante asfáltico. Após a homogeneização mecânica da mistura, e antes da compactação, esta ficou condicionada em estufa durante duas horas na temperatura de compactação, 155 °C.

3.3.2 Moldagem das placas e corpos de prova

Após a produção da mistura asfáltica em laboratório, foram moldadas seis placas de concreto asfáltico para os ensaios de vida à fadiga no equipamento de flexão a quatro pontos. As dimensões das placas são de 60 cm x 40 cm x 9 cm. A compactação da mistura foi realizada segundo à norma francesa *AFNOR NF P 98-250-2 (1991) - Essais Relatifs Aux*

Chaussées, Préparation Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques.

O equipamento utilizado para a moldagem das placas de concreto asfáltico foi a mesa compactadora IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux*) (Figura 26). Este equipamento procura simular em laboratório o processo de compactação em campo da mistura asfáltica.

Figura 26 - Mesa Compactadora IFSTTAR



Fonte: Melo (2016)

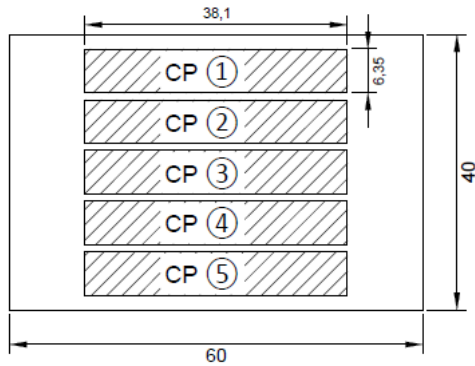
Após a desforma das placas, com auxílio de uma serra, as mesmas foram transformadas em prismas, com as seguintes dimensões: 5,08 cm x 6,35 cm x 38,1 cm. De cada placa moldada foram extraídos 5 corpos de prova prismáticos. A Figura 27 representa o plano de serragem das placas para obtenção dos corpos de prova.

Para melhores resultados, segundo Pérez (2016), é necessário um procedimento rigoroso na preparação dos materiais, na compactação e no processo de corte das placas para obter corpos de prova que sejam os mais homogêneos possíveis, tanto na porcentagem de vazios quanto nas suas dimensões.

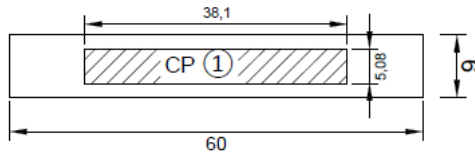
Ressalta-se, que tanto o processo de preparo das misturas asfálticas, quanto a moldagem e serragem das placas para obtenção dos corpos de prova prismáticos foram executados por Melo, durante seu estágio de Pós-doutoramento na UFSC em 2015.

Figura 27 - Plano de Serragem das Placas Moldadas (em cm)

Vista de Cima



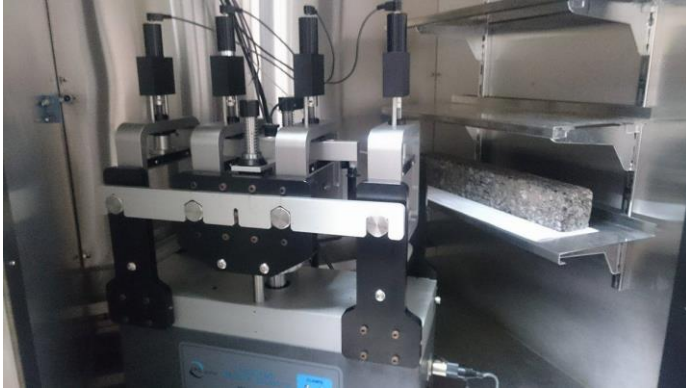
Vista Lateral



Fonte: Elaboração própria.

3.4 ETAPA 4: ENSAIOS DE VIDA À FADIGA: OBTENÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE FADIGA OBTIDOS POR DIFERENTES NORMATIVAS

Com os corpos de prova preparados, foi dado início aos ensaios de vida à fadiga no equipamento de origem australiana “*Pneumatic 4 Point Bending Apparatus*” ou equipamento de fadiga a quatro pontos (Figura 28). Este equipamento está disponível no laboratório de pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina. A descrição do ensaio pode ser encontrada no item 2.4.5 Ensaio de Flexão a Quatro Pontos.

Figura 28 - *Four Point Bending Apparatus*

Fonte: Autoria própria (2017)

Conforme o objetivo deste trabalho, parte dos corpos de prova foram testados segundo as prescrições da norma americana ASTM D7460, com pulsos de carregamento em formato haversine, e outra parte, com pulsos de carregamento sinusoidal, de acordo com a norma europeia EN 12697-24 e a americana AASHTO T321. Todos os ensaios foram realizados sob deformação controlada, a temperatura de 20° C e com frequência de aplicação da carga de 10 Hz. Destaca-se, que a curva de fadiga segundo a normativa EN 12697-24, foi obtida por Melo (2016), e, as demais são fruto deste Trabalho de Conclusão de Curso.

O controle do equipamento, no que diz respeito à forma do carregamento aplicado e à regulação da microdeformação controlada se dá através de dois softwares, que, por meio de um computador, transmitem o formato da onda sinusoidal ou haversine para o equipamento de fadiga a quatro pontos. Para realização do ensaio sob a norma americana ASTM D7460 foi utilizado o programa UTS015, enquanto para o ensaio sob a norma europeia, o programa UTS018. No ambiente de ambos os programas o operador fornece os parâmetros iniciais definidos para o ensaio, como: microdeformação estabelecida, frequência do ensaio, tipo de onda, critério de finalização do ensaio, entre outros.

Durante o ensaio, os softwares citados registram pares de dados no formato (n° de ciclos; módulo complexo) e a partir destes dados, é possível gerar curvas, a partir das quais, determina-se a vida de fadiga do material, de acordo com o respectivo critério de ruptura. O operador pode acompanhar o registro dos dados pela tela do computador, bem como pode escolher quais variáveis deseja analisar ao longo do ensaio.

O critério de ruptura, conforme exposto no item 2.6, foi considerado como:

- Momento do ensaio em que a rigidez do corpo de prova equivale a 50% da sua rigidez inicial, medida no ciclo 100, ou ruptura total do corpo de prova, se esta ocorrer antes que a rigidez do corpo de prova seja reduzida à metade, para a norma europeia, EN 12697-24.
- Máximo valor atingido do módulo normalizado durante o ensaio para a norma americana, ASTM D7460.
- Momento do ensaio em que a rigidez do corpo de prova equivale a 50% da sua rigidez inicial, medida no ciclo 50, ou ruptura total do corpo de prova, se esta ocorrer antes que a rigidez do corpo de prova seja reduzida à metade, para a norma americana, AASHTO T321.

Realizados os ensaios de fadiga, foi possível obter os modelos de fadiga de acordo com cada norma, ou seja, uma curva padrão que explica o comportamento dos corpos de prova ensaiados. Neste trabalho, utilizou-se a abordagem fenomenológica, já abordada no item 2.5.1, para a modelação das curvas de fadiga representativas para cada normativa. Esta abordagem é representada pela Equação 3 para ensaios a deformação controlada.

Os modelos obtidos, permitem que se estime o número de ciclos correspondente a vida de fadiga da mistura asfáltica ensaiada, para qualquer deformação aplicada. Estes modelos são muito úteis por permitirem estimar a vida de fadiga das misturas asfálticas antes da sua aplicação em campo e dimensionar pavimentos mais resistentes aos efeitos deste fenômeno.

O passo seguinte foi usar os modelos de fadiga obtidos para analisar e discutir o efeito da aplicação de cada uma das três normas no dimensionamento da estrutura de um pavimento.

A fim de aprofundar a análise e discussão dos modelos, foi gerado mais um modelo de fadiga com os dados disponíveis. Neste novo modelo gerado, foram considerados os resultados obtidos com os corpos de prova testados sob o procedimento da norma americana ASTM D7460 (com ondas tipo haversine), porém aplicando o critério de ruptura da norma europeia. O objetivo desta análise foi a comparação exclusiva do formato de onda utilizado no ensaio e sua influência sobre os resultados.

3.5 ETAPA 5: APLICAÇÃO DOS RESULTADOS NO DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

Na última etapa do trabalho, foi realizada uma simulação numérica no *software* ViscoRoute 2.0, desenvolvido pelo IFSTTAR, em conjunto com a *École Nationale des Ponts et Chaussées* (ENPC).

Como dados de entrada no programa, foram inseridas as características da estrutura do pavimento do trecho experimental e da carga atuante, o eixo padrão de 8,2 toneladas (eixo simples de roda dupla).

Como dado de saída, foi avaliada a microdeformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico, levando em consideração os efeitos do tempo de aplicação do carregamento e a temperatura do revestimento de concreto asfáltico.

Com o valor obtido de microdeformação de tração, foi possível extrair das equações de fadiga desenvolvidas, a previsão de ruptura por fadiga do revestimento asfáltico para cada normativa.

O objetivo desta análise foi a comparação do número de ciclos obtidos a partir de cada modelo de fadiga e sua influência na definição da vida de fadiga da estrutura. Como o valor de solitação do tráfego no segmento monitorado é conhecido, foi possível avaliar, sob a perspectiva de cada normativa, se o dimensionamento previsto e executado atenderá ou não os requisitos do projeto.

Uma segunda análise a ser realizada consiste na definição da espessura mínima de revestimento asfáltico necessária para resistir ao carregamento esperado no horizonte do projeto. Esta análise visa estabelecer o efeito do uso de cada uma das normativas na definição da espessura da camada pavimentada na rodovia, uma vez que a etapa de pavimentação é um serviço que exige controle rigoroso de execução e tem participação significativa no orçamento de uma obra rodoviária, portanto a espessura de material a ser usado é uma variável extremamente importante.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes às cinco etapas descritas no Capítulo 3: Materiais e Métodos.

4.1 DEFINIÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA PARA O ESTUDO

A Etapa 1, Definição da Mistura Asfáltica para o Estudo, compilou os dados levantados por Pérez (2016).

4.1.1 Informações gerais

Definiu-se como mistura asfáltica a ser estudada, o revestimento aplicado em um segmento monitorado localizado no município de Itapoá, ao Norte do Estado de Santa Catarina, conforme a Figura 29. O trecho possui 300 m de extensão, localiza-se na rodovia SC-416 (antiga nomenclatura SC-415), compreendido entre as estacas 1170 e 1185 e faz parte de uma pesquisa sobre segmentos experimentais em Santa Catarina que está sendo conduzida pelo Laboratório de Ligantes e Misturas Asfálticas/UFSC ligado à Rede Temática do Asfalto/Petrobras.

Figura 29 - Localização do Município de Itapoá no Estado de Santa Catarina



Fonte: Wikipédia (2017)

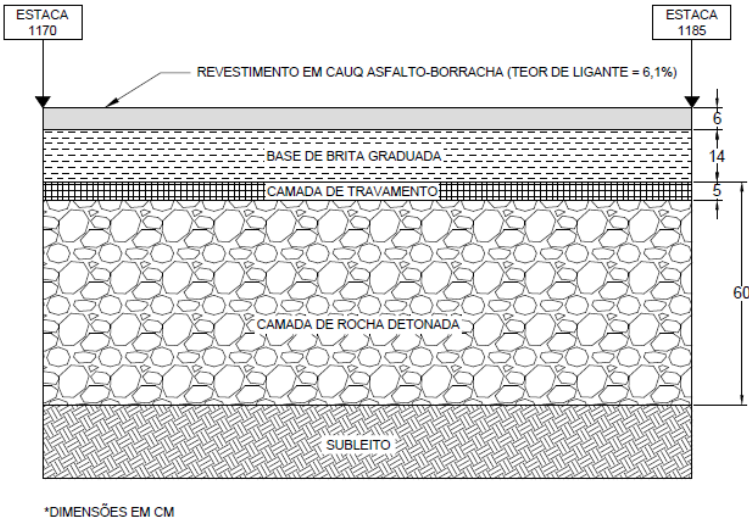
O tráfego previsto para o período de projeto, em termos do eixo padrão rodoviário brasileiro, é de um $N_{8,2t}$ igual a $1,16 \times 10^7$ (USACE), considerando a abertura ao tráfego no ano de 2012 e período de projeto de dez anos. A rodovia estadual SC-416 faz a ligação do Porto de Itapoá

à Rodovia BR-101, passando pelo município de Garuva, compreendendo 27 km de rodovia.

A estrutura do pavimento executado no trecho é formada por camada de revestimento em asfalto-borracha com 6 cm de espessura, camada de base em brita graduada com 14 cm de espessura sobre uma camada em pedra detonada com 60 cm de espessura, cujos cinco centímetros finais foram preenchidos com material granular mais fino, no intuito de preencher os vazios intergranulares da parte superior desta camada, propiciando o travamento dos agregados, para aumentar a estabilidade do arranjo estrutural (Figura 30). O material do subleito, em suas camadas finais (greide de terraplenagem de solo) foi compactado com 95% da energia de Proctor Normal.

Este segmento foi dimensionado segundo método previsto pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza (DNER/1981).

Figura 30 - Estrutura do Pavimento do Segmento Monitorado de Itapoá-SC



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 31 retrata as fases de construção da estrutura pavimentada do segmento monitorado em Itapoá.

Figura 31 - Etapas de Construção do Segmento Monitorado de Itapoá



(a) Camada Final de Terraplenagem



(b) Camada de Pedra Detonada



(c) Camada de Base do Pavimento



(d) Revestimento Asfáltico

Fonte: Adaptado de Trichês (2014)

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

A seguir são apresentados os resultados da caracterização dos materiais utilizados na produção da mistura asfáltica, conforme os ensaios descritos no item 3.2.

4.2.1 Agregados Minerais

O Quadro 3 contempla a caracterização dos agregados utilizados na obra, em Itapoá, segundo relatório *As Built* (2012) da empresa SOTEPA.

Quadro 3 - Caracterização dos Agregados Minerais

MATERIAL PÉTREO	Tipo	GNAISSE
	Abrasão (%)	26,9
	Lamelar / Índice de forma 25% > 0,4	8,0/2,3
	Sanidade (%)	0,38
AGREGADOS	Densidade Real (g/cm ³)	2,796
	Densidade Aparente (g/cm ³)	2,767

Fonte: Adaptado do relatório *As Built* da empresa SOTEPA (2012)

4.2.2 Composição Granulométrica

A composição da fração de agregados minerais foi a mesma adotada em campo, conforme Quadro 4.

Quadro 4 - Composição da Fração de Agregados Minerais Utilizados na Mistura Asfáltica

COMPOSIÇÃO TRAÇO	Brita 3/4"	20,00%
	Brita 3/8"	25,00%
	Pó	53,50%
	Cal CH-1	1,50%

Fonte: Adaptado do relatório *As Built* da empresa SOTEPA (2012)

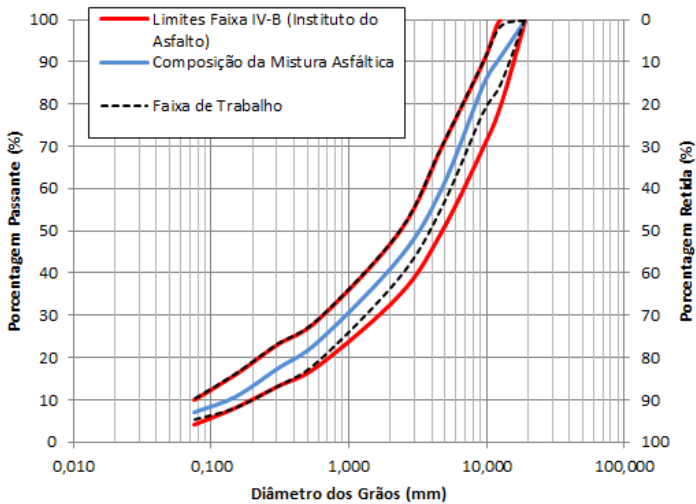
A curva granulométrica da mistura é apresentada no Quadro 5 e na Figura 32. A composição granulométrica da mistura se enquadra na faixa IV-B do Instituto do Asfalto e dentro dos limites da faixa de trabalho estabelecida.

Quadro 5 - Composição Granulométrica da Mistura Asfáltica

PENEIRAS	Série da ASTM	Mm	PROJETO	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA IV-B INST. ASFALTO
	3/4"	19,100	100,0%	100-100	100-100
	1/2"	12,700	91,5%	84,5-98,5	80-100
	3/8"	9,500	84,9%	77,9-90,0	70-90
	n° 4	4,750	60,4%	55,4-65,4	50-70
	n° 8	2,360	44,0%	39,0-49,0	35-50
	n° 30	0,600	24,0%	19,0-29,0	18-29
	n° 50	0,300	17,5%	13,0-22,5	13-23
	n° 100	0,150	10,9%	8,0-13,9	8-16
	n° 200	0,075	7,2%	5,2-9,2	4-10

Fonte: Adaptado do relatório *As Built* da empresa SOTEPA (2012)

Figura 32 - Curva Granulométrica da Mistura Asfáltica e Faixa de Trabalho



Fonte: Elaboração própria.

Considerando que o agregado graúdo é a fração passante na peneira 3/4” e retido na peneira n° 4; o agregado miúdo representa a fração passante na peneira n° 4 e retida na peneira n° 200; e o material pulverulento é o passante na peneira n° 200, tem-se que a mistura é composta por 39,6% de agregado graúdo, 53,2% de agregado miúdo e 7,2% de filer.

4.2.3 Ligante Asfáltico

O Quadro 6 contempla a caracterização do ligante utilizado na obra, em Itapoá, segundo o relatório *As Built* (2012) da empresa ENGEVIX.

Quadro 6 - Caracterização do Ligante Asfáltico Utilizado

Controle	Especificado Projetado	Amostras Testadas			
Tipo	CAPFLEX- B	1	2	3	4
Viscosidade Brookfield a 175°C, spindle 3, 20 RPM, máx. (cP)	2200-4000	3512,0	3435,0	3624,0	3702,0
Ponto de Amolecimento (°C)	55°C (min.)	55,0	55,0	55,0	55,0
Penetração (0,1 mm)	35 a 70	37,0	38,0	36,0	37,0
Recuperação Elástica (%)	50% (min.)	51,0	52,0	51,0	52,0

Fonte: Adaptado do relatório *As Built* da empresa ENGEVIX (2012)

4.2.4 Dosagem da Mistura

A dosagem da referida mistura foi desenvolvida pela empresa SOTEPA. O Quadro 7 abaixo, mostra as principais características volumétricas do projeto de dosagem.

Quadro 7 - Características Volumétricas da Dosagem da Mistura Asfáltica

CARACTERÍSTICAS MARSHALL	Densidade Teórica Máxima (g/cm ³)	2,501
	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,390
	Teor de Asfalto (%)	6,10
	Volume de Vazios (%)	4,20 (3 a 5)
	Relação Betume-Vazios (%)	77,2 (65 a 78)
	Estabilidade (kgf)	1167 (> 800)
	Fluência (1/100")	13,4 (2-4)
	Equivalente de Areia (%)	65,2 (> 55%)
	Finos/Ligante	1,18

Fonte: Adaptado do relatório *As Built* da empresa SOTEPA (2012)

4.3 PRODUÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA EM LABORATÓRIO: PLACAS E CORPOS DE PROVA

O processo de produção da mistura asfáltica e confecção dos corpos de prova foi realizado no laboratório de pavimentação da UFSC por Melo, no ano de 2015. Ao todo foram moldadas 6 grandes placas e obtidos 30 corpos de prova. Contudo, foram selecionados apenas 24 corpos de prova para este estudo. A Figura 33 retrata as principais fases desta etapa e a Figura 34 apresenta os corpos de prova já moldados e prontos para serem ensaiados.

Figura 33 - Fases da Produção dos Corpos de Prova em Laboratório



(a) Pesagem do Ligante Asfáltico



(b) Homogeneização Mecânica da mistura



(c) Desforma das Placas



(d) Serragem das Placas

Fonte: Adaptado de Melo (2016)

Figura 34 - Corpos de Prova da Mistura Asfáltica



Fonte: Autoria própria (2017)

4.4 ENSAIOS DE VIDA À FADIGA: OBTENÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE FADIGA OBTIDOS POR DIFERENTES NORMATIVAS

Preparados os corpos de prova, a próxima etapa do trabalho baseou-se em ensaiá-los no equipamento de fadiga a quatro pontos.

Os ensaios de fadiga foram realizados empregando o modo de carregamento à deformação controlada, com temperatura de 20°C e frequência de 10 Hz. Os critérios de ruptura utilizados para cada normativa estão descritos no item 3.4 deste mesmo trabalho.

Ao todo, vinte e quatro corpos de prova foram ensaiados. Doze testemunhos foram testados conforme preconiza a norma americana (ASTM D7460), sobre diferentes microdeformações, ensaios realizados pela autora. Os demais doze testemunhos foram testados conforme a normativa europeia (EN 12697-24), resultados obtidos por Melo (2016)).

Os valores adotados para a deformação inicial dos corpos de provas variaram entre 200 $\mu\epsilon$ e 650 $\mu\epsilon$. Embora estas deformações sejam bem maiores do que as registradas em campo, as normas sugerem a execução dos ensaios com deformações entre 200 $\mu\epsilon$ e 800 $\mu\epsilon$. Segundo Arao (2014), um dos motivos pode ser o grande tempo de execução do ensaio quando utilizadas deformações muito pequenas, que dependendo da temperatura adotada e frequência admitida, o ensaio de uma única viga pode durar meses. Além da demora para obtenção dos resultados do ensaio, microdeformações muito pequenas, acarretam a fadiga dos próprios componentes do equipamento de teste, devido ao longo tempo de uso intermitente, o que é bastante indesejável, visto o alto valor de investimento para aquisição do equipamento de fadiga a quatro pontos.

Uma dificuldade enfrentada durante os ensaios, devido ao longo tempo de duração dos mesmos, foi a ocorrência de perda de conexão entre o computador e o equipamento de fadiga. Esta perda de conexão acaba gerando a perda dos dados que deveriam ser registrados neste período, deixando a curva incompleta. Nestes casos, nas ocasiões em que houve erro no ensaio e também naquelas em que não se atingiu o valor do módulo complexo esperado durante o ensaio, foram usados modelos matemáticos para extrapolar os dados perdidos e apresentar uma curva completa para ser usada na modelagem da vida de fadiga. Este é o procedimento recomendado pelas normas em estudo.

Nos itens a seguir, serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios segundo as normas em estudo, os modelos de fadiga gerados e a comparação dos resultados.

4.4.1 Resultados do Ensaio de Fadiga Segundo a EN 12697-24

As curvas geradas nos ensaios e apresentadas abaixo (Figura 35, Figura 36 e Figura 37) representam o módulo complexo do material testado em função do número de ciclos. O fim do ensaio se dá no momento em que o módulo complexo atinge metade do seu valor inicial, medido no centésimo ciclo de carga.

Para uma melhor representatividade e visualização dos resultados, as curvas foram agrupadas em função do número de ciclos decorridos até o fim do ensaio e da deformação inicial estabelecida.

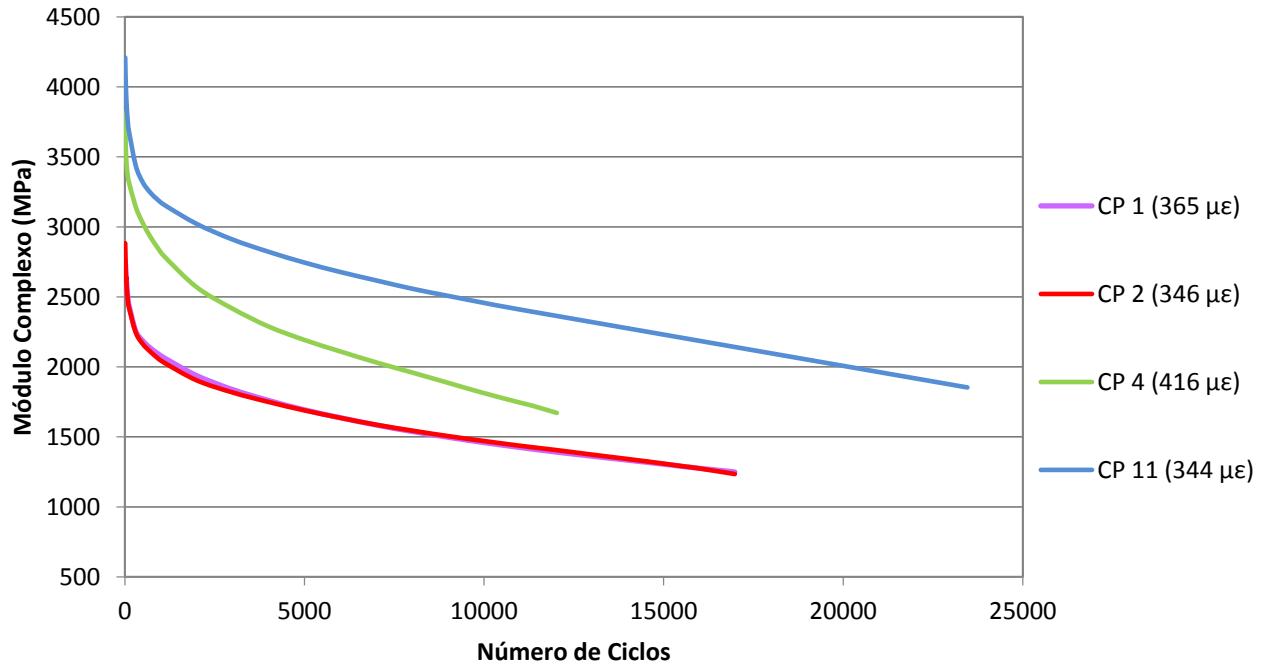
O Quadro 8 apresenta um resumo dos dados dos corpos de prova ensaiados, contemplando o módulo complexo inicial (medido no centésimo ciclo), o módulo complexo final, a microdeformação média estabelecida no ensaio e o número total de ciclos até o fim do ensaio.

Quadro 8 - Quadro Resumo dos Corpos de Prova Ensaçados sob a Norma Europeia EN 12697-24

Mistura Asfalto Borracha - 20 Graus/10 Hz (EN 12697-24)					
CP	Microdeformação Inicial	Módulo Inicial - 100º ciclo (MPa)	Módulo Final (MPa)	% do Módulo Inicial	Número total de Ciclos
1	365	2457	1228	49,98%	17634
2	346	2441	1220	49,98%	17365
3	281	3869	1935	50,01%	145133
4	416	3334	1666	49,97%	12074
5	231	2663	1332	50,02%	440302
6	311	3496	1747	49,97%	128509
7	235	3968	1984	50,00%	587950
8	261	3778	1887	49,95%	148228
9	280	4991	2495	49,99%	79013
10	260	3745	1872	49,99%	146097
11	344	3705	1853	50,01%	23456
12	208	3953	1976	49,99%	1787890

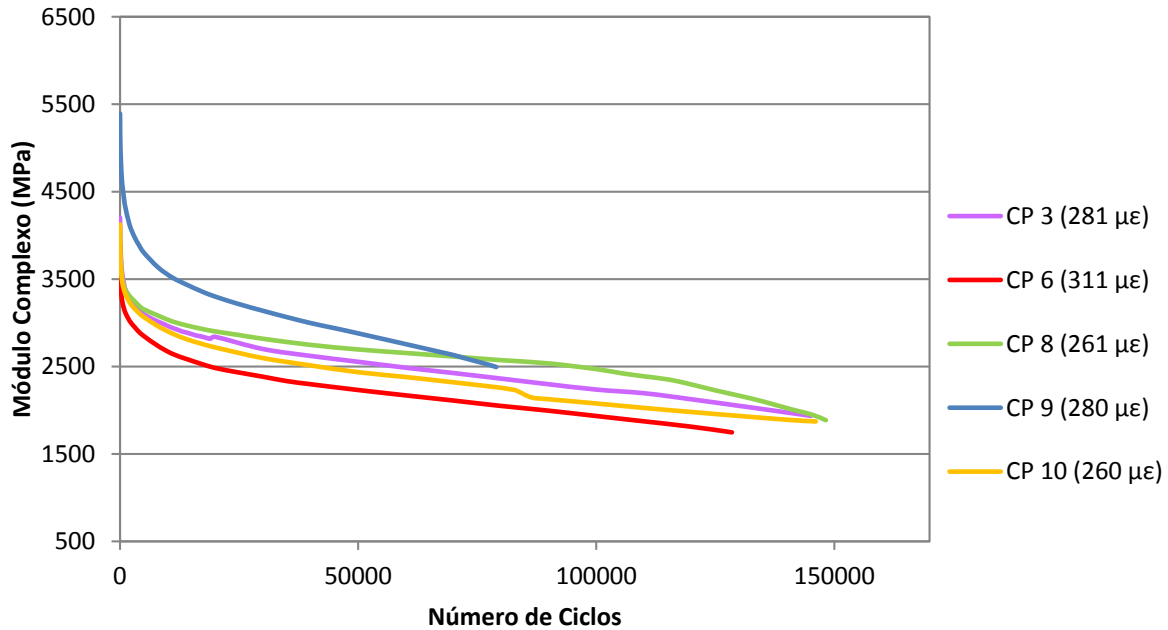
Fonte: Elaboração própria.

Figura 35 - Grupo 1: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (EN 12697-24)



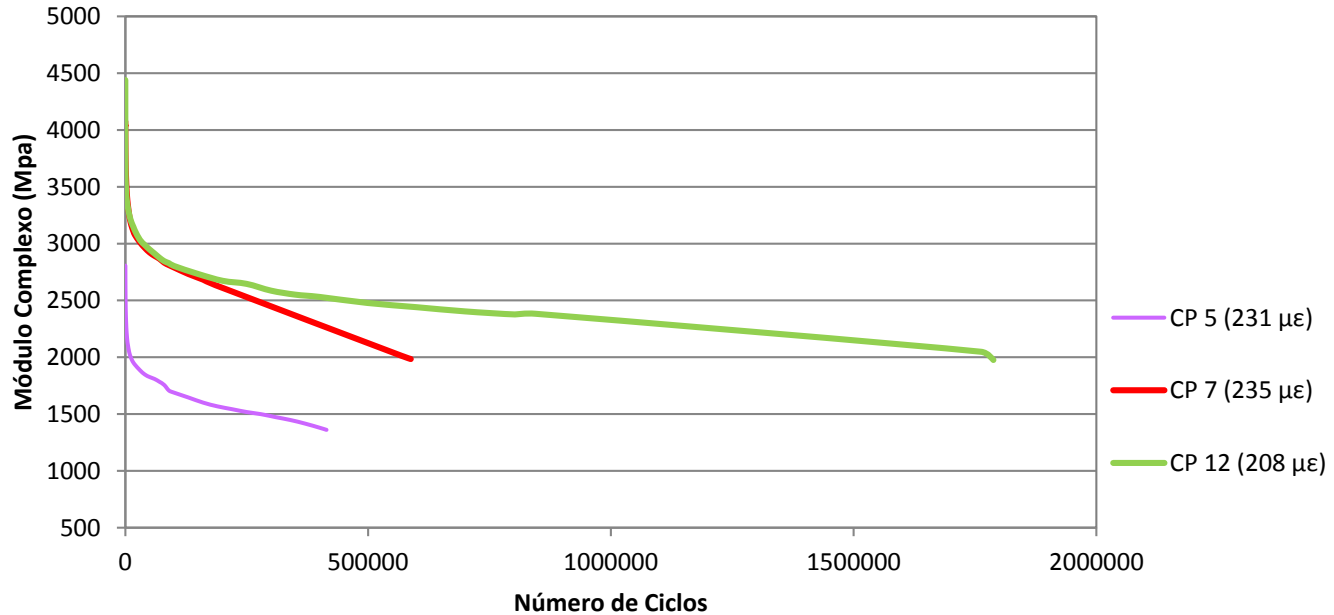
Fonte: Elaboração própria.

Figura 36 - Grupo 2: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (EN 12697-24)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 37 - Grupo 3: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (EN 12697-24)

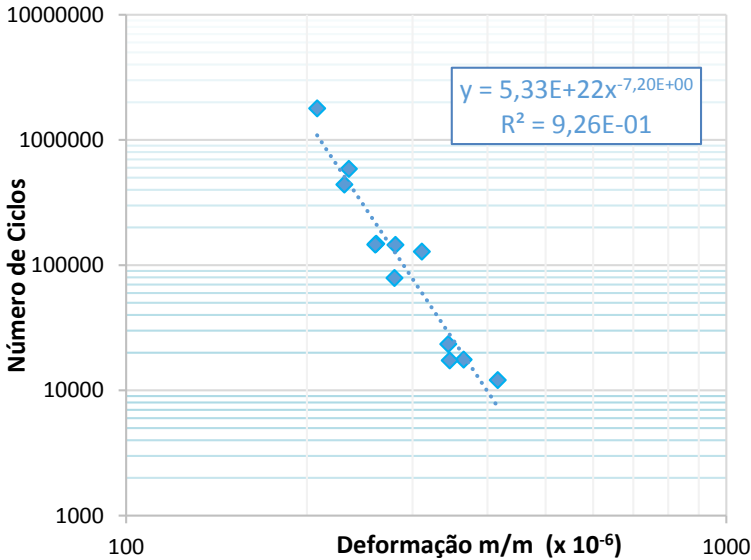


Fonte: Elaboração própria.

Em seguida, foi gerada por Melo (2016) a curva representativa do modelo de fadiga segundo a norma europeia EN 12697-24 para este conjunto de corpos de prova. A abordagem fenomenológica do problema, utilizada para o tratamento dos dados, é regida pela Equação 3, para ensaios a deformação controlada.

Com os dados obtidos nos ensaios e apresentados no Quadro 8, foi gerada a curva apresentada na Figura 38.

Figura 38 - Representação do Modelo de Fadiga Segundo a EN 12697-24



Fonte: Adaptado de Melo (2016).

A equação da curva com os devidos parâmetros determinados experimentalmente e o índice R^2 , segue abaixo:

$$N_f = 5,33 \times E^{22} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{7,20}$$

$$R^2 = 0,926$$

O coeficiente R^2 ou coeficiente de correlação varia entre 0 e 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo, ou

seja, melhor ele se ajusta aos dados experimentais. Segundo a classificação de Pearson, a correlação obtida é considerada muito forte ($R^2 > 0,90$).

4.4.2 Resultados do Ensaio de Fadiga Segundo a ASTM D7460

As curvas geradas nos ensaios e apresentadas abaixo (Figura 39, Figura 40 e Figura 41) representam o módulo normalizado do material testado em função do número de ciclos. O fim do ensaio, segundo a norma da ASTM, se dá no momento em que o módulo normalizado atinge seu valor máximo. Como não é possível prever o momento em que o corpo de prova atingirá este valor, é comum em ensaios laboratoriais programar o ensaio para que termine quando se atinge 20% do módulo complexo inicial, desta maneira, é muito provável que o ponto de máximo módulo normalizado seja registrado.

Como no item anterior, para uma melhor representatividade e visualização dos resultados, as curvas foram agrupadas em função do número de ciclos decorridos até o fim do ensaio e a deformação inicial estabelecida.

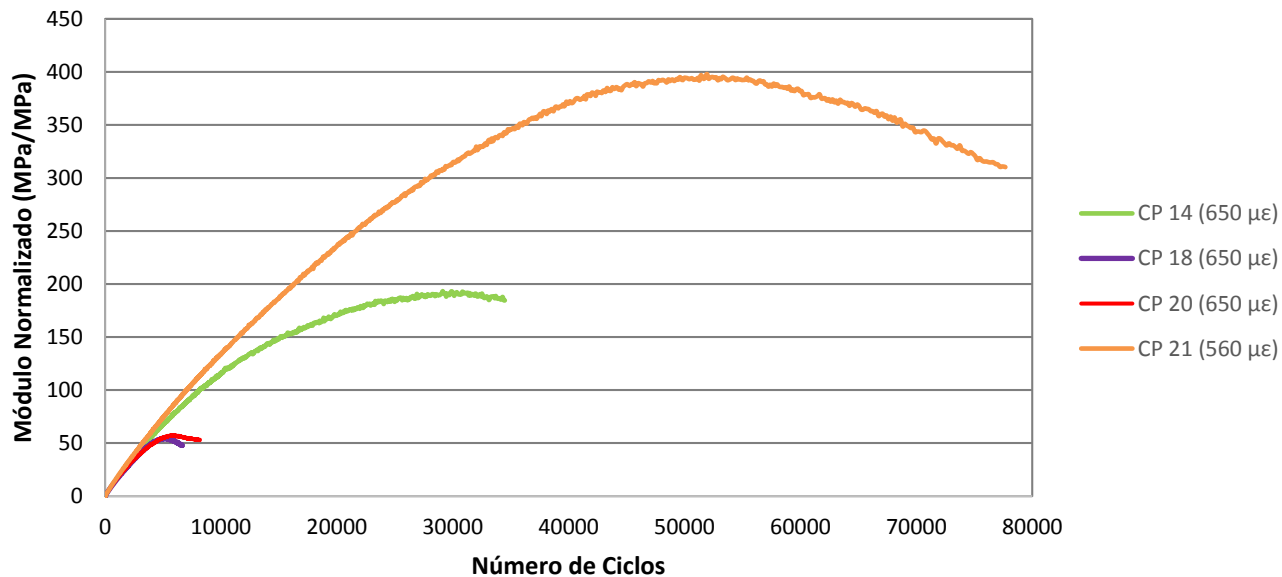
O Quadro 9 apresenta um resumo dos dados dos corpos de prova ensaiados, contemplando o pico do módulo normalizado, a microdeformação inicial e o número total de ciclos até que se atinja o pico.

Quadro 9 - Quadro Resumo dos Corpos de Prova Ensaaiados sob a Norma
Americana ASTM D7460

Mistura Asfalto Borracha - 20 Graus/10 Hz (ASTM D7460)			
CP	Microde- formação Inicial	Pico do Módulo Normalizado (MPa)	Número Total de Ciclos
13	450	2049,816	203390
14	650	193,281	29130
15	550	1730,739	154880
16	450	2311,51	232620
17	650	1274,376	310210
18	650	54,567	5170
19	416	18697,766	2701250
20	650	110,624	5690
21	560	397,938	51940
22	550	2224,929	247040
23	300	21385,476	3109560
24	450	5718,336	773270

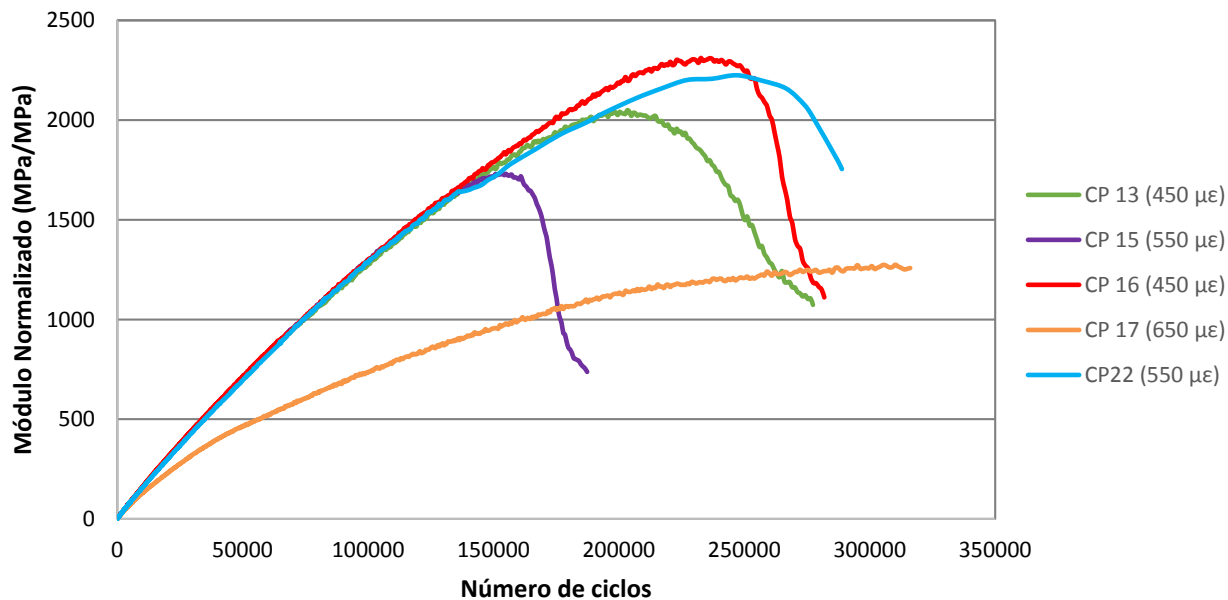
Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 - Grupo 1: Módulo Normalizado Versus Número de Ciclos (ASTM D7460)



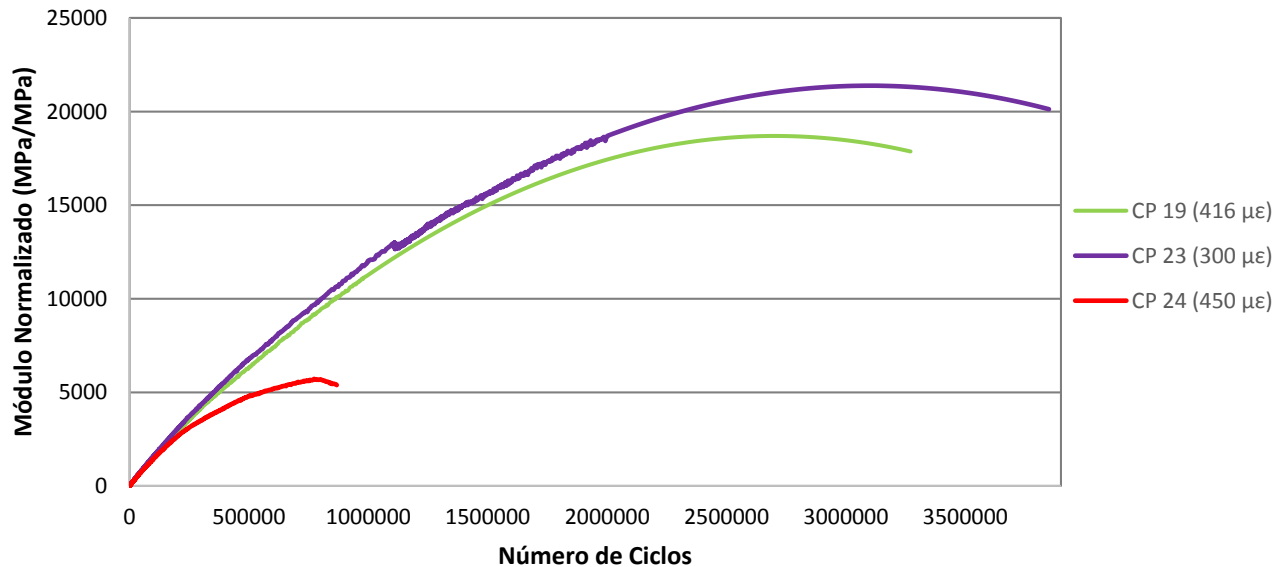
Fonte: Elaboração própria.

Figura 40 - Grupo 2: Módulo Normalizado Versus Número de Ciclos (ASTM D7460)



Fonte: Elaboração própria.

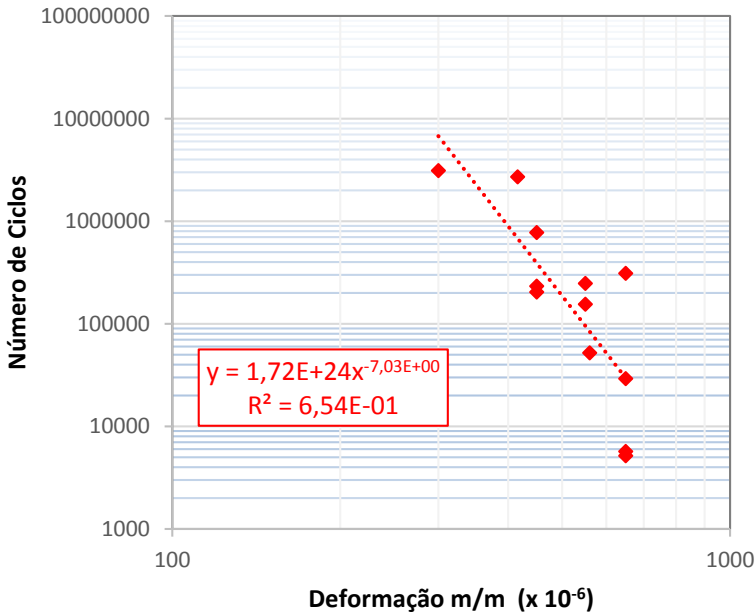
Figura 41 - Grupo 3: Módulo Normalizado Versus Número de Ciclos (ASTM D7460)



Fonte: Elaboração própria.

Dando continuidade ao trabalho de comparação dos modelos de fadiga segundo cada norma, foi gerada a curva representativa do modelo de fadiga para a norma americana ASTM D7460 segundo os resultados apresentados acima. Seguem abaixo, a curva (Figura 42) e a equação obtida segundo a abordagem fenomenológica.

Figura 42 - Representação do Modelo de Fadiga Segundo a ASTM D7460



Fonte: Elaboração própria.

A equação da curva com os devidos parâmetros determinados experimentalmente e o índice R^2 , segue abaixo:

$$N_f = 1,72 \times E^{24} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{7,03}$$

$$R^2 = 0,654$$

Segundo a classificação de Pearson, a correlação obtida é considerada moderada ($0,50 > R^2 > 0,70$).

4.4.3 Resultados do Ensaio de Fadiga Segundo a AASHTO T321

Conforme expõe o Quadro 2, há muita semelhança entre a norma europeia EN 12697-24 e a americana AASHTO T321. Ambas são realizadas com pulsos de carregamento do tipo sinusoidal, nas mesmas condições de frequência e temperatura, sendo a principal diferença a definição do módulo inicial. O fim do ensaio segundo a AASHTO se dá quando o módulo complexo atinge 50% do seu valor inicial, medido no 50º ciclo, enquanto a norma europeia registra o valor do 100º ciclo como ciclo inicial.

Sendo assim, para fins comparativos, usou-se os dados provenientes dos ensaios realizados conforme a norma EN 12697-24 para obter os resultados da norma AASHTO T321, considerando o fim do ensaio como o ciclo em que se atinge a metade do módulo complexo inicial, medido no 50º ciclo.

Como nos itens acima, para uma melhor representatividade e visualização dos resultados, as curvas foram agrupadas em função do número de ciclos decorridos até o fim do ensaio e a deformação inicial estabelecida (Figura 43, Figura 44 e Figura 45).

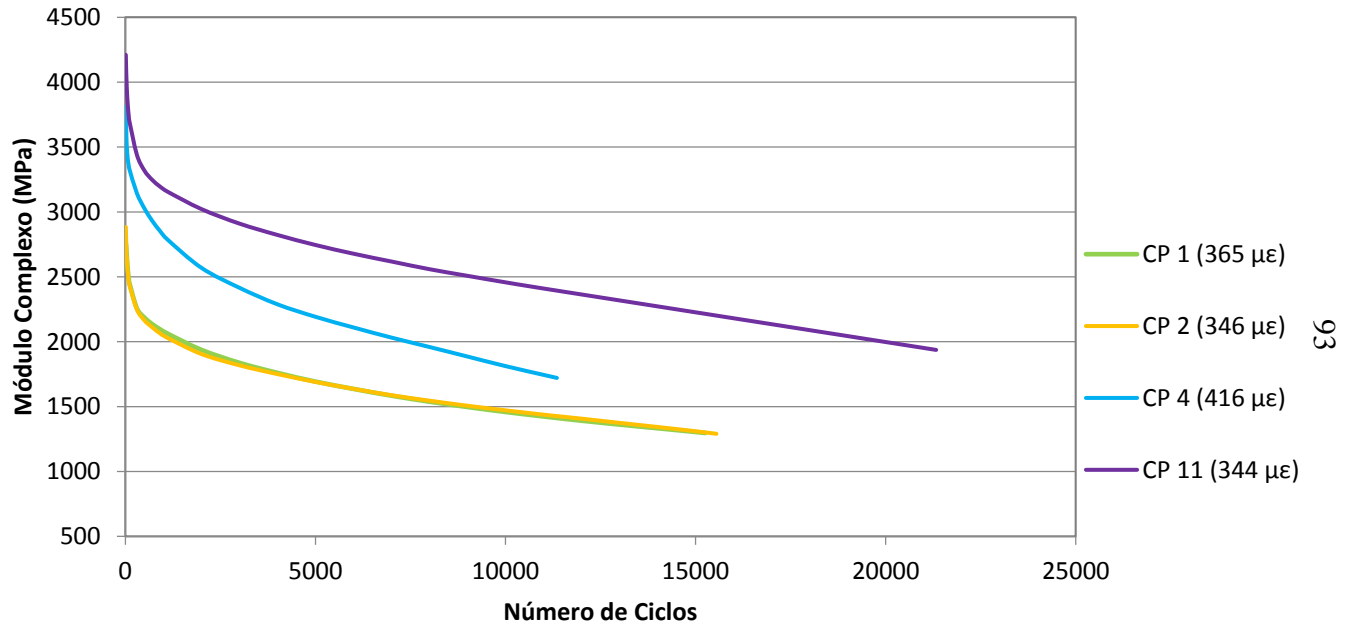
O Quadro 10 apresenta um resumo dos dados dos corpos de prova ensaiados, contemplando o módulo complexo inicial (medido no quinquagésimo ciclo), o módulo complexo final, a microdeformação média estabelecida no ensaio e o número total de ciclos até o fim do ensaio.

Quadro 10 - Quadro Resumo dos Corpos de Prova Ensaaiados sob a Norma Americana AASHTO T321

Mistura Asfalto Borracha - 20 Graus/10 Hz (AASHTO T321)					
CP	Microde- formação Inicial	Módulo Inicial - 50º ciclo (MPa)	Módulo Final (MPa)	% do Módulo Inicial	Número total de Ciclos
1	365	2597	1297	49,94%	15253
2	346	2581	1290	49,98%	15548
3	281	3986	1993	50,00%	136187
4	416	3444	1721	49,99%	11351
5	231	2721	1361	50,01%	414472
6	311	3623	1810	49,95%	120227
7	235	4028	2014	50,00%	567986
8	261	3892	1951	50,13%	145286
9	280	5135	2565	49,96%	74417
10	260	3870	1934	49,97%	130484
11	344	3873	1937	50,01%	21327
12	208	4097	2049	50,01%	1762300

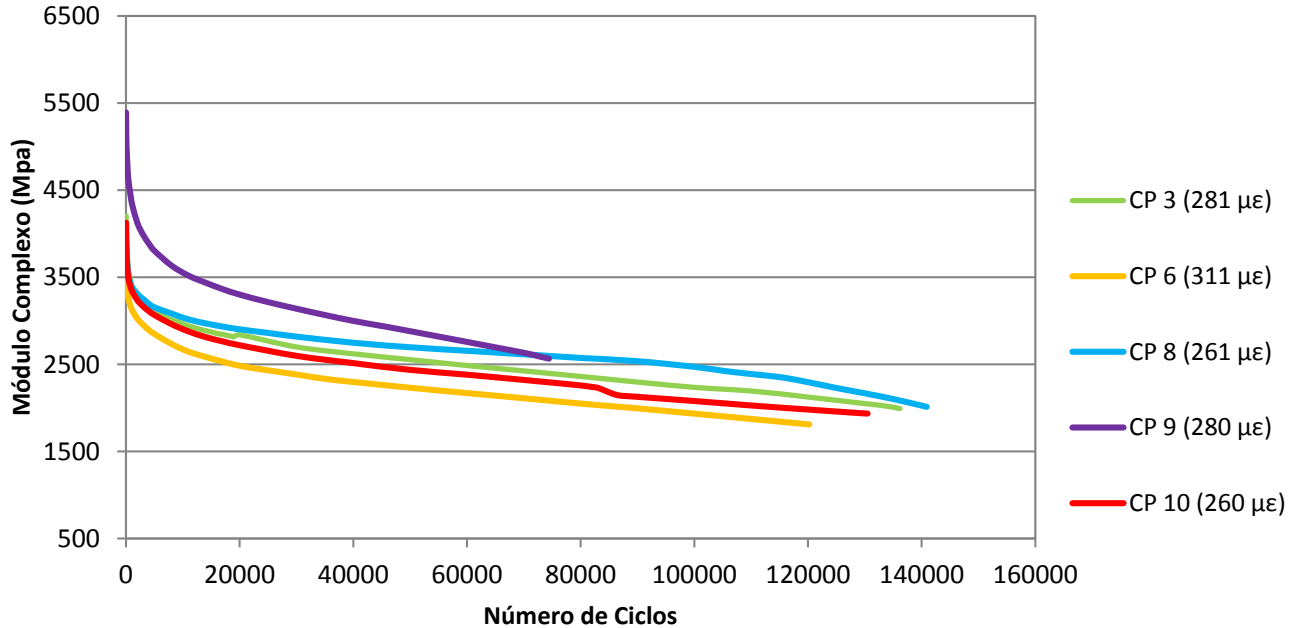
Fonte: Elaboração própria.

Figura 43 - Grupo 1: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (AASHTO T321)



Fonte: Elaboração própria.

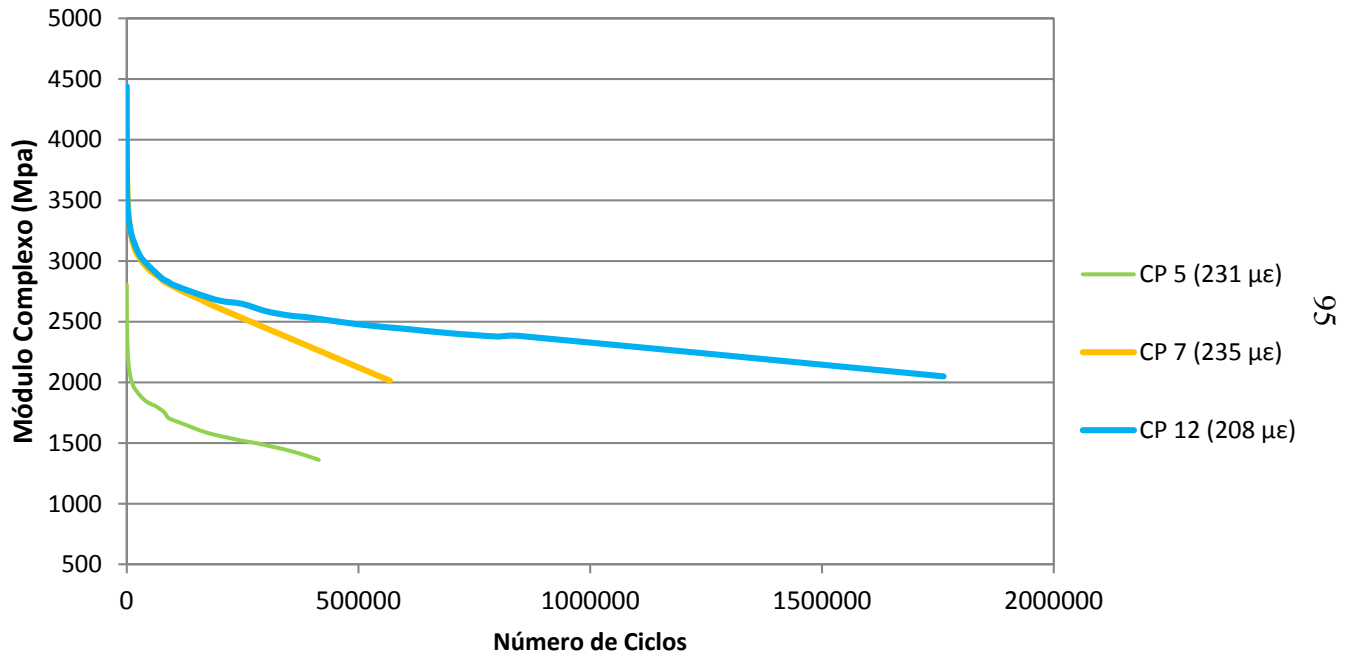
Figura 44 - Grupo 2: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (AASHTO T321)



Fonte: Elaboração própria.

<

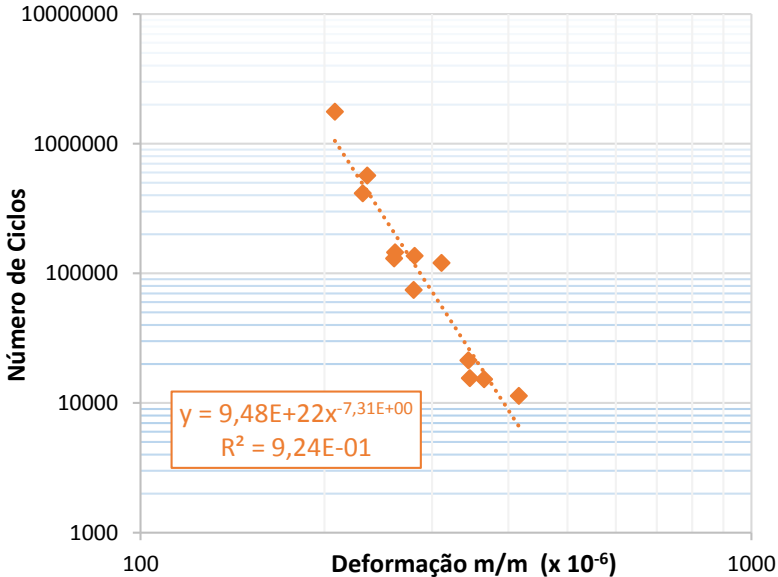
Figura 45 - Grupo 3: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (AASHTO T321)



Fonte: Elaboração própria.

Com os dados acima, procedeu-se à modelagem da curva de fadiga representativa da norma AASHTO T321 segundo a abordagem fenomenológica. Adicionou-se uma linha de tendência para correlacionar os dados obtidos, conforme pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 - Representação do Modelo de Fadiga Segundo a AASHTO T321



Fonte: Elaboração própria.

A equação da curva com os devidos parâmetros determinados experimentalmente e o coeficiente de correlação, R^2 , segue abaixo:

$$N_f = 9,48 \times E^{22} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{7,31}$$

$$R^2 = 0,924$$

Segundo a classificação de Pearson, a correlação obtida é considerada muito forte ($R^2 > 0,90$).

4.4.4 Resultados do Ensaio de Fadiga Segundo a Norma ASTM D7460 com Critério de Ruptura da Norma EN 12697-24

O objetivo deste item é estudar apenas o efeito da escolha do tipo de onda para aplicação da carga sobre o corpo de prova no resultado do ensaio de fadiga, ou seja, haversine versus senoidal. Para tal, foram utilizados os dados adquiridos no ensaio sob a norma americana ASTM D7460 e aplicado sobre eles o critério de ruptura da norma EN 12697-24 (redução do módulo inicial pela metade, considerando o módulo inicial no 100º ciclo). Utilizou-se como base o critério de ruptura da norma europeia, pois foi o que menos apresentou dispersão dos dados nos três modelos de fadiga apresentados acima, e, portanto, seria o mais adequado para a comparação aqui proposta.

As curvas foram agrupadas em função do número de ciclos decorridos até o fim do ensaio e a deformação inicial estabelecida, como nos itens anteriores (Figura 47, Figura 48 e Figura 49).

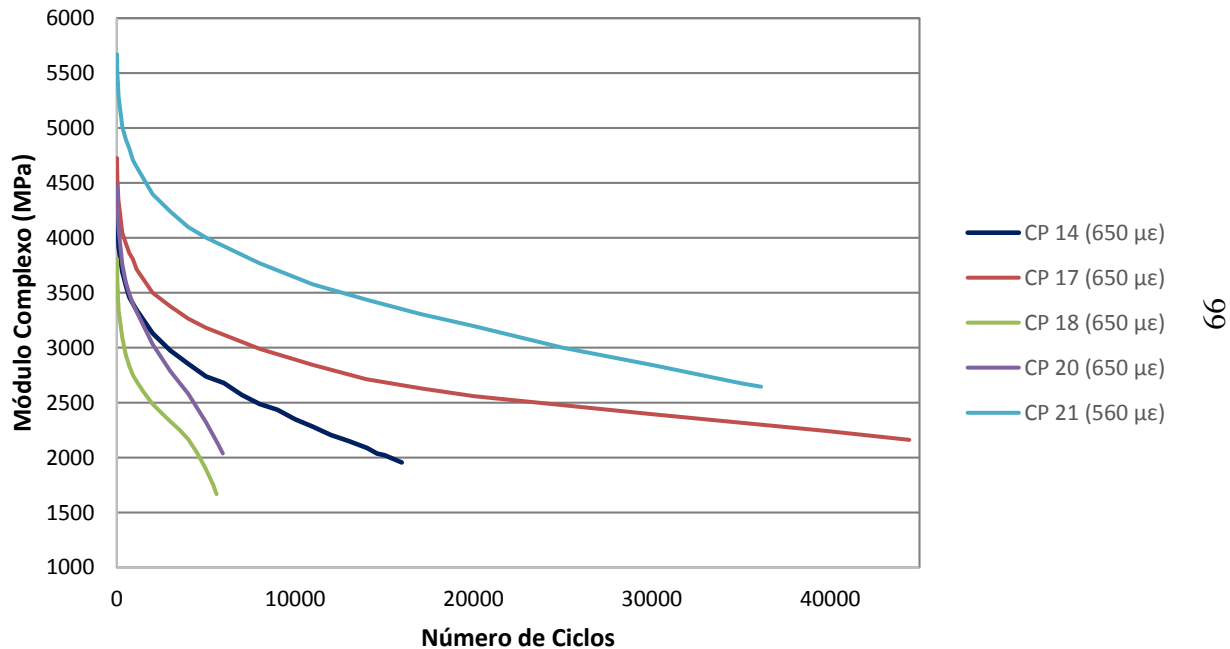
O Quadro 11 apresenta um resumo dos dados dos corpos de prova ensaiados, contemplando o módulo complexo inicial (medido no centésimo ciclo), o módulo complexo final, a microdeformação média estabelecida no ensaio e o número total de ciclos até o fim do ensaio.

Quadro 11 - Quadro Resumo dos Corpos de Prova Ensaiaados Segundo as Diretrizes da Norma ASTM D7460 e Avaliados com o Critério de Ruptura da Norma EN 12697-24

Mistura Asfalto Borracha - 20 Graus/10 Hz (ASTM D7460 com Critério de Ruptura da EN 12697-24)					
CP	Microde- formação Inicial	Módulo Inicial - 100 ^o ciclo (MPa)	Módulo Final (MPa)	% do Módulo Inicial	Número total de Ciclos
13	450	3600	1803	50,10%	208120
14	650	3916	1955	49,92%	15970
15	550	4745	2370	49,95%	165950
16	450	4939	2467	49,95%	234420
17	650	4329	2161	49,92%	44430
18	650	3339	1667	49,93%	5590
19	416	4584	2292	50,00%	1529000
20	650	4073	2037	50,01%	5940
21	560	5280	2645	50,10%	36120
22	550	4757	2378	49,99%	224520
23	300	4436	2221	50,07%	1758370
24	450	5180	2586	49,93%	480460

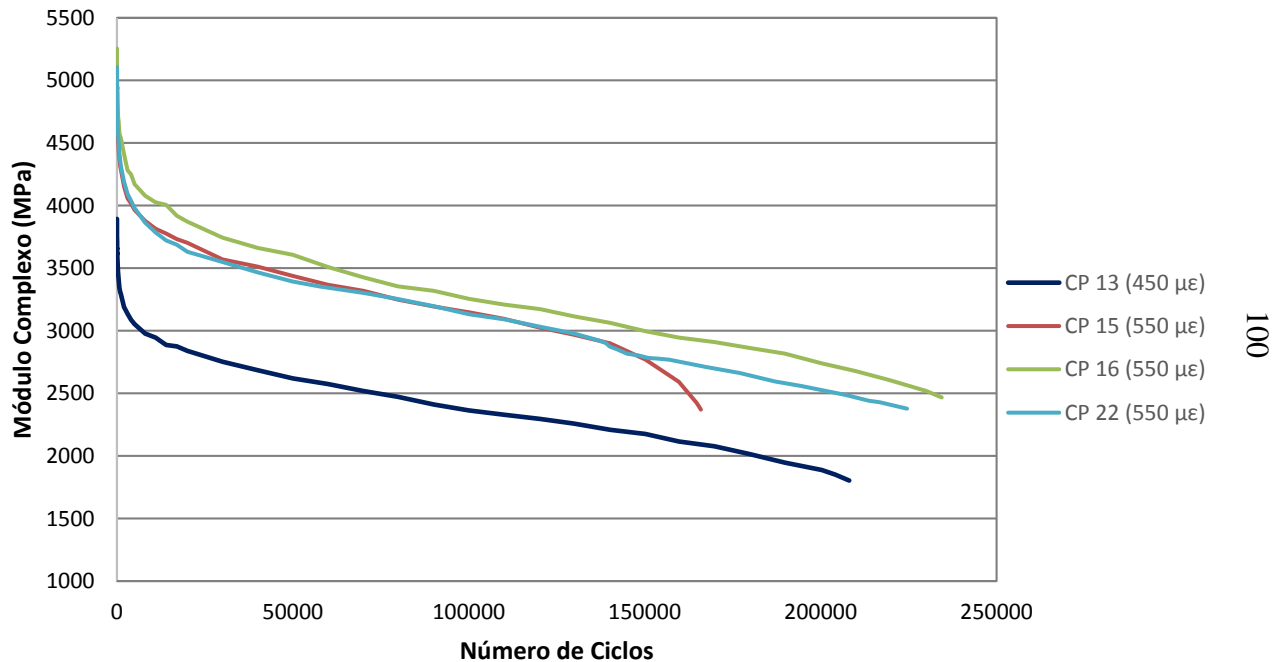
Fonte: Elaboração própria.

Figura 47 - Grupo 1: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (Dados da ASTM D7460 Sob Critério de Ruptura da EN 12697-24)



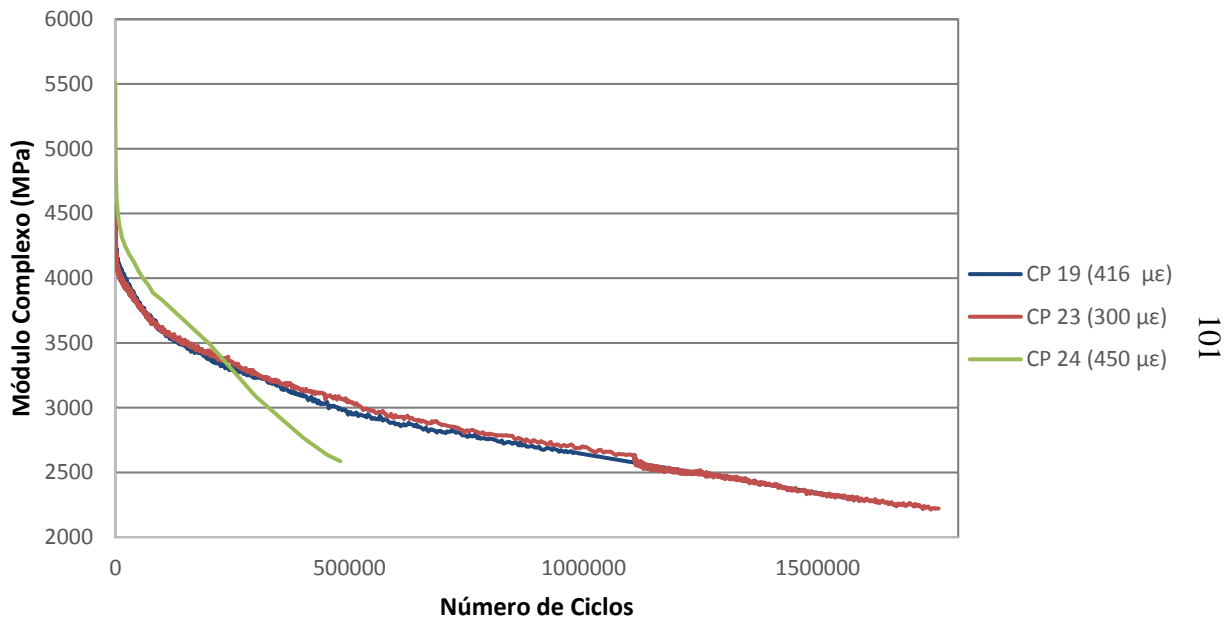
Fonte: Elaboração própria.

Figura 48 - Grupo 2: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (Dados da ASTM D7460 Sob Critério de Ruptura da EN 12697-24)



Fonte: Elaboração própria.

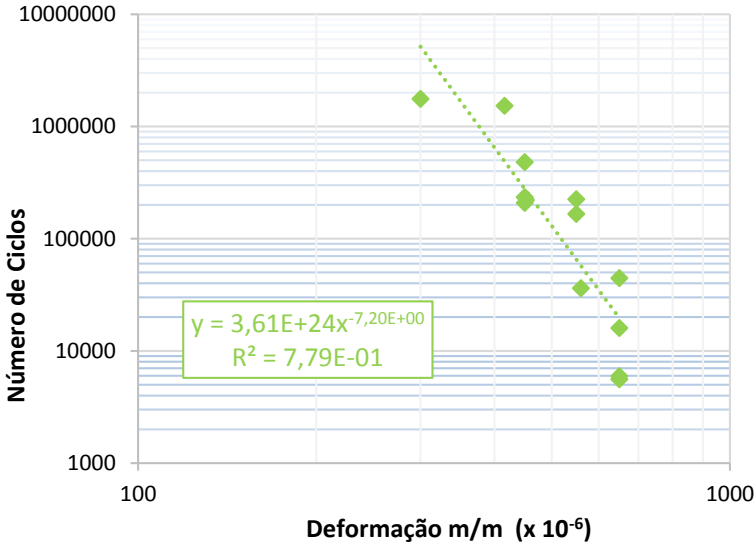
Figura 49 - Grupo 3: Módulo Complexo Versus Número de Ciclos (Dados da ASTM D7460 Sob Critério de Ruptura da EN 12697-24)



Fonte: Elaboração própria.

Segue o modelo de fadiga (Figura 50), de acordo com a abordagem fenomenológica, obtido com os apresentados no Quadro 11.

Figura 50 - Modelo de Fadiga Comparativo: Dados da ASTM D7460 e Critério de Ruptura da EN 12697-24



Fonte: Elaboração própria.

A equação da curva com os devidos parâmetros determinados experimentalmente e o coeficiente de correlação, R^2 , são apresentados abaixo.

$$N_f = 3,61 \times E^{24} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{7,20}$$

$$R^2 = 0,779$$

Segundo a classificação de Pearson, a correlação obtida é considerada forte ($0,70 > R^2 > 0,90$).

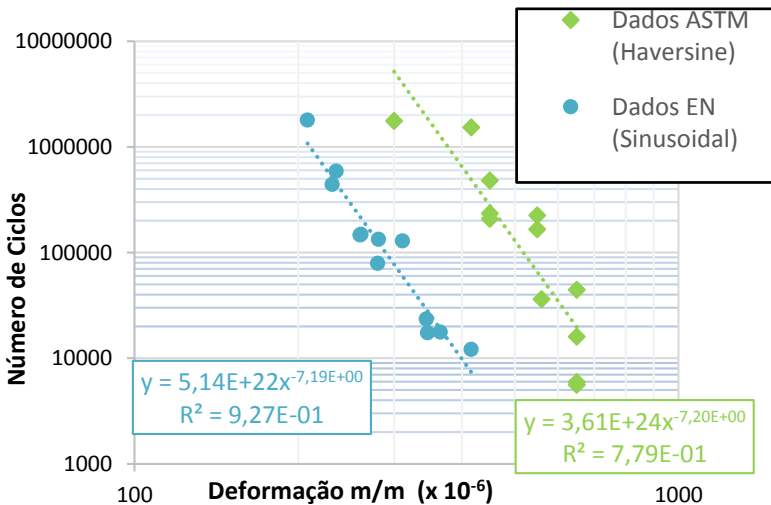
4.4.5 Considerações Sobre os Modelos de Fadiga Gerados

4.4.5.1 Comparação entre o tipo de onda utilizado

Nesta seção, foi analisado apenas o efeito da escolha do tipo de onda para aplicação do pulso do carregamento. Utilizou-se para tal, as curvas geradas nos itens 4.4.1 e 4.4.4, com os dados obtidos a partir dos ensaios sob a norma europeia e americana, respectivamente, sob as mesmas condições de temperatura e frequência, considerando para ambas o critério de ruptura como a redução à metade do módulo complexo inicial, medido no 100º ciclo.

Fazendo uma rápida análise das curvas (Figura 51), percebe-se que o procedimento com ondas do tipo haversine, mesmo quando utilizado o mesmo critério de ruptura da norma europeia, ainda apresenta resultados mais dispersos e menos homogêneos que aqueles obtidos com carregamento do tipo sinusoidal. Apesar do coeficiente R^2 ter aumentado em comparação ao atingido com o critério de ruptura da própria norma da ASTM, ele ainda se apresenta bem menor que o índice de correlação dos dados testados com ondas sinusoidais.

Figura 51 - Análise da Escolha da Onda de Pulso de Aplicação de Carregamento



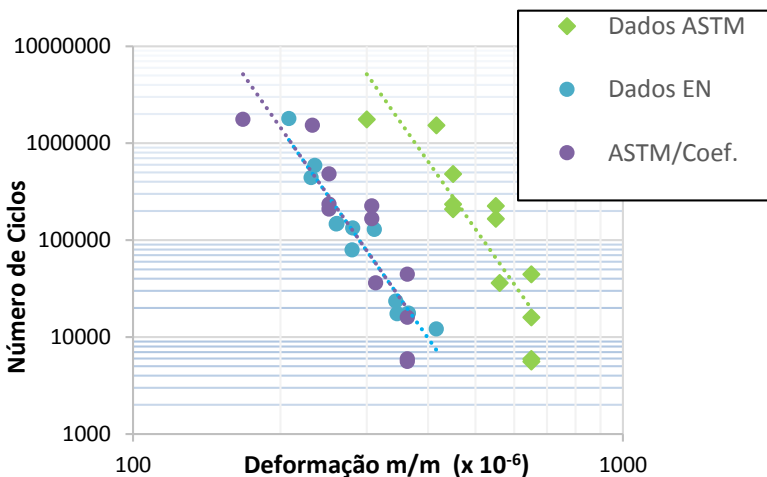
Fonte: Elaboração própria.

Outro fator importante a ser notado na comparação destas duas curvas é a existência de um fator de “translação” entre elas, no eixo das abcissas, uma vez que as inclinações das curvas são praticamente iguais.

Verifica-se, que para um mesmo nível de deformação (valor em X), a vida de fadiga sob o modelo europeu é um valor “Y”, porém, sob o modelo americano, a vida de fadiga do material é um valor superior a “Y”. Isso indica que, ensaios conduzidos sob uma mesma deformação, utilizando ondas sinusoidais ou haversine, mesmo que se utilize do mesmo critério de ruptura, apresentarão vidas de fadiga diferentes. Na prática, significa que o dimensionamento do pavimento será influenciado pela escolha da onda de aplicação de carga no ensaio. Neste caso, o dimensionamento de revestimentos asfálticos, levando em conta ensaios de vida de fadiga com ondas sinusoidais, resultaria em camadas mais espessas que aqueles cuja vida de fadiga foi dimensionada com ensaios de onda haversine.

Para determinar o fator de translação das curvas, no eixo das abcissas, e assim comparar a magnitude desta diferença gerada entre os tipos de ondas, dividiu-se por um fator (método iterativo) os valores de microdeformação do modelo com carregamento haversine, até que este se igualasse ao modelo com carregamento sinusoidal (Figura 52). Foi encontrado um valor de 1,79 como fator de translação transversal entre as curvas, ou seja, para ensaios realizados com ondas haversine, a vida a fadiga encontrada será equivalente àquela encontrada num ensaio com ondas sinusoidais com microdeformação inicial 1,79 vezes menor. Desta maneira, o ensaio com carregamento sinusoidal indicará o fim da vida útil da estrutura muito antes que o previsto no ensaio com ondas haversine.

Figura 52 - Definição do Fator de Translação Entre as Curvas sob Carregamento Haversine e Sinusoidal



Fonte: Elaboração própria.

O resultado obtido vai ao encontro do artigo escrito por Denneman em 2013 e às hipóteses levantadas por Mamlouk, Souliman e Zeiada (item 2.7), que apontam um fator de translação de aproximadamente 2 entre modelos de fadiga testados com ondas haversine e sinusoidais, com o critério de ruptura igual a redução do módulo complexo a 50% do seu valor inicial. Conforme apontado pelos autores, isto ocorre provavelmente devido à dificuldade de aplicação do carregamento haversine pelo equipamento de fadiga a quatro pontos. Segundo Denneman (2013), no decorrer do ensaio, o corpo de prova acaba reagindo à aplicação da carga em apenas um lado do eixo da viga, causando uma reposta para o outro lado do eixo e este movimento transforma o formato da onda em sinusoidal, reduzindo a amplitude inicial estabelecida (microdeformação) à metade e aumentando assim a vida de fadiga dos testemunhos avaliados sob as normas que utilizam este tipo de onda. Esta teoria se confirma com os resultados obtidos neste trabalho.

Em resumo, conclui-se, que, para ensaios realizados com ondas do tipo haversine, a amplitude da deformação de entrada no programa não corresponde à deformação real, a qual o corpo de prova sofre no ensaio. A deformação real é aproximadamente a metade da amplitude da deformação de entrada.

4.4.5.2 Comparação Entre as Normas ASTM D7460 e EN 12697-24

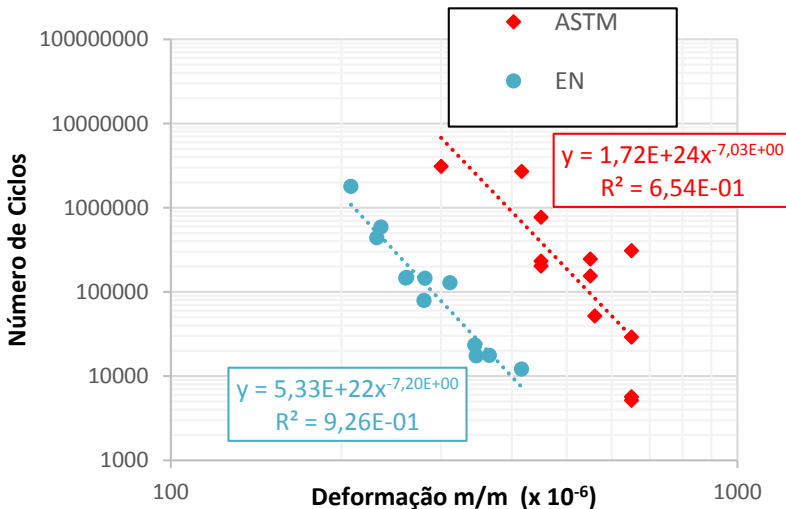
Nesta seção foram comparados os resultados obtidos a partir das normas ASTM D7460 e EN12697-24, que apresentam tanto o modo de carregamento, como o critério de ruptura diferentes, avaliando os resultados dos ensaios e os modelos de fadiga obtidos.

Pode-se ver, através da comparação das duas curvas de fadiga geradas (Figura 53), que o critério de ruptura utilizado pela norma europeia gerou um modelo cujos dados apresentam baixa dispersão e coeficiente de correlação muito forte ($R^2 = 0,927$), ou seja, mostra-se um critério bastante coeso. Por outro lado, o critério da norma americana apresentou dados muito mais dispersos e coeficiente de correlação moderado ($R^2 = 0,654$).

Ainda, através da Figura 53, pode-se perceber que o critério da norma europeia, em relação ao critério americano, prevê, para uma mesma deformação estabelecida, um número bem menor de ciclos que aquele previsto na norma da ASTM D7460. Foi feita, novamente, uma análise para encontrar o fator de translação transversal entre estas duas curvas e o fator encontrado foi de aproximadamente 1,88. Ou seja, uma

mistura asfáltica ensaiada sob a normativa americana, apresenta a mesma vida útil que a mesma mistura ensaiada sob a norma europeia para uma deformação aplicada 1,88 vezes menor que a primeira. Novamente, constata-se que o ensaio com ondas haversine gera resultados semelhantes àqueles obtidos com ondas sinusoidais com metade da deformação inicial. Percebe-se que há grande diferença entre os resultados obtidos por uma norma ou outra e este fator influencia diretamente no dimensionamento da estrutura pavimentada e também no custo dela.

Figura 53 - Comparação entre Modelos de Fadiga das Normas ASTM D7460 e EN12697-14



Fonte: Elaboração própria.

Outro fator observado é a dispersão dos resultados entre os corpos de prova testados com microdeformação similar. Enquanto na norma europeia, os resultados em termos de número de ciclos do ensaio para semelhantes microdeformações estabelecidas foram bem parecidos, na norma americana, a maioria dos corpos de prova não seguiu esta tendência e os resultados de alguns testemunhos apresentam-se bem diferentes para a mesma microdeformação inicial.

Estes fatos podem ser relacionados aos próprios critério de ruptura estabelecido para cada norma. O critério de fim de ensaio da EN 12697-24 é facilmente programável no sistema de aquisição de dados do ensaio, basta definir que o módulo complexo deve ser reduzido à metade daquele

registrado no centésimo ciclo. Dos 12 corpos de prova ensaiados sob a normativa europeia, apenas dois não chegaram ao fim do ensaio conforme previsto, devido à queda na conexão entre o equipamento e o computador.

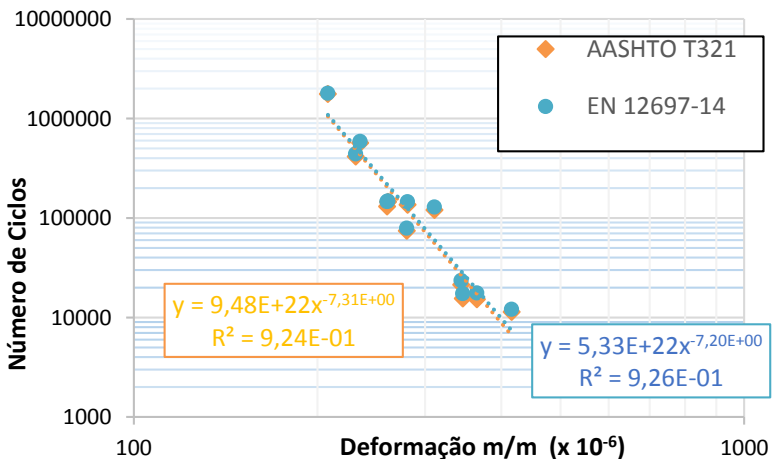
Por outro lado, não é possível saber em que momento do ensaio, o corpo de prova atingirá o pico do módulo normalizado, critério de ruptura da ASTM D7460. Nos ensaios sob esta norma americana, programa-se o fim do ensaio para a redução do módulo complexo inicial a 20%, o que torna o ensaio mais longo e não garante que o pico do módulo normalizado seja registrado. Dos 12 corpos de prova ensaiados, 5 não atingiram claramente o pico do módulo normalizado, apenas aproximando-se dele, fazendo necessário o uso de modelos matemáticos para atingir o pico desejado, conforme preconiza a própria norma ASTM.

Dada esta análise, conclui-se que o procedimento proposto pela norma europeia se apresenta mais consistente que aquele proposto pela norma americana (ASTM D7460), uma vez que os resultados dos ensaios foram mais uniformes, gerando um modelo de fadiga bem ajustado aos dados experimentais.

4.4.5.3 Comparação Entre AASHTO T321 e EN 12697-24

A comparação proposta neste item se dá entre os modelos de fadiga segundo as normas AASHTO T321 e EN 12697-24, e pode ser visualizada na Figura 54, abaixo.

Figura 54 - Comparação entre Modelos de Fadiga das Normas EN 12697-24 e AASHTO T321



Fonte: Elaboração própria.

Ambos os procedimentos são realizados com carregamento sinusoidal, mesmas condições de frequência e temperatura e mesmo critério de ruptura: redução do módulo complexo a 50% do valor inicial. A diferença entre elas está no ciclo considerado para o registro do módulo complexo inicial. Enquanto a norma americana prevê o uso do valor medido no 50º ciclo, a europeia utiliza o valor do módulo complexo registrado no 100º ciclo.

As curvas apresentadas na Figura 54 foram plotadas usando como base o mesmo grupo de corpos de prova e seus dados dos ensaios, portanto a única diferença nesta análise é o valor do módulo complexo considerado como inicial.

Conclui-se desta análise, que o critério da norma europeia se mostrou mais uma vez mais confiável do que aquele ao qual está sendo comparado, apresentando maior correlação entre os dados. Porém a diferença do fator R^2 da norma da AASHTO foi muito pequena e o critério americano apresentou também alta correlação entre os dados.

Associa-se a menor efetividade do critério da AASHTO ao registro precipitado do módulo complexo inicial. Como a maioria dos equipamentos, o equipamento de fadiga a quatro pontos leva um tempo, embora muito pequeno, no início do ensaio para se adaptar à microdeformação estabelecida e para que o ensaio seja executado de acordo com todos os parâmetros iniciais estabelecidos. Isto pode ter influenciado o resultado final do modelo. Sendo assim, o critério mais conservador, que assume o valor inicial como aquele medido no 100º ciclo acaba apresentando resultados mais fidedignos.

4.5 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

Com as curvas de fadiga obtidas para cada norma, propôs-se que elas fossem utilizadas para prever a vida útil do pavimento, em termos do número de repetições do eixo padrão ($N_{8,2tr}$), do segmento monitorado de Itapoá. Para isso, utilizou-se o *software* ViscoRoute 2.0 para definir a deformação atuante no pavimento projetado, conforme suas características físicas e considerando o carregamento do eixo padrão de 8,2 toneladas.

O passo inicial para a obtenção da deformação atuante no segmento monitorado de Itapoá foi a inserção dos dados de entrada no *software*. A estrutura do pavimento foi descrita na Figura 30 e os dados dos materiais utilizados foram aqueles compilados por Melo (2016) e Pérez (2016).

O Quadro 12 apresenta os parâmetros viscoelásticos considerados para a mistura asfáltica em questão. Estes dados foram obtidos através do modelo reológico de Huet-Sayegh, abordado no item 2.2.2, elaborado através do ensaio de módulo complexo.

Quadro 12 - Parâmetros Viscoelásticos da Mistura Asfáltica

Parâmetros Viscoelásticos – Mistura Asfáltica Segmento de Itapoá	
E_0 (MPa)	42,3043
E_∞ (MPa)	21.345,2
δ	2,04866
k	0,21359
h	0,53921
τ	0,01701
A_0	0,0743558
A_1	-0,376794
A_2	0,0016876

Fonte: Adaptado de Melo (2016)

O Quadro 13 e o Quadro 14 apresentam os módulos estimados e características das camadas da estrutura.

Quadro 13 - Parâmetros Elásticos Estimados do Segmento Monitorado de Itapoá

Módulo de Elasticidade (MPa) das camadas elásticas		
Base de Brita Graduada	Sub-base de Rocha Detonada	Subleito
333	132	124

Fonte: Adaptado de Pérez (2016)

Quadro 14 - Características Básicas das Camadas

Camada	Coefficiente de Poisson	Peso Específico (kg/m ³)
Revestimento	0,30	2570,00
Base	0,35	2480,00
Sub-base	0,35	2200,00
Subleito	0,45	1850,00

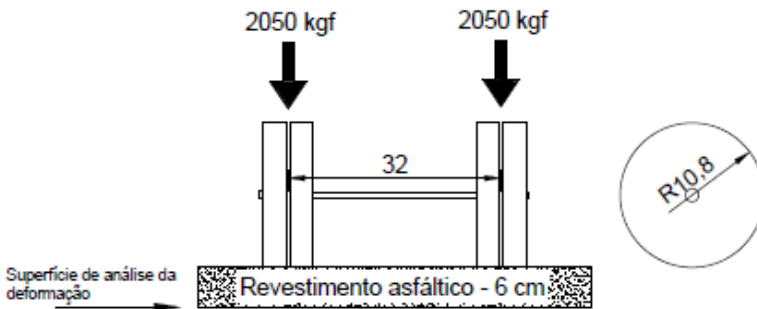
Fonte: Adaptado de Pérez (2016)

Outros fatores considerados na simulação numérica do *software*:

- Frequência de carregamento de 10 Hz, correspondente à velocidade constante de 72 km/h ou 20 m/s;
- Temperatura do revestimento asfáltico de 20° C;
- Carregamento dinâmico de um eixo simples de rodas dupla de 8,2 t, com distância entre rodas de 32 cm;
- Carga por roda de 2050 kgf, com área circular de contato entre pneu e pavimento (raio de 10,8 cm);
- Pressão de contato de 5,6 kgf/cm²;
- Fator laboratório-campo igual a 1.

O *software* simula a passagem de um eixo simples de rolagem dupla com carga padrão de 8,2 ton, com as características descritas, sobre a estrutura pavimentada estudada. O cálculo das deformações sofridas é medido na fibra inferior da camada asfáltica da estrutura, neste caso, 6 cm abaixo do topo da mesma (Figura 55).

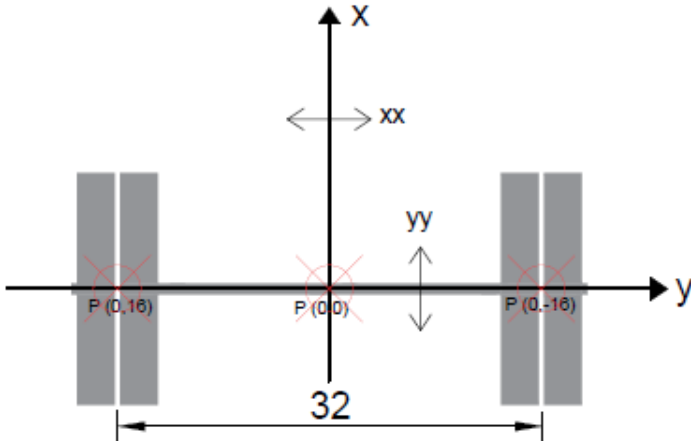
Figura 55 - Características da Simulação Numérica



Fonte: Elaboração própria.

Foram medidas as deformações nos sentidos xx , yy e zz , a fim de encontrar a maior deformação de tração sofrida pelo pavimento. Ainda, analisou-se dois pontos principais da aplicação da carga: no ponto entre rodas [P(0; 0)], e logo abaixo das rodas, local de aplicação direta da carga [P(0; 16) ou P(0; -16)]. Assim buscou-se o ponto da estrutura que seria mais exigido e sofreria a maior deformação de tração.

Figura 56 - Plano Cartesiano da Simulação no *Software* ViscoRoute 2.0



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 57 e a Figura 58 apresentam as telas de entrada de dados no ambiente de trabalho do programa ViscoRoute 2.0. A seguir, apresenta-se a análise feita em cada um dos pontos marcados na Figura 56, nas três direções.

Figura 57 - Dados de Entrada da Estrutura do Pavimento

ViscoRoute 2.0 (LCPC-ENPC)

Fichier Outils Aide

Structure | Chargement | Résultats

C:\Users\Master\Documents\Mariana\TCC\Simulacao.str

Nb de couches

	Z (m)	Epais. (m)	Module E (MPa)	Coef. de Poisson	Mas. Vol. (kg/m ³)	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	0.060	0.060	21345.20000	0.300	2570.000	autre	Viscoelastique	collée	42.30430	20.000	0.214	0.539	2.049	0.074	-0.377	0.001688
2	0.200	0.140	333.00000	0.350	2480.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
3	0.800	0.600	132.00000	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	124.00000	0.450	1850.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000

Fonte: Software Visco Route 2.0.

Figura 58 - Dados de Entrada da Carga Aplicada

ViscoRoute 2.0 (LCPC-ENPC)

Fichier Outils Aide

Structure | Chargement | Résultats

C:\Users\Master\Documents\Mariana\TCC\carga.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	0.06000	epsxix (microdef)
2	0.06000	epszz (microdef)
3	0.06000	epsyy (microdef)

Fonte: Software ViscoRoute 2.0.

I. Ponto de análise P(0,0) - entre rodas:

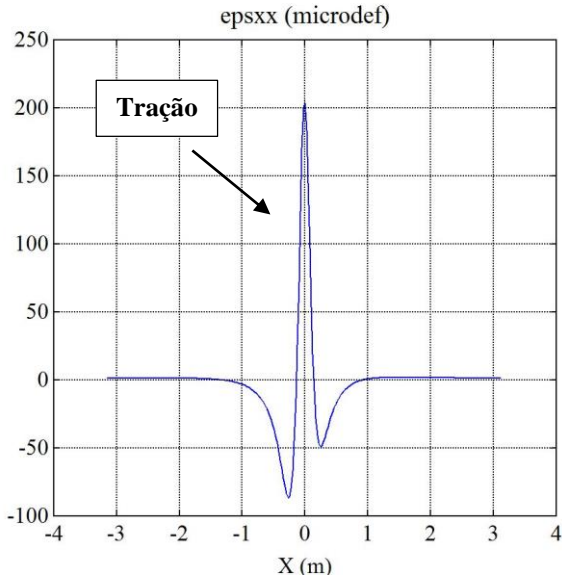
Quadro 15 - Resultados Obtidos em P (0,0)

Direção das Microdeformações	Microdeformações
Epsxx	203,966 (tração)
Epsy y	-182,692 (compressão)
Epsz z	-39,776 (compressão)

Fonte: Dados provenientes de ViscoRoute 2.0.

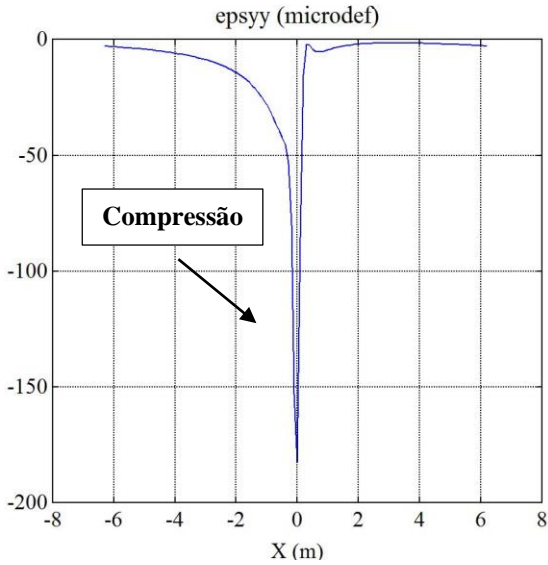
Neste ponto, a maior deformação sofrida ocorrerá na direção xx, será de tração e sua magnitude é de 203,996 $\mu\text{m}/\text{m}$, conforme Quadro 15. As imagens abaixo mostram a variação da microdeformação sofrida na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico com relação ao ponto (0,0) do plano cartesiano, no centro do eixo, nos três sentidos estudados (Figura 59, Figura 60 e Figura 61).

Figura 59 - Microdeformação no Ponto P (0,0) no Sentido xx



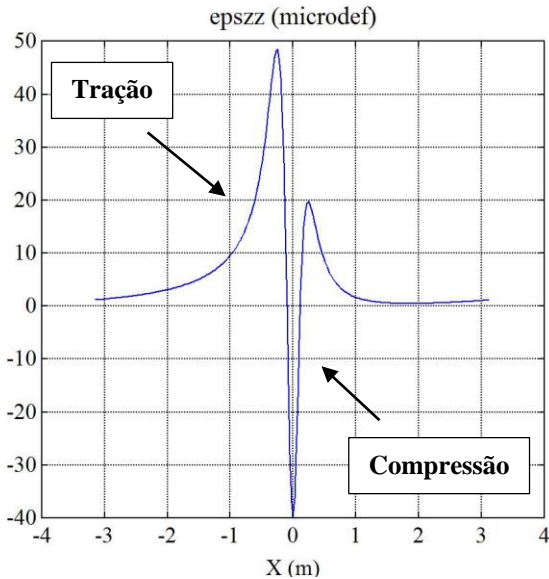
Fonte: Software ViscoRoute 2.0.

Figura 60 - Microdeformação no Ponto P (0,0) no Sentido yy



Fonte: Software ViscoRoute 2.0.

Figura 61 - Microdeformação no Ponto P (0,0) no Sentido zz



Fonte: Software ViscoRoute 2.0.

II. Ponto de análise P(0,16) e/ou P(0,-16) - embaixo da roda.

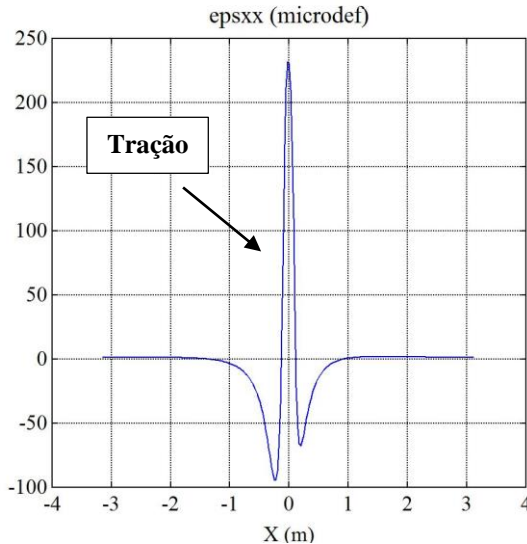
Quadro 16 - Resultados Obtidos em P (0,16) ou P (0,-16)

Direção das Microdeformações	Microdeformações
Epsxx	230,855 (tração)
Epsyy	198,813 (tração)
Epszz	-259,111 (compressão)

Fonte: Dados provenientes de ViscoRoute 2.0

Nestes pontos, as deformações sofridas tanto sob a roda esquerda como a direita foram iguais ou muito parecidas, por esta razão, elas foram agrupadas. A maior deformação sofrida ocorrerá na direção zz, será de compressão e sua magnitude é de 259,111 $\mu\text{m}/\text{m}$. Entretanto, também é neste ponto que ocorre a maior deformação de tração na estrutura, correspondente a 230,855 $\mu\text{m}/\text{m}$. As imagens abaixo mostram a variação da microdeformação sofrida na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico com relação ao ponto (0,16) e/ou (0,-16) do plano cartesiano, sob as rodas, nos três sentidos estudados (Figura 62, Figura 63 e Figura 64).

Figura 62 - Microdeformação nos Pontos P (0,16) e/ou P (0,-16) no Sentido xx



Fonte: Software ViscoRoute 2.0.

Figura 63 - Microdeformação nos Pontos P (0,16) e/ou P (0,-16) no Sentido yy

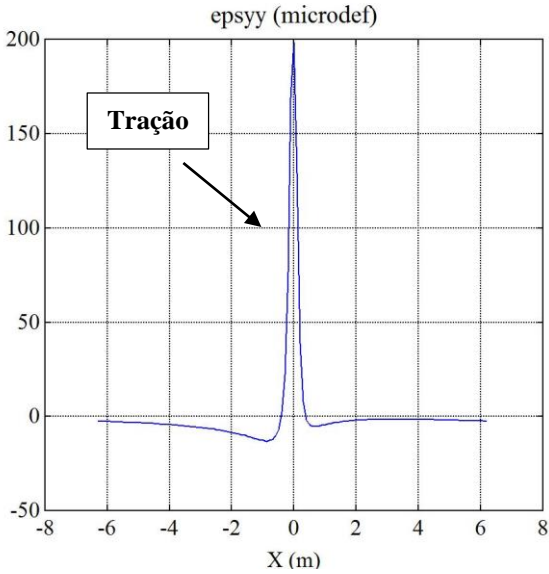
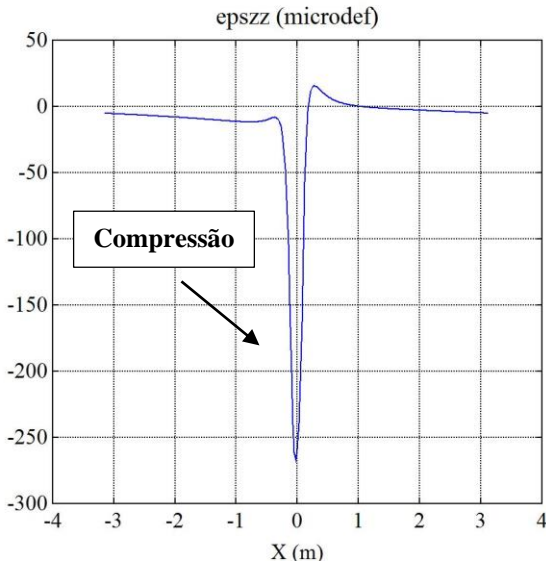
Fonte: *Software ViscoRoute 2.0.*

Figura 64 - Microdeformação nos Pontos P (0,16) e/ou P (0,-16) no Sentido zz

Fonte: *Software ViscoRoute 2.0.*

Sendo assim, conclui-se que a estrutura sofrerá as maiores deformações logo abaixo do ponto de aplicação da carga, ou seja, sob as rodas do eixo padrão. Nestes pontos deverão surgir as primeiras manifestações de fadiga do revestimento asfáltico, quando este atingir o fim de sua vida útil de fadiga.

4.5.1 Análise da Resistência à Fadiga do Pavimento do Segmento Monitorado de Itapoá

Definida a maior deformação de tração atuante na estrutura (230,855 $\mu\text{m/m}$), pode-se desenvolver os cálculos para determinar se a mesma apresentará ou não falhas com relação ao fenômeno da fadiga antes do término do horizonte de projeto da rodovia. A microdeformação entra como variável independente nas equações obtidas no item 4.4 e o resultado será o número de ciclos de carregamento que a mesma resiste antes de chegar ao fim da sua vida de fadiga. Os resultados, de acordo com cada norma estudada podem ser comparados no Quadro 17 abaixo.

Quadro 17 - Vida de Fadiga do Segmento Monitorado de Itapoá Segundo as Normas Estudadas

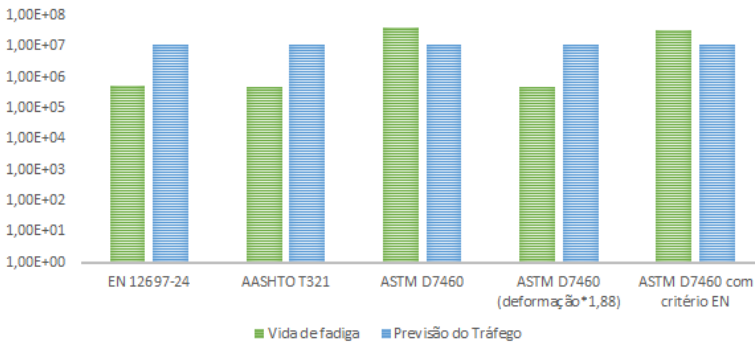
Norma	Equação	ε_i ($\mu\text{m/m}$)	$N_{8,2t}$
EN 1269-24	$N_{8,2t} = 5,33 \times E^{22} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{7,20}$	230,855	5,14E+05
AASHTO T321	$N_{8,2t} = 9,48 \times E^{22} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{7,31}$	230,855	5,02E+05
ASTM D7460	$N_{8,2t} = 1,72 \times E^{24} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{7,03}$	230,855	4,17E+07
ASTM D7460 * fator de translação	$N_{8,2t} = 1,72 \times E^{24} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{7,03}$	413,23	4,93E+05
ASTM D7460 com critério EN 1269-24	$N_{8,2t} = 3,61 \times E^{24} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{7,20}$	230,855	3,48E+07

Fonte: Elaboração própria.

Nesta comparação, pode-se perceber claramente, a diferença da previsão de ruptura por fadiga de um revestimento dimensionado segundo uma norma que utiliza carregamento sinusoidal, daquela que utiliza carregamento haversine. Em termos de número de ciclos, a norma da ASTM prevê, de forma errônea, que a mistura asfáltica vai resistir à fadiga aproximadamente 80 vezes mais, do que aquela projetada pelas outras duas normas (EN 1269-24 e AASHTO T321), uma diferença muito expressiva.

Considerando a previsão de tráfego elaborada para o período de projeto de dez anos no segmento monitorado de Itapoá de $1,16 \times 10^7$ (USACE) repetições do eixo padrão sobre a rodovia, pode-se concluir que, o critério da ASTM revela que a estrutura está bem dimensionada e, inclusive, tem capacidade para resistir a um maior volume de veículos durante sua vida útil, sem sofrer danos do fenômeno de fadiga. Por outro lado, a norma da AASHTO e a europeia preveem que a camada de revestimento se encontra subdimensionada para o carregamento esperado e que a ruptura por fadiga ocorrerá antes do fim do horizonte de projeto da rodovia (Figura 65).

Figura 65 - Vida Útil Prevista Pelas Normas Versus Previsão de Tráfego



Fonte: Elaboração própria.

A penúltima linha do Quadro 17 foi elaborada a título de comparação da vida de fadiga prevista pelas normas, considerando que a onda de formato haversine tenha sua amplitude inicial (microdeformação de tração na base do revestimento – ocasionada pelo eixo padrão) multiplicada pelo fator de translação de 1,88, obtido no item 4.4.5.2. O resultado da vida de fadiga considerando uma microdeformação de

434,007, quase o dobro da deformação atuante na camada asfáltica, aproximou-se muito daquele previsto pelas normas da AASHTO T321 e EN 1269-24, apresentando a mesma ordem de grandeza, confirmando a teoria levantada por Denneman (2013) e os resultados obtidos no presente trabalho, de que o pulso de carregamento haversine, ao longo do ensaio, acaba transformando-se num pulso sinusoidal com aproximadamente a metade da sua amplitude inicial.

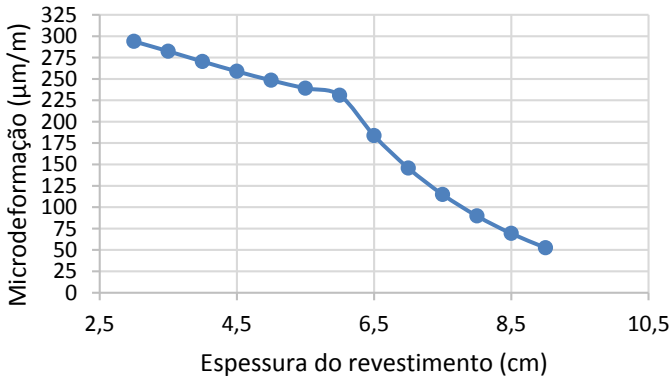
Por fim, aplicou-se a microdeformação encontrada à equação que considera os dados do ensaio com ondas haversine e o critério de ruptura da norma europeia. O resultado obtido foi novamente superior à previsão de tráfego para a vida de projeto da rodovia, cerca de três vezes, e muito superior aos resultados obtidos com ensaios com pulso sinusoidal, cerca de 65 vezes. Esta análise também confirma a teoria de que resultados provenientes de ensaios realizados com ondas haversine, mesmo com variados critérios de ruptura, não traduzem os efeitos correspondentes à microdeformação informada, e sim, a uma microdeformação próxima à metade daquela inicialmente estabelecida.

4.5.2 Definição da Espessura de Revestimento Asfáltico Necessária Segundo as Normas

Com a estrutura do trecho monitorado de Itapoá modelada no *software* ViscoRoute 2.0 e os modelos de fadiga obtidos, pode-se definir a espessura necessária do revestimento asfáltico segundo cada norma a fim de que a estrutura resista, sem danos por fadiga, à vida de projeto.

Para determinar a espessura da camada superior do corpo estradal, foi feita uma análise iterativa no programa ViscoRoute 2.0, arbitrando espessuras e obtendo microdeformações máximas de tração na fibra inferior do revestimento, todas medidas no mesmo ponto, logo abaixo da roda do veículo (Figura 66).

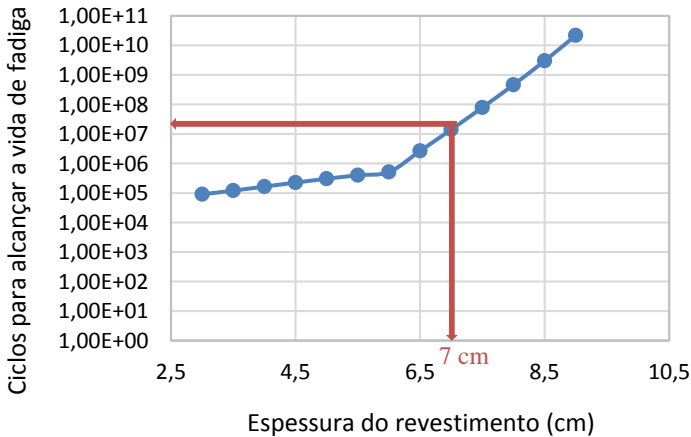
Figura 66 - Microdeformação de Tração Máxima em Função da Espessura do Revestimento Asfáltico



Fonte: Elaboração própria.

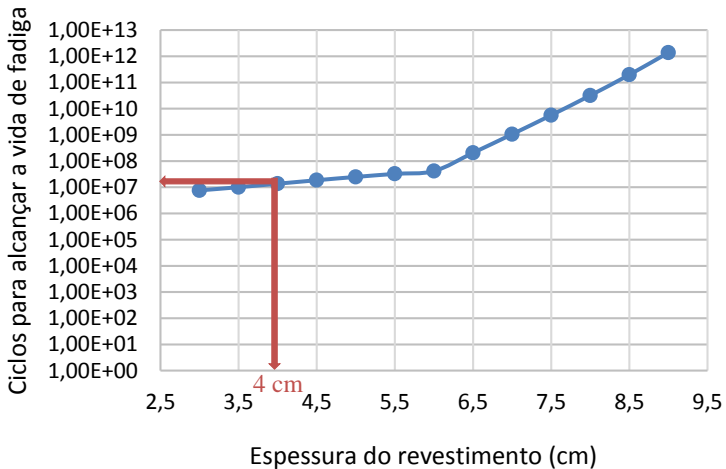
O valor das microdeformações é usado como dado de entrada nos modelos de fadiga, que entregam o número de ciclos da vida útil a fadiga como dado de saída. Seguem abaixo, os resultados encontrados para a norma europeia (Figura 67) e para norma da ASTM D7460 (Figura 68).

Figura 67 - Vida de Fadiga em Função da Espessura do Revestimento Asfáltico Segundo a EN 12697-24



Fonte: Elaboração própria.

Figura 68 - Vida de Fadiga em Função da Espessura do Revestimento Asfáltico Segundo a ASTM D7460



Fonte: Elaboração própria.

Conforme observa-se nos gráficos apresentados, para uma projeção de $1,16 \times 10^7$ repetições do eixo padrão sobre o segmento monitorado de Itapoá, seriam necessários, no mínimo, 7 centímetros de revestimento asfáltico segundo a norma EN 12697-24. Confirma-se que a estrutura executada atualmente no trecho, não terá capacidade de suportar o tráfego até o fim do horizonte de projeto sem sofrer danos por fadiga.

Por outro lado, de acordo com a normativa americana ASTM D7460, uma camada de apenas 4 centímetros de revestimento asfáltico seria suficiente para comportar o tráfego esperado. Sendo assim, a estrutura existente estaria superdimensionada, não correndo risco de sofrer danos por fadiga nos dez anos de vida útil.

Esta análise reforça a teoria de que há diferenças significativas no projeto de pavimentos rodoviários dimensionados com as normas estudadas no presente trabalho. Na breve simulação feita acima, percebe-se uma diferença significativa de três centímetros entre a camada dimensionada segundo a norma europeia EN 12697-24 e aquela projetada segundo a norma americana ASTM D7460. Essa diferença de espessura aplicada em uma grande extensão rodoviária pode diminuir ou aumentar de forma significativa o custo da obra a ser executada. Entretanto o custo operacional de bloquear o tráfego devido a reformas e intervenções que

venham a ser necessárias, no caso de subdimensionamento da camada, tende a ser bastante elevado e causar incomodações aos usuários. Portanto, é de extrema importância, que se esclareça essa diferença apontada pelas diversas normativas, para que se assegure um dimensionamento assertivo e se evite problemas futuros.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta a compilação das considerações feitas ao longo deste trabalho, a fim de responder ao objetivo do mesmo, que se propôs a comparar os resultados de resistência à fadiga de uma mistura asfáltica obtidos através do procedimento previsto em três normas internacionalmente conhecidas, a ASTM D7460, a AASHTO T321 e a norma europeia EN 12697-24, a fim de obter sensibilidade para a futura criação de um procedimento normativo brasileiro.

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios laboratoriais executados e das discussões apresentadas no Capítulo 4, foi possível elaborar as seguintes conclusões:

- Os dados obtidos a partir de ensaios realizados com carregamento em formato sinusoidal apresentaram alta correlação quando tratados na abordagem fenomenológica. Os dados provenientes de ensaios com ondas haversine, por sua vez, apresentaram fatores de correlação bem mais baixos;
- O critério de ruptura estabelecido como a redução do módulo complexo à metade do seu valor inicial apresentou maior facilidade na execução do ensaio do que o proposto pela norma da ASTM D7460, de atingir o pico do módulo normalizado. Ainda, os dados provenientes da análise do primeiro critério de ruptura apresentaram maior correlação entre si do que aqueles provenientes dos modelos com o segundo critério;
- Ensaios de vida de fadiga no equipamento de fadiga a quatro pontos têm resultados diferentes, dependendo do tipo de onda utilizado. Neste trabalho, analisou-se o comportamento da aplicação de carga através de ondas sinusoidais e haversine, e pode-se concluir que os ensaios realizados com ondas haversine apresentam vida de fadiga muito superior que aqueles realizados com ondas sinusoidais. Comprovou-se que os modelos de fadiga obtidos pelos diferentes tipos de onda apresentam um fator de “translação” de aproximadamente 1,79;
- A teoria levantada por Denneman (2013) de que o equipamento de fadiga a 4 pontos não é capaz de reproduzir um sinal de formato haversine, pois, ao longo do ensaio, o pulso acaba tomando forma sinusoidal com ondas de amplitude igual à

aproximadamente metade da amplitude inicial estabelecida foi confirmada. Resultados semelhantes foram encontrados para a vida útil de fadiga do pavimento quando considerada uma deformação para os modelos que utilizam onda sinusoidais, e a metade desta deformação para modelos baseados em ensaios com ondas haversine. Concluiu-se que, nos ensaios com pulso de carga com formato haversine, os parâmetros iniciais estabelecidos não refletem as reais condições do ensaio.

- Através da projeção da deformação atuante na camada inferior do revestimento, realizado no *software* ViscoRoute 2.0, aliada ao resultado dos modelos de fadiga de cada norma, mostrou-se que a normativa utilizada para definição da vida de fadiga de uma mistura asfáltica influencia muito o resultado da vida útil do pavimento. Resultados de vida de fadiga obtidos com a norma da ASTM D7460 foram cerca de 80 vezes maiores que aqueles obtidos com as normas da AASHTO T321 e da EN 12697-24.
- Constatou-se que as camadas de mistura asfáltica dimensionadas através da norma ASTM D7460 apresentam espessura bastante inferior àqueles dimensionados pela norma EN 12697-24, causando subdimensionamento da camada de revestimento;
- Por fim, a principal conclusão do presente trabalho consiste na percepção de que, apesar de serem procedimentos internacionalmente reconhecidos, seu uso no dimensionamento de pavimentos gerará resultados significativamente diferentes, que podem acarretar na brusca diminuição de vida útil de fadiga de um pavimento após sua abertura ao tráfego, dependendo do critério utilizado. Portanto, os procedimentos normativos que utilizam carregamento sinusoidal para este tipo de ensaio são mais adequados e recomendados. Ainda, das três normas analisadas, a norma europeia foi aquela que apresentou maior correlação entre os dados, em todos os aspectos estudados, e é, portanto, considerada como o melhor modelo normativo referente à vida de fadiga de misturas asfálticas para uma futura norma brasileira a ser criada.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem sugestões para trabalhos futuros sobre temas que não foram abordados neste trabalho, mas que são interessantes para a área:

- Analisar a correlação entre os dados de ensaios com ondas haversine e sinusoidal seguindo outras abordagens para modelagem das curvas de fadiga, como o método da energia dissipada;
- Avaliar os danos de fadiga de um pavimento executado, causados pela ação do tráfego num horizonte estabelecido, e comparar os dados de campo com aqueles obtidos pelas normas. Com ênfase na norma europeia, que foi apontada como aquela que melhor se adequa à avaliação do fenômeno da fadiga, tanto por este trabalho como por Denneman (2013), a fim de descobrir se ela realmente reflete a realidade do que ocorre *in loco*.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6560: Materiais Betuminosos – Determinação o ponto de amolecimento – Método do anel e bola.** 2008.

_____. **ABNT NBR 6576: Materiais asfálticos – Determinação da penetração.** 2007.

_____. **ABNT NBR 7809: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma.** 2008.

_____. **ABNT NBR 15086: Materiais Betuminosos – Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro.** 2006.

_____. **ABNT NBR 15184: Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** 2004.

AFNOR – *Association Française de Normalisation*. **AFNOR NF P 98-250-2: Essais relatifs aux chaussées-préparation des mélanges hydrocarbonés, Partie 2: compactage des plaques.** França, 1991.

ALMEIDA, Adosindro Joaquim de. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas com aplicação dos aditivos pr plast s e pr flex 20 no módulo complexo e na fadiga** 2013. 261 p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2013

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T321: Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending.** Washington, DC, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7460: Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending,** Philadelphia, 2010.

ARAO, Mieka. **Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas**. 2014. 61 p. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, 2014. Disponível em:

< <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009440.pdf> >

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

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p. ISBN 9788586238567.

BARRA, Breno Salgado. **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. 2009. 327 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2009.

BERNUCCI, Liedi Légi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, c2007. 501 p. ISBN 8585227842.

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.

CERATTI, J.A.P., REIS, R. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. São Paulo: Oficina de textos; Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar, 2011.

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

COLPO, Gracieli Bordin. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. 2014. 154 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2014. Disponível em:
< <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/114463>>

DENNEMAN, E. **Review of the AG/PT-233 fatigue test protocol and its link to structural pavement design**. Brisbane, 15th AAPA - International Flexible Pavement Conference, 2013.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 035: Agregados: determinação das abrasão Los Angeles**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 1998.

_____. **DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 1995.

_____. **DNER-ME 081: Agregados: determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 1998.

_____. **DNER-ME 084: Agregado miúdo: determinação da densidade real**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 1995.

_____. **DNER-ME 089: Agregados: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 112 - ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, Brasil. 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12697-24: Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 24: Resistance to Fatigue**. Brussels, 2004.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. 545 f. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho, 2009. Disponível em: <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PT0029-T.pdf>>

IWANAGA, Fabio Issao. **Avaliação da influência do tipo de agregado, do tipo do ligante, do tipo de moldagem e do tipo de Fíler na vida de fadiga de misturas asfálticas densas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LEDEZMA PÉREZ, Jahel Sarvia. **Avaliação do desempenho de pavimentos flexíveis dos segmentos monitorados de Urubici e Itapoá**. 2016. 333 p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2016 Disponível em: <<http://www.bu.ufsc.br/teses/PECV0931-T.pdf>>

LOUREIRO, Thiago Grangeiro. **Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

MAMLOUK, M.; SOULIMAN, M.; ZEIADA, W. **Optimum Testing Conditions to Measure HMA Fatigue and Healing Using Flexural Bending Test**. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board. USA, 2012.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos pavimentos**/ Jacques de Medina. Rio de Janeiro: Ed. da UFRJ, 1997. 380p. ISBN 85711082006.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014. 414 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2014 Disponível em: <<http://www.bu.ufsc.br/teses/PECV0931-T.pdf>>

MELO, João Victor Staub. **Relatório Final de Atividades de Estágio Pós-Doutoral PNPD/CAPES**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC. Florianópolis, 2016.

PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1991.

QUINTERO, Carlos Fernando. **Influência da temperatura e da consistência do ligante na fadiga e no módulo complexo de misturas asfálticas**. 2016. 264 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2016.

ROSSATO, Fábio Pereira. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2015.

SILVA, Paulo Fernando A. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008. 128p.

SOTEPÁ. **Supervisão de assistência e de subsídios à fiscalização de obras rodoviárias, Trecho: Itapoá Sociedade técnica de estudos, projetos e assessoria LTDA**. Santa Catarina, Brasil. 2012.

SPEIGHT, James G.. **Asphalt Materials Science and Technology**. Waltham: Butterworth-Heinemann, 2016.

TRICHÊS, G. **Desenvolvimento de método para dimensionamento de pavimentos asfálticos. Fase I: trechos experimentais e materiais de pavimentação** – UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil. 2014.

WIKIPÉDIA. **Itapoá – Wikipédia, a enciclopédia livre**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Itapoá>>. Acesso em: 19 fev. 2017.