

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de
Flexão em Viga Quatro Pontos**

Gracieli Bordin Colpo

Porto Alegre
2014

GRACIELI BORDIN COLPO

**ANÁLISE DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS
ATRAVÉS DO ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGA QUATRO
PONTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre

2014

Colpo, Gracieli Bordin

Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através
do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos /
Gracieli Bordin Colpo. -- 2014.

154 f.

Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-
RS, 2014.

1. Pavimentos. 2. Misturas Asfálticas. 3. Vida de
Fadiga. 4. Ensaio de Flexão em Quatro Pontos. I.
Pereira Ceratti, Jorge Augusto , orient. II. Título.

GRACIELI BORDIN COLPO

**ANÁLISE DE FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS
ATRAVÉS DO ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGA QUATRO
PONTOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de outubro de 2014

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D.Sc. pela COPPE/UFRJ
Orientador

Prof. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Glicério Trichês (UFSC)
Dr. pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Prof. Luciano Pivoto Specht (UFSM)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Sérgio e Margarete, a minha irmã, Angélica, e ao meu namorado, Douglas, pelo companheirismo, incentivo e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela família maravilhosa que tenho, por estar sempre guiando meus caminhos, pensamentos e ajudando a fazer as escolhas certas.

Ao orientador desta dissertação, Prof. Jorge Augusto P. Ceratti, pela oportunidade, motivação, confiança e incentivo para realização desta pesquisa.

Ao Prof. Washington Peres Núñez grande pesquisador e incentivador da pesquisa.

Ao Lélcio Brito pelo incentivo e ajuda ao longo desta jornada, desempenhando por muitas vezes o papel de co-orientador deste trabalho e por ter me incentivado ao interesse pela pavimentação asfáltica.

À minha grande amiga Marlova Johnston, que conheci durante esta caminhada, pelos conselhos, por estar sempre disposta a ajudar e pelo otimismo contagiante.

À Equipe do Lapav, Bernadette, Seu Ivo, Vinicius Alves, Daniel Fernandes, Lucas Pereira, Rodrigo Silva, Douglas Mocelin, Douglas Engelke, Maximiliano Cavalcanti, Jefferson Martins, Kethelin Klagenberg, Lucas Aragão, Caroline Brauwers, Larissa Montagner, Fábio Conterato, Liana Turcati, Thomás Spier, Leonardo da Paz, Isadora Castelli, Tatiane Paviani, André Bock, Dionísio Doering, Lysiane Pacheco, Willian Fedrigo e Lucas Delongui pelo auxílio na realização dos ensaios, pela amizade e pelo espírito de equipe.

Agradeço aos professores, coordenação e aos funcionários do PPGEC pelos ensinamentos e apoio durante esta etapa.

À toda a equipe da Concepa, principalmente ao Eng. Fábio Hirsch, pelo apoio constante em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho. Ao TRS e ao técnico Elias Corrêa, pelo auxílio no processo de moldagem das placas, e a ANTT pelo incentivo ao desenvolvimento de pesquisas.

À marmoraria Rosito Luce pelo auxílio e excelência no corte das placas, e a Delmaq pela usinagem dos moldes.

Ao CNPQ pela bolsa de estudos, que tornou viável a minha dedicação exclusiva a esta pesquisa.

À tia Silvana e ao tio Vilmor, minha segunda família, por terem me recebido e acolhido durante este período.

Aos meus amados pais, Sérgio e Margarete, por todo amor, apoio, carinho, dedicação, compreensão, por sempre estarem presentes em todas as etapas da minha vida e pelo exemplo de vida e união. A minha irmã Angélica, minha melhor amiga, por sempre estar disposta a me ouvir e por me entender em todos os momentos.

Ao meu grande amor Douglas Mocelin, pelo carinho, amor, dedicação, companheirismo, felicidade e paciência. Obrigada por sempre estar ao meu lado e pela constante ajuda em todas as etapas deste trabalho, sem você não teria conseguido chegar ao final desta etapa. Te amo!!

Cada sonho que você deixa para trás,
é um pedaço do seu futuro que deixa de existir.

Steve Jobs

RESUMO

COLPO, G.B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O fenômeno de fadiga é caracterizado pela deterioração estrutural que um material está sujeito quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando assim, em um trincamento do pavimento, que pode até culminar na sua ruptura após um número suficiente de repetições de carregamento. Este processo é considerado como sendo a perda de resistência do material quando solicitado por uma carga repetida. Conhecer a resistência à fadiga de misturas asfálticas torna-se relevante para a formulação das misturas, para o dimensionamento de uma estrutura ou para a escolha de uma adequada solução em uma obra de recuperação do pavimento de uma rodovia. O ensaio laboratorial mais utilizado no Brasil para analisar a fadiga de misturas é o de tração indireta por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos, contudo este ensaio apresenta algumas variáveis que diferenciam os resultados obtidos em laboratório com a realidade apresentada em campo. Neste sentido, o presente trabalho analisou o comportamento à fadiga, através do ensaio de flexão em viga quatro pontos, de duas misturas asfálticas: concreto asfáltico com ligante modificado por polímero (COMPAFLEX 60/85) e concreto asfáltico com ligante modificado por polímero e adição de TLA (CAP TLA FLEX). Para obter as vigas de mistura asfáltica optou-se por utilizar uma metodologia de moldagem e compactação das placas em uma usina de asfalto. Após este processo as placas foram serradas para obtenção das vigas nos tamanhos definidos, sendo estas amostras ensaiadas para verificação da densidade aparente e grau de compactação. Com o intuito de atingir o objetivo proposto foram realizados ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos, sob modo de carregamento à deformação e tensão controlada, ensaios de fadiga por compressão diametral (tensão controlada) e ensaios de resistência à tração, sendo estes realizados à temperatura de 25°C. Também foi determinado o módulo dinâmico das misturas estudadas para as temperaturas de 15°C, 20°C e 25°C. Os resultados obtidos demonstram que a metodologia escolhida para a moldagem e compactação das placas foi adequada, pois as amostras apresentaram valores de volume de vazios, densidade aparente e grau de compactação semelhantes aos estabelecidos nos projetos das misturas. Em relação aos resultados obtidos nos ensaios de fadiga por compressão diametral a mistura CA-TLA obteve valores de vida de fadiga superiores em relação à mistura CA-E, enquanto no ensaio de flexão em quatro pontos, à deformação controlada, a mistura CA-E apresentou maiores vidas de fadiga. Os resultados dos ensaios de módulo dinâmico das misturas CA-TLA e CA-E foram apresentados através das representações clássicas nas curvas isotérmica, frequência-temperatura, isócrona, espaço de Black e plano cole-cole, mostrando que a mistura CA-TLA apresentou maior rigidez em relação a mistura CA-E.

Palavras-chave: *fadiga; misturas asfálticas; flexão a quatro pontos; módulo dinâmico.*

ABSTRACT

COLPO, G.B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos.** 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The phenomenon of fatigue is characterized by structural deterioration when a material is subjected to a state of repeated stress and strain cycles, thus resulting in cracking of the pavement which may even result in its failure after a sufficient number of load repetitions. Considering the fatigue resistance of asphalt mixtures becomes relevant for the formulation of mixes, for the design of a pavement structure or for choosing an adequate solution for pavement rehabilitation in highways. The laboratory test commonly employed in Brazil to analyze the fatigue life of asphalt mixes is the indirect tensile test by diametrical compression in cylindrical specimens. However, this test presents some variables that differentiate the results obtained in laboratory with the in situ loading conditions. In this sense, the present work examined the fatigue behavior, through the four points bending beam test, in two asphalt mixtures: asphalt concrete with binder modified by polymer (COMPAFLEX 60/85) and asphalt concrete with binder modified by polymer and TLA (CAP TLA FLEX) addition. To obtain the beams of asphalt mixture, it was chosen to use a methodology of molding and compaction of the slabs in an asphalt plant, after this process the slabs were sawn in order to obtain the beams in set sizes, and these samples tested to verify the apparent density and degree of compaction. For the research, flexural fatigue tests were conducted in four points bending beam under controlled strain and stress modes, fatigue tests by diametrical compression (stress controlled) and tensile strength tests, all these conducted at a temperature of 25°C. It was also determined dynamic modulus of the mixtures at temperatures of 15°C, 20°C and 25°C. The results show that the methodology chosen for molding and compaction of the plates were appropriate because the samples showed targeted values of void volume, bulk density and degree of compaction, similar to those established in the mix design. Regarding the results obtained in fatigue tests by diametrical compression the mixture CA-TLA obtained values higher fatigue life compared to the mix CA-E, while in the bending test on four points, the controlled deformation, the mixture CA-E showed higher fatigue lifes. The test results of dynamic modulus of mixtures CA-TLA and CA-E were presented through classical representations of the isotherm curves, frequency-temperature, isochrone, Black space and cole-cole plane, showing that mixture CA-TLA presented higher stiffness in relation to mixture CA-E.

Key-words: *fatigue; asphalt mixtures; hot mix asphalt, four point bending test; dynamic module.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	26
1.2 OBJETIVO GERAL	27
1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS	27
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	29
2.2 DIFERENTES TIPOS DE ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	36
2.2.1 Ensaio de fadiga por compressão diametral.....	38
2.2.2 Ensaio de fadiga à flexão em corpos de prova trapezoidais.....	39
2.2.3 Ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos.....	40
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS	43
2.3.1 Método de confecção dos corpos de prova	43
2.3.2 Modos de carregamento	45
2.3.3 Variáveis da mistura.....	46
2.3.4 Carregamento e variáveis ambientais.....	48
2.4 NORMALIZAÇÃO DO ENSAIO DE FADIGA A FLEXÃO EM VIGA QUATRO PONTOS.....	50
2.4.1 Norma norte-americana AASHTO T-321-07	50
2.4.2 Proposta norma norte-americana AASHTO T-321.....	53
2.4.3 Norma norte-americana ASTM D 7460.....	54
2.4.4 Norma europeia EN 12697-24:2004	55
2.5 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS.....	56
2.6 MÓDULO COMPLEXO	62
2.6.1 Curvas isotérmicas.....	64
2.6.2 Curva equivalência frequência-temperatura ou curva mestra.....	64

2.6.3	Curvas isócronas.....	67
2.6.4	Curva espaço de Black	67
2.6.5	Representação cole-cole	68
3	EQUIPAMENTOS, MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS	69
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.1.1	Matriz experimental.....	70
3.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	71
3.2.1	Equipamento para ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos e ensaio de módulo dinâmico.....	72
3.2.2	Equipamento para ensaio de fadiga por compressão diametral	82
3.3	MÉTODOS EMPREGADOS	85
3.3.1	Ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos.....	85
3.3.2	Ensaio de módulo dinâmico	88
3.3.3	Ensaio de fadiga por compressão diametral.....	88
3.3.4	Ensaio de resistência à tração	89
3.4	MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	91
3.4.1	Agregado Mineral.....	91
3.4.2	Cimentos asfálticos de petróleo.....	92
3.4.3	Misturas asfálticas utilizadas.....	93
3.4.4	Preparação dos corpos de prova prismáticos e cilíndricos.....	95
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	107
4.1	DENSIDADE APARENTE, PERCENTAGEM DE VOLUME DE VAZIOS E GRAU DE COMPACTAÇÃO DAS AMOSTRAS	107
4.1.1	Resultados de densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação dos corpos de prova prismáticos	107
4.1.2	Resultados de densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação dos corpos de prova cilíndricos.....	112
4.2	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	116
4.3	ENSAIOS DE MÓDULO DINÂMICO	116
4.3.1	Curva de equivalência frequência-temperatura (curva mestra)	121
4.3.2	Curva isócrona.....	123

4.3.3	Espaço de Black	125
4.3.4	Representação no plano Cole-Cole	127
4.4	ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	129
4.5	ENSAIOS DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS.....	136
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
5.1	CONCLUSÕES	143
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diferenciação entre o fenômeno de fadiga e deformação permanente (baseado em: DI BENEDETTO <i>et al.</i> , 2004).	31
Figura 2: tensões desenvolvidas em uma camada de concreto asfáltico submetido a uma carga de roda (baseado em: ROQUE; BUTTLAR, 1992).....	31
Figura 3: estágios que ocorrem em um processo de fadiga (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008).....	32
Figura 4: exemplos de curvas de Wöhler (ROHDE, 2007).....	33
Figura 5: comportamento visco-elástico (a) e elástico (b) dos materiais na relação tensão-deformação (ROWE, 1996).	34
Figura 6: representação do comportamento da deformação (ϵ), tensão (σ) e ângulo de fase (ϕ) obtidos em um ensaio com carregamento dinâmico em um material visco-elástico.....	34
Figura 7: comportamento da energia dissipada durante os ensaios a deformação e a tensão controlada (MELLO, 2008).	35
Figura 8: características geométricas dos ensaios à fadiga comumente empregados (baseado em: DI BENEDETTO <i>et al.</i> , 2004).	37
Figura 9: configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à compressão diametral.	38
Figura 10: equipamento do ensaio de fadiga à flexão em amostras trapezoidais (GRENFELL, 2013).	40
Figura 11: configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à flexão em vigas quatro pontos.....	41
Figura 12: comparativo do comportamento a tensão controlada e deformação controlada em ensaios de fadiga (baseado em: MOFFATT; RABE, 2011).....	46
Figura 13: formas de carregamento empregadas em ensaios de fadiga (baseado em: SAID, 1988, apud FONTES, 2009).	49
Figura 14: características do equipamento para o ensaio de fadiga em viga quatro pontos (baseada em: AASHTO T-321-07).....	51
Figura 15: procedimento de fixação da amostra no equipamento para ensaio de fadiga em viga quatro pontos (baseada em: AASHTO T-321-07).....	52
Figura 16: rigidez à flexão x ciclos de carga (S_xn) versus número de ciclos (baseada em: AASHTO T-321).	53
Figura 17: módulo normalizado x ciclo de carga versus número de ciclos (baseada em: ASTM D 7460).	54

Figura 18: sistema de moldes empregados pela Universidade da Califórnia para confecção de placas em laboratório destinadas a ensaios de fadiga a flexão em quatro pontos.	57
Figura 19: detalhe do molde empregado pela Universidade da Califórnia para confecção de placa para serrar quatro vigas, sendo obtidas duas vigas por vão.....	57
Figura 20: compactação das placas de misturas asfálticas utilizando rolo compactador, Universidade da Califórnia.	58
Figura 21: sistema de moldes empregados pela Universidade da Califórnia para confecção de placas em campo destinadas a ensaios de fadiga a quatro pontos.	58
Figura 22: sistema utilizado para a retirada das placas de misturas asfálticas moldadas em campo, Universidade da Califórnia.	59
Figura 23: amostras para o ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos, após o processo de corte, Universidade da Califórnia.	59
Figura 24: sistema de moldagem e compactação de vigas utilizado por Fontes (2009).	60
Figura 25: compactação e moldagem de corpos de prova em formato de viga empregado por Mello (2008).	61
Figura 26: mesa compactadora francesa tipo LCPC (Moura, 2010).	61
Figura 27: representação do módulo complexo pelas curvas isotérmicas (De La Roche, 1996).	64
Figura 28: curvas de equivalência frequência–temperatura (Momm, 1998).....	65
Figura 29: translação gráfica das curvas isotérmicas (Otto, 2009).....	66
Figura 30: curvas isócronas de uma mistura asfáltica (Otto, 2009).	67
Figura 31: espaço de Black de uma mistura asfáltica (Baaj, 2002).....	68
Figura 32: representação da parte imaginária e real do módulo complexo no plano cole-cole (Fontes, 2009).	68
Figura 33: equipamento para realização do ensaio de flexão em viga quatro pontos.	72
Figura 34: câmara climática utilizada para realização dos ensaios de flexão em viga quatro pontos e módulo complexo.	74
Figura 35: gabinete do sistema integrado de controle multi-eixos (IMACS) pneumático.....	74
Figura 36: tela do programa UTS015.	75
Figura 37: tela do programa UTS018.	76
Figura 38: interface do controlador do atuador onde: (a) controlador ativo e (b) funções do controlador desabilitadas durante o ensaio.	76

Figura 39: interface do visualizador dos níveis de sinais dos transdutores.	77
Figura 40: página de exibição dos dados gerais.	78
Figura 41: página de exibição dos dados da amostra.	78
Figura 42: página de exibição dos parâmetros do ensaio no UTS015.....	79
Figura 43: página de exibição dos parâmetros do ensaio no UTS018.....	79
Figura 44: página de exibição dos dados do ensaio do UTS015.....	80
Figura 45: página de exibição dos dados do ensaio do UTS018.....	80
Figura 46: página de ajuste dos parâmetros e formas de onda.	81
Figura 47: página de escolha das opções de gráficos.	81
Figura 48: corpo de prova modelo para a realização das leituras de temperatura interna e de superfície durante a execução dos ensaios.....	82
Figura 49: (a) câmara climática e (b) sistema de carregamento do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral.	83
Figura 50: sistema de aquisição e controle de dados do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral.	83
Figura 51: programa de controle do ensaio de fadiga por compressão diametral e detalhes das telas de configurações.	84
Figura 52: tela do programa onde é possível visualizar o comportamento da carga pelo deslocamento e do módulo de resiliência pelo número de ciclos no decorrer do ensaio de fadiga.	85
Figura 53: posicionamento da amostra no equipamento de flexão em quatro pontos.....	86
Figura 54: sequência de montagem das peças de suporte para fixação do LVDT no corpo de prova cilíndrico.	89
Figura 55: forma de carregamento e plano de ruptura gerados durante o ensaio de resistência à tração (BRITO, 2006).	90
Figura 56: prensa para ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	90
Figura 57: distribuição granulométrica dos agregados utilizados no estudo.....	92
Figura 58: composição granulométrica estabelecida para as misturas CA-TLA e CA-E - Faixa C DNIT.	94
Figura 59: detalhamento dos moldes para produção dos corpos de prova prismáticos desenvolvidos para esta pesquisa.....	96
Figura 60: moldes usinados para moldagem de vigotas: (a) positivo 1 e (b) positivo 2.	97

Figura 61: face superior (a) e inferior (b) do molde metálico denominado de base com engastes que servem para fixá-lo na pista de compactação.	97
Figura 62: adaptação da pista de concreto para colocação das bases e moldes metálicos.	98
Figura 63: posicionamento das bases metálicas (a) na pista de concreto e dos moldes metálicos (b) no interior das bases.	98
Figura 64: pista de moldagem construída na usina de asfalto para produção das placas de misturas asfálticas.	99
Figura 65: utilização de papel nos moldes metálicos com o intuito da massa asfáltica não aderir nas faces dos moldes.	99
Figura 66: processo de preenchimento dos moldes metálicos com massa asfáltica.	100
Figura 67: verificação da temperatura de compactação da mistura asfáltica.	101
Figura 68: processo de pré-compactação da mistura asfáltica no interior dos moldes metálicos.	101
Figura 69: processo de compactação das placas de mistura asfáltica.	102
Figura 70: placas de mistura asfáltica compactadas.	103
Figura 71: processo de desmoldagem das placas de mistura asfáltica.	103
Figura 72: armazenamento das placas de mistura asfáltica.	104
Figura 73: transporte das placas de mistura asfáltica da usina de asfalto para o local do processo de corte.	104
Figura 74: processo de corte das placas de mistura asfáltica para obtenção das vigotas.	105
Figura 75: vigotas obtidas após o processo de corte das placas de mistura asfáltica.	106
Figura 76: extração de corpos de prova cilíndricos de placas moldadas na usina de asfalto.	106
Figura 77: densidade aparente das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.	109
Figura 78: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.	109
Figura 79: densidade aparente das vigotas moldadas com a mistura CA-E.	110
Figura 80: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) das vigotas moldadas com a mistura CA-E.	110
Figura 81: vigota dividida em quatro partes para ensaio de densidade aparente, grau de compactação e volume de vazios.	111
Figura 82: densidade aparente das partes de uma vigota moldada com a mistura CA-E.	111

Figura 83: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) das partes de uma vigota moldada com a mistura CA-E.	112
Figura 84: densidade aparente dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA.....	114
Figura 85: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA.....	114
Figura 86: densidade aparente dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.	115
Figura 87: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.....	115
Figura 88: módulo dinâmico da mistura CA-E em função das frequências de solicitação.	118
Figura 89: módulo dinâmico da mistura CA-TLA em função das frequências de solicitação.	118
Figura 90: ângulos de fase da mistura CA-E em função das frequências de solicitação.	119
Figura 91: ângulos de fase da mistura CA-TLA em função das frequências de solicitação. .	119
Figura 92: módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA.....	120
Figura 93: ângulo de fase das misturas CA-E e CA-TLA.....	120
Figura 94: curva frequência-temperatura da mistura CA-E.	122
Figura 95: curva frequência-temperatura da mistura CA-TLA.	122
Figura 96: representação do módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA na curva frequência-temperatura.	123
Figura 97: representação do módulo dinâmico da mistura CA-E na curva isócrona.	124
Figura 98: representação do módulo dinâmico da mistura CA-TLA na curva isócrona.....	124
Figura 99: curvas isócronas das misturas CA-E e CA-TLA.	125
Figura 100: espaço de Black da mistura CA-E.....	126
Figura 101: espaço de Black da mistura CA-TLA.	126
Figura 102: representação do módulo dinâmico no espaço de Black das misturas CA-E e CA-TLA.....	127
Figura 103: representação do módulo complexo da mistura CA-E no plano Cole-Cole.	128
Figura 104: representação do módulo complexo da mistura CA-TLA no plano Cole-Cole..	128
Figura 105: representação no plano Cole-Cole das misturas CA-E e CA-TLA.....	129

Figura 106: curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da tensão de tração e tensão de tração normalizada (σ/R_t).	131
Figura 107: curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da diferença de tensões.....	131
Figura 108: curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da deformação específica inicial de tração.	132
Figura 109: estrutura de pavimento empregada na análise (VICTORINO, 2008).....	133
Figura 110: vida de fadiga da estrutura analisada (aplicação do modelo gerado no ensaio de fadiga por compressão diametral).....	134
Figura 111: valores de MR das misturas estudadas obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral.	134
Figura 112: energia dissipada obtida nos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada.....	135
Figura 113: curvas de fadiga das misturas estudadas em função da deformação de tração – ensaio a deformação controlada.....	137
Figura 114: vida de fadiga da estrutura analisada (aplicação do modelo gerado no ensaio de flexão à deformação controlada).....	138
Figura 115: rigidez na flexão das misturas estudadas - ensaio a deformação controlada.	139
Figura 116: energia dissipada obtida nos ensaios de fadiga à flexão sob deformação controlada.....	139
Figura 117: curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas no ensaio de flexão à tensão (TC) e deformação (DC) controlada.	140
Figura 118: curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos (4P) e por compressão diametral (CD) em função da tensão de tração e tensão de tração normalizada (σ/R_t).	141
Figura 119: curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos (4P) e por compressão diametral (CD) em função da deformação de tração.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: fatores que influenciam a rigidez e a vida de fadiga das misturas asfálticas.....	47
Tabela 2: comparativo entre as normas do ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos..	50
Tabela 3: matriz de ensaios realizados na pesquisa para mistura com CAP TLA FLEX e COMPAFLEX 60/85.	71
Tabela 4: características dos agregados utilizados no estudo.....	91
Tabela 5: distribuição granulométrica dos agregados.	92
Tabela 6: propriedades do cimento asfáltico modificado por polímero e adição de TLA (CAP TLA FLEX) utilizado na pesquisa.....	93
Tabela 7: propriedades do cimento asfáltico modificado por polímero (COMPAFLEX 60/85) utilizado na pesquisa (ANP, 2010).	93
Tabela 8: resumo das propriedades da mistura CA-TLA e da mistura CA-E.....	95
Tabela 9: resultados da densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.	108
Tabela 10: resultados da densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação das vigotas moldadas com a mistura CA-E.	108
Tabela 11: resultados da densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA.....	113
Tabela 12: resultados da densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.	113
Tabela 13: resultados de RT das misturas asfálticas estudadas.....	116
Tabela 14: resultados do ensaio de módulo dinâmico da mistura CA-E.....	117
Tabela 15: resultados do ensaio de módulo dinâmico da mistura CA-TLA.	117
Tabela 16: resultados obtidos nos ensaios de fadiga por compressão diametral sob tensão controlada.....	130
Tabela 17: parâmetros dos modelos de fadiga das misturas estudadas.	130
Tabela 18: valores de tensão, deformação e vida de fadiga calculados.	133
Tabela 19: resultados obtidos nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos sob deformação controlada.....	136
Tabela 20: parâmetros obtidos para os modelos de fadiga determinados no ensaio de flexão à deformação controlada.....	136

Tabela 21: valores de deformação e vida de fadiga calculados (modelo obtido no ensaio de flexão à deformação controlada).....	138
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABPV: Associação Brasileira de Pavimentação

ANP: Agência Nacional do Petróleo

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

CA: Concreto Asfáltico

CA-E: Concreto Asfáltico com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por Polímero

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CA-TLA: Concreto Asfáltico com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por Polímero e Adição de TLA

CDAS: Sistema de Controle e Aquisição de Dados

C_1 e C_2 : Constantes

DC: Deformação Controlada

DMM: Densidade Máxima Medida

DMT: Densidade Máxima Teórica

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

E: Módulo de Elasticidade

E_1 : Parte Real do Módulo Complexo

E_2 : Parte Imaginária do Módulo Complexo

E^* : Módulo Complexo

$|E^*|$: Módulo Imaginário

EN: *European Standard*

EUA: Estados Unidos da América

ϵ_t : Deformação de tração

φ : Ângulo de fase

F: Carga de Ruptura

GC: Grau de Compactação

IMACS: Sistema Integrado de Controle Multi-Eixos

LAPAV: Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LCPC: *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

MR: Módulo de Resiliência

N: Vida de fadiga

NF: Norma Francesa

NM: Módulo Normalizado

R: Constante Universal dos Gases

R²: Coeficiente de Determinação

RBV: Relação Betume Vazios

RT: Resistência à Tração por Compressão Diametral

S: Rigidez na flexão

s: tempo de defasagem entre a aplicação da carga e o deslocamento

t: Tempo

T: Temperatura

TC: Tensão Controlada

T_R: Temperatura de Referência

TLA: *Trinidad Lake Asphalt*

t_{r1} e t_{r2}: Translações

σ_t: Tensão de Tração

UFGRS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VAM: Vazios de Agregado Mineral

VV: Volume de Vazios

ω: Frequência Angular

α_t : Coeficiente de Translação

δH : Energia de Ativação Permanente

δ : deflexão no centro da amostra

1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é considerado o modal mais importantes no Brasil, porém como o tráfego pode variar em relação ao tipo de veículos e as cargas transportadas, a degradação dos pavimentos é, muitas vezes, prematura e inevitável.

Sabe-se que 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 transmitir as cargas dos 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 a sua liberação ao tráfego.

A fadiga é considerada um dos problemas de maior relevância que ocorre nas misturas asfálticas, pois resulta na degradação dos materiais que compõe o pavimento asfáltico e, conseqüentemente, da estrutura do pavimento [DI BENEDETTO *et al.*, 2004]. O fenômeno de fadiga origina-se devido às cargas repetidas do tráfego que geram tensões de tração na base do revestimento. Isto faz com que no estágio inicial ocorra o surgimento de microfissuras, as quais podem evoluir para trincas e, assim, levar à falha mecânica do pavimento. O conhecimento da resistência à fadiga de misturas asfálticas assume particular importância na formulação das misturas, no dimensionamento de uma estrutura ou na escolha de uma adequada solução para uma obra de recuperação do pavimento de uma rodovia.

O comportamento à fadiga das misturas asfálticas é influenciado por diferentes fatores como a preparação dos corpos de prova, as características dos ensaios empregados, os fatores relacionados com as propriedades da mistura asfáltica e condições ambientais [TANGELLA *et al.*, 1990]. Estes fatores precisam ser considerados, uma vez que, o desempenho à fadiga das misturas obtido em campo é diferente do determinado em laboratório e, por esse motivo torna-se necessário a utilização de um fator laboratório-campo (*shift-factor*) para estimar a vida de fadiga destas misturas no campo. O fator laboratório-campo pode ser determinado pelo estado

de tensões, tráfego de veículos de carga, recuperação do concreto asfáltico e propriedades do material [AL-QADI; NASSAR, 2003].

Ensaaios laboratoriais são fundamentais para determinar os modelos de fadiga comumente estabelecidos pela relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos de carga até atingir a ruptura. Estes ensaios consideram cargas repetidas que são conduzidas a diferentes níveis de tensão ou deformação, devendo reproduzir o mais próximo possível as condições estabelecidas em campo. Os ensaios geralmente realizados em laboratório para determinar a vida de fadiga são os de tração e compressão simples, de flexão em dois, três e quatro pontos e de tração indireta.

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 1Hz e temperatura de 25°C. As principais vantagens deste ensaio são a simplicidade na preparação das amostras e o fato de existir um estado biaxial de tensões, representando melhor as condições *in situ*. 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. Também não é possível variar a razão entre as componentes horizontal e vertical e, assim, simular o estado de tensão em pontos críticos do pavimento [TAYEBALLI, 1994]. Além disso, o ensaio de fadiga por compressão diametral não pode ser realizado a deformação controlada, e em função de uma série de simplificações elásticas do ensaio e de suas características executivas, há valores de fator laboratório-campo elevados.

O ensaio de flexão em quatro pontos foi utilizado por Ceratti (1991) em amostras de solos estabilizados com cimento, por Trichês (1993) em corpos de prova de concreto compactado a rolo e por Pinto (1991) e Fontes (2009) em amostras de misturas asfálticas, com o objetivo de determinar a vida de fadiga. Este ensaio é bastante difundido na Europa e nos Estados Unidos para determinar a fadiga de misturas asfálticas e consiste em submeter um corpo de prova, em formato prismático simplesmente apoiado, a uma carga vertical nos dois terços médios da viga, originando assim, um estado de tração uniforme na parte central da amostra, entre os dois pontos de carregamento, zona onde o momento fletor é constante com esforços cortantes nulos.

Isto faz com que este tipo de ensaio seja considerado adequado para representar o comportamento de campo em relação à resistência a fadiga das misturas asfálticas.

No ensaio de flexão em viga quatro pontos é possível optar pelo carregamento a tensão controlada ou a deformação controlada. Os resultados determinados em ensaios de fadiga à tensão controlada são comumente utilizados no dimensionamento de pavimentos com uma espessura de revestimento espessa, enquanto que os obtidos em ensaios à deformação controlada devem ser usados em pavimentos que apresentam uma espessura betuminosa delgada. Em especial no ensaio de flexão em quatro pontos, a ruptura da viga tende a ocorrer em uma zona de tensão uniforme, sem a presença de tensões de cisalhamento, em contraponto, o estado de tensão é essencialmente de tração na flexão, sendo diferente do que ocorre na estrutura de um pavimento.

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Com o crescente aumento do volume de tráfego e da sobrecarga nos pavimentos, faz-se necessário a utilização de revestimentos mais resistentes e duráveis. Em função disto, é importante aprofundar nossos conhecimentos em relação ao comportamento à fadiga de misturas asfálticas especiais, como as com asfalto modificado por polímero e as com adição de asfalto natural, que estão sendo empregadas nas rodovias do nosso país. A principal função destes tipos de misturas asfálticas é compensar algumas deficiências do cimento asfáltico convencional, aumentando a vida útil do pavimento e melhorando o seu desempenho.

O emprego de misturas com cimento asfáltico de petróleo (CAP) modificado por polímero e adição de TLA (*Trinidad Lake Asphalt*) e cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero (COMPAFLEX 60/85) tem sido bastante difundido em concessionárias de rodovias brasileiras. O TLA é um asfalto natural extraído de um lago localizado em Trinidad e Tobago, e sua adição ao CAP pode proporcionar um maior desempenho mecânico em consequência da melhor estabilidade da mistura asfáltica [COSTA *et al.*, 2008]. A adição de TLA em ligantes asfálticos foi utilizada no revestimento da nova ponte TNB (Takoma Narow Bridge) nos EUA, a qual foi referência para o projeto de restauração do revestimento da ponte móvel do Guaíba [SPECHT *et al.*, 2012].

Cavalcanti (2010) e Shinohara (2012) realizaram ensaios de tração indireta por compressão diametral e flexão em amostras trapezoidais para determinar a vida de fadiga de misturas compostas por ligantes modificados mostrando um desempenho adequado destes materiais.

O Laboratório de Pavimentação da UFRGS - LAPAV - através da cooperação com a Petrobrás (Projeto Rede Temática de Asfalto) adquiriu um equipamento da empresa IPC Global (modelo CS 7800) para realização do ensaio de flexão a quatro pontos em vigas prismáticas, buscando determinar a resistência à fadiga de misturas asfálticas. Este tipo de ensaio é comumente empregado nos Estados Unidos e Europa, sendo que no Brasil seu emprego ainda não é muito difundido, não havendo normatização para a realização do mesmo. Além disso, no Brasil há poucos laboratórios que realizam o ensaio de flexão em vigas a quatro pontos, sendo que ainda não há nenhuma pesquisa concluída no assunto. Com isso, esta pesquisa visa contribuir para o conhecimento e comportamento de fadiga de misturas asfálticas através deste tipo de configuração de ensaio.

Neste sentido, foi empregado nesta pesquisa o ensaio de flexão a quatro pontos em corpos de prova prismáticos para analisar a resistência à fadiga e o módulo dinâmico de misturas asfálticas. Também, buscou-se comparar a vida de fadiga das misturas obtida no ensaio de flexão a quatro pontos com a determinada no ensaio de tração indireta por compressão diametral, usualmente utilizado no país.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é utilizar o ensaio de flexão em viga quatro pontos para analisar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas densas, tipicamente utilizadas no estado do Rio Grande do Sul, com ligantes asfálticos modificados.

1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) investigar na literatura nacional e internacional a metodologia empregada para realizar o ensaio de flexão em vigas a quatro pontos para misturas asfálticas;
- b) buscar uma metodologia adequada para realização da moldagem de placas para obtenção das vigas de misturas asfálticas, considerando trabalhos já realizados;

- c) realizar ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos em duas misturas asfálticas: concreto asfáltico com cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero e adição de TLA (CA-TLA) e concreto asfáltico com cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero (CA-E).
- d) determinar a energia dissipada ao longo dos ensaios de vida de fadiga;
- e) comparar a vida de fadiga no ensaio de flexão em viga a quatro pontos com a determinada no ensaio de tração indireta por compressão diametral;
- f) determinar o módulo dinâmico das misturas asfálticas estudadas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação foi dividida em cinco capítulos. O capítulo 1 apresentou o tema da pesquisa, sua relevância, os objetivos e a organização do trabalho.

No capítulo 2, faz-se uma revisão bibliográfica sobre a fadiga de misturas asfálticas, apresentando sua definição, importância, os métodos de ensaio para a obtenção da vida de fadiga, uma descrição dos diferentes fatores que influenciam o desempenho a fadiga de pavimentos flexíveis, as diferentes normas para o ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos, a descrição de alguns sistemas de compactação e moldagem empregados na fabricação de corpos de prova prismáticos, bem como a determinação e representação do módulo complexo de misturas asfálticas.

O capítulo 3 apresenta a metodologia empregada na realização dos ensaios, uma descrição dos equipamentos utilizados e da moldagem dos corpos de prova, além da caracterização dos materiais empregados.

No capítulo 4 consta a apresentação e a análise dos resultados encontrados para os objetivos propostos nesta pesquisa.

No capítulo 5 busca-se apresentar as conclusões da pesquisa e também algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados assuntos relevantes ao desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente relata-se como ocorre o fenômeno de fadiga em misturas asfálticas. Apresentam-se, também, os diferentes tipos de ensaios realizados para determinar a vida de fadiga de misturas asfálticas, destacando suas configurações, tipo e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos de análise, para melhor entender a teoria que envolve o ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos, foco deste trabalho.

Disserta-se sobre os fatores mais relevantes que influenciam a determinação da vida de fadiga dos materiais betuminosos como os métodos de compactação das amostras, modos de carregamento e as variáveis ambientais e da mistura.

Posteriormente, é feito um relato sobre as normas comumente utilizadas na realização dos ensaios de fadiga em viga a quatro pontos, buscando mostrar as principais diferenças entre as normatizações.

Também são mostrados sistemas de compactação e moldagem dos corpos de prova prismáticos empregados em diferentes pesquisas, visando o entendimento destes métodos para uma melhor adequação neste trabalho.

Além disso, disserta-se sobre a determinação do módulo complexo em misturas asfálticas, bem como a sua representação através de diferentes curvas.

2.1 FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas que fazem parte da estrutura dos pavimentos são submetidas, em um curto intervalo de tempo, a carregamentos resultantes dos veículos que trafegam sobre eles. Este carregamento faz com que inicialmente ocorram microfissuras na base dos revestimentos asfálticos resultando, assim, na perda da rigidez do material, e o acúmulo destas microfissuras acaba gerando o fenômeno de fadiga [DI BENEDETTO *et al.*, 2004].

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].

A ASTM E206-72 (1979) define fadiga como o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões e deformações variáveis, produzindo fissuras que podem levar à ruptura após um determinado número de ciclos. Porém, deve-se levar em consideração que o estado de ruptura por fadiga somente irá ocorrer quando os danos atingirem a um nível crítico, o que pode não acontecer dentro do período da vida útil da estrutura do pavimento [TRICHÊS, 1993].

O processo de fadiga é considerado como um importante mecanismo que pode levar a degradação dos pavimentos e tem sido estudado há bastante tempo [MATTHEWS *et al.*, 1993]. Acredita-se que o pioneiro no estudo de fadiga em materiais foi o engenheiro alemão Albert que em 1829 estudou os efeitos de cargas repetidas em peças de máquinas [PINTO, 1991].

Entre 1850 e 1875 Wöhler realizou ensaios, em escala natural e em corpos de prova, buscando determinar o número de ciclos de carregamento que o material poderia suportar, a cada nível de tensão, antes de ocorrer a ruptura [SILVA, 2009]. Os primeiros pesquisadores em relacionar determinados tipos de trincas que surgem nos pavimentos flexíveis com o carregamento cíclico do tráfego foram Porter em 1942, Nijboer e Van der Poel em 1953, Hveem em 1955 e Moavenzadeh em 1971 [NUÑEZ, 2013].

Preussler, Pinto e Medina (1981) apresentaram no Brasil os primeiros modelos para determinar a vida de fadiga de concretos asfálticos, obtidos através de ensaios realizados em laboratório. Estes autores ainda apresentaram um exemplo de aplicação dos resultados dos ensaios no projeto de reforço de um pavimento.

Como mencionado, o efeito de fadiga está relacionado com a redução da rigidez do material, sendo influenciado pelas condições de carregamento e limites de contorno. Porém, este fenômeno não deve ser confundido com a deformação permanente que pode ocorrer quando são aplicadas apenas tensões de compressão ou de tração originando significativas deformações acumuladas irreversíveis que podem ocultar o efeito relacionado com a fadiga, conforme mostrado na Figura 1.

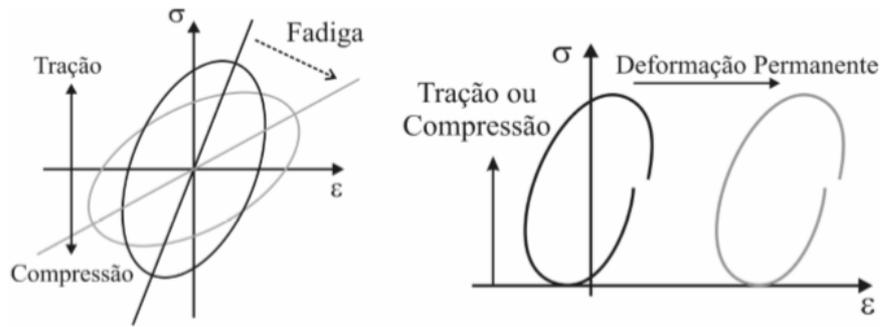


Figura 1: diferenciação entre o fenômeno de fadiga e deformação permanente (baseado em: DI BENEDETTO *et al.*, 2004).

As tensões de compressão e tração induzidas por uma carga de roda em uma camada de concreto asfáltico podem ser observadas na Figura 2, onde o caso 1 representa compressão triaxial na superfície e imediatamente abaixo da roda; o caso 2 representa tração longitudinal combinada com compressão vertical na base da camada de concreto asfáltico e imediatamente abaixo da carga; o caso 3 é tração longitudinal ou transversal na superfície a certa distância da carga e, o caso 4 representa compressão longitudinal ou transversal na base da camada de concreto asfáltico a certa distância da carga.

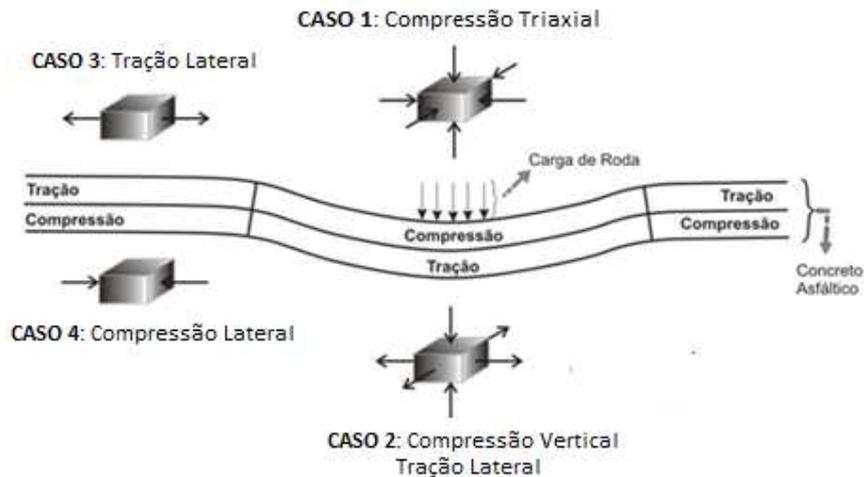


Figura 2: tensões desenvolvidas em uma camada de concreto asfáltico submetido a uma carga de roda (baseado em: ROQUE; BUTTLAR, 1992).

Diferentes estágios podem ocorrer durante o processo de fadiga em uma camada de revestimento asfáltico submetida a um carregamento cíclico, como pode ser observado na

Figura 3. A região I corresponde às primeiras mudanças microestruturais com a formação de microfissuras e, além disso, neste estágio a densidade dos deslocamentos cresce e se iniciam as zonas de danos irreversíveis. Já a região II é caracterizada pelas microfissuras que surgem devido à união das microfissuras. Por fim, na região III ocorre o crescimento das microfissuras conduzindo rapidamente ao colapso total da estrutura [BERNUCCI *et al.*, 2008].

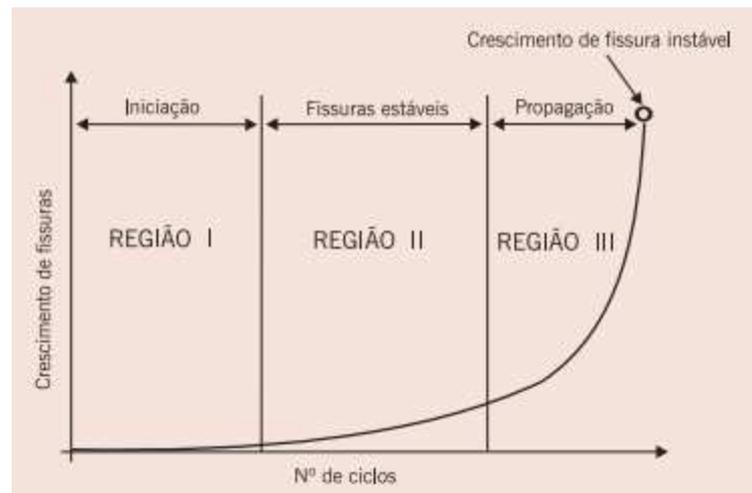


Figura 3: estágios que ocorrem em um processo de fadiga (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O ensaio geralmente empregado para caracterizar o fenômeno de fadiga consiste em submeter amostras de misturas asfálticas a solicitações repetidas, registrando o número de ciclos até atingir à ruptura. A análise da resistência à fadiga pode ser realizada de diferentes formas, seja através dos métodos tradicionais, considerando tensão de tração e deformação de tração inicial, ou da energia dissipada. As curvas clássicas que representam a vida de fadiga versus a tensão ou deformação de tração aplicada são denominadas de curvas de Wöhler e podem ser observadas através da Figura 4.

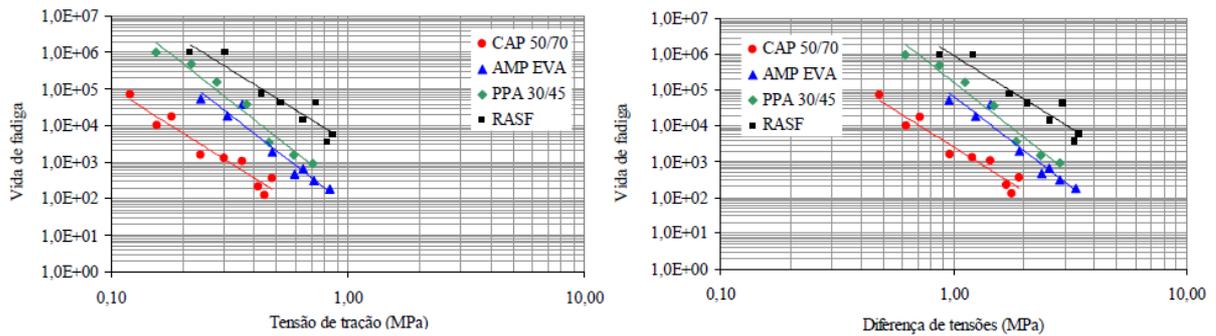


Figura 4: exemplos de curvas de Wöhler (ROHDE, 2007).

A vida de fadiga determinada nos ensaios pode ser representada em função da deformação ou tensão de tração através das Equações 1 e 2.

$$N = a * (\varepsilon)^b \quad (1)$$

$$N = a * (\sigma)^b \quad (2)$$

onde N é a vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga; ε é a deformação de tração controlada; σ é a tensão de tração controlada; a , b são constantes determinadas experimentalmente.

A resistência à fadiga de misturas asfálticas, também, pode ser caracterizada em função do nível de deformação aplicada e da rigidez inicial da mistura. O modelo apresentado na Equação 3 relaciona a resistência à fadiga com estas duas propriedades [PAIS *et al.* 1998].

$$N = a * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^b * \left(\frac{1}{S}\right)^c \quad (3)$$

onde S é a rigidez na flexão; a , b , c são constantes determinadas experimentalmente e as outras variáveis foram definidas anteriormente.

Nas misturas asfálticas a energia é dissipada durante o carregamento e a relaxação, isto ocorre em função do comportamento visco-elástico do material à temperatura ambiente. Em um material elástico a energia armazenada no sistema, quando carregada, é igual à área sob a curva tensão-deformação e durante o descarregamento toda a energia é recuperada. Já um material visco-elástico, quando descarregado, a curva tensão-deformação percorre um caminho diferente do seu carregamento, sendo este fenômeno conhecido como histerese, onde a energia dissipada é equivalente à área dentro do laço histerético (Figura 5).

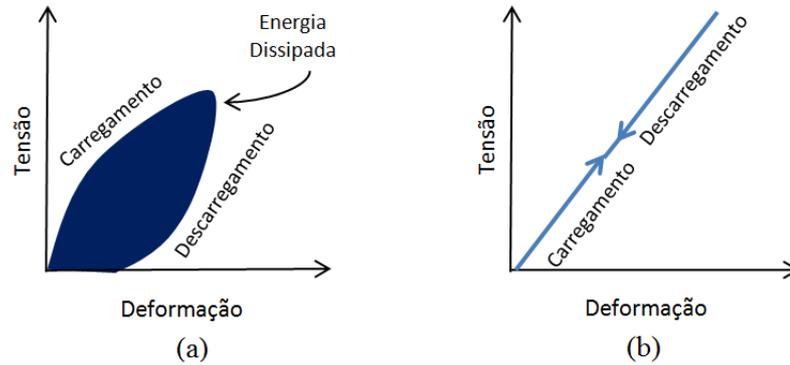


Figura 5: comportamento visco-elástico (a) e elástico (b) dos materiais na relação tensão-deformação (ROWE, 1996).

A energia dissipada durante um ciclo de carregamento pode ser determinada integrando o trabalho realizado ao longo de todo o período T , como mostra a Equação 4, sendo função da tensão e da deformação inicial. Tendo em vista à característica visco-elástica do material, a deformação possui uma defasagem em relação à tensão, sendo representada pelo ângulo de fase como mostra a Figura 6.

$$w_{ciclo} = \int_0^T \sigma(t) * d\varepsilon(t) \rightarrow w_{ciclo} = \pi * \varepsilon_i * \sigma_i * \sin(\varphi_i) \quad (4)$$

onde w_{ciclo} é a energia dissipada durante um ciclo; T é o período de um ciclo; ε_i é a deformação de tração por ciclo; σ_i é a tensão de tração por ciclo; φ_i é o ângulo de fase por ciclo.

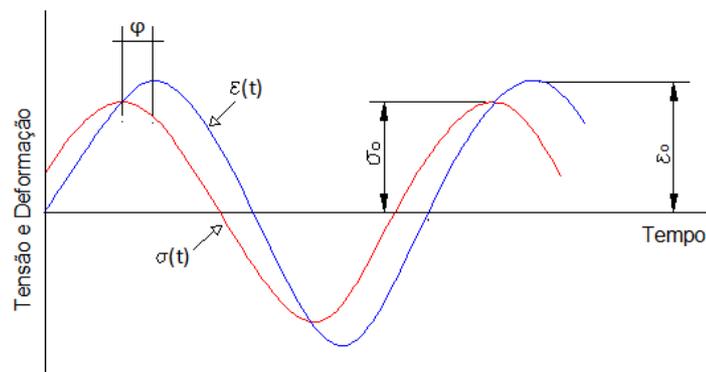


Figura 6: representação do comportamento da deformação (ε), tensão (σ) e ângulo de fase (φ) obtidos em um ensaio com carregamento dinâmico em um material visco-elástico.

Nos ensaios de fadiga à deformação controlada, a tensão aplicada decresce com o tempo, reduzindo assim a energia dissipada durante o ensaio. Enquanto nos ensaios a tensão controlada, a deformação cresce com o tempo, aumentando a energia dissipada com o número de ciclos, conforme mostra a Figura 7.

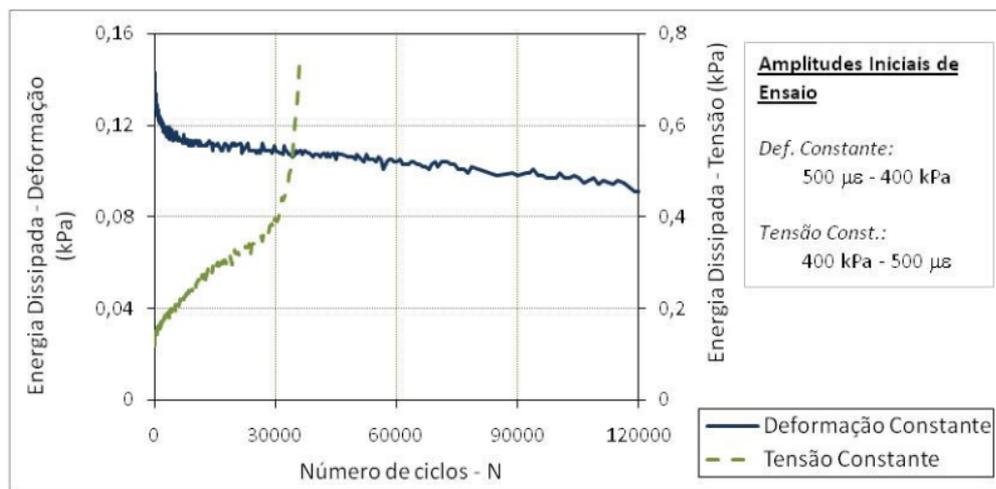


Figura 7: comportamento da energia dissipada durante os ensaios a deformação e a tensão controlada (MELLO, 2008).

Van Dijk e Visses (1977) apud Fontes (2009) sugeriram que através da energia dissipada é possível obter resultados sob a forma de uma única relação, para cada mistura, entre o número de aplicações de carga até a ruptura e a energia dissipada acumulada, relação esta que não depende do tipo de ensaio e do modo de carregamento. A relação entre a vida de fadiga e a energia dissipada acumulada foi determinada pela Equação 5.

$$w_N = A(N)^z \quad (5)$$

onde N é a vida de fadiga; w_N é a energia dissipada acumulada; A, z são coeficientes determinados experimentalmente.

A energia dissipada acumulada até a ruptura (Equação 6) foi definida pelo somatório da energia dissipada por cada ciclo.

$$w_N = \sum_{i=0}^N w_{ciclo} \quad (6)$$

Van Dijk e Visses (1977) apud Rowe (1996) desenvolveram uma razão para energia dissipada (ψ) (Equação 7), a qual depende do modo de carregamento e da rigidez da mistura.

$$\psi = \frac{w_0}{w_{fadiga}} \rightarrow w_0 = \pi * N * \sigma_0 * \varepsilon_0 * \sin \varphi_0 \quad (7)$$

Tayebali *et al.* (1994) desenvolveram um modelo de vida de fadiga baseado na energia dissipada inicial que ocorre durante os ensaios de fadiga a flexão. A Equação 8 relaciona o número de ciclos até a ruptura com a percentagem de vazios preenchidos com ligante e a energia dissipada inicial, considerando o ciclo de número 50 para determinar a energia dissipada no início do ensaio.

$$N = 2,365 * \exp^{0,069 * VFA} (w_0)^{-1,882} \quad R^2 = 0,76 \quad (8)$$

onde w_0 é a energia dissipada inicial; VFA são os vazios preenchidos com ligante.

2.2 DIFERENTES TIPOS DE ENSAIOS DE FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Ensaio laboratoriais são fundamentais para determinar os modelos de fadiga estabelecidos pela relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos de carga até atingir a ruptura ou um critério de ruptura. Estes ensaios consideram cargas repetidas com diferentes níveis de tensão ou deformação, devendo reproduzir o mais próximo possível as condições estabelecidas em campo para as misturas utilizadas nas camadas de concreto asfáltico. Os resultados dos ensaios de fadiga são influenciados pelas condições de carregamento e pelas configurações usadas; por isso, são extremamente importantes a calibração dos transdutores, o alinhamento das faces dos corpos de prova, a adequação dos sinais de carregamentos impostos, a rigidez do equipamento, suficiente para não influenciar nas leituras de força e deslocamento, e a verificação adequada da aquisição dos dados [DI BENEDETTO *et al.* 2004].

Diferentes tipos de ensaios podem ser realizados em laboratórios para estudar a resistência à fadiga em misturas asfálticas. A Figura 8, adaptada do trabalho de Di Benedetto *et al.* (2004), mostra as características dos ensaios utilizados em um projeto inter-laboratorial para determinar a resistência à fadiga de misturas asfálticas. Nota-se que somente nos ensaios uniaxiais de tração/compressão em corpos de prova cilíndricos é considerado um estado de deformação uniforme, denominado pelos autores de homogêneo. Os ensaios à flexão com vigotas, bem

como os de tração indireta são considerados não homogêneos, em virtude de que a tensão/deformação no material não é constante.

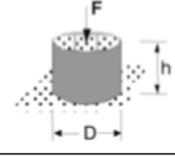
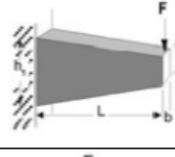
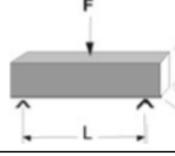
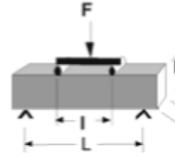
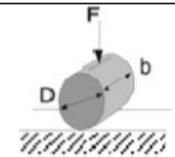
Tipo Teste	Geometria	Tipo Carregamento
T/C		Tensão – Compressão Homogêneo
2PB		Flexão - dois pontos Não Homogêneo
3PB		Flexão - três pontos Não Homogêneo
4PB		Flexão - quatro pontos Não Homogêneo
IDT		Tração indireta Não Homogêneo

Figura 8: características geométricas dos ensaios à fadiga comumente empregados (baseado em: DI BENEDETTO *et al.*, 2004).

Além dos ensaios tradicionais apresentados na Figura 8 tem-se buscado caracterizar a vida de fadiga de misturas asfálticas por meio da mecânica do dano contínuo, utilizando o modelo S-VECD (Simplified Viscoelastic Continuum Damage), proposto inicialmente por Kim e Little (1990) e modificado por Underwood e Kim (2009), considerando ensaios de tração direta cíclicos. No Brasil, Nascimento *et al.* (2014) vem utilizando esta metodologia para caracterizar misturas asfálticas.

Os ensaios laboratoriais empregados para estabelecer a resistência à fadiga de misturas asfálticas podem apresentar variações em função das condições do equipamento e do carregamento solicitado, necessitando assim, de uma análise criteriosa das respostas [MELLO, 2008]. A seguir é apresentado um resumo dos três tipos de ensaios comumente utilizados no

Brasil para determinar a vida de fadiga de materiais betuminosos em relação à configuração, tipo e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos de análise.

2.2.1 Ensaio de fadiga por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido pelo brasileiro Fernando Luiz Lobo B. Carneiro em 1943 para determinar, inicialmente, a resistência à tração (RT) de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland. No ensaio de compressão diametral utilizam-se corpos de prova cilíndricos que são carregados por compressão, atuando paralelamente ao plano diametral vertical desenvolvendo, assim, uma tensão de tração uniforme no corpo de prova, perpendicular à direção de aplicação da carga e ao longo do plano diametral vertical, como mostra a Figura 9.

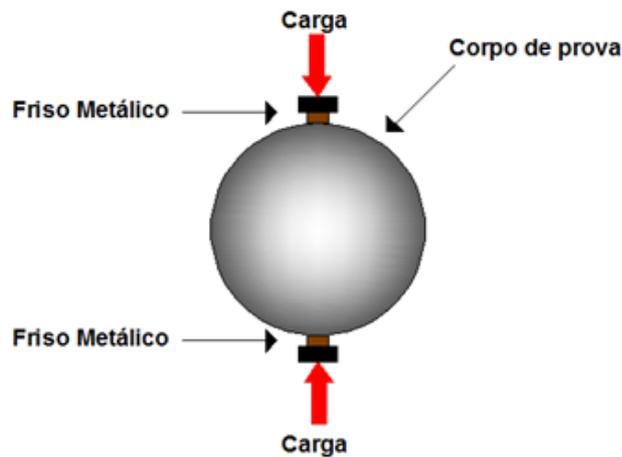


Figura 9: configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à compressão diametral.

No Brasil, o ensaio de fadiga por compressão diametral é ainda o mais utilizado para estimar a vida de fadiga de misturas asfálticas. Este ensaio é realizado a tensão controlada podendo ser executado no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de módulo de resiliência (MR) por compressão diametral, à temperatura controlada de 25°C. Neste ensaio, a carga aplicada conduz a níveis de tensões normais horizontais de 10% a 50% da tensão de ruptura estática, ocasionando o trincamento total e posterior ruptura do corpo de prova [MEDINA; MOTTA, 2005].

O carregamento aplicado no ensaio é com pulso de carga de duração igual a 0,10 segundo para 0,90 segundo de intervalo de repouso, representando o tempo de intervalo entre a passagem de uma roda e outra. O corpo de prova empregado é submetido a um estado biaxial de tensões e a frequência comumente utilizada é igual a 1Hz [PINTO, 1991; CERATTI, 1991; MEDINA e MOTTA, 2005].

Segundo Tangella *et al.* (1990) e Read e Collop (1997) as principais vantagens do ensaio de compressão diametral para obter a vida de fadiga de misturas asfálticas são a facilidade de execução do ensaio e confecção das amostras. O trincamento tem início em uma zona com estado uniforme de tensões, apresenta um estado biaxial de tensões que possibilita uma melhor representação das condições de campo. O ensaio pode ser realizado com corpos de prova moldados em laboratório ou extraídos de pista, e é de boa repetibilidade e reprodutibilidade, além de ser economicamente e comercialmente viável.

Em contraponto, este ensaio apresenta algumas desvantagens como o surgimento de deformações permanentes junto aos frisos de carregamento durante a execução do ensaio, o que é indesejável para a avaliação do potencial de fissuração das misturas asfálticas e faz com que a vida de fadiga do material seja subestimada.

O ensaio de fadiga por compressão diametral não pode ser realizado a deformação controlada e, além disso, a distribuição de deformações no centro do corpo de prova é razoavelmente não-linear [TANGELLA *et al.*, 1990; TAYEBALI *et al.*, 1994; READ e COLLOP, 1997], pois para taxas de tensão de tração acima de 30% começa a predominar a parcela viscosa do material, o que compromete o mecanismo de fadiga.

2.2.2 Ensaio de fadiga à flexão em corpos de prova trapezoidais

O ensaio de fadiga à flexão em corpos de prova trapezoidais foi primeiramente desenvolvido na França e normatizado pela norma NF P 98-261-1 em 1993. Posteriormente, foi preconizado pela norma europeia EN 12697:24. O ensaio é realizado em corpos de prova trapezoidais com dimensões de 70,0 mm (base maior) x 25,0 mm (base menor) x 25,0 mm (espessura) x 250,0 mm (altura), à temperatura controlada de 10°C e com frequência de 25Hz, sendo o carregamento aplicado sob o modo de deformação controlada ou tensão controlada [MOMM, 1998]. 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. Na Figura 10 é possível observar o equipamento empregado para o ensaio de fadiga à flexão em amostras trapezoidais.

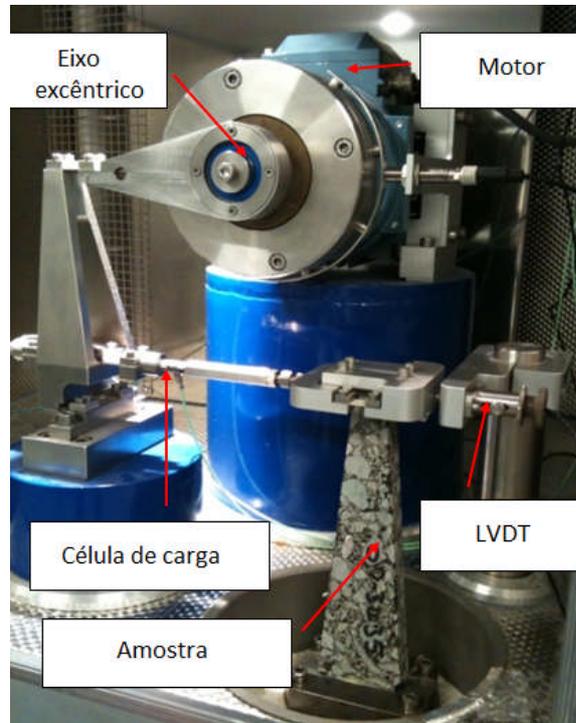


Figura 10: equipamento do ensaio de fadiga à flexão em amostras trapezoidais (GRENFELL, 2013).

O ensaio é finalizado quando a tensão aplicada é reduzida de 50% em relação a tensão inicial aplicada (medida após 100 ciclos de aplicação do carregamento). O modelo de fadiga para este ensaio é definido pelo gráfico obtido através do número de solicitações por nível de deformação de tração. Além disso, a norma específica que neste gráfico devem conter os valores de deformação relativos a um milhão de solicitações e que se deve empregar como critério de aceitação dos resultados o valor de 95% de intervalo de confiança para a variância do número de solicitações em cada ensaio [LOUREIRO, 2003]. A curva de fadiga é obtida a partir da execução do ensaio em três níveis de deformação, com seis corpos de prova por nível.

2.2.3 Ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos

O ensaio de flexão em viga quatro pontos é comumente empregado nos Estados Unidos, Europa e Austrália, sendo normatizado pelas normas da AASHTO T-321, ASTM D7460 e pela norma europeia EN 12697:24. No Brasil, Cerrati (1991) desenvolveu um equipamento de flexo-tração

de cargas repetidas para ensaiar vigas de solo-cimento com o objetivo de estudar o desempenho destas misturas à fadiga, enquanto Pinto (1991) realizou ensaios de fadiga à flexão em vigotas de misturas asfálticas.

Conforme pode ser visto na Figura 11, o ensaio consiste em submeter um corpo de prova, em formato prismático bi-apoiado, a cargas verticais nos dois terços médios da viga originando, assim, um estado de tração uniforme na parte central da amostra, entre os dois pontos de carregamento, zona onde o momento fletor é constante com esforços cortantes nulos. É considerado, assim, um ensaio adequado para representar o comportamento de campo em relação à resistência a fadiga das misturas asfálticas [TAYEBALI *et al.*, 1994].

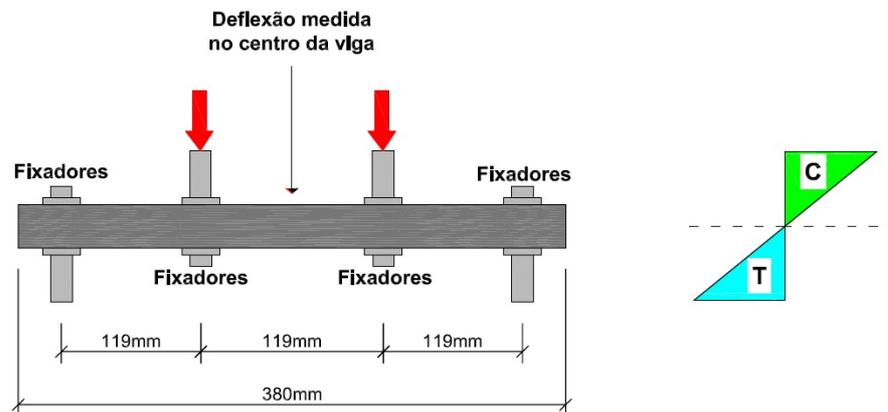


Figura 11: configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à flexão em vigas quatro pontos.

De acordo com Tayebali *et al.* (1994), a frequência de ensaio geralmente empregada é 10Hz, que é considerada adequada para proporcionar um ensaio rápido, representando ainda os pulsos de carga gerados pelo tráfego. O ensaio pode ser realizado a tensão controlada ou a deformação controlada e, também, deve haver um controle da temperatura através de câmara climatizada. Além disso, as dimensões das amostras variam de acordo com as normas que preconizam este ensaio, salientando que o mesmo não dispõe de uma normatização brasileira.

No ensaio de flexão em viga quatro pontos com carregamento à tensão controlada usualmente utiliza-se como critério de término do ensaio o número de solicitações até a ruptura total da amostra, enquanto que no modo de deformação controlada comumente o critério de término empregado é a redução em 50% da rigidez inicial da mistura, representada pelo módulo de rigidez à flexão inicial [LOUREIRO, 2003]. A trinca que pode surgir na viga no decorrer do

ensaio é geralmente única, sendo formada no local onde o momento fletor é constante e, com isso, reduz a dispersão dos resultados de ensaio.

Segundo Tangella *et al.* (1990) e Fontes (2009) as principais vantagens descritas para o ensaio de flexão em viga quatro pontos são: o ensaio é conhecido por diferentes países, sendo seu emprego generalizado e facilmente compreendido; estabelece um adequado fator de correlação entre resultados obtidos em laboratório com o comportamento em campo e os resultados dos ensaios de fadiga podem ser usados diretamente no dimensionamento estrutural de pavimentos; os ensaios podem ser realizados a deformação ou a tensão controlada; neste ensaio a ruptura tende a ocorrer em uma zona de tensão uniforme, sem a presença de tensões de cisalhamento, o que auxilia na redução do coeficiente de variação dos resultados e, portanto, necessita-se da moldagem de um menor número de amostra em comparação com o ensaio de flexão em corpos de prova trapezoidais.

Em contraponto às vantagens do ensaio de flexão em quatro pontos tem-se algumas limitações como: diferente do que ocorre na estrutura de um pavimento, o estado de tensão é essencialmente uniaxial; para validar os resultados obtidos em laboratório e comparar com o desempenho do pavimento em campo é necessário determinar um fator laboratório-campo, assim como em outros ensaios [TANGELLA *et al.* (1990); FONTES (2009)].

Vale salientar que além do estado biaxial de tensões, existem outras diferenças entre os ensaios de flexão em vigas e os ensaios de compressão diametral. Estas diferenças são contempladas pelo fato de que as deformações permanentes, não permitidas nos ensaios de flexão, são possíveis de ocorrer nos ensaios de compressão diametral. Em virtude disto, a vida de fadiga de misturas asfálticas no ensaio de flexão em vigas pode ser aproximadamente 40 vezes maior que a obtida no ensaio de compressão diametral [MOMM, 1998].

Estudos sobre ensaios de fadiga em misturas asfálticas utilizando vigotas vêm sendo apresentados em *Workshops* como a terceira conferência *Four-Point Bending* (4PB) realizada em Davis, Califórnia, EUA em 2012. De acordo com Pais e Harvey (2012), organizadores da conferência, o objetivo principal do evento foi reunir pesquisadores do mundo todo para discutir o uso do ensaio de flexão em quatro pontos para avaliar a rigidez e a resistência à fadiga de materiais betuminosos, evidenciando a importância e eficiência dos ensaios à flexão para melhor compreensão do fenômeno de fadiga em misturas asfálticas.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Segundo Tangella *et al.* (1990), os principais fatores que influenciam o comportamento à fadiga das misturas asfálticas são relativos à preparação dos corpos de prova, às características dos ensaios utilizados e os relacionados com as propriedades da mistura asfáltica. A seguir, é feita uma descrição dos fatores mais relevantes que influenciam a determinação da vida de fadiga dos materiais betuminosos.

2.3.1 Método de confecção dos corpos de prova

Na realização dos ensaios de fadiga em laboratório é necessário atender os critérios de homogeneidade dos corpos de prova confeccionados e, em virtude da dispersão que comumente ocorre nestes ensaios, torna-se necessário ensaiar um grande número de amostras. Existem diferentes métodos empregados para realizar a compactação das amostras em laboratório das quais se destacam: a compactação estática, compactação por impacto, compactação por amassamento, compactação giratória e compactação por rolamento, sendo que os três últimos métodos são considerados os que melhor reproduzem a compactação que ocorre em campo [IWANAGA, 2007].

O método de compactação estática consiste na colocação da mistura asfáltica em um molde com forma e tamanho desejados, comprimindo a mistura através da aplicação de carga estática gradual, procurando homogeneizar bem a mistura antes da compactação. A principal vantagem considerada neste processo é a sua simplicidade em comparação com os métodos de amassamento, compactação giratória e rolamento. Já a sua principal desvantagem está na orientação das partículas de agregado, a qual é diferente da obtida no campo e, com isso, não é possível simular com precisão as condições de campo.

No procedimento de compactação por impacto a mistura é compactada em um molde empregando aplicações repetidas de cargas de impacto através de um martelo de peso estipulado, sendo permitido a sua queda livre de uma distância pré-determinada. Além disso, o número de golpes é selecionado buscando obter densidades próximas as de campo. Este método é empregado na dosagem de misturas pelo método de Marshall. Tangella *et al.* (1990) salientam que a vantagem deste procedimento está relacionada ao fato de que a alta energia pode ser aplicada por um aparelho portátil, relativamente simples, de baixo custo e de acionamento

manual, tornando-o conveniente para moldar amostras em laboratório, bem como no campo. Em contraponto, a principal desvantagem é que a transferência de elevada energia no impacto pode causar uma diferença das misturas compactadas em campo em relação à película de ligante que envolve o agregado e a disposição das partículas dos mesmos, além de poder causar uma ruptura excessiva e degradação do agregado.

No compactador por amassamento a compactação é atingida por meio de carga repetitiva aplicada pela base do soquete de compactação de menor tamanho que a amostra a ser compactada. Este método de carregamento produz deformações e orientação das partículas semelhantes às que acontecem em campo, sendo utilizado na preparação de amostras de vigas para os ensaios de fadiga. Estudos de correlação foram realizados indicando que as amostras fabricadas em laboratórios apresentam propriedades físicas e mecânicas equivalentes às obtidas em campo [TANGELLA *et al.*, 1990].

Por meio do compactador de cisalhamento giratório a mistura asfáltica é compactada submetendo uma amostra cilíndrica ao movimento giratório de um molde de compactação, enquanto mantém-se a pressão, em cada extremidade da amostra, através de pistões de aço, com faces paralelas. A principal desvantagem considerada neste método é que as amostras de ensaio somente podem apresentar formato cilíndrico. De acordo com Tangella *et al.* (1990) estudos realizados constataram que a compactação giratória produz amostras representativas dos materiais compactados em campo, sendo que esta conclusão é baseada em um comparativo de vários parâmetros de rigidez e de deformação medidos em amostras de campo obtidas logo após a construção, com os mesmos parâmetros de amostras preparadas em laboratório e que apresentam os mesmos pesos específicos dos testemunhos de campo.

A compactação por rolamento é capaz de simular adequadamente as condições de compactação de campo, pois através desta técnica é possível alcançar uma adequada orientação das partículas do agregado e da densidade da mistura, ficando estes parâmetros próximos dos obtidos na compactação de campo [TANGELLA *et al.*, 1990]. Esta proximidade entre os parâmetros de laboratório com os de campo é alcançada através da compactação da mistura em uma grande área utilizando um rolo de compactação capaz de transmitir pressões semelhantes às que acontecem em campo. Após a compactação das placas, as amostras necessitam ser extraídas por meio de serras. A desvantagem deste procedimento é o fato de ser dispendioso e necessitar de equipamento especializado. Porém, para o emprego deste método de compactação em pequena escala é possível utilizar a mesa compactadora francesa.

Segundo Balbo (2000), no campo são muitos os fatores que auxiliam para que não ocorra uma grande homogeneidade do material após sua compactação; dentre elas destacam-se: as mudanças nos procedimentos de usinagem do material, variações na qualidade de materiais de diferentes fornecedores, segregação da mistura entre a usinagem e a aplicação em campo, bem como as diferentes formas de compactação. Estes fatores indicam a ocorrência de uma significativa heterogeneidade no material aplicado em campo e, portanto, as exigências laboratoriais para a realização dos ensaios de fadiga fazem com que seja obtida uma homogeneidade que não condiz com as condições de campo, principalmente em virtude da variação da percentagem do volume de vazios em campo.

2.3.2 Modos de carregamento

Nos ensaios para determinação da vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório o modo de carregamento empregado por ser do tipo tensão controlada (TC) ou deformação controlada (DC).

Nos ensaios em tensão controlada, a amplitude da carga aplicada permanece a um nível constante durante o período de ensaio. Como a amostra é progressivamente submetida a ciclos repetidos de carga, o deslocamento e, portanto, as deformações desenvolvidas aumentam progressivamente à medida que a rigidez da mistura asfáltica diminui. Busca-se com isso simular a passagem da roda de um veículo, em uma determinada seção do pavimento em campo, através da frequência de aplicação de carga [IWANAGA, 2007].

Em contraponto, no ensaio de fadiga à deformação controlada, a deformação é mantida constante no decorrer do ensaio e, como o início e propagação das fissuras ocorrem progressivamente na amostra, o nível de carga necessário para gerar a deformação constante reduz. Um comparativo do comportamento da tensão e da deformação ao longo do tempo de execução do ensaio de fadiga em função do modo de carregamento é mostrado na Figura 12, utilizando uma forma de carregamento senoidal.

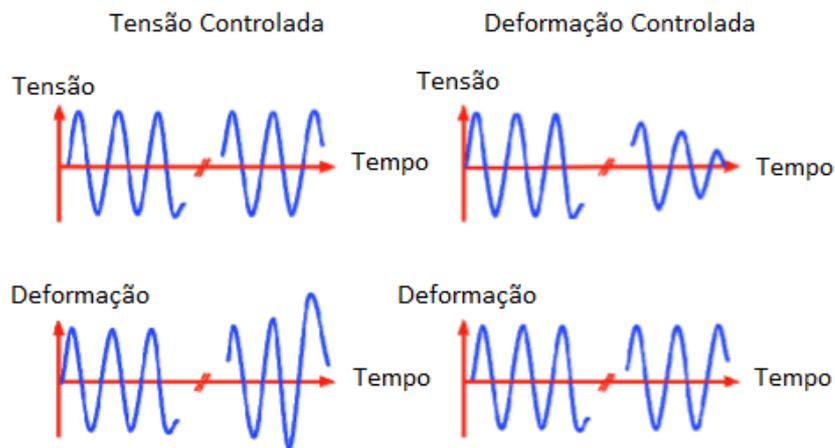


Figura 12: comparativo do comportamento a tensão controlada e deformação controlada em ensaios de fadiga (baseado em: MOFFATT; RABE, 2011).

Com o objetivo de determinar um critério de término dos ensaios de fadiga algumas normas estabelecem que no caso do ensaio à tensão controlada o fim do ensaio é geralmente definido pela ruptura da amostra. No ensaio à deformação controlada geralmente não ocorre uma ruptura bem definida da amostra ensaiada e a ruptura é, muitas vezes, caracterizada como uma redução de 50% da rigidez inicial da mistura.

No ensaio a deformação controlada a rigidez da mistura controla os níveis de tensão dentro da amostra e, por consequência, a taxa de propagação das fissuras. Por outro lado, nos ensaios à tensão controlada, a taxa de propagação das fissuras é mais elevada, conduzindo a ensaios com menor prazo duração. Considera-se, geralmente, que o ensaio de deformação controlada simule mais adequadamente as condições predominantes em camadas de revestimento asfáltico delgadas e, o ensaio de tensão controlada é mais indicado para simular as condições de camadas espessas de revestimento. Segundo Baburamani (1999) as espessuras que diferem camadas delgadas de espessas variam, mas é comumente empregado que as camadas delgadas apresentem espessuras menores do que 80 mm e camadas espessas são denominadas por espessuras de revestimento asfáltico maiores que 80 mm.

2.3.3 Variáveis da mistura

O desempenho de misturas asfálticas em relação à fadiga é influenciado por fatores que fazem parte da mistura, como viscosidade, teor de ligante, distribuição granulométrica do agregado, volume de vazios. Na Tabela 1 é apresentado um resumo do efeito destes fatores no comportamento das misturas asfálticas.

Tabela 1: fatores que influenciam a rigidez e a vida de fadiga das misturas asfálticas.

Fator	Variação do fator	Efeito da variação do fator		
		Rigidez	Vida de fadiga a tensão controlada	Vida de fadiga a deformação controlada
Viscosidade	Aumento	Aumento	Aumento	Diminuição
Teor de ligante	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento
Distribuição granulométrica	Aberta para contínua	Aumento	Aumento	Diminuição
Volume de vazios	Diminuição	Aumento	Aumento	Aumento

(fonte: Tangella *et al.*, 1990)

Segundo Tangella *et al.* (1990) os dois principais fatores que afetam a desempenho à fadiga e que estão relacionados com a composição das misturas asfálticas são o teor de ligante e o volume de vazios, sendo que a distribuição do agregado apresenta uma menor influência em comparação com os outros dois fatores.

Estudos têm mostrado que o acréscimo do teor de ligante na mistura asfáltica, até certo limite, tem melhorado significativamente o desempenho à fadiga, em virtude do preenchimento dos vazios da mistura. Também, deve-se levar em consideração o tipo de ligante empregado, pois pesquisas relatam que ligantes modificados por polímeros e borracha tornam as misturas mais flexíveis, fazendo com que a vida de fadiga obtida em ensaios à tensão controlada aumente em relação às misturas com ligantes convencionais [IWANAGA, 2007].

A importância de considerar o efeito do volume de vazios da mistura em relação à fadiga está no fato de que o aumento da rigidez da mistura é proporcional ao acréscimo da densidade aparente e diminuição do volume de vazios. Além disso, a redução deste fator é responsável pelo decréscimo das tensões que atuam na combinação ligante-filer originando, assim, um acréscimo na vida de fadiga da mistura asfáltica [SANTOS, 2005].

Segundo Harvey *et al.* (1995), aumentando o teor de ligante e diminuindo o volume de vazios, considerando os limites práticos, obtém-se aumento da vida de fadiga do pavimento. Deve-se considerar que em uma mistura o teor máximo de ligante e o volume de vazios mínimo são limitados, não só pela economia, mas também por outros mecanismos de deterioração, especificamente as deformações plásticas das camadas asfálticas, a instabilidade e a exsudação.

As propriedades dos agregados e sua granulometria influenciam a vida de fadiga das misturas asfálticas. Kim *et al.* (1992) constataram que agregados com maior microtextura aumentam a

resistência à fadiga das misturas, isto se deve ao fato de haver uma maior adesividade do ligante asfáltico. Agregados de formato angular, também, melhoram o desempenho da vida de fadiga em comparação com os agregados arredondados.

2.3.4 Carregamento e variáveis ambientais

O tipo de carregamento que acontece no pavimento em função da ação do tráfego é complicado de ser reproduzido em laboratório. No momento em que um rodado 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 período de 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. Apesar disso, é possível analisar os módulos e as características de fadiga através de diferentes condições de carregamento [CAPITÃO, 2003].

Neste sentido, a forma, duração e frequência do pulso de carga utilizado em laboratório e a temperatura de ensaio influenciam significativamente a vida de fadiga de misturas asfálticas. A temperatura, em função da grande susceptibilidade térmica das misturas, afeta o desempenho a fadiga, que varia de acordo com a variação da rigidez das misturas em diferentes níveis de temperatura [PINTO, 1991]. As principais formas de pulso de carga empregadas nos ensaios de fadiga em misturas são senoidal, semi-seno-verso (*haversine*), cíclica e retangular, sendo suas configurações em relação à tensão e a deformação em função do tempo demonstradas na Figura 13.

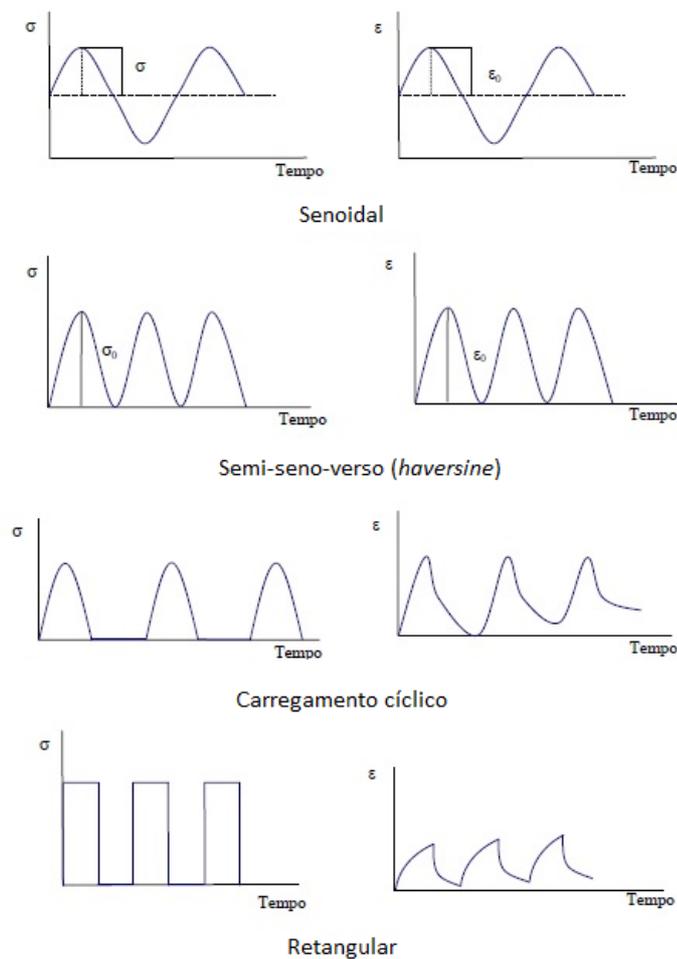


Figura 13: formas de carregamento empregadas em ensaios de fadiga (baseado em: SAID, 1988, apud FONTES, 2009).

A forma de carregamento senoidal 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 (*haversine*) ocorre quando o equipamento aplica uma mesma amplitude de deslocamento em um único sentido, inferior ou superior.

Outra variável fundamental para o desempenho das misturas asfálticas é o envelhecimento. A influência do envelhecimento na vida de fadiga está diretamente relacionada com a rigidez das misturas e suas propriedades de fadiga, bem como os módulos de resiliência das camadas que compõem o pavimento. Tonial *et al.* (2001) relatam que os principais fatores de influência no envelhecimento do ligante são a temperatura e a exposição ao ar, levando à oxidação do ligante e, por conseguinte, ao aumento da sua consistência, causando uma diminuição na vida de fadiga da mistura.

2.4 NORMALIZAÇÃO DO ENSAIO DE FADIGA A FLEXÃO EM VIGA QUATRO PONTOS

Faz-se nesse item uma descrição de algumas normas de ensaio em viga quatro pontos para determinar a vida de fadiga de misturas asfálticas, ressaltando alguns pontos chaves, principalmente em relação ao tipo de equipamento solicitado, os procedimentos de ensaio e os critérios de definição de ruptura por fadiga. Salienta-se que o Brasil não possui uma normatização para a realização deste ensaio tornando-se, assim, necessário usar procedimentos especificados por outros países, onde o ensaio a fadiga em viga quatro pontos é comumente empregado. Na Tabela 2 consta um breve resumo dos principais critérios estabelecidos para o ensaio à flexão em quatro pontos pelas diferentes normas utilizadas.

Tabela 2: comparativo entre as normas do ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos.

Crítérios/Normas	AASHTO T 321-07	Proposta AASHTO T 321	ASTM D7460-10	EN 12697-24: 2004
Condição de ruptura	Redução em 50% da Rigidez Inicial	Ponto máximo da curva: Rigidez na flexão x Ciclos vs N° Ciclos	Pico da curva módulo normalizado x Ciclos vs N° Ciclos	Redução em 50% da Rigidez Inicial ou Ruptura da amostra
Modo de carregamento	Deformação controlada	Deformação controlada	Deformação controlada	Deformação ou tensão controlada
Limites de deformação controlada	250 µε - 750 µε	250 µε - 2000 µε	50 µε - 3000 µε	Níveis de deformação em que a vida de fadiga fique entre 10 ⁴ a 2x10 ⁶
Limites de tensão controlada	-	-	-	Níveis de tensão em que a vida de fadiga fique entre 10 ⁴ a 2x10 ⁶
Controle de temperatura	20°C ± 0,5°C	20°C ± 0,5°C	20°C ± 0,5°C	0°C ou 20°C
Tempo em estufa antes do início do ensaio	2 horas	2 horas	1,5 a 2 horas	2 h para 0°C e 1 h para 20°C
Comprimento vigotas (mm)	380 ± 6	380 ± 6	380 ± 6	Não deve exceder o Comprimento Efetivo em mais de 10%
Largura vigota (mm)	63 ± 6	63 ± 6	63 ± 2	> 3 x Dmax
Espessura vigota (mm)	50 ± 6	50 ± 6	50 ± 2	> 3 x Dmax
Mínimo faceamento dos lados da vigota (mm)	6	6	6	6
Determinação da rigidez inicial	50 ciclos	50 ciclos	50 ciclos	100 ciclos
Forma de carregamento	Senoidal	Senoidal	Semi-seno-verso	Senoidal
Frequência (Hz)	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 60
Número de amostras por nível	3	3	9	6

2.4.1 Norma norte-americana AASHTO T-321-07

Esta norma determina os procedimentos para obter a vida de fadiga de misturas asfálticas, onde corpos de prova no formato de vigas são submetidos à flexão. Pode ser considerada uma norma de médio grau de detalhamento. O ensaio deve ocorrer à temperatura controlada de 20 ± 0,5°C e com frequência variando entre 5 a 10Hz. Preconiza-se que a forma do pulso de carga empregado seja do tipo senoidal. O equipamento utilizado no ensaio deve possuir funções

capazes de produzir a forma de onda descrita, além de apresentar livre rotação e translação horizontal de todas as cargas e pontos de reação, conforme mostrado na Figura 14.

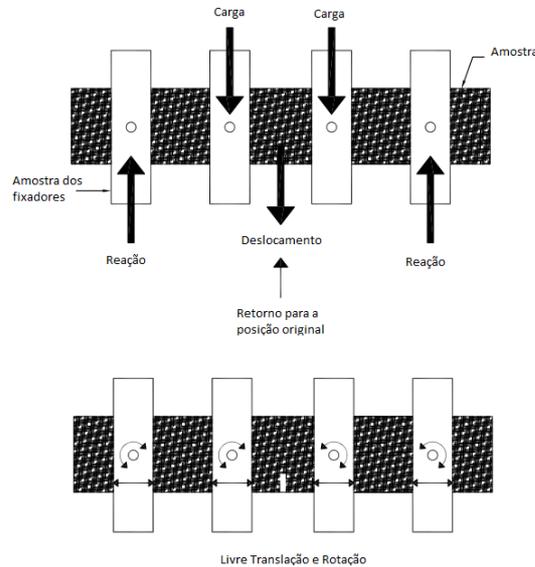


Figura 14: características do equipamento para o ensaio de fadiga em viga quatro pontos (baseada em: AASHTO T-321-07).

No ensaio, a cada ciclo de carga, o sistema de controle e aquisição de dados deve medir o deslocamento no centro da viga, registrando a 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.

Deve-se atentar para o posicionamento correto da amostra no equipamento. Os fixadores precisam ser abertos e a amostra colocada na posição correta, salientando-se que após a colocação da viga no pórtico deve ser usado um gabarito para assegurar o espaçamento horizontal correto dos fixadores. Logo após a este procedimento, os fixadores externos devem ser os primeiros a serem fechados, aplicando pressão suficiente para manter a amostra no local

e, em seguida, os fixadores internos são fechados. Este procedimento pode ser visualizado através da Figura 15.

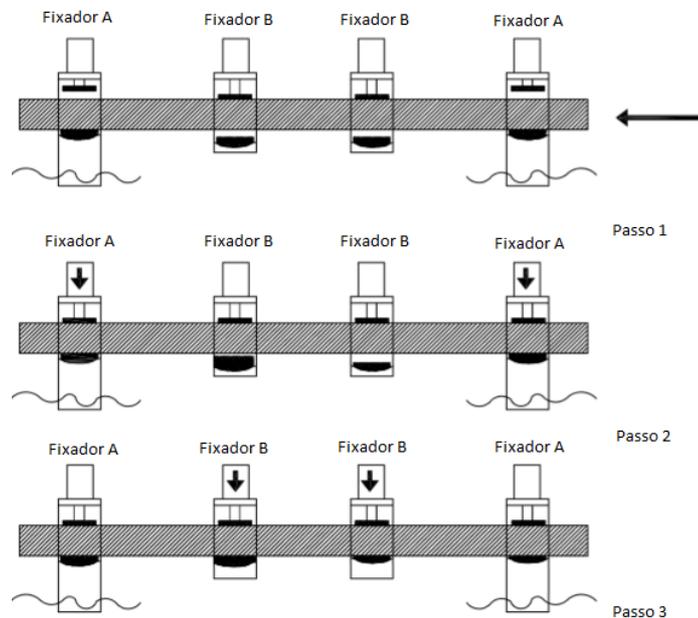


Figura 15: procedimento de fixação da amostra no equipamento para ensaio de fadiga em viga quatro pontos (baseada em: AASHTO T-321-07).

Na realização do ensaio em deformação controlada a norma recomenda que a deformação inicial especificada esteja no intervalo entre 250 a 750 microdeformações e a rigidez inicial deve ser determinada quando forem aplicados aproximadamente 50 ciclos de carga. A ruptura é definida na norma como a redução de 50% da rigidez inicial da amostra.

Todos os lados da amostra devem ser faceados em 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, 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 $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ duas horas antes do início do ensaio para garantir a estabilidade de temperatura.

Nesta norma, também, constam as equações para se determinar a máxima tensão de tração, máxima deformação de tração, rigidez à flexão, ângulo de fase, energia dissipada e energia dissipada acumulada para o intervalo de ciclos de carga determinado pelo operador.

2.4.2 Proposta norma norte-americana AASHTO T-321

A norma norte-americana AASHTO T-321, aprovada em 2007, encontra-se em revisão e os principais itens que estão em discussão para alteração são os seguintes:

- a) no ensaio realizado a deformação controlada recomenda-se o emprego de uma deformação inicial entre 250 a 2000 microdeformações;
- b) nesta proposta não estão contempladas as equações para o cálculo da energia dissipada por ciclo e a energia dissipada acumulada;
- c) o término da coleta de dados e encerramento do ensaio deve dar-se no ponto em que o valor de pico da curva – rigidez à flexão x ciclos de carga (S_xn) versus número de ciclos - reduz em 15%;
- d) a ruptura é definida como o ponto máximo da curva – rigidez à flexão x ciclos de carga (S_xn) versus número de ciclos, conforme mostra a Figura 16.

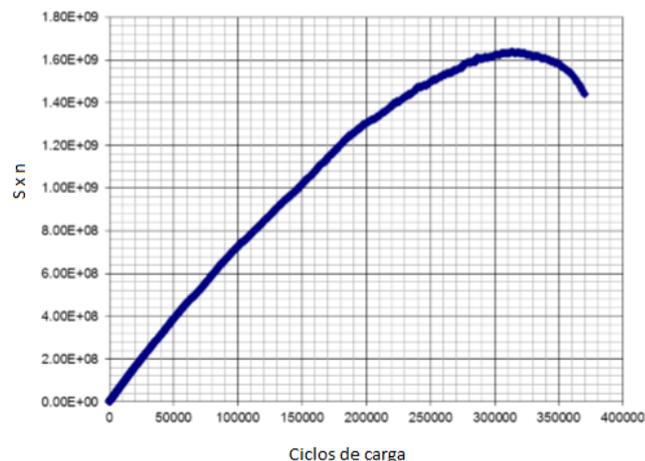


Figura 16: rigidez à flexão x ciclos de carga (S_xn) versus número de ciclos (baseada em: AASHTO T-321).

Salienta-se que os outros procedimentos e especificações relatados no texto sobre a versão de 2007 desta norma permanecem inalterados na proposta que está em fase de aprovação.

2.4.3 Norma norte-americana ASTM D 7460

Na norma ASTM D 7460, de 2008 e revista em 2010, alguns dos procedimentos, especificações e características do equipamento descritos para o ensaio de fadiga em viga quatro pontos são os mesmos relatados nas normas anteriores. Pode ser considerada uma norma com alto grau de detalhamento.

O ensaio deve ser realizado com pulso de carregamento de formato semi-seno-verso à temperatura controlada de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ e com frequência variando entre 5 a 10Hz. 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 ponto de ruptura corresponde ao máximo valor do módulo normalizado x ciclo de carga quando plotado versus número de ciclos (Figura 17).

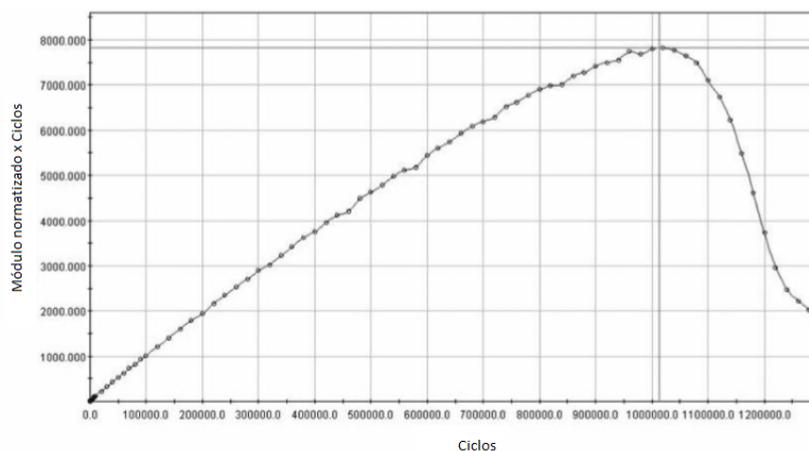


Figura 17: módulo normalizado x ciclo de carga versus número de ciclos (baseada em: ASTM D 7460).

O módulo normalizado x ciclo de carga (NM) é determinado pela Equação 9.

$$NM = \frac{S_i \cdot N_i}{S_0 \cdot N_0} \quad (9)$$

onde S_i é a rigidez à flexão da viga para o ciclo i em Pa, N_i é o ciclo i , S_0 é a rigidez à flexão inicial da viga em Pa estimada no ciclo 50, aproximadamente, e N_0 é o real número do ciclo onde a rigidez à flexão inicial da viga é determinada.

Além da Equação 9, outras são apresentadas na norma para determinação da máxima tensão de tração, máxima deformação de tração, rigidez à flexão e o ângulo de fase para o intervalo de ciclos de carga estipulado.

Esta norma, também, recomenda facear todos os lados da amostra em 6 mm ficando as dimensões finais requeridas de 380 ± 6 mm de comprimento, 50 ± 2 mm de altura, 63 ± 2 mm de largura, sendo preconizada a moldagem de nove vigas idênticas, onde no mínimo seis delas devem ser ensaiadas a diferentes níveis de deformação a fim de desenvolver a curva de fadiga, as amostras extras podem ser testadas caso algum dado apresente alguma discrepância ou a alguma viga rompa diretamente nos fixadores. Além disso, as amostras devem ser colocadas em uma câmara climática a $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ por um período de 1,5 horas a 2 horas antes do início do ensaio.

2.4.4 Norma europeia EN 12697-24:2004

A norma EN 12697-24 descreve cinco tipos de ensaio para a obtenção da vida de fadiga de misturas asfálticas e dentre eles está o ensaio de fadiga a quatro pontos em vigas prismáticas. Pode ser considerada uma norma de alto grau de detalhamento em relação aos procedimentos e as equações estabelecidas para os cálculos dos principais parâmetros necessários para determinar a resistência à fadiga de misturas asfálticas. As características do equipamento são as mesmas comentadas nas normas já relatadas.

É recomendada a realização do ensaio com carregamento de forma senoidal à temperatura controlada de 0°C ou 20°C e com frequência variando entre 5 a 60 Hz. Os ensaios podem ser realizados a tensão ou deformação controlada, onde devem ser estipulados três diferentes níveis de deformação ou tensão, 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 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, sendo que a rigidez à flexão inicial é determinada no ciclo de carga número 100.

Esta norma preconiza que a altura e largura dos corpos de prova devem ser no mínimo três vezes a dimensão máxima do agregado, 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 ainda que o comprimento total não deva exceder o comprimento efetivo em mais de

10%. Os corpos de prova são serradas de placas moldadas em laboratório ou em campo, deixando um espaço de no mínimo 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 diferem em menos de 0,25%.

As amostras devem ser armazenadas em um suporte reforçado, plano e limpo, não podendo ficar empilhadas. As vigas que são submetidas a ensaio imediato devem ser armazenadas em local seco à temperatura entre 0°C e 20°C. Enquanto que para as amostras armazenadas por um período superior a um mês, a temperatura na câmara climática deve estar entre 0°C e 5°C. A umidade relativa do ar na sala de armazenamento não deve exceder a 80% e as amostras devem ser ensaiadas entre duas e oito semanas após a data de corte.

A norma estabelece que se a temperatura de ensaio for 0°C as amostras devem ser colocadas em uma câmara climática por um período de no mínimo 2 horas antes do início do ensaio e se a temperatura de ensaio for 20°C as amostras devem permanecer por no mínimo 1 hora na câmara climática. Salienta-se que este período de aclimatização não deve durar mais do que 6 horas.

2.5 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

A Universidade da Califórnia localizada em Berkeley, Califórnia, nos Estados Unidos, tem utilizado intensamente o ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos para determinar a resistência à fadiga de misturas asfálticas. O sistema de moldes para confecção das vigas prismáticas em laboratório empregado é composto por um conjunto de chapas metálicas, formando três gabaritos que se diferem pelo tamanho total das placas. Na Figura 18 é possível observar a configuração deste sistema de moldes, salientando-se que ele deve apresentar uma resistência capaz de suportar um rolo compactador.



Figura 18: sistema de moldes empregados pela Universidade da Califórnia para confecção de placas em laboratório destinadas a ensaios de fadiga a flexão em quatro pontos.

Este sistema de molde apresenta gabaritos com configurações diferentes, apresentando um gabarito único e outros dois gabaritos divididos por dois vãos. Esta modificação no formato dos gabaritos torna possível moldar placas de misturas asfálticas de tamanhos diferentes, em virtude dos pesos das mesmas e da quantidade de amostra requerida para um determinado ensaio. A Figura 19 mostra em detalhe o gabarito dividido por dois vãos, onde é possível moldar duas placas de menor tamanho e peso em comparação com o gabarito de formato único mostrado na Figura 18.



Figura 19: detalhe do molde empregado pela Universidade da Califórnia para confecção de placa para serrar quatro vigas, sendo obtidas duas vigas por vão.

O processo de compactação ocorre com o preenchimento dos gabaritos com a mistura asfáltica e, logo após, a realização da compactação por meio de rolos compactadores semelhantes aos utilizados em campo, conforme mostra a Figura 20. Ressalta-se o cuidado que se deve ter com

a densidade da mistura para que não ocorra uma grande concentração de volume de vazios nas placas.



Figura 20: compactação das placas de misturas asfálticas utilizando rolo compactador, Universidade da Califórnia.

O sistema de moldes para confecção de placas de misturas asfálticas, também, pode ser montado em campo, como mostrado na Figura 21. Nesta configuração de montagem dos moldes é possível utilizar trilhos de trem para fazer o suporte externo da pista de concreto onde os gabaritos, para moldagem das placas, são instalados na parte central da pista com o intuito de deixar livre o espaço para passagem do rolo compactador.



Figura 21: sistema de moldes empregados pela Universidade da Califórnia para confecção de placas em campo destinadas a ensaios de fadiga a quatro pontos.

Após o processo de moldagem e cura, as placas devem ser retiradas dos gabaritos. Dependendo do tamanho e peso das placas, este processo de retirada pode ser trabalhoso, dispendioso e necessitar de equipamentos especiais para fazer essa remoção. A Figura 22 mostra o processo de retirada da placa de mistura asfáltica, com o auxílio de um de guindaste, de um molde confeccionado em campo.



Figura 22: sistema utilizado para a retirada das placas de misturas asfálticas moldadas em campo, Universidade da Califórnia.

As placas de mistura asfáltica após serem retiradas dos moldes devem ser serradas para obterem-se as vigas, como mostrado na Figura 23. As vigas prismáticas devem ser faceadas em no mínimo 6 mm de cada lado, visando o alinhamento dos lados e a redução do volume de vazios, devido as recomendações feitas por normas que preconizam os ensaios de fadiga em vigas.



Figura 23: amostras para o ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos, após o processo de corte, Universidade da Califórnia.

Fontes (2009) moldou placas de misturas asfálticas em laboratório, para obter corpos de prova em formato de vigas para ensaiar à flexão em quatro pontos, utilizando moldes metálicos e rolo liso de médio porte (Figura 24). A compactação foi realizada até conseguir atingir a densidade aparente de projeto da mistura empregada, sendo que após o processo de compactação as placas permaneceram no molde até completo resfriamento e, posteriormente as mesmas foram serradas para obtenção das vigas.



Figura 24: sistema de moldagem e compactação de vigas utilizado por Fontes (2009).

Os corpos de prova prismáticos, também, podem ser moldados por unidade através de um molde metálico que é submetido a uma pequena pressão de 1,40kPa por meio de uma placa rígida para acomodação do material, aplicando na amostra um carregamento harmônico (*haversine*) à tensão controlada, com uma amplitude de 1,40MPa e frequência de 2,0Hz conforme mostra a Figura 25. Este procedimento de moldagem e compactação foi empregado por Mello (2008). Após o processo de compactação a viga é serrada nas dimensões especificadas por norma obtendo, assim, superfícies lisas que visam reduzir a variabilidade dos ensaios e eliminar possíveis microfissuras nas laterais dos corpos de prova que foram produzidas durante a compactação da mistura asfáltica.

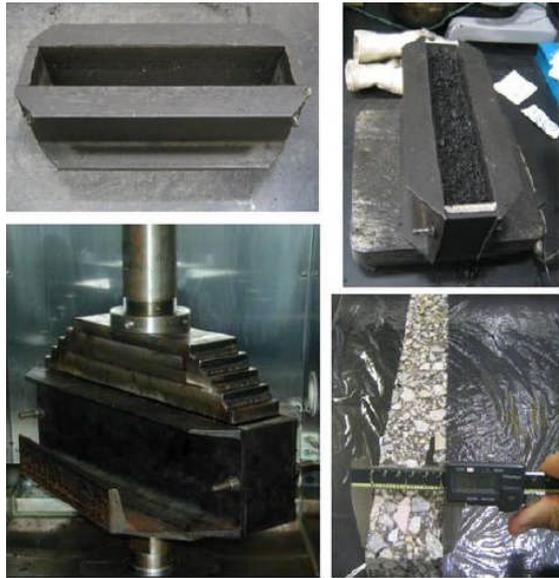


Figura 25: compactação e moldagem de corpos de prova em formato de viga empregado por Mello (2008).

As placas de misturas asfálticas podem ser, também, compactadas utilizando uma mesa compactadora tipo LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, Figura 26. A mistura asfáltica é compactada por amassamento através de uma sequência de passagens de um pneu padronizado, sendo possível determinar a pressão de inflação dos pneus, a carga de eixo, o número de passagens e o local destas passadas com o intuito de sobrepor parcialmente o local de uma passada em relação à anteriormente aplicada, reproduzindo o modo de compactação em campo [MOURA, 2010].



Figura 26: mesa compactadora francesa tipo LCPC (Moura, 2010).

2.6 MÓDULO COMPLEXO

A caracterização dos materiais visco-elásticos pode ser realizada através do módulo complexo (E^*) e do ângulo de fase (φ). Estas propriedades estabelecem respostas mecânicas sob condições de sollicitações harmônicas em regime constante.

O módulo complexo (E^*) é obtido pela relação entre a amplitude complexa de uma tensão senoidal a uma velocidade angular (ω) aplicada a um material visco-elástico linear e a amplitude complexa de uma deformação senoidal [KIM, 2009].

Em função das misturas asfálticas possuírem 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 necessário uma varredura de frequências e temperaturas representativas das condições de temperatura e velocidade de aplicação do carregamento em campo.

A determinação do módulo complexo consiste na aplicação de uma sequência de sollicitações senoidais com diferentes frequências, podendo apresentar uma variação entre 0,1Hz e 30Hz e, também, diferentes temperaturas, geralmente no intervalo entre -15°C e 40°C, em função da metodologia de ensaio utilizada [BRITO, 2006].

Ao analisar uma mistura asfáltica no domínio das baixas deformações, onde se espera um comportamento visco-elástico linear, uma tensão senoidal imposta (Equação 10) origina uma resposta de deformação também senoidal (Equação 11), mas defasada por um ângulo de fase [DI BENEDETTO *et al.*, 2001].

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (11)$$

onde ε_0 é a amplitude de deformação, σ_0 é a amplitude de tensão, ω ($2\pi F_r$) é a velocidade angular, t é o tempo e φ é o ângulo de fase.

Em função do módulo complexo, definido pela Equação 12, por convenção ser considerado um número complexo, ele possui partes real e imaginária. O módulo complexo por ser dividido em duas componentes E_1 e E_2 , as quais representam à energia armazenada no material e dissipada por atrito interno durante um ciclo, sendo denominadas de módulo de armazenagem (Equação

13) e módulo de perda (Equação 14), respectivamente. A componente E_1 é denominada de módulo elástico real, pois representa a parte real do módulo e está associada ao comportamento elástico do material, permitindo avaliar a parte recuperável da energia armazenada. Já a componente E_2 é conhecida como o módulo da perda, sendo a parte imaginária do módulo e está associada ao comportamento viscoso irreversível do material devido a uma dissipação de energia, representando assim, a energia produzida por atrito interno no material [MINHOTO, 2005].

$$E^* = E_1 + i.E_2 \quad (12)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} . \cos\varphi = |E^*|. \cos\varphi \quad (13)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} . \sen\varphi = |E^*|. \sen\varphi \quad (14)$$

onde E^* é o módulo complexo, E_1 e E_2 são os módulos de armazenamento e de perda.

O valor absoluto do módulo complexo é conhecido como módulo dinâmico $|E^*|$, sendo definido como a relação entre a tensão e deformação como mostra a Equação 15. Torna-se importante ressaltar que o valor absoluto do módulo complexo é definido na literatura tanto como módulo dinâmico como também módulo de rigidez ou, ainda, módulo de deformabilidade. Contudo, ainda há outros entendimentos para as mesmas denominações como: módulo de rigidez – propriedade determinada por meio de ensaios resilientes, porém nos quais a determinação do deslocamento resiliente contempla a parcela elástica mais a parcela tempo-dependente, ou ainda, é utilizado para definir o módulo obtido através de carregamento estático; módulo dinâmico – termo empregado também para definir qualquer tipo de módulo determinado em uma condição não-estática [BRITO, 2006].

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \quad \text{para } \varphi = 0 \quad (15)$$

onde $|E^*|$ é o módulo dinâmico.

O módulo complexo, também, pode ser apresentado pelo seu valor em módulo $|E^*|$ e pelo seu ângulo de fase (φ), respectivamente, conforme mostram as Equações 16 e 17.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (16)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (17)$$

O comportamento reológico das misturas asfálticas pode ser representado em função da variação da temperatura e da frequência, da relação entre as partes reais e imaginárias, dos módulos e ângulo de fase [MOMM, 1998]. Os resultados $|E^*|$, φ , E_1 e E_2 são geralmente mostrados através das representações clássicas nas curvas isotérmica, frequência-temperatura, isócrona, espaço de Black e cole-cole.

2.6.1 Curvas isotérmicas

As curvas isotérmicas são obtidas através da representação gráfica do valor absoluto do módulo complexo em função da frequência aplicada para cada nível de temperatura estabelecida para o ensaio, geralmente em escala logarítmica. Na Figura 27 é apresentado um exemplo de curvas isotérmicas.

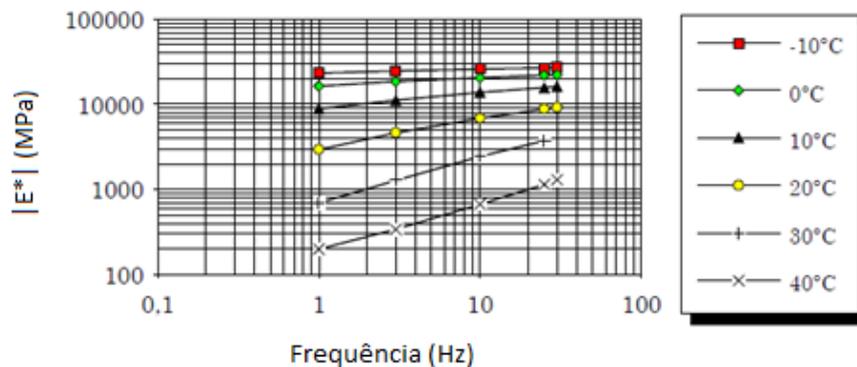


Figura 27: representação do módulo complexo pelas curvas isotérmicas (De La Roche, 1996).

A mudança do módulo em função da frequência possibilita analisar a susceptibilidade cinética das misturas asfálticas [BAAJ, 2002].

2.6.2 Curva equivalência frequência-temperatura ou curva mestra

Considerando a equivalência frequência-temperatura é possível obter, através da translação horizontal de cada curva isotérmica, uma curva contínua na escala logarítmica, denominada de curva mestra. Esta curva permite obter valores de módulo para frequências que não são alcançadas em ensaios, conforme mostra o exemplo da Figura 28.

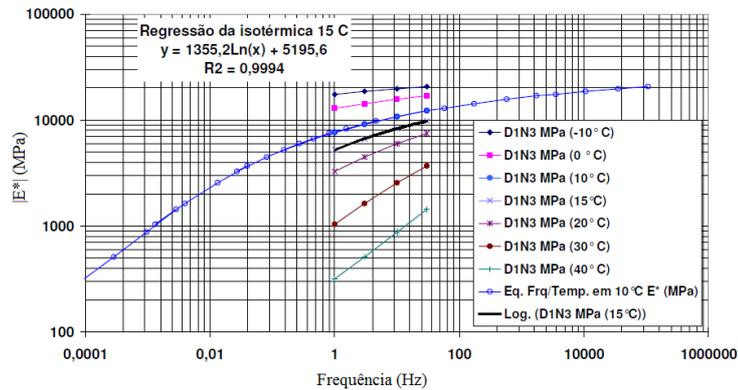


Figura 28: curvas de equivalência freqüência–temperatura (Momm, 1998).

A curva equivalência freqüência–temperatura (curva mestra) representa a viscoelasticidade da mistura asfáltica. Assim, uma curva horizontal caracteriza uma mistura com comportamento puramente elástico. Já uma curva próxima da vertical corresponderia ao comportamento de uma mistura muito sensível às variações de temperatura e de freqüência [MOMM, 1998].

A translação das curvas isotérmicas para obter a curva mestra pode ser feita de três maneiras, sendo duas utilizando formulações matemáticas com base em um coeficiente de translação e uma empregando forma gráfica:

a) Equação de Arrhenius:

A Equação 18 apresenta a formulação de Arrhenius para obter o coeficiente de translação das curvas isotérmicas:

$$\log(\alpha_T) = \frac{-C_1 x (T - T_R)}{(T - T_R) + C_2} \log(\alpha_T) = 0,4343 x \frac{\delta H}{R} x \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (18)$$

onde α_T é o coeficiente de translação; δ_H é a energia de ativação aparente característica do material (kJ/mole); R é a constante universal dos gases (8,31 j/mole/°K); T é a temperatura (°K); T_R é a temperatura de referência (°K).

b) Equação de Willian, Landel e Ferry:

O coeficiente de translação determinado por Willian, Landel e Ferry (1955) é mostrado na Equação 19:

$$\log(\alpha_T) = \frac{-C_1 x (T - T_R)}{(T - T_R) + C_2} \quad (19)$$

onde C_1 e C_2 são constantes dependentes do material e as demais variáveis foram descritas anteriormente.

c) Translação gráfica:

Na translação gráfica deve-se escolher um ponto de referência (F_{ref} , E_{ref}) sobre a curva que se quer transferir. Sobre a outra curva escolhem-se três pontos (F_1 , E_1 ; F_2 , E_2 e F_3 , E_3) de maneira que o valor do módulo do ponto de referência seja próximo do valor do módulo no ponto (F_2 , E_2), obtendo-se as retas que passam pelos pontos. Dois pontos onde o valor de módulo é igual ao valor do módulo de referência são determinados. A frequência média destes dois pontos é utilizada para a translação, determinada em escala logarítmica como apresenta a Figura 29.

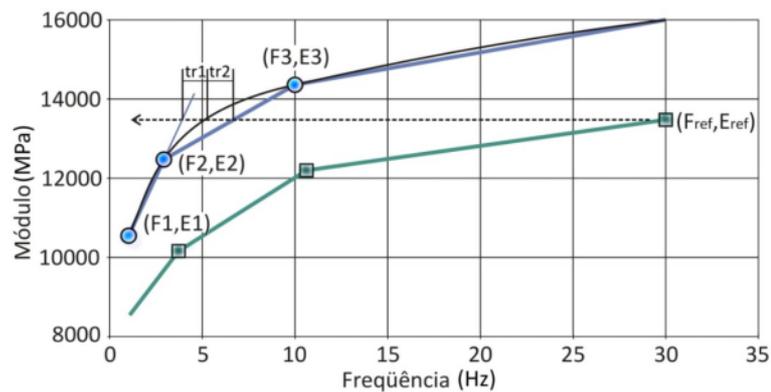


Figura 29: translação gráfica das curvas isotérmicas (Otto, 2009).

A translação da curva é determinada pelas Equações 20, 21, 22 e 23:

$$tr_1 = \exp \left[\ln(F1) + \frac{\ln\left(\frac{F2}{F1}\right)}{\ln\left(\frac{E2}{E1}\right)} \right] \times \ln\left(\frac{E_{ref}}{E1}\right) \quad (20)$$

$$tr_2 = \exp \left[\ln(F2) + \frac{\ln\left(\frac{F3}{F2}\right)}{\ln\left(\frac{E3}{E2}\right)} \right] \times \ln\left(\frac{E_{ref}}{E2}\right) \quad (21)$$

$$tr_m = \frac{(tr_1 + tr_2)}{2} \quad (22)$$

$$\ln(\alpha_T) = \ln\left(\frac{F_{ref}}{tr_m}\right) \quad (23)$$

onde tr_1 , tr_2 são as translações; F_i , E_i são pontos (frequência, módulo); α_T é o fator de translação.

2.6.3 Curvas isócronas

As curvas isócronas são representadas através do valor absoluto do módulo complexo $|E^*|$ em função da temperatura, em um gráfico com escala semi-logarítmica, permitindo, assim, visualizar a redução do $|E^*|$ da mistura com o acréscimo da temperatura, sendo que cada uma das curvas representa as frequências de ensaio (Figura 30).

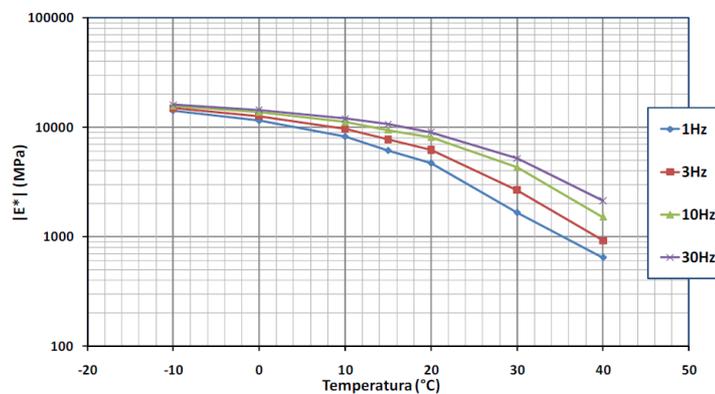


Figura 30: curvas isócronas de uma mistura asfáltica (Otto, 2009).

A representação das curvas isócronas, também, permite verificar a susceptibilidade térmica das misturas asfálticas, em função da variação do módulo pela variação da temperatura.

2.6.4 Curva espaço de Black

O espaço de Black é a representação do valor absoluto do módulo complexo ($|E^*|$) em função do ângulo de fase (φ) para cada uma das temperaturas ensaiadas. Caso ocorra uma sobreposição perfeita da frequência - temperatura, a curva originada deve ser única, ou seja, cada valor do ângulo de fase corresponde a um só valor de $|E^*|$ na frequência estabelecida e, isto se deve a característica do material ensaiado [DE LA ROCHE, 1996].

A curva do espaço de Black permite visualizar a zona dos módulos onde acontece o aumento do ângulo de fase para elevadas temperaturas [BAAJ, 2002]. A Figura 31 apresenta um exemplo do gráfico espaço de Black.

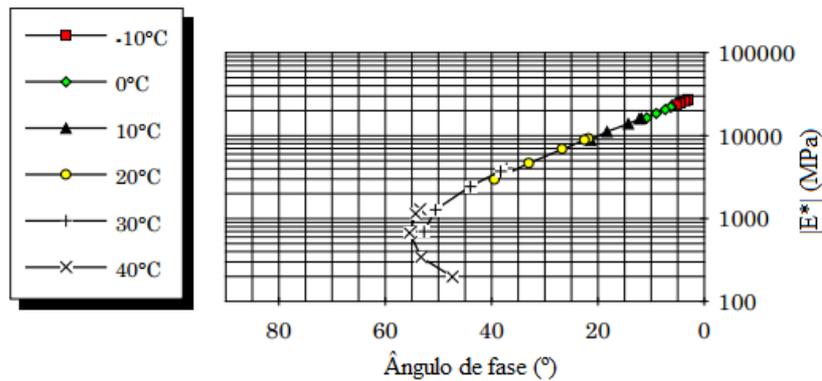


Figura 31: espaço de Black de uma mistura asfáltica (Baaj, 2002).

2.6.5 Representação cole-cole

O módulo complexo pode ser representado através do plano cole-cole, o qual apresenta os valores da parte imaginária (E_2) em função da parte real (E_1), em coordenadas aritméticas. Esta curva é semelhante a um arco de círculo, independente da frequência e da temperatura, conforme mostra a Figura 32 [DOUCET; AUGER, 2010]. A representação no plano cole-cole permite avaliar em que temperatura e frequência se tem a maior energia dissipada em cada ciclo de carregamento. Para estas condições (ou regiões) é que deveria ser conduzido os ensaios de fadiga.

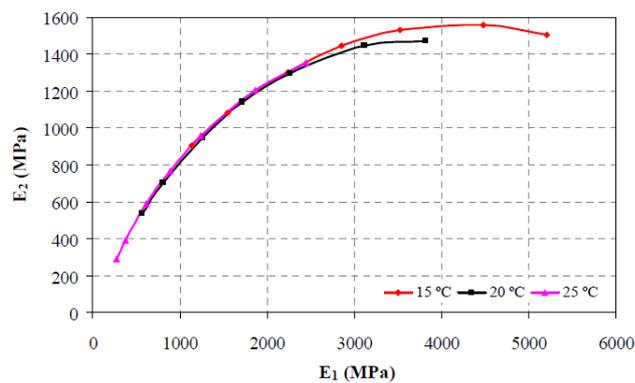


Figura 32: representação da parte imaginária e real do módulo complexo no plano cole-cole (Fontes, 2009).

3 EQUIPAMENTOS, MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Nesta etapa do trabalho, são caracterizados os materiais empregados na pesquisa e descritos os métodos adotados para obter os resultados, bem como os procedimentos utilizados na elaboração das misturas betuminosas e na confecção dos corpos de prova. A pesquisa foi realizada no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV, em conjunto com a Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre S/A - Concepa e a usina de asfalto da Construtora Triunfo localizada no km 30 da BR-290/RS.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Dentre os diferentes parâmetros que influenciam a vida de fadiga de misturas asfálticas, conforme apresentado no capítulo 2, foram selecionados alguns para estudo nesta pesquisa. O programa experimental desenvolvido está descrito a seguir e consistiu em:

- a) caracterização do agregado pétreo e dos ligantes asfálticos utilizados na usina de asfalto para elaboração das misturas;
- b) análise dos traços de concreto asfáltico (CA) com cimento asfáltico de petróleo (CAP) modificado por polímero e adição de TLA (Trinidad Lake Asphalt) - CAP TLA FLEX e cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero - COMPAFLEX 60/85 utilizados na usina de asfalto;
- c) determinação do sistema de compactação dos corpos de prova das misturas para realização dos ensaios;
- d) definição do nível de deformação utilizado no ensaio de flexão à deformação controlada: 400 $\mu\epsilon$, 600 $\mu\epsilon$, 800 $\mu\epsilon$;
- e) escolha do nível de carga utilizado no ensaio de fadiga por compressão diametral: 10%, 20%, 30% da RT;
- f) escolha do nível de carga utilizado no ensaio de flexão à tensão controlada: 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% da resistência à tração na flexão (RF);
- g) determinação da frequência de ensaio: 10Hz para ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos, 1Hz para ensaio de fadiga por compressão diametral. Os ensaios

para determinação do módulo dinâmico foram realizados com frequência de 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5 e 10Hz;

- h) definição da forma do pulso de carga: senoidal e semi-seno-verso;
- i) determinação da temperatura de ensaio: 25°C para os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos e por compressão diametral. Os ensaios de módulo dinâmico foram realizados com temperaturas de 15°C, 20°C e 25°C;
- j) escolha dos programas para realização dos ensaios: programa UTS015 para ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos com carregamento à deformação controlada e programa UTS018 para ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos com carregamento à tensão controlada e ensaios de módulo dinâmico. Os ensaios de fadiga por compressão diametral foram realizados no programa SEEPAV 8200;
- k) determinação dos critérios de término dos ensaios para determinar a vida de fadiga das misturas estudadas.
- l) realização dos ensaios de módulo dinâmico nas misturas;
- m) realização dos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos com modo de carregamento à tensão e deformação controlada e ensaio de fadiga por compressão diametral.

3.1.1 Matriz experimental

A matriz experimental desta pesquisa é composta por ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos sob tensão e deformação controlada, ensaio de fadiga por compressão diametral, ensaios de módulo dinâmico e ensaios de resistência à tração por compressão diametral. A Tabela 3 apresenta a matriz dos experimentos realizados nesta pesquisa, com as configurações empregadas nos ensaios.

Tabela 3: matriz de ensaios realizados na pesquisa para mistura com CAP TLA FLEX e COMPAFLEX 60/85.

CA-TLA			
Ensaio de Fadiga Flexão a 4 Pontos	25°C	Frequência	10Hz
		Deformação de ensaio	400µε, 600µε e 800µε
		Modo de carregamento	Deformação Controlada
		Forma do pulso de carga	Senoidal
Ensaio de Fadiga Compressão Diametral	25°C	Frequência	1Hz
		Pulso de carga	0,1s
		Carga de ensaio	10%, 20%, 30 RT25°C
		Modo de carregamento	Tensão Controlada
		Forma do pulso de carga	Semi-seno-verso
Módulo Complexo		Frequência	0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10Hz
		Deformação de ensaio	50µε
		Modo de carregamento	Deformação Controlada
		Forma do pulso de carga	Senoidal
		Temperatura	15°C, 20°C e 25°C
Ensaio de RT		25°C	
CA-E			
Ensaio de Fadiga Flexão a 4 Pontos	25°C	Frequência	10Hz
		Carga de ensaio	15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% RT25°C
		Deformação de ensaio	400µε, 600µε e 800µε
		Modo de carregamento	Tensão e Deformação Controlada
		Forma do pulso de carga	Senoidal
Ensaio de Fadiga Compressão Diametral	25°C	Frequência	1Hz
		Pulso de carga	0,1s
		Carga de ensaio	10%, 20% e 30% RT25°C
		Modo de carregamento	Tensão Controlada
		Forma do pulso de carga	Semi-seno-verso
Módulo Complexo		Frequência	0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10Hz
		Deformação de ensaio	50µε
		Modo de carregamento	Deformação Controlada
		Forma do pulso de carga	Senoidal
		Temperatura	15°C, 20°C e 25°C
Ensaio de RT		25°C	

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos e por compressão diametral, bem como os ensaios de módulo complexo e resistência à tração desta pesquisa foram realizados em equipamentos pertencentes ao Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS e são descritos a seguir.

3.2.1 Equipamento para ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos e ensaio de módulo dinâmico

Os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos e de módulo dinâmico devem ser realizados em um equipamento capaz de atender a todos os requisitos recomendados nas normas vigentes que preconizam estes tipos de ensaios. O Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS - através da colaboração da Petrobrás (Projeto Rede Temática de Asfalto) adquiriu um equipamento da empresa IPC Global - modelo CS 7800, capaz de realizar tanto o ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos quanto o ensaio de módulo dinâmico de misturas asfálticas.

Este equipamento apresenta um suporte digital pneumático servo-controlado embutido na base que possui um motor, o qual controla os fixadores verticais, e um atuador para a aplicação da carga. Este suporte pode ser observado na Figura 33.



Figura 33: equipamento para realização do ensaio de flexão em viga quatro pontos.

O suporte de viga foi projetado para submeter uma amostra de mistura asfáltica, em formato prismático, à flexão em quatro pontos, com livre rotação e translação horizontal de todos os pontos de carga e de reação, sendo estipulado o espaçamento entre os pontos de carregamento externos em 355,5 mm. A amostra é presa verticalmente por fixadores externos e internos

acionados por motor, sendo necessário manter os motores em operação contínua durante todo o ensaio, com o intuito de retirar o espaço resultante da deformação permanente da amostra nas superfícies de fixação.

O equipamento da IPC Global, modelo CS 7800, empregado nesta pesquisa apresenta as seguintes características principais:

- a) capacidade de carga estática de até 5kN;
- b) frequência de carregamento senoidal de 0,01 a 30Hz;
- c) modos de carregamento tanto em tensão controlada quanto deformação controlada;
- d) fornecimento de ar: ar limpo e seco à 800-900kPa;
- e) tamanho da amostra a ser ensaiada: no mínimo 380 mm de comprimento, máximo 70 mm de altura e máximo 85 mm de largura;
- f) célula de carga: Capacidade de $\pm 4,5$ kN tensão/compressão, resolução de 0,14N e precisão de ± 1 N. Transdutor usado para medir a força aplicada na amostra. O resultado deste transdutor é, também, empregado pelo sistema de controle para monitorar o deslocamento da viga quando o carregamento é utilizado à tensão controlada;
- g) transdutor de deslocamento interno: LVDT com curso de 10 mm \pm 5 mm usado no monitoramento da posição do pistão do atuador. Este transdutor fornece informações para o sistema de controle quando a função de movimento for utilizada;
- h) transdutores de deslocamento na amostra: LVDT com curso de 1 mm \pm 0,5 mm, sendo empregado para medir o deslocamento da amostra. O resultado deste transdutor é, também, usado pelo sistema de controle para monitorar o deslocamento da viga quando o sistema utiliza o modo de carregamento à deformação controlada.

De acordo com as normas que preconizam este ensaio o suporte onde a viga é ensaiada deve permanecer dentro de uma câmara climática capaz de manter a temperatura de ensaio com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, além de apresentar espaço suficiente para os corpos de prova que devem

ser aclimatizados antes do ensaio. A Figura 34 mostra a câmara climática utilizada pelo LAPAV.



Figura 34: câmara climática utilizada para realização dos ensaios de flexão em viga quatro pontos e módulo complexo.

Este equipamento utiliza um sistema integrado de controle multi-eixos – IMACS – para o controle e aquisição dos dados de ensaio. O IMACS é uma unidade compacta e independente que fornece todo o controle, tempo e funções de aquisição de dados para o suporte de ensaio e transdutores. Este sistema está ligado a um computador através de um cabo de comunicação USB. Todos os cabos de controle, comunicação e transdutores são conectados no painel frontal do IMACS. O gabinete do IMACS pneumático é mostrado na Figura 35.

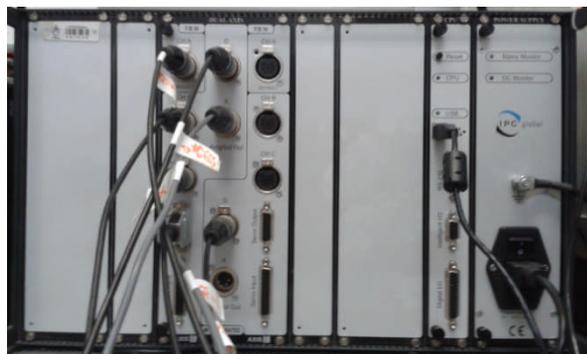


Figura 35: gabinete do sistema integrado de controle multi-eixos (IMACS) pneumático.

Nesta pesquisa foram utilizados dois programas para realização dos ensaios propostos. O programa empregado para a realização dos ensaios de fadiga à flexão em vigas quatro pontos à deformação controlada foi o UTS015, enquanto o programa utilizado para realizar os ensaios de fadiga quatro pontos à tensão controlada e para determinar o módulo dinâmico das misturas foi o UTS018.

O ambiente dos programas UTS015 e UTS018 referem-se a parâmetros que são selecionados pelo operador em função dos efeitos e níveis escolhidos para um determinado ensaio. Estes níveis de parâmetros e características determinadas para o ensaio são armazenados em um arquivo toda vez que o aplicativo é encerrado, sendo restaurados sempre que a aplicação é novamente solicitada. A tela do UTS015 e do UTS018 são apresentadas nas Figuras 36 e 37.

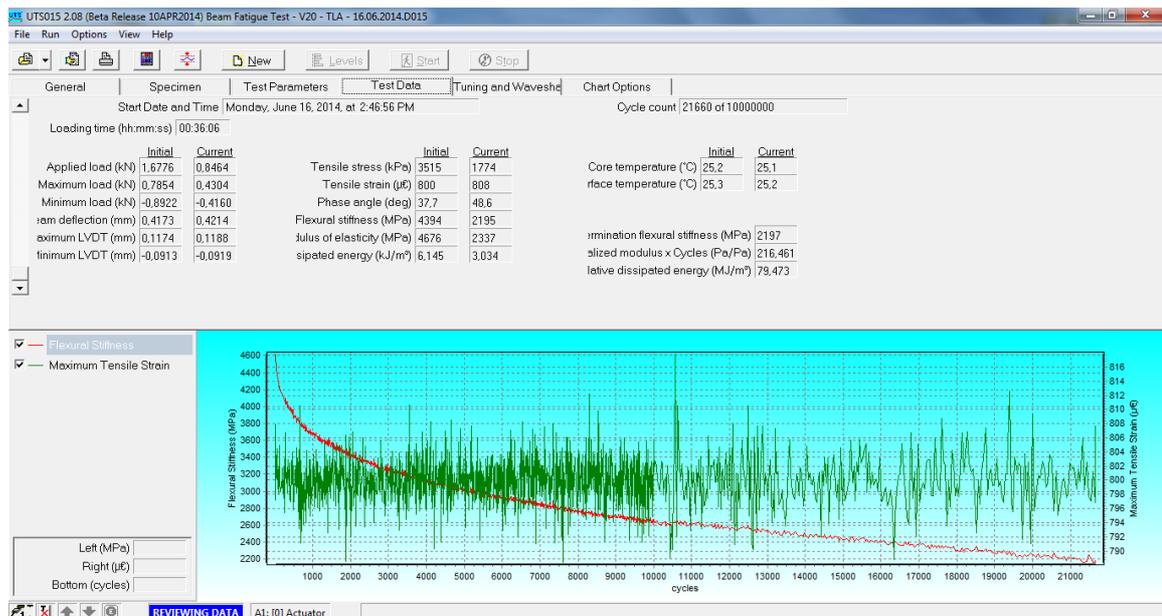


Figura 36: tela do programa UTS015.

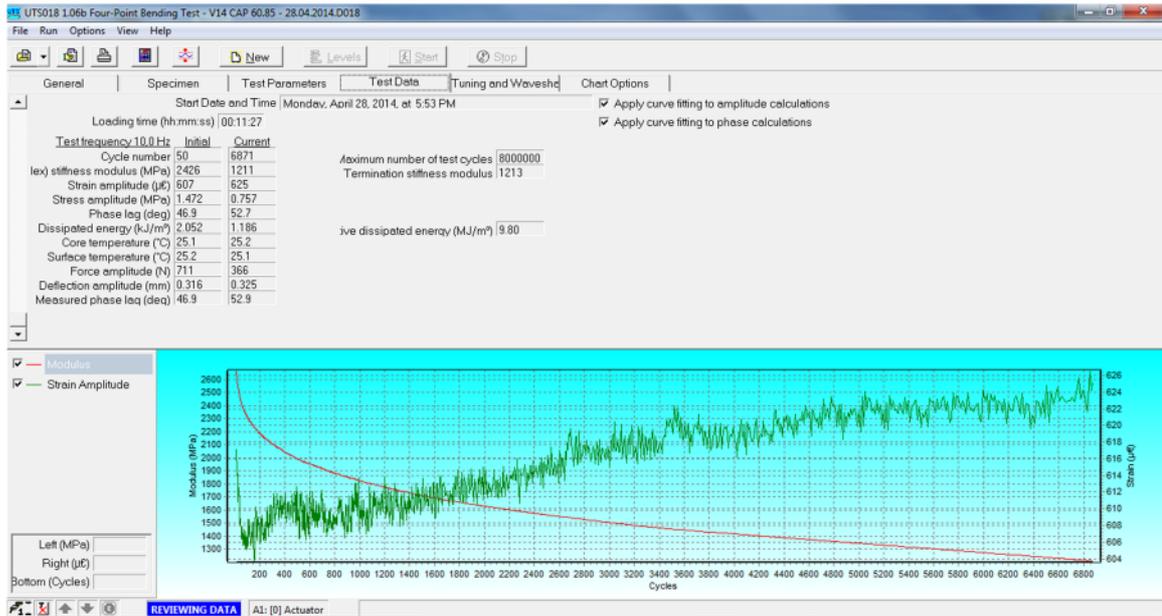
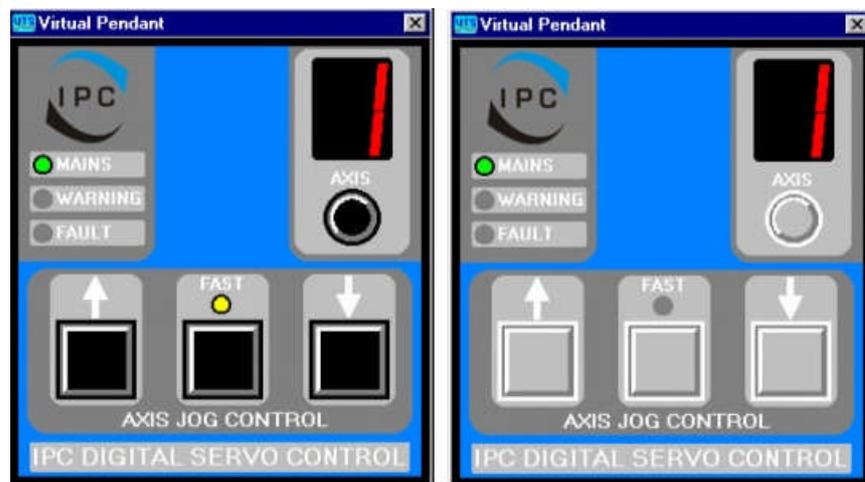


Figura 37: tela do programa UTS018.

O controlador do atuador localizado na barra de ferramentas dos programas permite que o operador movimente o atuador através de cada eixo de controle de deslocamento. Os botões para cima e para baixo podem ser usados para deslocar o atuador em uma velocidade normal, caso o botão rápido fique pressionado a velocidade de deslocamento irá aumentar. Durante os ensaios os botões do controlador ficam desabilitados e não são reativados até a conclusão de todos os ensaios, na Figura 38 é possível visualizar este sistema.



(a)

(b)

Figura 38: interface do controlador do atuador onde: (a) controlador ativo e (b) funções do controlador desabilitadas durante o ensaio.

Os níveis de sinais em tempo real de cada transdutor usado pelo sistema podem ser exibidos em uma janela separada, como mostrado na Figura 39. Cada transdutor está representado por uma barra com cor diferente que indica a sua posição dentro do seu curso máximo e mínimo ou a gama de funcionamento. O canal de entrada determinado no CDAS é mostrado no canto esquerdo de cada painel de exposição do transdutor em conjunto com a descrição do canal. No lado direito da barra de cor é apresentada uma caixa de exposição com um visor digital mostrando a variação do valor do sinal do transdutor e suas respectivas unidades.

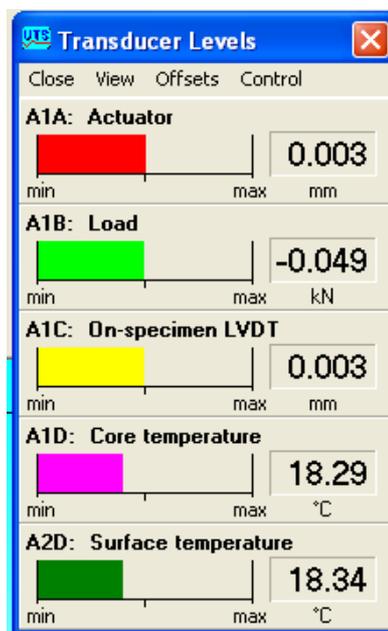


Figura 39: interface do visualizador dos níveis de sinais dos transdutores.

A área de gráficos permite que o operador visualize o comportamento da rigidez à flexão, deformações de tração máximas e/ou ângulo de fase que estão ocorrendo ao longo do ensaio em função dos ciclos de carregamento. A barra de status indica o estado em que se encontra o sistema de carregamento em andamento, a comunicação entre o computador e o CDAS, bem como o status do ensaio.

As páginas de exibição de dados consistem em seis painéis de dados com guias sobrepostas, sendo denominadas de: guia geral, guia de dados da amostra, guia dos parâmetros do ensaio, dados do ensaio, ajuste e forma de onda e opções de gráfico. Cada guia destas contém níveis, características e opções do ensaio que devem ser preenchidas.

A página de exibição dos dados gerais do UTS015 (Figura 40) permite que o operador selecione o método de ensaio que deseja utilizar. Dentre as opções de métodos está a norma australiana AUSTROADS AST 03:2000, a norma norte-americana AASHTO T 321-03, a norma europeia EN 12697-24:2003 e a opção de um ensaio de fadiga à flexão que não segue o padrão das normas mencionadas. Estes métodos contemplam as configurações de ensaio que são estabelecidas pelas suas respectivas normas.

Figura 40: página de exibição dos dados gerais.

No UTS018 a página de exibição dos dados gerais apresenta apenas três métodos de ensaios, sendo a norma europeia EN 12697-24:2004, a norma EN 12697-26:2004 e a opção de um ensaio de flexão em quatro pontos que não segue o padrão das normas mencionadas.

A página que contém os campos para preenchimento dos dados de entrada para a identificação da amostra é mostrada na Figura 41. Além disso, pode ser inserido o tempo de condicionamento da amostra, suas propriedades específicas e comentários. Devem ser realizadas seis medições de comprimento, largura e altura da amostra para que o software possa calcular automaticamente a média, desvio-padrão, a área da seção transversal e volume da amostra.

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Width (mm)	62,00	61,00	61,00	61,00	60,00	60,00	60,83	0,753
Height (mm)	47,00	47,00	47,00	50,00	49,00	49,00	48,17	1,329
Length (mm)	380,00	380,20	380,50	380,50	380,50	380,30	380,33	0,207

Cross-sectional area (mm²) 2930,1
Volume (cc) 141,1

Figura 41: página de exibição dos dados da amostra.

No programa UTS015 os parâmetros de ensaio que devem ser selecionados pelo operador para realização do ensaio de fadiga são: o modo de carregamento, sendo tensão ou deformação controlada; a forma de onda, podendo ser senoidal, semi-seno-verso ou uma forma definida pelo operador; parâmetros de carregamento como frequência, deformação ou tensão de tração máxima dependendo do modo de carregamento escolhido; o número de ciclos para obter a rigidez à flexão inicial, geralmente o ciclo 50, que poderá ser utilizada como um critério de término do ensaio; escolha do modo de armazenamento dos dados do ensaio; o coeficiente de *Poisson*; a porcentagem da rigidez inicial para término do ensaio e o número máximo de ciclos para o ensaio. A configuração da página de exibição dos parâmetros de ensaio pode ser visualizada na Figura 42.

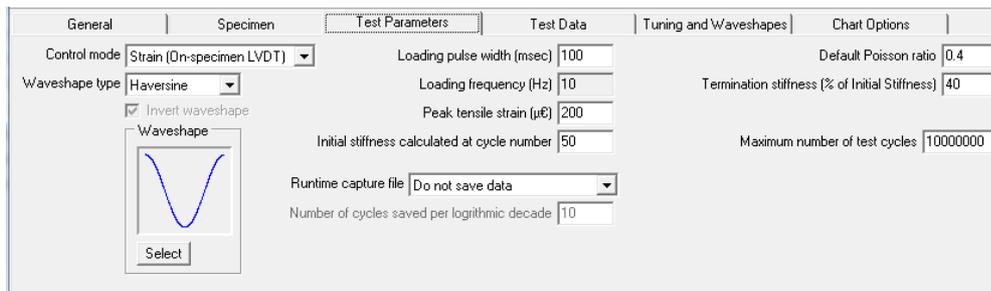


Figura 42: página de exibição dos parâmetros do ensaio no UTS015.

A interface da página de exibição dos parâmetros de ensaio no UTS018 apresenta algumas diferenças em relação à do programa UTS015, como pode ser visto na Figura 43. Além disso, o UTS018 possui uma opção de pré-teste de frequências, o qual é utilizado no ensaio de módulo dinâmico.

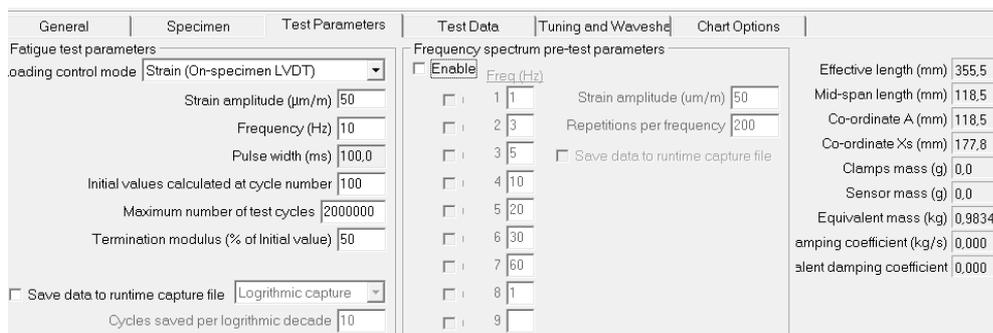


Figura 43: página de exibição dos parâmetros do ensaio no UTS018.

Os dados do ciclo inicial e do ciclo em andamento podem ser visualizados no decorrer do ensaio nos programas UTS015 (Figura 44) e UTS018 (Figura 45). Estes dados contemplam as leituras máxima e mínima da célula de carga e do transdutor de deslocamento, a carga aplicada, o deslocamento da viga, a tensão de tração, a deformação de tração, o ângulo de fase, a rigidez à flexão (S), módulo de elasticidade (E), a energia dissipada e a temperatura interna e da superfície de um corpo de prova modelo.

General	Specimen	Test Parameters	Test Data	Tuning and Waveshapes	Chart Options
Start Date and Time		Tuesday, April 1, 2014, at 7:32:55 PM		Cycle count 2836110 of 6000000	
Loading time (hh:mm:ss)		78:46:51			
	Initial	Current		Initial	Current
Applied load (kN)	0,5323	0,2940	Tensile stress (kPa)	1250	620
Maximum load (kN)	0,2921	0,1561	Tensile strain ($\mu\epsilon$)	403	402
Minimum load (kN)	-0,3002	-0,1379	Phase angle (deg)	35,8	40,9
Beam deflection (mm)	0,2122	0,2120	Flexural stiffness (MPa)	3105	1543
Maximum LVDT (mm)	0,0683	0,0684	Modulus of elasticity (MPa)	3300	1640
Minimum LVDT (mm)	-0,0378	-0,0376	Dissipated energy (kJ/m ²)	1,088	0,560
			Core temperature (°C)	25,1	25,0
			Surface temperature (°C)	25,1	25,1
			Termination flexural stiffness (MPa)	1552	
			Normalized modulus x Cycles (Pa/Pa)	28185,62	
			Cumulative dissipated energy (MJ/m ²)	2029,817	

Figura 44: página de exibição dos dados do ensaio do UTS015.

General	Specimen	Test Parameters	Test Data	Tuning and Waveshapes	Chart Options
Start Date and Time		Monday, April 28, 2014, at 5:53 PM		<input checked="" type="checkbox"/> Apply curve fitting to amplitude calculations <input checked="" type="checkbox"/> Apply curve fitting to phase calculations	
Loading time (hh:mm:ss)		00:11:27			
	Initial	Current		Initial	Current
Test frequency	10,0 Hz		Maximum number of test cycles	8000000	
Cycle number	50	6871	Termination stiffness modulus	1213	
Flex stiffness modulus (MPa)	2426	1211			
Strain amplitude ($\mu\epsilon$)	607	625			
Stress amplitude (MPa)	1,472	0,757			
Phase lag (deg)	46,9	52,7			
Dissipated energy (kJ/m ²)	2,052	1,186	Cumulative dissipated energy (MJ/m ²)	9,80	
Core temperature (°C)	25,1	25,2			
Surface temperature (°C)	25,2	25,1			
Force amplitude (N)	711	366			
Deflection amplitude (mm)	0,316	0,325			
Measured phase lag (deg)	46,9	52,9			

Figura 45: página de exibição dos dados do ensaio do UTS018.

A página de exibição de ajustes e forma de onda, Figura 46, contém informações e gráficos de um ciclo de ensaio. Durante um ensaio a caixa de seleção para atualização automática pode ser usada para atualizar automaticamente a página de exibição com os dados do ciclo de ensaio em andamento. Caso esta caixa de seleção esteja desmarcada é possível usar o botão atualizar para que a página de exibição seja atualizada com o próximo ciclo de ensaio, seguido pelo armazenamento dos dados.

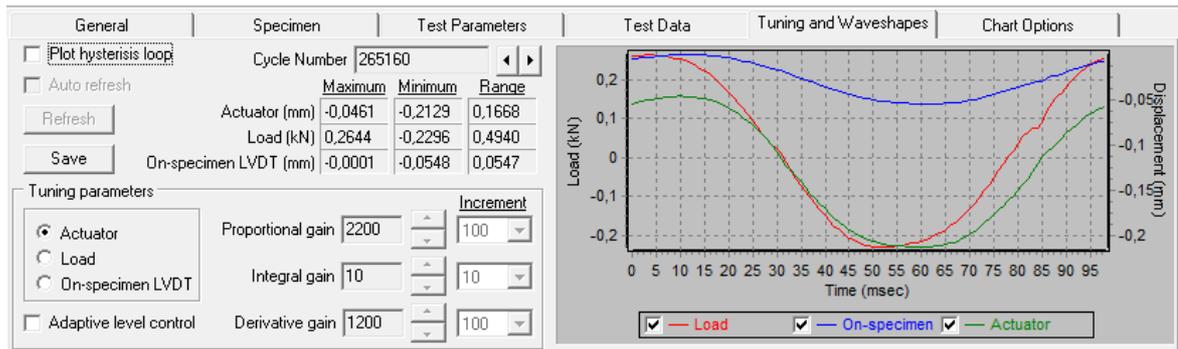


Figura 46: página de ajuste dos parâmetros e formas de onda.

A página de exibição das opções dos gráficos permite o operador escolher o formato ideal dos gráficos que poderão ser gerados. Na Figura 47 é possível ver as diferentes opções apresentadas pelos programas para gerar gráficos que contemplem os diferentes resultados obtidos durante o período dos ensaios.

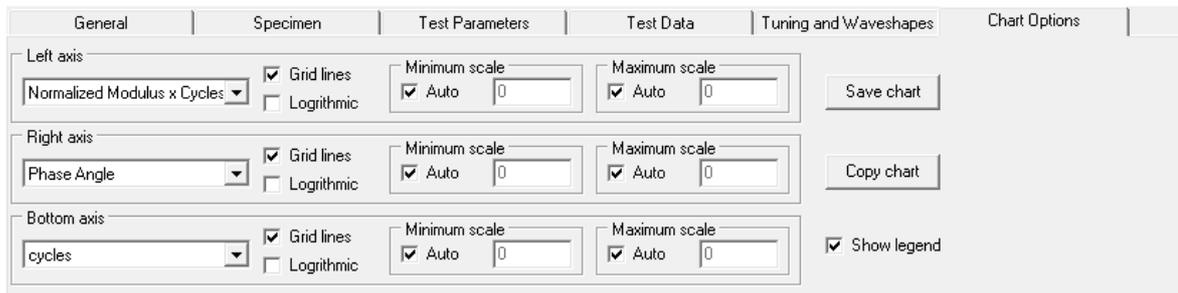


Figura 47: página de escolha das opções de gráficos.

Vários parâmetros são calculados a partir dos dados adquiridos nos ensaios, sendo estes resultados apresentados em forma de tabela e de gráficos. A tabela de dados do ensaio é atualizada à medida que cada ciclo é transferido do sistema de controle e aquisição de dados – CDAS – para o computador. A parcela de dados é inicialmente coletada linearmente até o preenchimento da capacidade de armazenamento de dados e depois periodicamente em uma base logarítmica. Os dados disponíveis durante o ensaio são tempo de carregamento do ensaio (hora, minutos e segundos); número de ciclos do ensaio; máxima e mínima carga aplicada; máximo e mínimo deslocamento da amostra; tensão e deformação de tração; ângulo de fase; a rigidez à flexão; módulo de elasticidade; energia dissipada e temperaturas interna e de superfície de um corpo de prova modelo conectado ao sistema de aquisição de dados por LVDT, conforme Figura 48.



Figura 48: corpo de prova modelo para a realização das leituras de temperatura interna e de superfície durante a execução dos ensaios.

3.2.2 Equipamento para ensaio de fadiga por compressão diametral

O ensaio de fadiga por compressão diametral é realizado em um equipamento que possui uma estrutura metálica, com um pistão que proporciona um carregamento repetitivo pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, o qual é acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento fica localizado dentro de uma câmara com temperatura termoccontrolada, permitindo a realização de ensaios em temperaturas distintas. A Figura 49 mostra a câmara climática e o sistema de carregamento do ensaio de fadiga por compressão diametral para misturas asfálticas que o LAPAV/UFRGS dispõe.

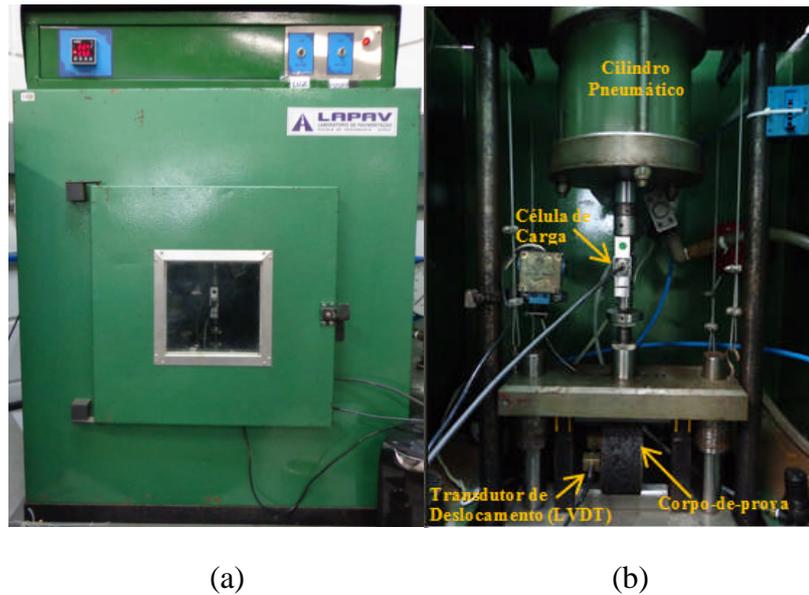


Figura 49: (a) câmara climática e (b) sistema de carregamento do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral.

Ao aplicar o carregamento, com tempo de 0,1 segundo e 0,9 segundo de repouso, o corpo de prova de mistura asfáltica sofre deformações horizontais, as quais são medidas por um LVDT, ligado a um micro computador. A Figura 50 apresenta o sistema de ensaio de fadiga por compressão diametral para misturas asfálticas do LAPAV/UFRGS – SEEPAV 8200, com detalhes do sistema de aquisição e controle.



Figura 50: sistema de aquisição e controle de dados do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral.

A tela principal do SEEPAV 8200 para o ensaio de fadiga, onde constam o programa de controle e as configurações de ensaio, é apresentada na Figura 51. Para dar início ao ensaio o operador

precisa inserir no programa o nome do cliente, a identificação, altura, diâmetro e resistência à tração do corpo de prova que está sendo ensaiado. Além disso, é necessário determinar o percentual de resistência à tração por compressão diametral em que a carga será aplicada, o número máximo de ciclos para o ensaio e o percentual de redução do módulo de resiliência inicial por compressão diametral, sendo estes dois últimos itens critérios de término do ensaio.

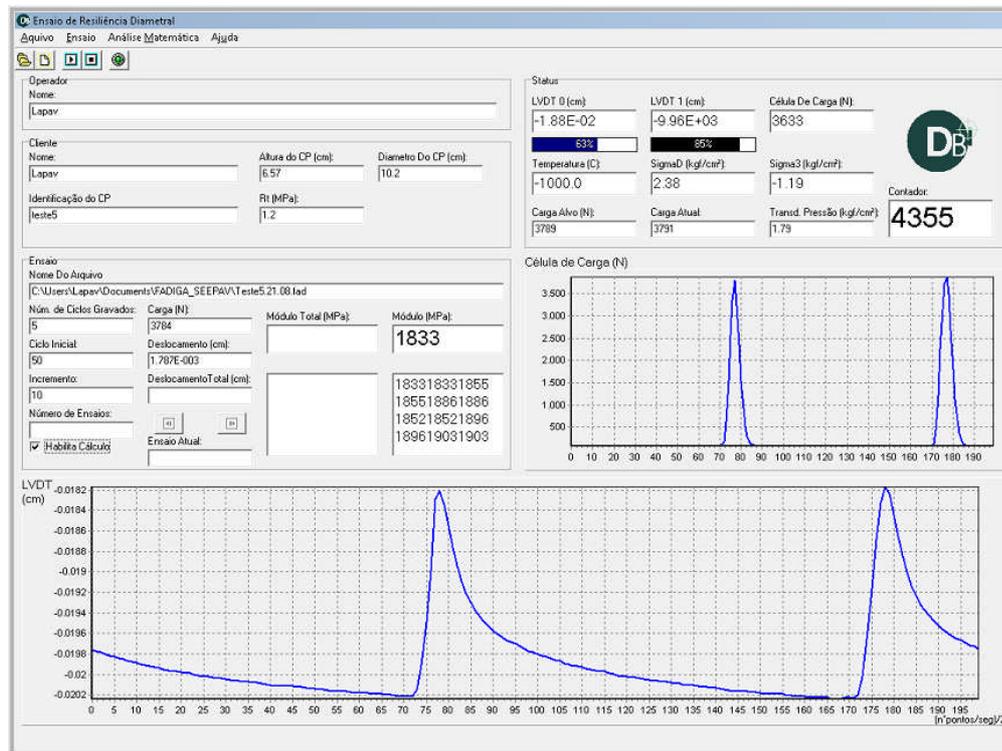


Figura 51: programa de controle do ensaio de fadiga por compressão diametral e detalhes das telas de configurações.

O SEEPAV 8200 dispõe de uma tela, Figura 52, onde é possível monitorar o comportamento da carga em função do deslocamento e o módulo de resiliência por compressão diametral em função do número de ciclos, mostrando uma linha vermelha que representa o valor do MR em que o ensaio poderá ser finalizado, sendo este valor em função do percentual de redução do MR inicial. Salienta-se que o módulo de resiliência é análogo ao módulo de elasticidade com ambos os termos apresentado a mesma definição pela teoria da elasticidade, com a diferença que o MR é obtido através de um ensaio de cargas repetidas [BRITO, 2006].

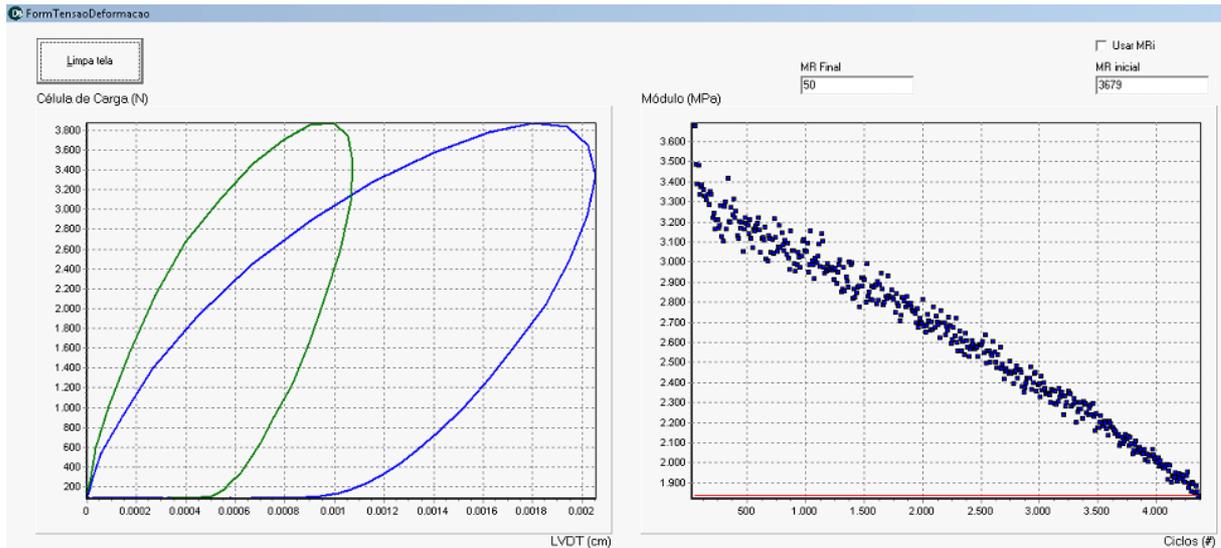


Figura 52: tela do programa onde é possível visualizar o comportamento da carga pelo deslocamento e do módulo de resiliência pelo número de ciclos no decorrer do ensaio de fadiga.

3.3 MÉTODOS EMPREGADOS

3.3.1 Ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos

A metodologia utilizada para a realização dos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos seguiu alguns procedimentos preconizados pela norma AASHTO T321-07. Os ensaios foram realizados em corpos de prova prismáticos com dimensões de 380 ± 6 mm de comprimento, 50 ± 6 mm de altura e 63 ± 6 mm de largura serrados de placas moldadas na usina de asfalto. Foram utilizadas três amostras para cada um dos três níveis de solicitação imposta, sendo que estes níveis de tensão ou deformação dependem do modo de carregamento empregado no ensaio. Salienta-se, que conforme a norma AASHTO T321-07 são necessários nove ensaios de fadiga à flexão para a obtenção de uma única curva de fadiga.

Através da Figura 53 é possível observar o posicionamento da amostra no equipamento para ensaio de flexão em quatro pontos. Os procedimentos utilizados para realização dos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos seguem a seguinte sequência:

- a) colocar o gabarito de posicionamento dos fixadores;
- b) inserir a amostra no equipamento e verificar se ambas as extremidades laterais estão aproximadamente iguais, tendo-se o cuidado de manter o LVDT central posicionado no centro da amostra.

- c) os fixadores externos e internos devem ser reduzidos, fixando a amostra no equipamento. Salienta-se que estes fixadores devem permanecer ativos durante todo o período de ensaio, com o intuito de não haver perda de contato entre os fixadores e amostra mesmo com o surgimento de deformações permanentes.
- d) retirar o gabarito de posicionamento dos fixadores;
- e) aguardar o tempo de condicionamento da amostra, em função de que a temperatura estabelecida para o ensaio se torne constante. O tempo de condicionamento determinado pela norma da AASHTO T321 (2007) é de 2 horas.
- f) após o processo de condicionamento verificar se o LVDT central precisa ser reajustado e, assim, iniciar o ensaio.



Figura 53: posicionamento da amostra no equipamento de flexão em quatro pontos.

Os ensaios sob o modo de carregamento a deformação controlada foram submetidos a três níveis distintos de deformação de 400, 600 e 800 $\mu\epsilon$, sabe-se que estes valores são altos para as condições observadas em campo, mas em função do tempo para realização dos ensaios e a duração dos mesmos para baixas deformações optou-se por realizar os ensaios nestes níveis, os quais já foram utilizados por Fontes (2009) e Klinsky (2014).

Os ensaios realizados à tensão controlada foram submetidos a 7 diferentes níveis de tensão, sendo eles 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% da RF da mistura estudada. Em função de

não ter acesso a um equipamento adequado para o ensaio de resistência à tração na flexão, a mesma foi determinada considerando a correlação apresentada por Pinto (1991), onde a resistência à tração na flexão pode ser considerada três vezes maior que a resistência à tração por compressão diametral ($\sigma_f \approx 3\sigma_c$). A RT por compressão diametral foi determinada através da média obtida para quatro corpos de prova cilíndricos, conforme a especificação apresentada no item 3.3.4.

A tensão e deformação de tração máxima obtidas nos ensaios foram determinadas pelas Equações 24 e 25, enquanto a rigidez na flexão, o ângulo de fase e a energia dissipada pelas Equações 26, 27 e 28 de acordo com a AASHTO T321-07:

$$\sigma_t = \frac{0,357 * F}{b * h^2} \quad (24)$$

onde σ_t é a tensão de tração (Pa); F é a carga vertical total aplicada (N); b é a largura da amostra (m); h é a altura da amostra (m).

$$\varepsilon_t = \frac{12 * \delta * h}{3 * L^2 - 4 * a^2} \quad (25)$$

onde ε_t é a deformação de tração ($\mu\varepsilon$); δ é a deflexão no centro da amostra; L é o comprimento da amostra entre os fixadores externos (m); a é o espaçamento entre os fixadores internos (m); as demais variáveis foram definidas anteriormente.

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (26)$$

$$\varphi = 360 * f * s \quad (27)$$

$$w = \pi * \sigma_t * \varepsilon_t * \sin(\varphi) \quad (28)$$

onde S é a rigidez na flexão (Pa); φ é o ângulo de fase ($^\circ$); f é a frequência de aplicação da carga (Hz); s é o tempo de defasagem entre a aplicação da carga F e o deslocamento δ (s); w é a energia dissipada (J/m³).

Os ensaios de flexão a quatro pontos foram realizados com uma frequência de carregamento de 10Hz e temperatura constante de 25°C. A forma de carregamento senoidal foi empregada para os ensaios tanto com modo de carregamento a deformação controlada quanto a tensão controlada, conforme prescreve a norma AASHTO T321-07.

3.3.2 Ensaio de módulo dinâmico

Os ensaios para determinação do módulo dinâmico das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa foram realizados com o mesmo equipamento e a metodologia de ensaio empregados nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos.

Para determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase das misturas foi utilizado o programa UTS018, com uma forma de carga senoidal, sob deformação controlada de $50\mu\epsilon$. As frequências utilizadas na realização dos ensaios foram 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1Hz, sendo aplicadas em ordem decrescente conforme preconizado pela norma ASTM 3497 (1995).

O número de ciclos de carga considerado foi de 100 para todas as frequências empregadas. Além disso, estes ensaios foram realizados em três distintas temperaturas, sendo 15°C , 20°C e 25°C . Todos os ensaios para cada temperatura foram realizados utilizando uma mesma viga, pois o baixo número de ciclos de carga não provoca redução significativa da rigidez do material [FONTES, 2009].

3.3.3 Ensaio de fadiga por compressão diametral

Os ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada realizados nesta pesquisa utilizaram corpos de prova cilíndricos com diâmetro de $101,6 \pm 2$ mm e altura $53,4 \pm 3$ mm extraídos com sonda rotativa de placas moldadas na usina de asfalto.

Para realização destes ensaios utilizou-se um equipamento de carga repetida, descrito no item 3.2.2 deste trabalho, com aplicação de um carregamento com duração de 0,1 e 0,9 segundos de intervalo de repouso. Neste ensaio a frequência empregada foi de 1Hz.

Procederam-se à gravação de carga, deslocamento e monitoramento do módulo de resiliência ao longo de toda o ensaio. Foram empregados três critérios para finalização do ensaio de fadiga: redução em 50% do MR inicial, a vida de fadiga atingir 10^6 ciclos e o corpo de prova romper completamente.

Os corpos de prova foram submetidos a diferentes níveis de tensão, proporcionais a resistência à tração estática, sendo 10%, 20% e 30% da RT. A forma de carregamento empregada foi semi-seno-verso (*haversine*) e os deslocamentos horizontais foram medidos através de um LVDT de ponta retrátil. A Figura 54 mostra como o LVDT é acoplado ao corpo de prova através de peças de suporte que são coladas no corpo de prova com resina epóxi, no mínimo 24 horas de

antecedência do início dos ensaios. Os ensaios foram realizados sob temperatura de 25°C em estufa termo-controlada e as amostras ensaiadas apresentaram um volume de vazios entre 3 e 5%. O coeficiente de *Poisson* foi fixado em 0,30 para temperatura de 25°C, conforme recomendação da norma NBR-16018 (2012).



Figura 54: sequência de montagem das peças de suporte para fixação do LVDT no corpo de prova cilíndrico.

3.3.4 Ensaio de resistência à tração

Nesta pesquisa, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado segundo os procedimentos da norma NBR-15087 (2012), utilizando corpos de prova com diâmetro de $101,6 \pm 2$ mm e altura $53,4 \pm 3$ mm extraídos com sonda rotativa das placas moldadas na usina de asfalto.

Este ensaio consiste em aplicar um carregamento estático de compressão distribuído ao longo de dois planos paralelos e diametralmente opostos, conforme mostra a Figura 55, com o intuito de obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal e perpendicular ao carregamento.

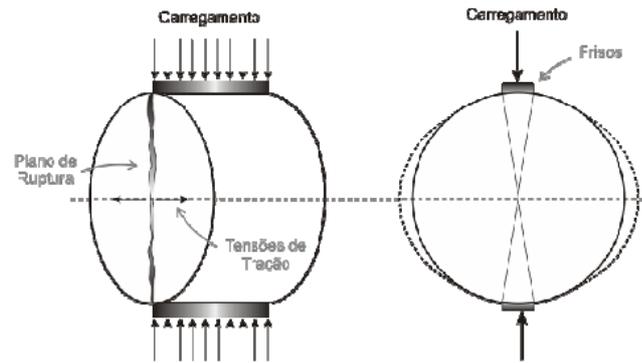


Figura 55: forma de carregamento e plano de ruptura gerados durante o ensaio de resistência à tração (BRITO, 2006).

A velocidade de avanço da prensa é de 0,8 mm/s e a Equação 29 é empregada para o cálculo da resistência à tração.

$$\sigma_R = \frac{2.F}{100.\pi.D.H} \quad (29)$$

onde σ_R é a resistência à tração em MPa; F é a carga de ruptura em N; D e H são o diâmetro e a altura do corpo de prova, respectivamente, em cm.

O equipamento utilizado para o ensaio de resistência à tração foi uma prensa mecânica apresentada na Figura 56. Salienta-se que os ensaios de RT foram realizados com temperatura de 25°C.



Figura 56: prensa para ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

3.4 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

Os materiais utilizados nesta pesquisa tais como ligantes asfálticos, agregados minerais e misturas asfálticas foram avaliados de acordo com diversas técnicas laboratoriais, sendo estas realizadas no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS. As misturas empregadas para moldagem das placas, das quais foram extraídos corpos de prova prismáticos e cilíndricos, foram produzidas na usina de asfalto e apresentam características semelhantes aos das misturas asfálticas utilizadas em trechos experimentais da rodovia BR-290/RS onde, futuramente, pretende-se realizar levantamentos dos trincamentos do pavimento com o objetivo de estimar o fator laboratório-campo.

3.4.1 Agregado Mineral

Os agregados, graúdos e miúdos, utilizados nesta pesquisa são provenientes da pedreira da Construtora Triunfo localizada no km 30 da BR-290/RS, sendo de origem basáltica da formação Serra Geral. Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFRGS) e os resultados desta caracterização encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: características dos agregados utilizados no estudo.

Propriedade	Método	Resultado
Massa Esp. Real - Agregado Graúdo	DNER-ME 081/98	2831 kg/m ³
Massa Esp. Real - Agregado Miúdo	DNER-ME 084/95	2860 kg/m ³
Massa Esp. Aparente do Grão	DNER-ME 081/98	2764 kg/m ³
Absorção	DNER-ME 081/98	0,9%
Índice de Forma	DNER-ME 086/94	0,8
Desgaste à abrasão	DNER-ME 035/98	10%

As análises granulométricas dos agregados minerais foram realizadas de acordo com o procedimento estabelecido pela norma DNER- ME 083/98 e os resultados encontram-se na Tabela 5. Na Figura 57, estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados empregados neste estudo.

Tabela 5: distribuição granulométrica dos agregados.

Peneira		Porcentagem passante em massa (%)		
nº	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	51,4	100,0	100,0
3/8"	9,5	12,7	98,2	100,0
n 4	4,8	2,8	11,9	97,3
n 10	2,0	2,1	1,6	58,2
n 40	0,4	1,8	1,4	23,8
n 80	0,2	1,6	1,4	16,1
n 200	0,1	1,0	1,2	11,5

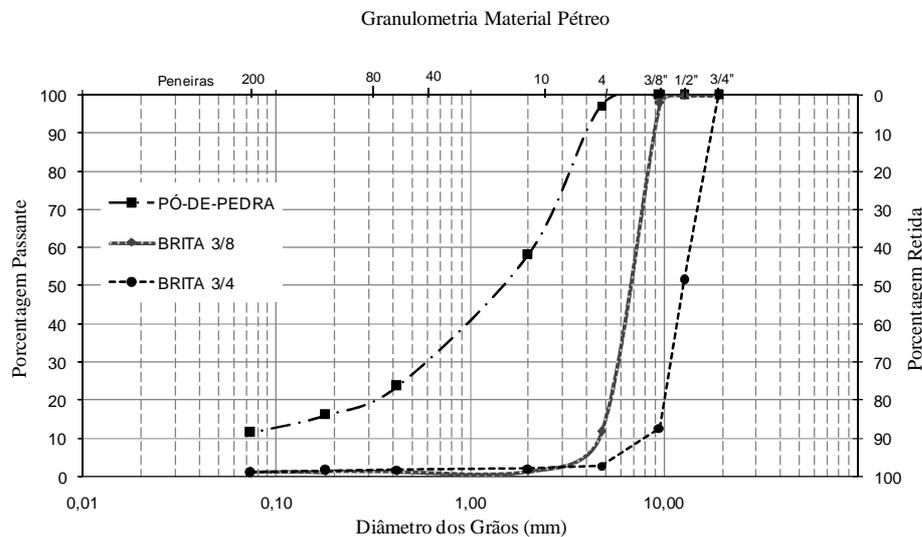


Figura 57: distribuição granulométrica dos agregados utilizados no estudo.

3.4.2 Cimentos asfálticos de petróleo

Foram utilizados dois tipos de cimento asfáltico na composição das misturas estudadas: um cimento asfáltico modificado por polímero e adição de TLA - CAP TLA FLEX e outro modificado por polímero - COMPAFLEX 60/85. Os cimentos asfálticos empregados neste estudo são utilizados em obras de pavimentação no estado do Rio Grande do Sul e os resultados da caracterização dos mesmos são mostrados nas Tabelas 6 e 7. Salienta-se que a especificação do CAP TLA FLEX foi fornecida pela empresa que comercializa este ligante modificado com adição de TLA.

Tabela 6: propriedades do cimento asfáltico modificado por polímero e adição de TLA (CAP TLA FLEX) utilizado na pesquisa.

Propriedade	Método	Especificação	Resultados
Ponto de Amolecimento (°C)	NBR 6560	58 min.	63
Penetração (0,1 mm)	NBR 6576	20 - 40	39
Viscosidade Brookfield 135°C (cp)	NBR 15184	1000 a 5000	1655
Viscosidade Brookfield 150°C (cp)	NBR 15184	500 a 2500	795
Viscosidade Brookfield 175°C (cp)	NBR 15184	100 a 1500	278
Recuperação Elástica à 25°C (%)	NBR 15086	60 min.	81

Tabela 7: propriedades do cimento asfáltico modificado por polímero (COMPAFLEX 60/85) utilizado na pesquisa (ANP, 2010).

Propriedade	Método	Especificação	Resultados
Ponto de Amolecimento (°C)	NBR 6560	60 min.	65
Penetração (0,1 mm)	NBR 6576	40 -70	50
Viscosidade Brookfield 135°C (cp)	NBR 15184	3000 máx.	898
Viscosidade Brookfield 150°C (cp)	NBR 15184	2000 máx.	360
Viscosidade Brookfield 177°C (cp)	NBR 15184	1000 máx.	173
Recuperação Elástica à 25°C (%)	NBR 15086	85 min.	92

3.4.3 Misturas asfálticas utilizadas

Nesta pesquisa foram utilizados dois diferentes tipos de misturas asfálticas produzidas na usina de asfalto e empregadas pela Concepa em obras de duplicação, reconstrução e reparos da BR-290/RS, sendo uma denominada de concreto asfáltico com CAP modificado por polímero e adição de TLA - CA-TLA e a outra de concreto asfáltico com CAP modificado por polímero (COMPAFLEX 60/85) - CA-E. A mistura CA-E também é utilizada no pavimento de trechos experimentais da BR-290/RS, na qual são realizados monitoramentos periodicamente.

Com o intuito de comparar as propriedades da mistura CA-E produzida na usina de asfalto foi realizado no Laboratório de Pavimentação da UFRGS uma mistura asfáltica modificada por polímero, utilizando COMPAFLEX 60/85, empregando a mesma composição granulométrica utilizada na mistura CA-E produzida na usina.

A composição granulométrica estabelecida para as misturas busca enquadrar o material próximo ao centro da faixa C do DNIT e dentro dos limites da faixa de trabalho, apresentando

diâmetro máximo dos agregados de 19 mm. As composições granulométricas da mistura CA-TLA e das misturas CA-E, produzidas na usina e no laboratório, são apresentadas na Figura 58.

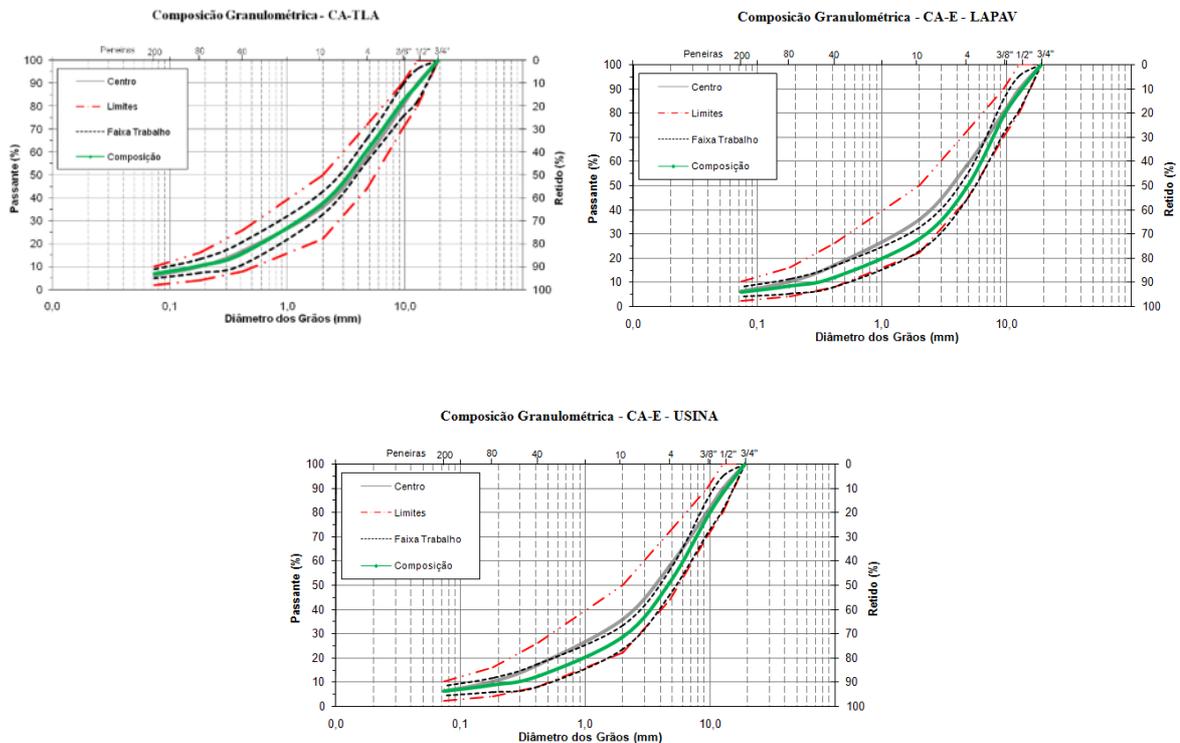


Figura 58: composição granulométrica estabelecida para as misturas CA-TLA e CA-E - Faixa C DNIT.

As empresas que comercializam o CAP TLA FLEX recomendam temperaturas para a mistura entre 178°C a 184°C e para compactação entre 169°C a 175°C, enquanto para a mistura com o COMPAFLEX 60/85 a temperatura deve estar entre 165°C e 172°C e para a compactação entre 155°C e 160°C. Na Tabela 8 estão resumidas as propriedades finais das misturas asfálticas como teor de ligante de projeto, volume de vazios (VV), vazios de agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), de densidade máxima medida (DMM), densidade máxima teórica (DMT) e densidade aparente (DAP). Além disso, o volume de vazios adotado para determinação do teor de ligante de projeto foi o que estava mais próximo de 4%.

Tabela 8: resumo das propriedades da mistura CA-TLA e da mistura CA-E.

Mistura	% Ligante	VV (%)	VAM (%)	RBV (%)	DMM	DMT	DAP
CA-TLA	5,10	4,10	16,40	75,00	2,530	-	2,428
CA-E - Usina	5,25	4,00	16,20	75,00	-	2,450	2,360
CA-E - LAPAV	5,50	4,75	17,40	72,70	2,536	-	2,390

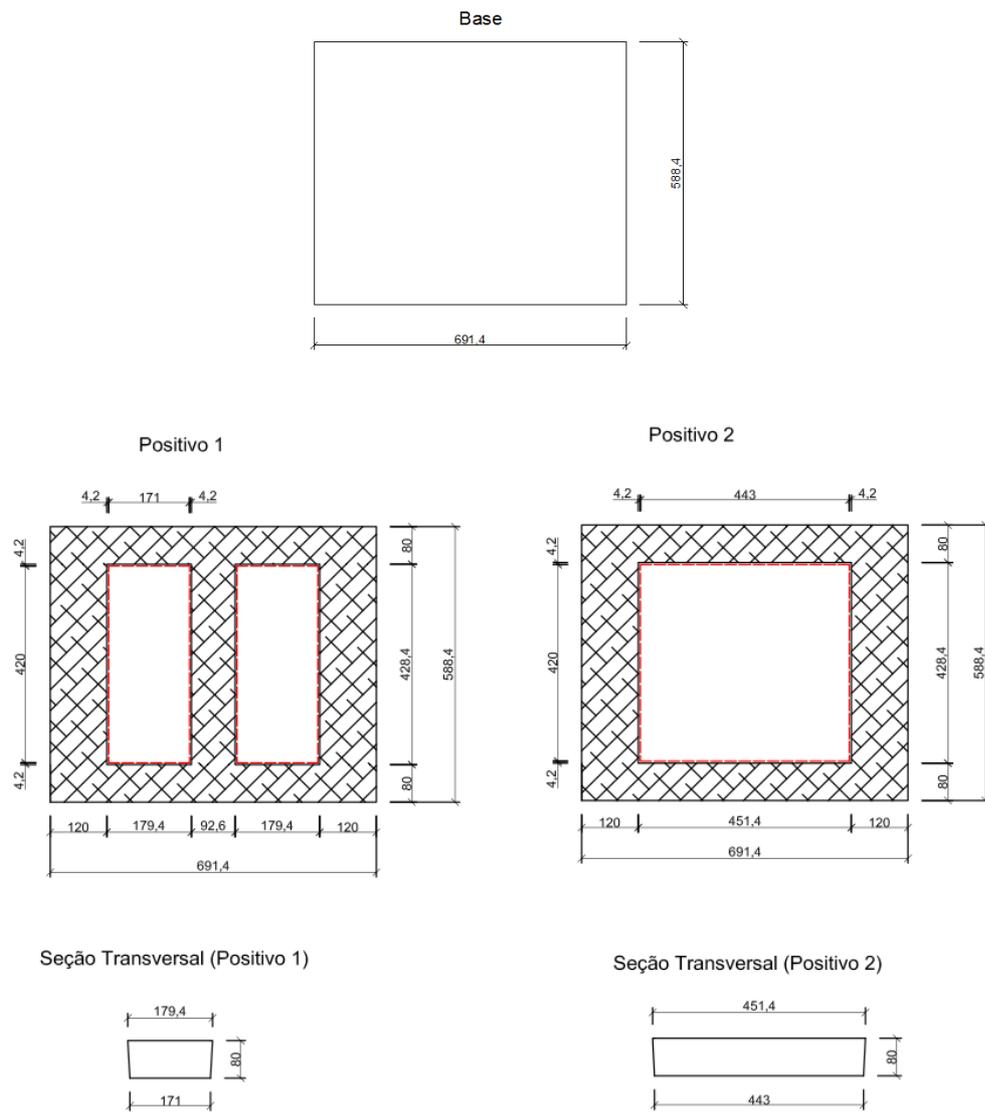
Como se pode verificar, a mistura CA-E produzida na usina de asfalto e a realizada no LAPAV apresentaram resultados distintos quanto a DMM. Contudo, optou-se por utilizar nas moldagens, a mistura asfáltica produzida na usina, em função da grande quantidade de mistura necessária para produzir as placas e, por esta ter sido empregada em trechos experimentais, frequentemente monitorados.

3.4.4 Preparação dos corpos de prova prismáticos e cilíndricos

A norma da AASHTO T-321-07 não determina o modelo do molde e nem a metodologia de compactação de placas para extração de corpos de prova prismáticos. Assim, diversos métodos podem ser encontrados na literatura, como apresentado no capítulo 2. A escolha do método de moldagem e compactação irá depender de diferentes fatores como a produção de amostras, a disponibilidade de equipamentos, bem como a possibilidade de adaptação dos moldes diretamente nas usinas de asfalto e, também, no laboratório.

Para a realização dos ensaios de fadiga à flexão em vigotas prismáticas foi necessário produzir grandes quantidades de mistura asfáltica. Em consequência disto, o sistema de moldagem e compactação para produção das amostras foi montado na usina de asfalto da Construtora Triunfo.

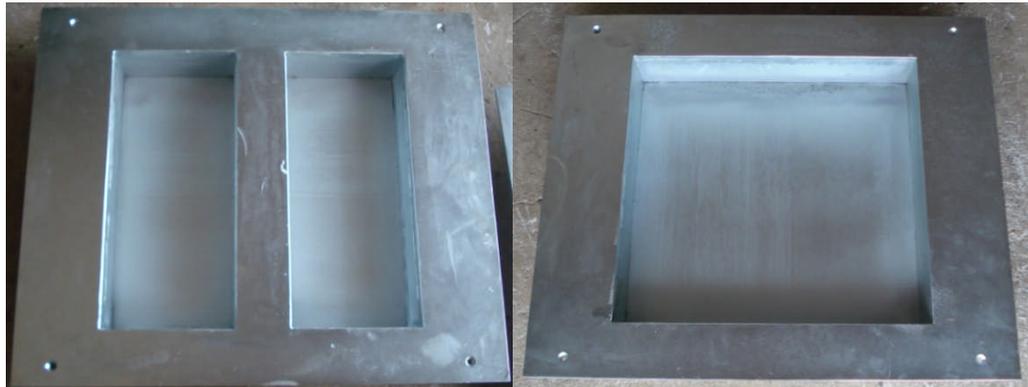
Visando a produção das amostras prismáticas para esta pesquisa, dimensionaram-se moldes metálicos, onde foram moldadas placas, com comprimento de 588,4 mm, largura de 691,4 mm e altura de 80 mm. Os detalhes e dimensões dos moldes metálicos podem ser vistos na Figura 59.



Observação:
- Medidas em mm

Figura 59: detalhamento dos moldes para produção dos corpos de prova prismáticos desenvolvidos para esta pesquisa.

Os moldes onde placas de mistura asfáltica foram moldadas e compactadas para posterior obtenção das vigotas foram produzidos através da usinagem de chapas metálicas, sendo as bases com chapa de 6,35 mm de espessura e os positivos com chapa de 9,53 mm de espessura. Na Figura 60 são apresentados os moldes metálicos usinados.

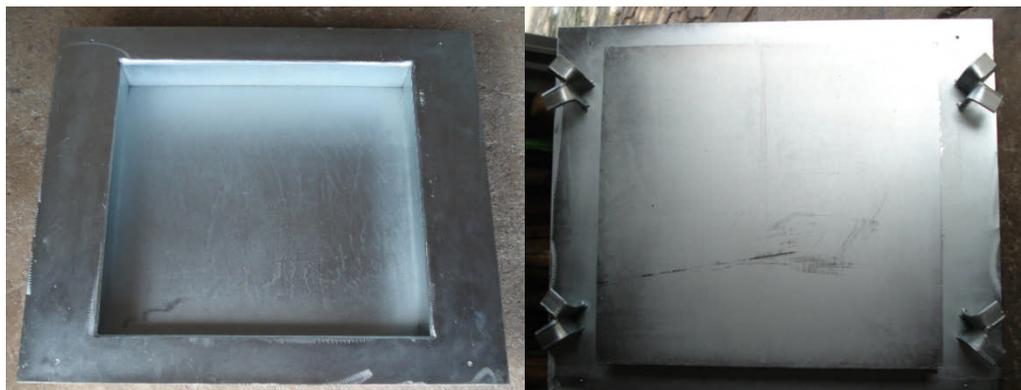


(a)

(b)

Figura 60: moldes usinados para moldagem de vigotas: (a) positivo 1 e (b) positivo 2.

O molde denominado de positivo 1 foi empregado para a moldagem de no máximo quatro vigas, sendo que cada vão comporta uma quantidade de mistura asfáltica necessária para a produção de duas amostras. No molde nomeado de positivo 2, podem ser produzidas até no máximo seis corpos de prova. Os dois moldes apresentam um ângulo de inclinação das faces de 3° , visando facilitar a retirada da placa do molde. Salienta-se que estes moldes são parafusados na base, a qual é fixada na pista de compactação com o auxílio de engastes localizados nos quatro cantos da base (Figura 61).



(a)

(b)

Figura 61: face superior (a) e inferior (b) do molde metálico denominado de base com engastes que servem para fixá-lo na pista de compactação.

Para construção da pista de moldagem e compactação das placas procurou-se utilizar uma pista existente construída em concreto, com o objetivo de evitar possíveis movimentações dos

moldes durante o processo de compactação, e adaptá-la às dimensões necessárias para colocação das bases e moldes metálicos descritos anteriormente. Na Figura 62 é possível observar as adaptações que foram realizadas na pista de concreto existente na usina.



Figura 62: adaptação da pista de concreto para colocação das bases e moldes metálicos.

As bases metálicas foram posicionadas na pista de concreto, Figura 63, através de fixadores de aço com o intuito de aumentar a rigidez do conjunto base e molde para que não ocorram possíveis deslocamentos durante a compactação das placas.



(a)

(b)

Figura 63: posicionamento das bases metálicas (a) na pista de concreto e dos moldes metálicos (b) no interior das bases.

Na Figura 64 é possível observar a pista de concreto adaptada para a moldagem de placas de misturas asfálticas. Salienta-se que para melhor circulação do rolo compactador utilizado na etapa de compactação das placas foi necessário construir uma rampa em massa asfáltica no início da pista de concreto.



Figura 64: pista de moldagem construída na usina de asfalto para produção das placas de misturas asfálticas.

Para realizar as moldagens das placas utilizou-se um papel, conhecido como papel pardo, que possui um dos lados liso, o qual fica em contato direto com o molde. O emprego deste papel tem como objetivo evitar a aderência da mistura asfáltica no molde, além de auxiliar na retirada das placas do interior dos moldes metálicos. Através da Figura 65 é possível verificar como este papel foi colocado nas faces dos moldes.



Figura 65: utilização de papel nos moldes metálicos com o intuito da massa asfáltica não aderir nas faces dos moldes.

As misturas asfálticas, com cimento asfáltico modificado por polímero e adição de TLA (CAP TLA FLEX) e com cimento asfáltico modificado por polímero (COMPAFLEX 60/85), utilizadas nas moldagens das placas foram produzidas na usina de asfalto seguindo as características dos projetos de dosagem descritas anteriormente. Com o intuito de controlar a compactação das placas, através da densidade aparente obtida no projeto de dosagem elaborado em laboratório, utilizou-se uma balança eletrônica para pesar as misturas asfálticas que foram colocadas no interior de cada molde para posterior processo de compactação.

Após o processo de pesagem da mistura asfáltica, a mesma foi colocada imediatamente no interior dos moldes para não ocorrer o resfriamento da mistura antes de ser realizada a compactação. No momento do preenchimento dos moldes é necessário tomar cuidado para que o mesmo fique totalmente preenchido com a mistura, sem apresentar espaços vazios, pois isto poderá influenciar no corte e volume de vazios das vigotas extraídas das placas. A Figura 66 mostra como é realizado o processo de preenchimento dos moldes metálicos com a mistura asfáltica.



Figura 66: processo de preenchimento dos moldes metálicos com massa asfáltica.

As temperaturas de compactação das misturas asfálticas devem ser controladas no momento do processo de compactação, conforme pode ser verificado na Figura 67. Estas temperaturas devem estar de acordo com o intervalo estabelecido pelos fornecedores dos ligantes asfálticos.



Figura 67: verificação da temperatura de compactação da mistura asfáltica.

Ao preencher os moldes com a mistura asfáltica foi realizado uma pré-compactação com auxílio de um soquete de madeira. Este processo foi estabelecido com o objetivo de proporcionar uma adequada acomodação do material no interior dos moldes. A pré-compactação da mistura asfáltica pode ser verificada através da Figura 68.



Figura 68: processo de pré-compactação da mistura asfáltica no interior dos moldes metálicos.

Para realizar a compactação das placas utilizou-se um rolo compactador normalmente utilizado em campo, sendo composto por um tambor dianteiro de aço e pneus traseiros. Na Figura 69 é possível observar como foi realizado o processo de compactação da mistura asfáltica nos moldes. A compactação foi realizada até atingir a densidade aparente de projeto de cada mistura, monitorando a altura da placa. Salienta-se que o ideal é a utilização de um rolo chapa-chapa, pois não se deve utilizar os pneus na compactação das placas maiores devido aos

problemas de deformação e, também, não se pode vibrar o rolo em função de possíveis deslocamentos dos moldes.



Figura 69: processo de compactação das placas de mistura asfáltica.

Após o processo de compactação as placas de mistura asfáltica permanecem no interior dos moldes, como demonstrado na Figura 70, até atingir o resfriamento total da mistura. Este procedimento é necessário, pois auxilia no momento de retirada das placas do interior dos moldes. Além disso, vale ressaltar que as faces dos moldes metálicos apresentam uma inclinação de três graus, também, com o objetivo de melhorar a remoção das placas de mistura asfáltica.



Figura 70: placas de mistura asfáltica compactadas.

As placas de misturas asfálticas após completo resfriamento foram retiradas dos moldes, como mostra a Figura 71.



Figura 71: processo de desmoldagem das placas de mistura asfáltica.

Logo após o processo de desmoldagem as placas foram armazenadas em local apropriado, Figura 72, até realizar o transporte das mesmas para o local onde foi realizado o processo de corte e extração das vigotas.



Figura 72: armazenamento das placas de mistura asfáltica.

As placas foram transportadas da usina de asfalto para uma marmoraria, onde foi realizado o processo de corte, em caixas de madeira preenchidas com areia, conforme mostra a Figura 73, com o intuito de não ocorrer o movimento e a deformação das placas durante o processo de transporte.



Figura 73: transporte das placas de mistura asfáltica da usina de asfalto para o local do processo de corte.

Para realizar os procedimentos de corte das placas e obter vigotas nos tamanhos estipulados por norma, utilizou-se uma serra automatizada com velocidade constante. O emprego deste processo de serragem teve como objetivo obter um corte preciso e vigotas com uma superfície uniforme, sem a presença de ranhuras. Salienta-se que durante o corte das placas tomou-se cuidado para que não houvesse aquecimento do disco, através do bombeamento constante de água no mesmo, pois isso levaria a exsudação de ligante nas faces das vigas. Na Figura 74 constam as etapas do processo de corte das placas.



Figura 74: processo de corte das placas de mistura asfáltica para obtenção das vigotas.

Nesta pesquisa, foram produzidas vigotas nas dimensões 380 mm de comprimento, 63 mm de largura e 50 mm de altura, após as faces serem serradas, buscando atender as dimensões e critérios de faceamento recomendados pela norma da AASHTO T-321-07, conforme mostra a Figura 75. Mello (2008) afirma que o processo de corte das vigotas é essencial, pois a serragem das faces permite obter superfícies lisas, reduzindo a probabilidade de imperfeições nas suas dimensões e, com isso, reduz a variabilidade dos ensaios. O processo de corte, também, auxilia na eliminação de possíveis microfissuras na base da vigota produzidas durante a compactação da mistura asfáltica.



Figura 75: vigotas obtidas após o processo de corte das placas de mistura asfáltica.

Os corpos de prova cilíndricos, utilizados nos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, foram extraídos com sonda rotativa das placas de mistura asfáltica moldadas na usina de asfalto e depois serrados, apresentando diâmetro de $101,6 \pm 2$ mm e altura $53,4 \pm 3$ mm, como mostra a Figura 76.



Figura 76: extração de corpos de prova cilíndricos de placas moldadas na usina de asfalto.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados, tais como: densidade aparente, percentagem de volume de vazios, grau de compactação das amostras, resistência à tração por compressão diametral, módulo dinâmico, vida de fadiga à flexão em quatro pontos e por compressão diametral.

Os ensaios foram realizados em corpos de prova prismáticos e cilíndricos extraídos de placas de mistura asfáltica moldadas na usina de asfalto com duas diferentes misturas, CA-TLA e CA-E.

4.1 DENSIDADE APARENTE, PERCENTAGEM DE VOLUME DE VAZIOS E GRAU DE COMPACTAÇÃO DAS AMOSTRAS

Com o intuito de testar em laboratório a metodologia empregada nesta pesquisa para a moldagem e compactação das placas de misturas asfálticas, foram realizados ensaios para determinação da densidade aparente dos corpos de prova prismáticos e cilíndricos extraídos das placas moldadas na usina de asfalto seguindo os procedimentos preconizados pela norma NBR 15573 (2012). Também, buscou-se determinar a percentagem de volume de vazios (VV) e o grau de compactação (GC) destas amostras, de acordo com o estabelecido na norma DNIT 031/2006 – ES.

4.1.1 Resultados de densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação dos corpos de prova prismáticos

Nas Tabelas 9 e 10 estão apresentados os resultados de densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação obtidos nos corpos de prova prismáticos moldados com a mistura asfáltica CA-TLA e a mistura CA-E. Salienta-se que o valor de densidade aparente de projeto para a mistura CA-TLA e a CA-E foi de 2,428 e 2,360, respectivamente.

Tabela 9: resultados da densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.

Mistura	Identificação das vigotas	Densidade Aparente	Volume de Vazios (%)	Grau de Compactação (%)
CA-TLA	1	2,413	4,6	99
	2	2,424	4,2	100
	3	2,415	4,6	99
	4	2,420	4,4	100
	5	2,425	4,1	100
	6	2,404	5,0	99
	7	2,404	5,0	99
	8	2,403	5,0	99
	9	2,407	4,8	99
	Média	2,413	4,6	99
	Des. Padrão	0,01	0,34	0,37
	Coef. Variação	0,4%	7,4%	0,4%

Tabela 10: resultados da densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação das vigotas moldadas com a mistura CA-E.

Mistura	Identificação das vigotas	Densidade Aparente	Volume de Vazios (%)	Grau de Compactação (%)
CA-E	1	2,376	3,0	101
	2	2,368	3,4	100
	3	2,366	3,4	100
	4	2,336	4,7	99
	5	2,350	4,1	100
	6	2,340	4,5	99
	7	2,348	4,2	99
	8	2,376	3,0	101
	9	2,348	4,1	100
	10	2,340	4,5	99
	11	2,371	3,2	100
	12	2,341	4,4	99
	13	2,330	4,9	99
	14	2,362	3,6	100
	15	2,343	4,4	99
	16	2,358	3,7	100
	17	2,375	3,1	101
	18	2,354	3,9	100
Média	2,355	3,9	100	
Des. Padrão	0,01	0,61	0,65	
Coef. Variação	0,6%	15,7%	0,7%	

Os resultados de densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação das vigotas produzidas com a mistura CA-TLA e CA-E podem, também, serem visualizados nas Figuras 77, 78, 79 e 80 onde é possível observar como ocorreu a variação de resultados entre as vigotas estudadas.

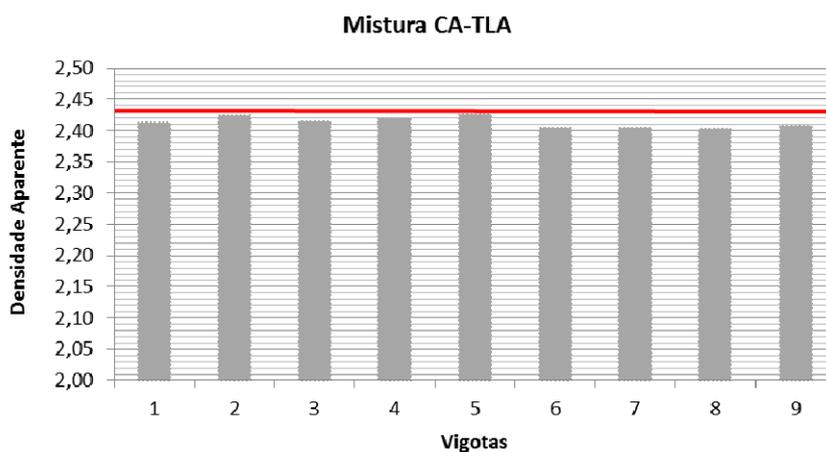


Figura 77: densidade aparente das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.

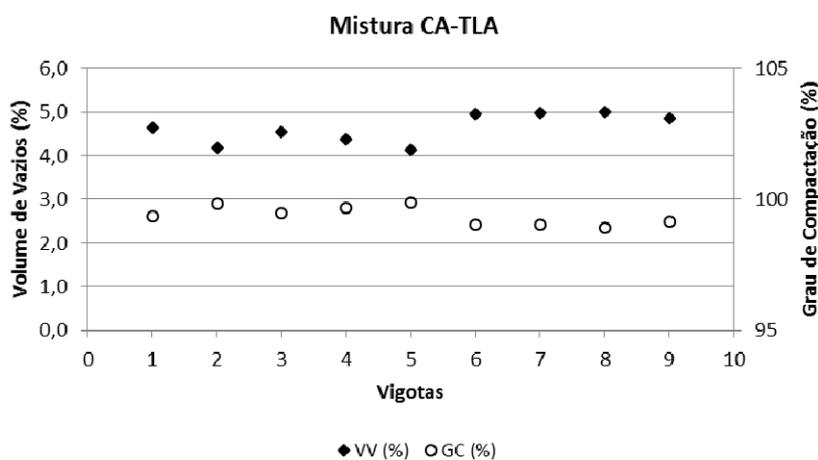


Figura 78: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.

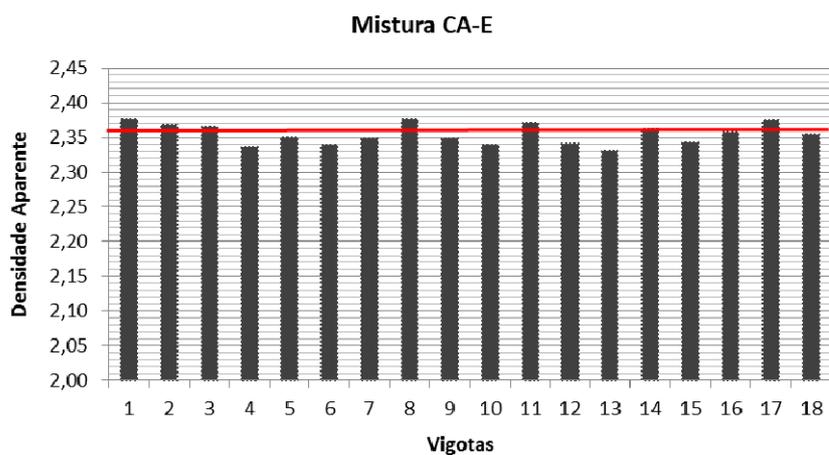


Figura 79: densidade aparente das vigotas moldadas com a mistura CA-E.

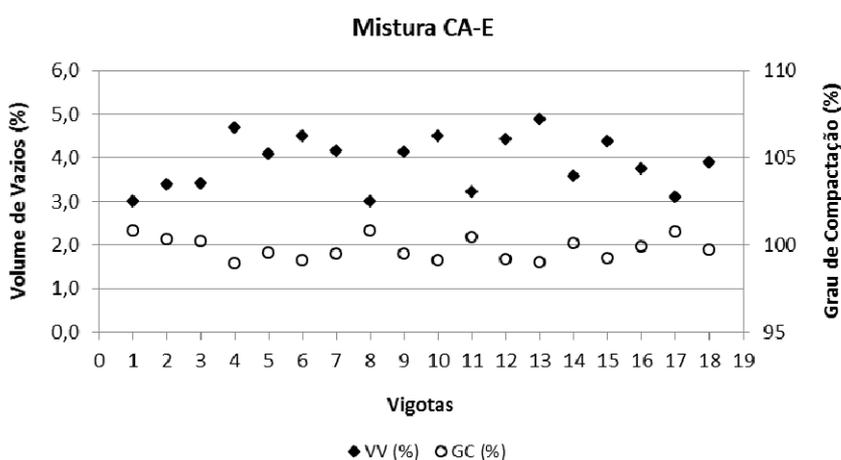


Figura 80: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) das vigotas moldadas com a mistura CA-E.

Constata-se que os resultados das densidades aparentes obtidas nas vigotas extraídas das placas moldadas na usina de asfalto estão coerentes com os valores estabelecidos nos projetos de ambas as misturas asfálticas estudadas. As percentagens de volume de vazios das misturas CA-TLA e CA-E apresentaram uma maior variação de resultados, como evidenciado pelos coeficientes de variação determinados. Isto pode ter ocorrido devido ao processo de pré-compactação ser manual, podendo influenciar na homogeneidade da mistura no interior dos moldes.

Observa-se que os resultados de volume de vazios das misturas CA-TLA ficaram entre 4,1% e 5% e da mistura CA-E entre 3% e 4,9%, enquanto que o grau de compactação obtido para a mistura CA-TLA apresentou valores entre 99% e 100% e para a mistura CA-E ficou entre 99% e 101%. Estes resultados mostram que a metodologia empregada para a compactação das placas de misturas asfálticas está adequada, pois apresenta valores semelhantes aos estabelecidos nos projetos destas misturas.

Com o objetivo de verificar a compactação ao longo da vigota, realizou-se o corte de uma amostra em quatro partes, como mostra a Figura 81, sendo determinada a densidade aparente, a percentagem de volume de vazios e o grau de compactação das mesmas.



Figura 81: vigota dividida em quatro partes para ensaio de densidade aparente, grau de compactação e volume de vazios.

Os resultados obtidos para cada uma das quatro divisões estão mostrados nas Figuras 82 e 83, onde é possível visualizar uma pequena variação ao longo da vigota dos valores de densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação, sendo que o VV (%) apresentou resultados entre 3,0% e 3,4% e o GC (%) entre 100% e 101%.

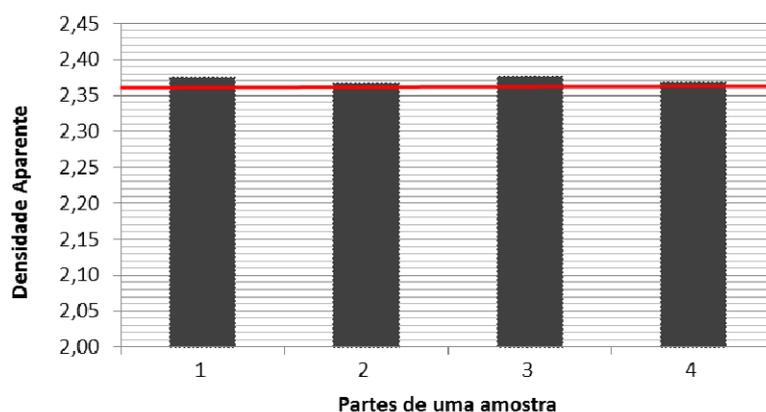


Figura 82: densidade aparente das partes de uma vigota moldada com a mistura CA-E.

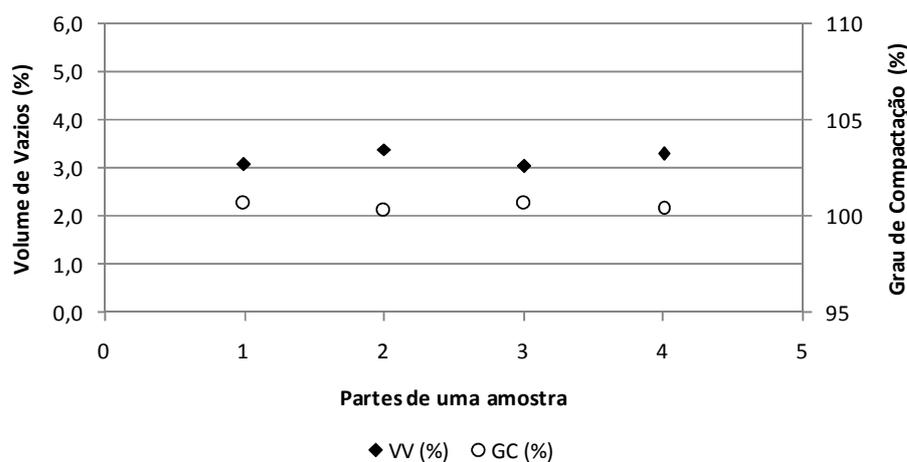


Figura 83: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) das partes de uma vigota moldada com a mistura CA-E.

A homogeneidade dos VV e GC ao longo da vigota mostra que a forma de compactação selecionada é adequada, apresentado pequena variação da densidade aparente.

4.1.2 Resultados de densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação dos corpos de prova cilíndricos

A verificação da densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação também foi realizada nos corpos de prova cilíndricos extraídos das placas. As Tabelas 11 e 14 mostram os valores obtidos para estas propriedades na mistura CA-TLA e CA-E, respectivamente.

Tabela 11: resultados da densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA.

Mistura	Identificação dos corpos de prova cilíndricos	Densidade Aparente	Volume de Vazios (%)	Grau de Compactação (%)
CA-TLA	1	2,423	4,2	100
	2	2,432	3,9	100
	3	2,447	3,3	101
	4	2,429	4,0	100
	5	2,426	4,1	100
	6	2,432	3,9	100
	7	2,430	3,9	100
	8	2,427	4,1	100
	9	2,432	3,9	100
	10	2,430	3,8	100
	11	2,430	3,8	100
	12	2,440	3,4	101
	13	2,430	3,8	101
	Média	2,431	3,9	100
	Des. Padrão	0,01	0,26	0,43
Coef. Variação	0,3%	6,8%	0,4%	

Tabela 12: resultados da densidade aparente, percentagem de volume de vazios e grau de compactação dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.

Mistura	Identificação dos corpos de prova cilíndricos	Densidade Aparente	Volume de Vazios (%)	Grau de Compactação (%)
CA-E	1	2,326	5,0	99
	2	2,366	3,4	100
	3	2,366	3,4	100
	4	2,356	3,8	100
	5	2,344	4,3	99
	6	2,330	4,9	99
	7	2,354	3,9	100
	8	2,332	4,8	99
	9	2,336	4,7	99
	10	2,340	4,5	99
	11	2,340	4,6	99
	12	2,330	4,9	99
	13	2,330	4,9	99
	Média	2,342	4,4	99
	Des. Padrão	0,01	0,57	0,56
Coef. Variação	0,6%	12,9%	0,6%	

Nas Figuras 84, 85, 86 e 87 é possível analisar, também, a variação dos resultados de densidade aparente, VV (%) e GC (%) obtidos nos corpos de prova cilíndricos moldados com as misturas CA-TLA e CA-E.

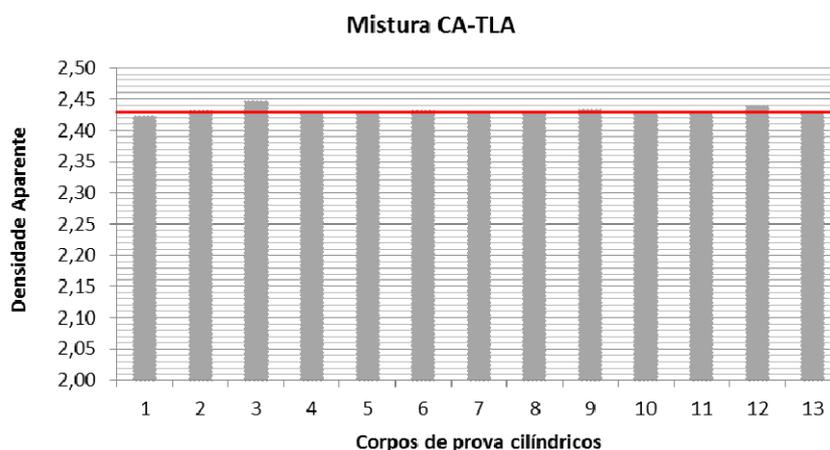


Figura 84: densidade aparente dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA

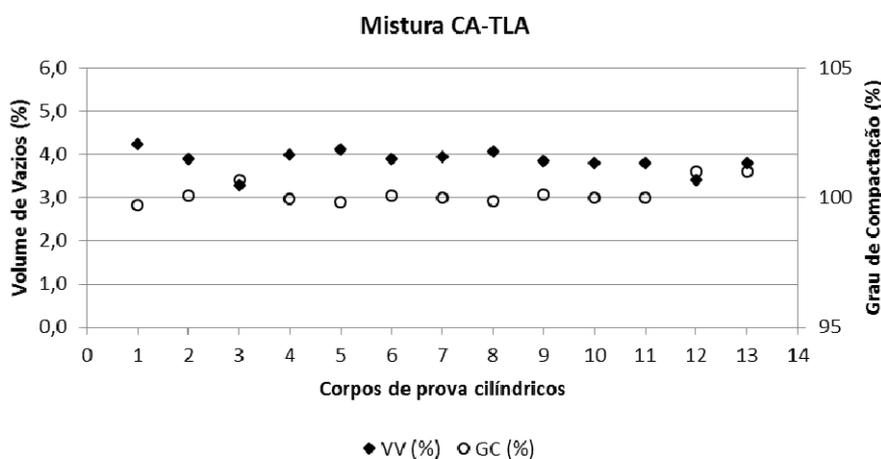


Figura 85: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA.

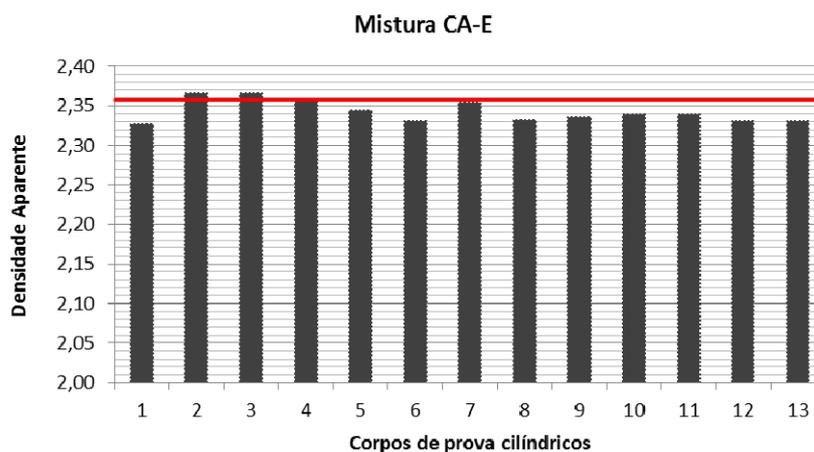


Figura 86: densidade aparente dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.

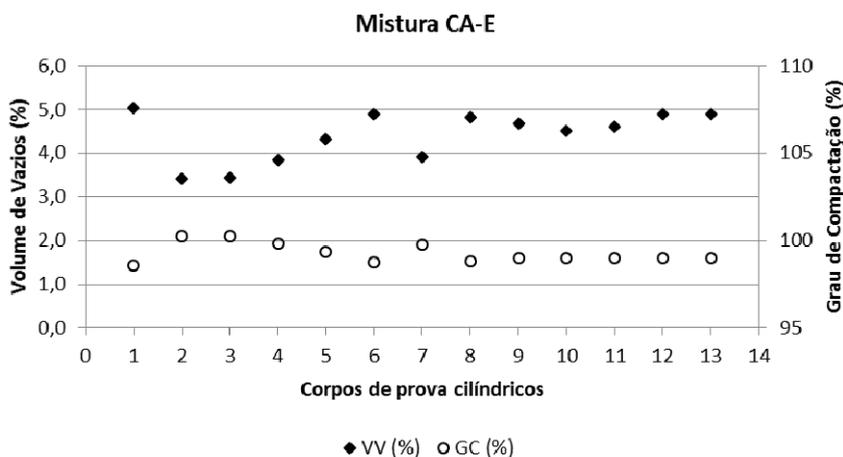


Figura 87: resultados da percentagem de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.

Em relação às densidades aparentes obtidas nos corpos de prova cilíndricos os resultados ficaram próximos dos valores determinados nos projetos de ambas as misturas. Contudo, houve uma maior variação nos resultados de percentagem de volume de vazios obtidos na mistura CA-E, como mostra o coeficiente de variação. Os resultados obtidos para a percentagem de volume de vazios e o grau de compactação da mistura CA-TLA ficaram entre 3,3% e 4,2% e 100% e 101%, respectivamente. Já o VV (%) da mistura CA-E apresentou uma maior variação ficando entre 3,4% e 5% e o GC (%) mostrou valores entre 99% e 100%.

4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados de acordo com a norma NBR-15087 (2012), sendo ensaiados três corpos de prova para cada mistura estudada com temperatura de 25°C. Na Tabela 13 estão apresentados os resultados de RT obtidos para as misturas CA-E e CA-TLA com suas respectivas médias e desvio padrão.

Tabela 13: resultados de RT das misturas asfálticas estudadas.

		CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação
CA-E	VV (%)	4,5	4,6	4,9	5,0	4,8	0,24	5,0%
	RT (MPa)	0,82	0,80	0,85	0,84	0,83	0,02	2,7%
CA-TLA	VV (%)	3,8	3,8	3,4	3,8	3,7	0,20	5,4%
	RT (MPa)	1,61	1,61	1,51	1,62	1,59	0,05	3,3%

Pode-se observar que a mistura CA-TLA apresentou valores de RT significativamente maiores que os da mistura CA-E, isto ocorre devido ao CAP TLA FLEX ser mais viscoso e a mistura CA-TLA apresentar uma maior densidade aparente. A mistura CA-TLA e CA-E apresentaram baixos desvios padrão de 0,05 MPA e 0,02 MPA, respectivamente, para os resultados de RT obtidos, além disso, para ambas as misturas o coeficiente de variação apresentou valores próximos.

Os valores médios de resistência à tração por compressão diametral foram utilizados nas taxas de tensão de tração utilizadas nos ensaios de fadiga por compressão diametral e nos ensaios de fadiga à flexão sob tensão controlada.

4.3 ENSAIOS DE MÓDULO DINÂMICO

O ensaio para obtenção do módulo dinâmico e ângulo de fase foi realizado segundo os procedimentos da ASTM 3497 (1995), com uma forma de carga senoidal, sob deformação controlada de 50µε. As frequências utilizadas na realização dos ensaios foram 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1Hz, sendo aplicadas em ordem decrescente, e em três diferentes temperaturas, 15°C, 20°C e 25°C.

Os resultados do ensaio de módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA encontram-se nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. A partir dos resultados apresentados nas tabelas é possível observar o comportamento do módulo dinâmico e do ângulo de fase em função das temperaturas e das frequências aplicadas.

Tabela 14: resultados do ensaio de módulo dinâmico da mistura CA-E.

Volume de vazios (%): 3,4			Densidade Aparente: 2,37		
Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	Ângulo de Fase (°)
15	10	8625	2769	9105	17,8
15	5	7259	2757	7725	20,8
15	2	5424	2518	6003	24,9
15	1	4168	2406	4857	30,0
15	0,5	3215	2056	3834	32,6
15	0,2	2119	1597	2672	37,0
15	0,1	1530	1257	1986	39,4
20	10	5987	2703	6531	24,3
20	5	4562	2405	5198	27,8
20	2	3163	2015	3714	32,5
20	1	2239	1681	2792	36,9
20	0,5	1545	1301	2026	40,1
20	0,2	957	889	1318	42,9
20	0,1	673	654	946	44,2
25	10	3305	2147	3941	33,0
25	5	2367	1745	2955	36,4
25	2	1503	1288	1956	40,6
25	1	1003	948	1400	43,4
25	0,5	695	690	997	44,8
25	0,2	451	462	637	45,3
25	0,1	322	326	451	45,7

Tabela 15: resultados do ensaio de módulo dinâmico da mistura CA-TLA.

Volume de vazios (%): 4,0			Densidade Aparente: 2,43		
Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	Ângulo de Fase (°)
15	10	12433	3077	12874	13,9
15	5	10833	3106	11358	16,0
15	2	8802	3065	9390	19,2
15	1	7426	3031	7968	22,2
15	0,5	5968	2847	6643	25,5
15	0,2	4362	2488	5068	29,7
15	0,1	3369	2196	3993	33,1
20	10	9579	3317	10164	19,1
20	5	8048	3252	8608	22,0
20	2	5963	2934	6595	26,2
20	1	4542	2622	5246	30,0
20	0,5	3332	2214	4014	33,6
20	0,2	2188	1691	2787	37,7
20	0,1	1546	1302	2001	40,1
25	10	6093	3064	6849	26,7
25	5	4732	2743	5410	30,1
25	2	3123	2187	3828	35,0
25	1	2233	1783	2843	38,6
25	0,5	1581	1389	2100	41,3
25	0,2	962	923	1342	43,8
25	0,1	685	671	959	44,4

As curvas isotérmicas das misturas CA-E e CA-TLA, que representam o módulo dinâmico em função da frequência de solicitação, e também o ângulo de fase em função da frequência são apresentados nas Figuras 88 a 91 para as temperaturas ensaiadas.

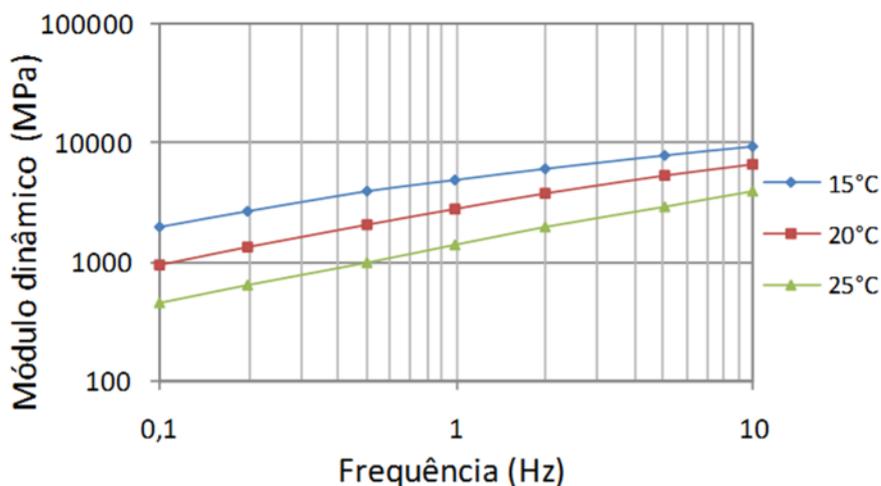


Figura 88: módulo dinâmico da mistura CA-E em função das frequências de solicitação.

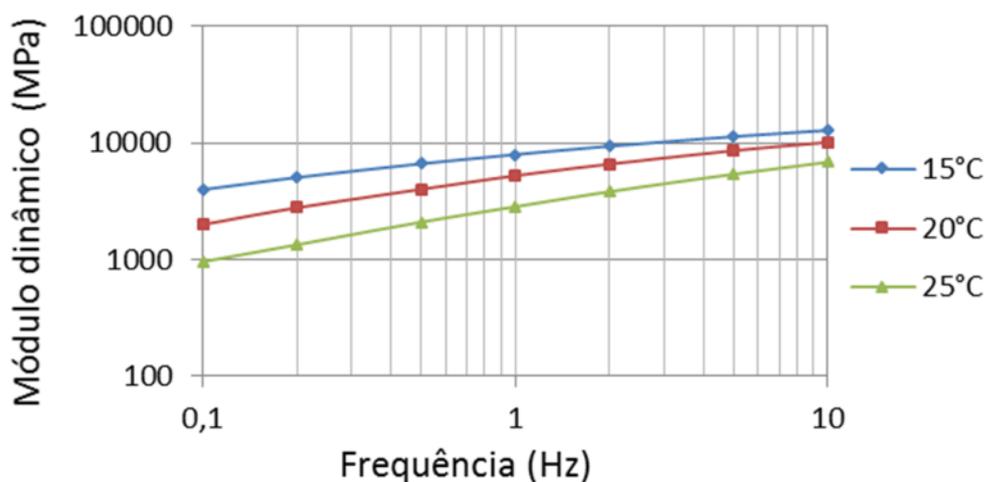


Figura 89: módulo dinâmico da mistura CA-TLA em função das frequências de solicitação.

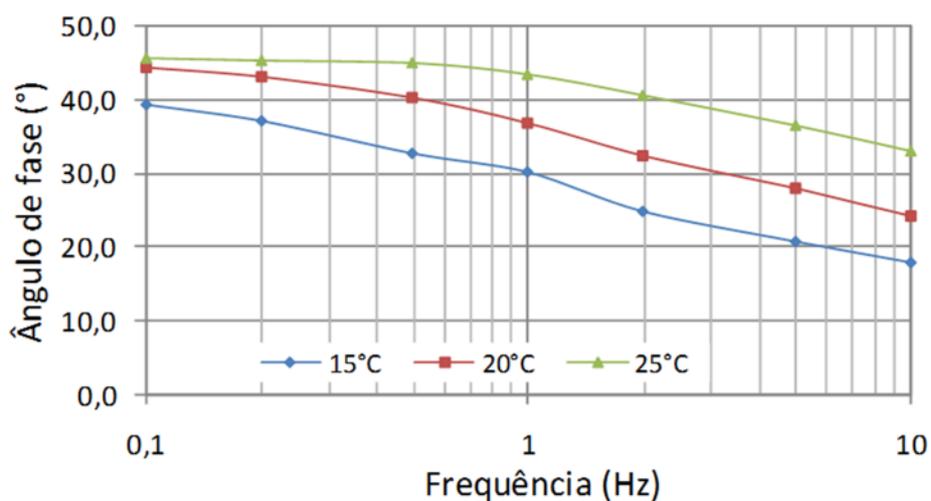


Figura 90: ângulos de fase da mistura CA-E em função das frequências de solicitação.

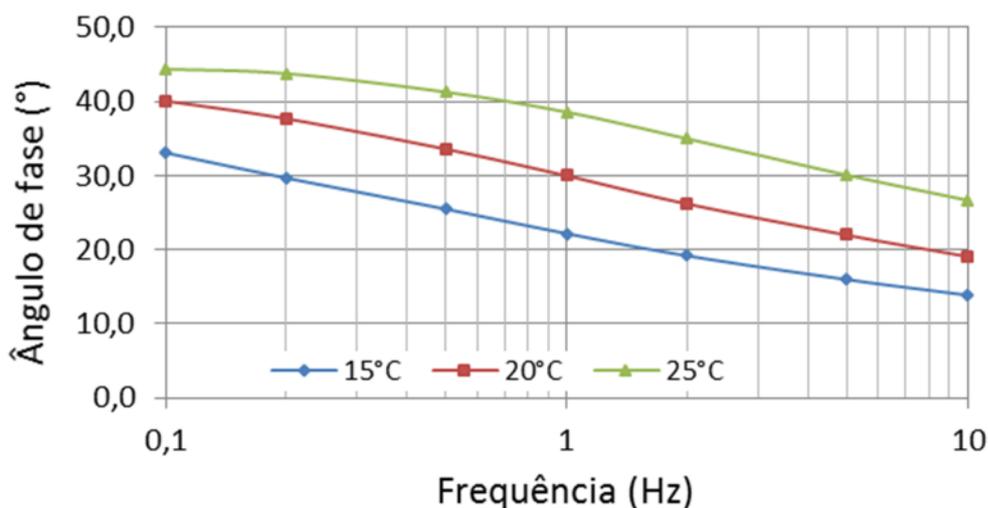


Figura 91: ângulos de fase da mistura CA-TLA em função das frequências de solicitação.

Os resultados obtidos nos ensaios de módulo dinâmico para as duas misturas analisadas mostram que $|E^*|$ aumenta com o acréscimo da frequência e diminui com a elevação da temperatura, enquanto que o ângulo de fase reduz com o aumento da frequência e aumenta com o acréscimo da temperatura. Este comportamento era o esperado de acordo com a literatura consultada.

Nas Figuras 92 e 93 é possível observar o comportamento do módulo dinâmico e do ângulo de fase, em função da frequência aplicada, das misturas CA-E e CA-TLA para as temperaturas de 15°C, 20°C e 25°C.

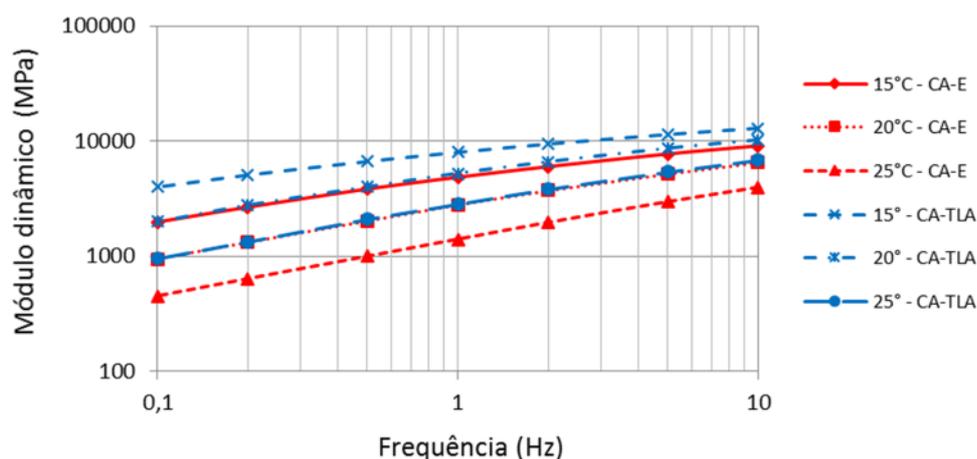


Figura 92: módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA.

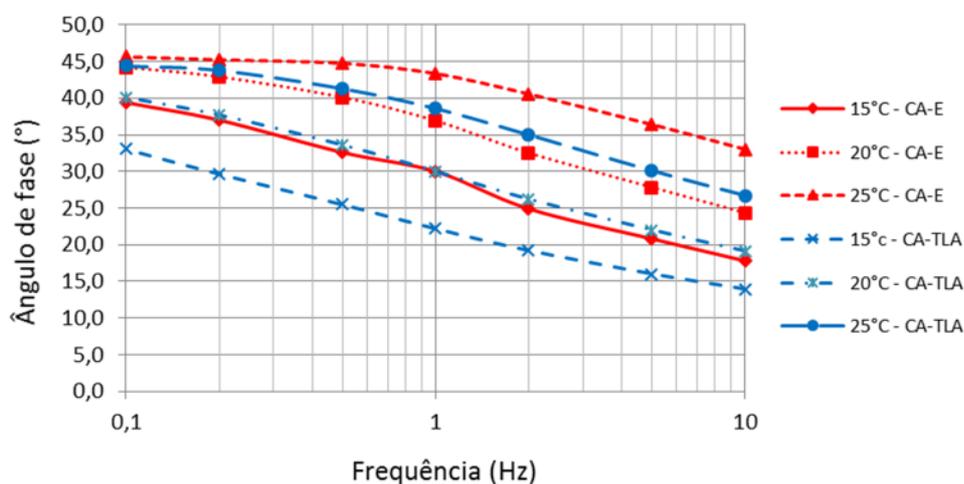


Figura 93: ângulo de fase das misturas CA-E e CA-TLA.

Observa-se que a mistura CA-TLA apresentou um módulo dinâmico maior em relação ao da mistura CA-E, para todas as temperaturas ensaiadas. Este comportamento era esperado em função do CAP TLA FLEX ser mais viscoso que o COMPAFLEX 60/85. Nota-se, também, que em ambas as misturas os resultados de $|E^*|$ apresentam uma maior dispersão para a

frequência de 0,1 Hz e uma menor dispersão para 10 Hz. Isto ocorre, pois com o aumento da frequência, o ângulo de fase diminui e a mistura tende para um comportamento mais elástico e, com isso, menor a dispersão.

Em relação ao ângulo de fase, o qual está relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos, a mistura CA-E apresentou ângulos de fase superiores para todas as frequências de solitação em comparação com a mistura CA-TLA, indicando uma tendência a ser mais suscetível à ação da temperatura.

As representações dos resultados do ensaio de módulo dinâmico auxiliam na compreensão das características do comportamento mecânico das misturas asfálticas que variam com a temperatura e frequência imposta. Além das curvas isotérmicas, o módulo dinâmico das misturas pode ser representado através da curva de equivalência frequência-temperatura (Curva Mestre), das curvas isócronas, do espaço de Black e do plano Cole-Cole, conforme segue.

4.3.1 Curva de equivalência frequência-temperatura (curva mestra)

A representação do módulo dinâmico através da curva de equivalência frequência-temperatura apresenta informações em relação ao comportamento visco-elástico das misturas asfálticas. Esta curva é obtida através da transformação das curvas isotérmicas em uma única curva, onde os dados dos módulos para várias temperaturas são deslocados com a sua respectiva frequência até originarem uma só curva para uma temperatura de referência.

Nas Figuras 94 e 95 são apresentadas as curva frequência-temperatura das misturas CA-E e CA-TLA, respectivamente, para a temperatura de referência de 20°C, obtida pela equação de Willian, Landel e Ferry.

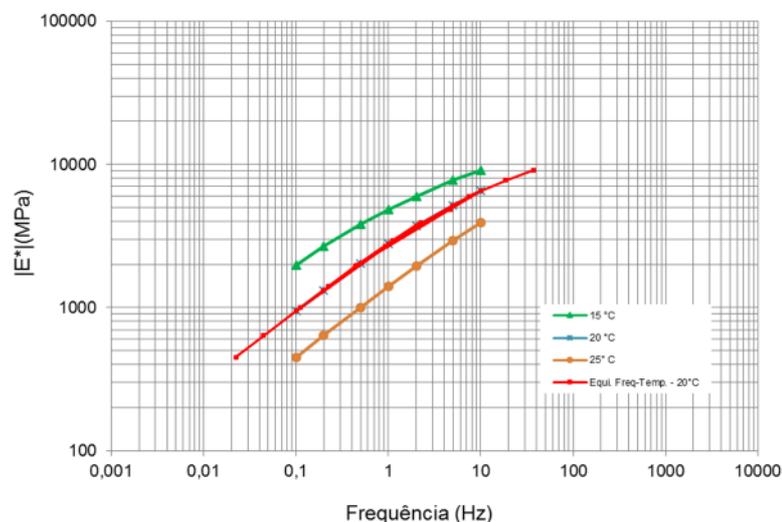


Figura 94: curva frequência-temperatura da mistura CA-E.

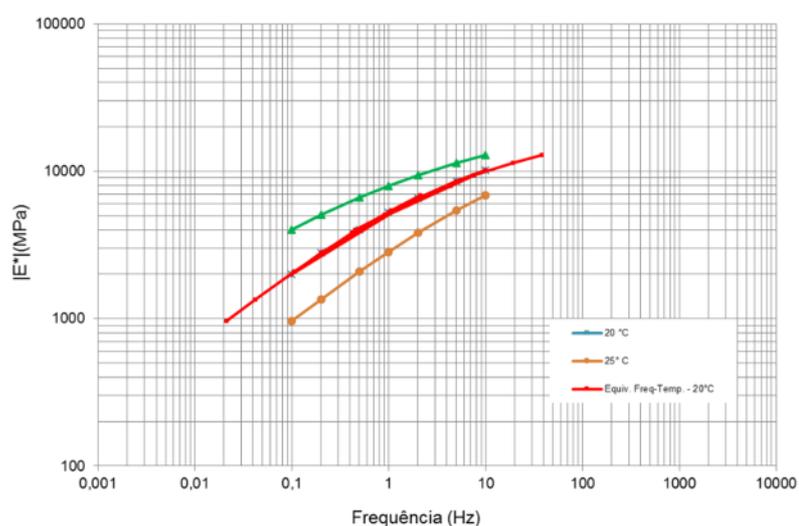


Figura 95: curva frequência-temperatura da mistura CA-TLA.

Através da curva de equivalência frequência-temperatura é possível obter valores de módulo em frequências inacessíveis durante o ensaio. Além disso, a curva demonstra a dependência do material em relação à temperatura, ou seja, uma curva horizontal representa um comportamento elástico da mistura, enquanto que uma curva próxima da vertical caracteriza uma mistura viscosa, com um comportamento muito susceptível às variações de temperatura e de frequência. Na Figura 96 é possível observar o comportamento das duas representações da curva frequência-temperatura das misturas CA-E e CA-TLA.

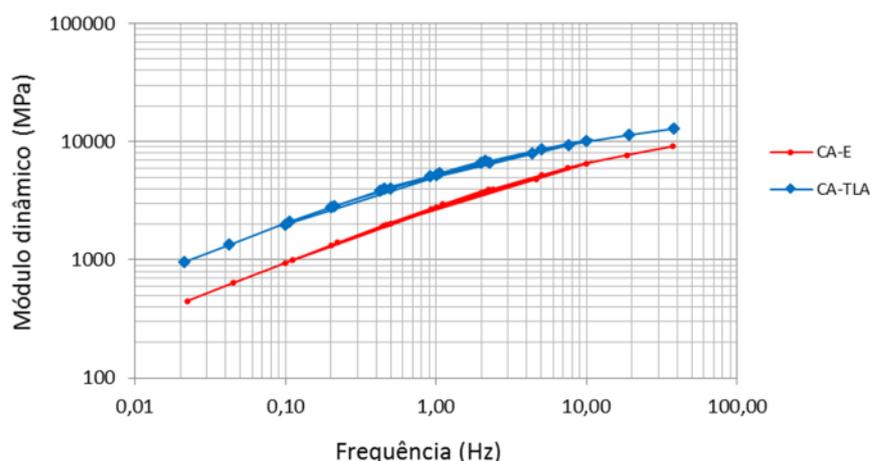


Figura 96: representação do módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA na curva frequência-temperatura.

Observa-se na Figura 96 que as curvas da mistura CA-E e CA-TLA representam um material visco-elástico, pois suas curvas estão próximas da vertical. Além disso, a curva da mistura CA-E representa um comportamento mais propenso às variações de temperatura e de frequência em comparação com a mistura CA-TLA. Pode-se perceber, também, que quanto maior a frequência maior é o valor do módulo dinâmico, comportamento frequente em materiais visco-elásticos.

4.3.2 Curva isócrona

As curvas isócronas representam o módulo dinâmico em função da temperatura, para cada nível de frequência, sendo assim, possível verificar a susceptibilidade térmica das misturas asfálticas. Nas Figuras 97 e 98 são mostradas as representações do módulo dinâmico através das curvas isócronas para as misturas CA-E e CA-TLA, respectivamente.

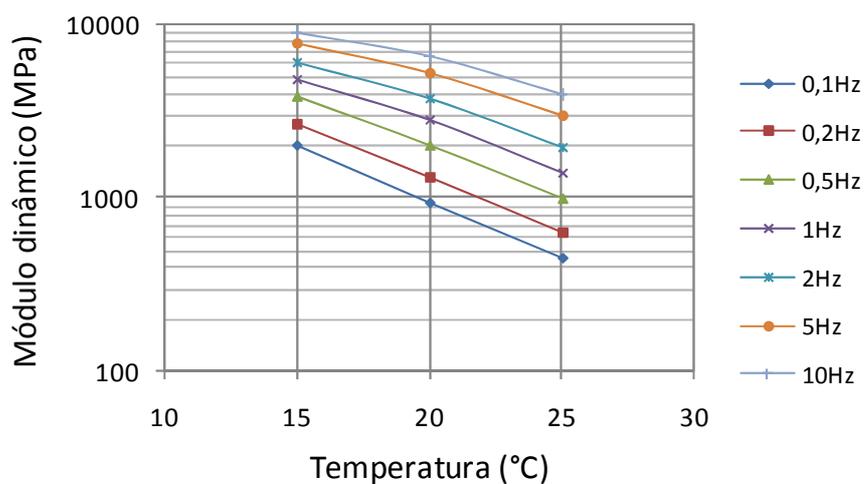


Figura 97: representação do módulo dinâmico da mistura CA-E na curva isócrona.

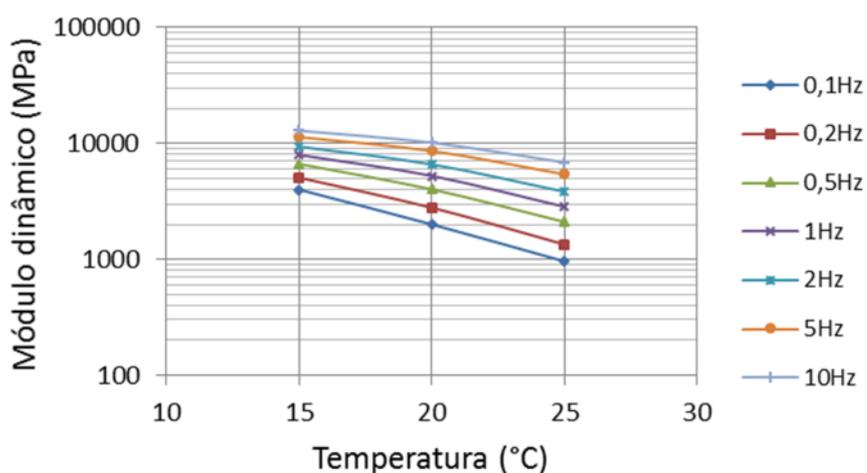


Figura 98: representação do módulo dinâmico da mistura CA-TLA na curva isócrona.

Observa-se através das curvas isócronas que ocorre uma redução do módulo dinâmico com o acréscimo da temperatura, em ambas as misturas asfálticas. Já em relação à frequência de solitação é possível verificar que quanto maior a frequência de ensaio maior é o valor do módulo complexo.

Nota-se, também, que o acréscimo da temperatura influencia no aumento da dispersão dos resultados dos módulos para todas as frequências aplicadas. Através da Figura 99 é possível analisar o comportamento do $|E^*|$ das misturas estudadas na curva isócrona.

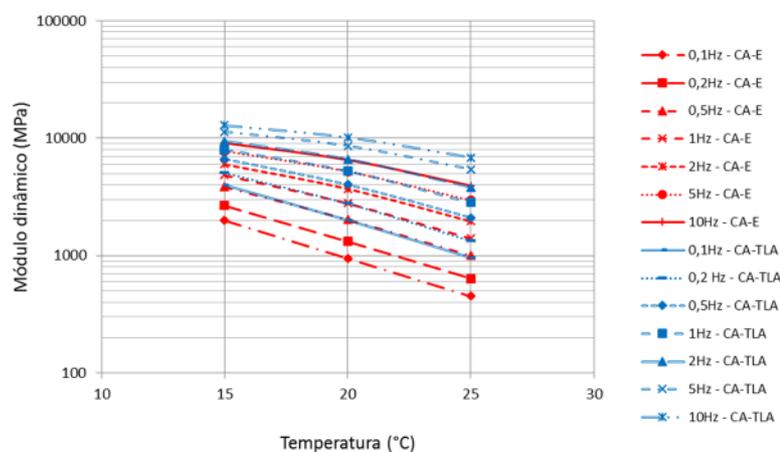


Figura 99: curvas isócronas das misturas CA-E e CA-TLA.

Os valores do módulo dinâmico para a mistura asfáltica CA-TLA, em todas as temperaturas e frequências utilizadas nos ensaios, são superiores aos do módulo dinâmico da mistura CA-E. Além disso, as curvas da mistura CA-E apresentam maior susceptibilidade a temperatura, pois conforme a temperatura aumenta maior é o decréscimo do módulo quando comparado com as curvas da mistura CA-TLA, sugerindo assim, que a mistura CA-E apresenta maior susceptibilidade térmica.

4.3.3 Espaço de Black

A curva no espaço de Black é formada pelo módulo dinâmico em função do ângulo de fase, para diferentes temperaturas. Através desta representação é possível visualizar a região dos módulos onde ocorre o acréscimo do ângulo de fase para condições de temperatura elevada. As Figuras 100 e 101 mostram a representação do módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA no espaço de Black.

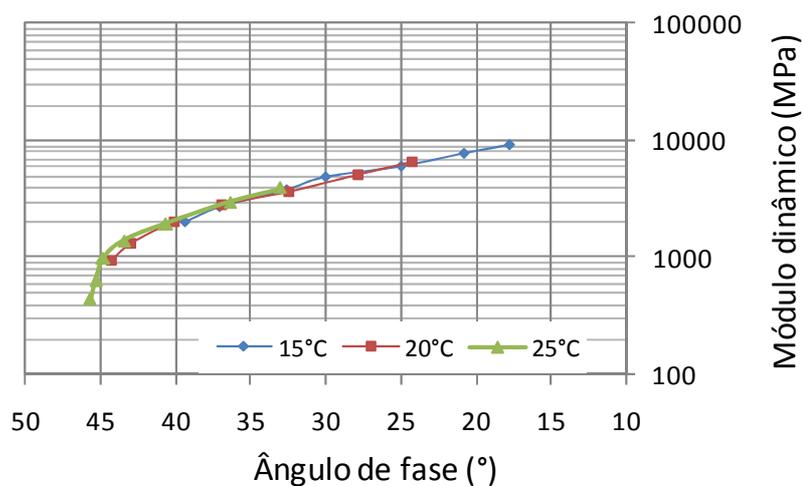


Figura 100: espaço de Black da mistura CA-E.

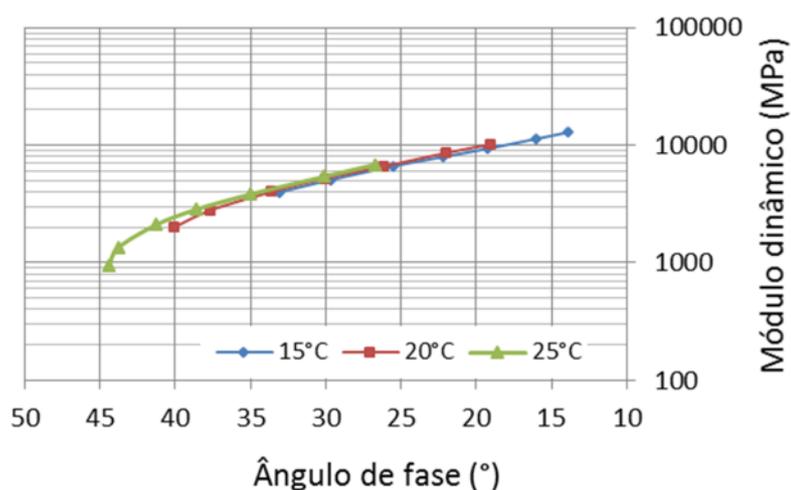


Figura 101: espaço de Black da mistura CA-TLA.

Torna-se possível observar através da representação do módulo dinâmico no espaço de Black a influência da temperatura nos resultados de ângulo de fase, pois conforme a temperatura aumenta o ângulo de fase também aumenta, enquanto o módulo dinâmico reduz. Já no domínio das baixas temperaturas o ângulo de fase diminui e o módulo aumenta. O espaço de Black das misturas estudadas pode ser também analisado na Figura 102.

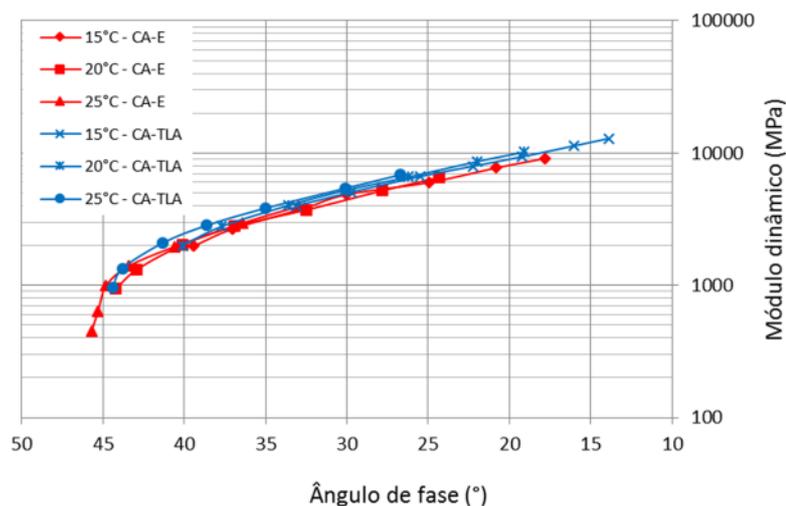


Figura 102: representação do módulo dinâmico no espaço de Black das misturas CA-E e CA-TLA.

As misturas CA-E e CA-TLA apresentaram um comportamento semelhante em relação à variação do módulo dinâmico e do ângulo de fase com a temperatura. Verifica-se uma redução do módulo com o aumento da temperatura e do ângulo de fase. Isto ocorre em função do acréscimo da temperatura provocar uma maior perda de energia, fazendo diminuir o valor do módulo dinâmico e aumentar o ângulo de fase. Além disso, a mistura CA-E apresentou maior ângulo de fase em relação à mistura CA-TLA, mostrando assim, uma maior perda por atrito interno.

4.3.4 Representação no plano Cole-Cole

A representação do módulo dinâmico no plano cole-cole apresenta os valores da parte real (E_1) em função dos valores da parte imaginária (E_2), sendo esta curva semelhante a um arco de círculo, a qual é independente da frequência e da temperatura de ensaio. Nas Figuras 103 e 104 estão apresentados os planos cole-cole das misturas CA-E e CA-TLA, respectivamente.

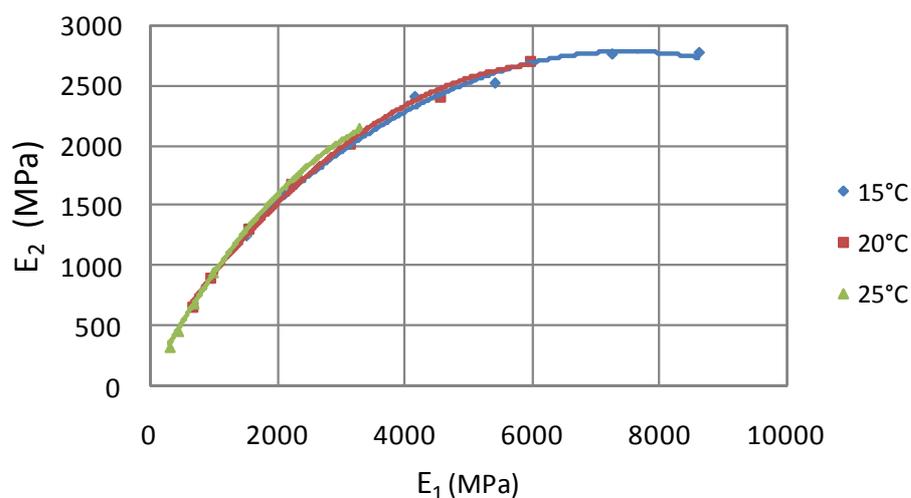


Figura 103: representação do módulo complexo da mistura CA-E no plano Cole-Cole.

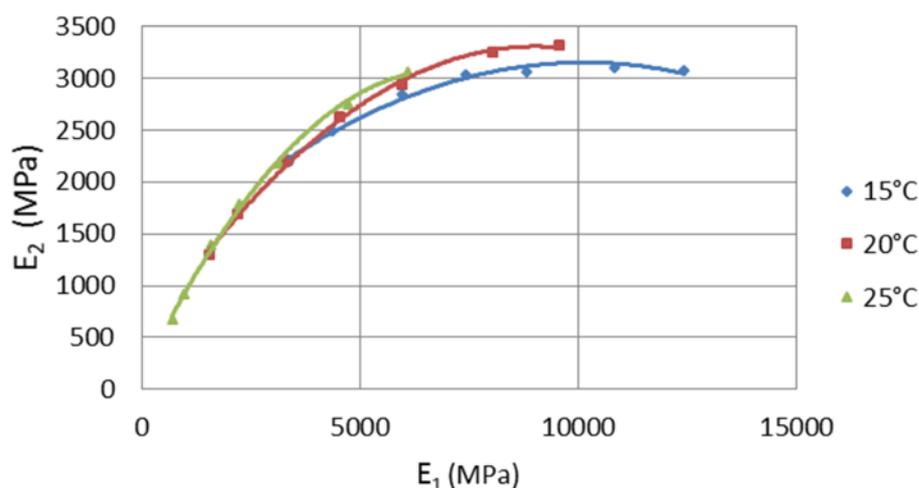


Figura 104: representação do módulo complexo da mistura CA-TLA no plano Cole-Cole.

Nota-se que o comportamento das misturas asfálticas estudadas é semelhante, pois quanto menor a temperatura de ensaio, maior é o módulo elástico (E_1) do material. Já em relação ao módulo de perda (E_2), que representa o comportamento visco-elástico, o mesmo apresenta na mistura CA-E um valor máximo para temperatura de 15°C, enquanto na mistura CA-TLA o maior valor do módulo está para a temperatura de 20°C. Nestas temperaturas é encontrada a maior perda irreversível do material em função da dissipação de energia por atrito interno, e os ensaios de fadiga deveriam ser realizados nestas regiões. No entanto, salienta-se que os ensaios de fadiga desta pesquisa foram realizados na temperatura de 25°C, em função de a mesma ser

considerada uma temperatura ambiente, utilizada por diversos pesquisadores em ensaios no Brasil. Além disso, a determinação da temperatura crítica das misturas pela representação no plano cole-cole foi realizada posteriormente aos ensaios de fadiga devido ao tempo para aquisição do programa UTS018.

A Figura 105 mostra o comportamento dos módulos E_1 e E_2 das misturas asfálticas CA-E e CA-TLA para as diferentes temperaturas de ensaio.

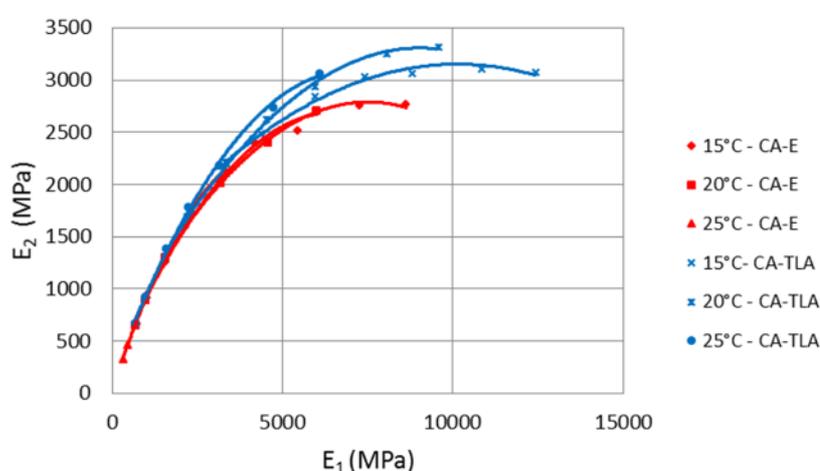


Figura 105: representação no plano Cole-Cole das misturas CA-E e CA-TLA.

Através da Figura 105 é possível observar o comportamento das duas misturas asfálticas estudadas, onde fica evidenciado que a mistura CA-TLA apresenta valores de módulo de perda (E_2) superiores ao da mistura CA-E. O módulo de perda representa a parte imaginária do módulo complexo e está associado à perda de energia devido ao atrito interno do material, situação considerada de maior severidade.

4.4 ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à fadiga de misturas asfálticas é uma característica importante do desempenho dos pavimentos. Os ensaios de fadiga por compressão diametral foram realizados com modo de carregamento a tensão controlada, com temperatura de 25°C, frequência de 1Hz, e o critério de

finalização do ensaio foi à redução em 50% da rigidez inicial da amostra, em função dos comparativos realizados com o ensaio de flexão a quatro pontos.

Os resultados de tensão de tração, deformação de tração, módulo de resiliência e vida de fadiga obtidos nos ensaios são mostrados na Tabela 16. As vidas de fadiga determinadas foram ajustadas de acordo com os modelos $N=a*(\epsilon_t)^b$ e $N=a*(\sigma_t)^b$ gerados por meio das curvas de Wöhler. Na Tabela 17 estão apresentados os parâmetros obtidos pelos modelos gerados em função das solicitações de tensão de tração, da diferença de tensões (tração e compressão) e da deformação específica inicial de tração.

Tabela 16: resultados obtidos nos ensaios de fadiga por compressão diametral sob tensão controlada.

Corpo de prova	% RT	Porcentagem de volume de vazios (%)		Tensão de tração (MPa)		Deformação de tração (cm/cm)		Módulo de resiliência (MPa)		Número de Ciclos	
		CA-E	CA-TLA	CA-E	CA-TLA	CA-E	CA-TLA	CA-E	CA-TLA	CA-E	CA-TLA
1	10%	5,0	4,2	0,08	0,16	3,58E-05	2,42E-05	1786	5551	1,09E+05	7,52E+04
2	10%	3,4	3,9	0,08	0,16	3,97E-05	2,50E-05	1711	4459	1,59E+05	6,02E+04
3	10%	3,4	3,3	0,08	0,16	3,32E-05	2,20E-05	1787	5536	7,36E+04	2,05E+05
4	20%	3,8	4,0	0,17	0,32	4,10E-05	5,69E-05	2948	4117	3,63E+03	1,90E+04
5	20%	4,3	4,1	0,17	0,32	6,99E-05	6,14E-05	1701	3753	6,61E+03	2,03E+04
6	20%	4,9	3,9	0,17	0,32	8,12E-05	7,37E-05	1535	3188	1,09E+04	3,02E+04
7	30%	3,9	3,9	0,25	0,48	1,06E-04	9,59E-05	1720	3660	2,52E+03	3,05E+03
8	30%	4,8	4,1	0,25	0,48	1,32E-04	1,18E-04	1388	2972	2,25E+03	2,10E+03
9	30%	4,7	3,9	0,25	0,48	1,09E-04	8,37E-05	1643	4197	1,85E+03	2,51E+03

Tabela 17: parâmetros dos modelos de fadiga das misturas estudadas.

Mistura	Tensão de Tração (MPa)			Diferença de Tensões (MPa)			Deformação de Tração (MPa)		
	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
CA-E	12,47	-3,60	0,95	1834,16	-3,61	0,95	6,00E-08	-2,69	0,66
CA-TLA	334,70	-3,19	0,89	28137,84	-3,20	0,89	2,00E-06	-2,32	0,83

As Figuras 106, 107 e 108 apresentam as curvas de fadiga das misturas estudadas em relação à tensão de tração, diferença de tensões e deformação de tração, respectivamente. Nota-se que, para estados de tensões iguais, a mistura CA-TLA apresentou uma maior vida de fadiga do que a mistura CA-E. Contudo, as análises diretas dos modelos ou das curvas de fadiga obtidas através dos resultados laboratoriais podem levar a conclusões equivocadas, em função de que as misturas possuem módulos resilientes e resistência à tração diferentes e, assim, distribuem tensões de maneira diferente.

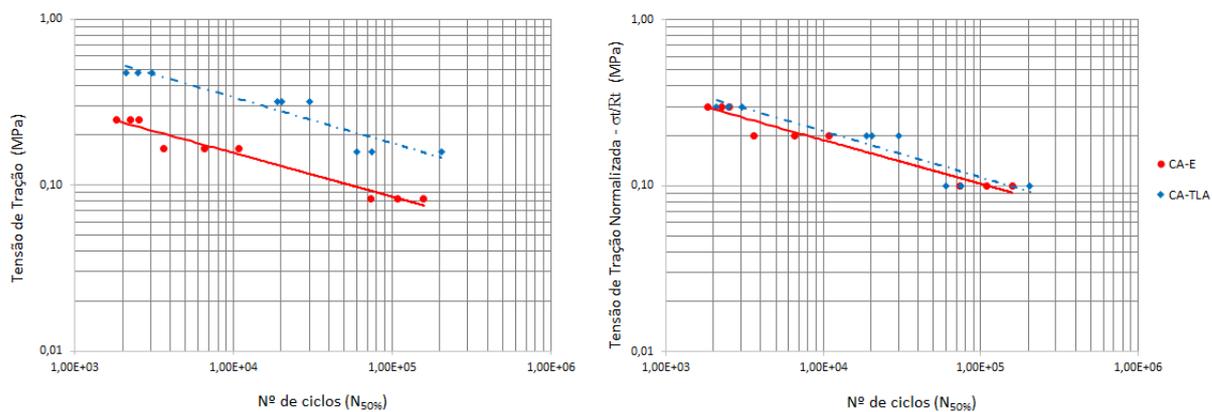


Figura 106: curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da tensão de tração e tensão de tração normalizada (σ_t/R_t).

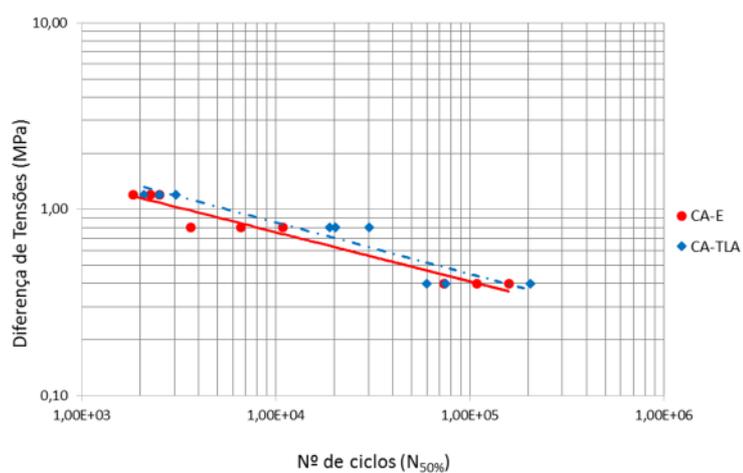


Figura 107: curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da diferença de tensões.

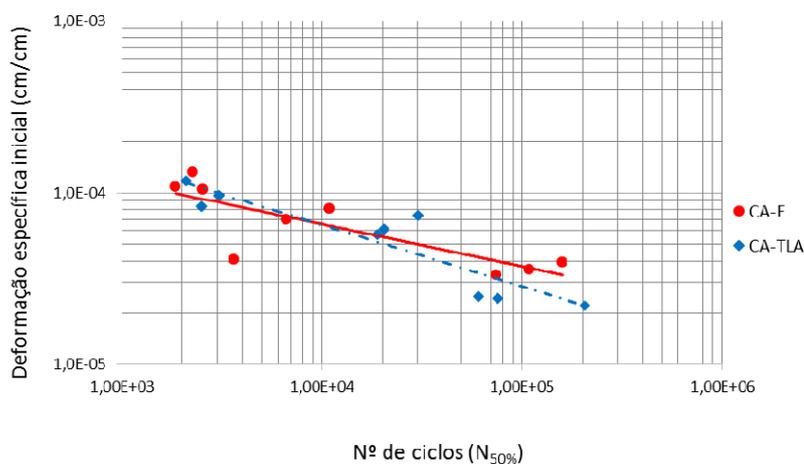


Figura 108: curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da deformação específica inicial de tração.

Para analisar a vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas foram realizadas análises utilizando o programa computacional Kenlayer, o qual faz parte de um pacote de programas intitulado Kenpave, para análise e projeto de pavimentos. O programa foi desenvolvido por Huang (2004) na Universidade de Kentucky, Estados Unidos. Este programa considera um sistema de multi-camadas permitindo a aplicação de múltiplas cargas, sendo cada carga aproximada por um carregamento circular homogêneo. Cada camada pode ser considerada elástica linear, elástica não-linear ou visco-elástica. No emprego de modelos de fadiga obtidos em laboratório para o dimensionamento de pavimentos é necessário aplicar fatores de correlação laboratório-campo, os quais consideram as diferenças existentes entre as condições de ensaio em laboratório e as observadas em campo. No entanto, nesta pesquisa não foram adotados fatores laboratório-campo.

Neste estudo as análises foram realizadas empregando uma estrutura utilizada na BR-290/RS, no trecho Osório-Porto Alegre (Figura 109), em função de serem conhecidas as propriedades mecânicas do material utilizado neste pavimento e por esta estrutura também ter sido estudada por outros pesquisadores como Victorino (2008) e Vitorello (2008). Optou-se por considerar as camadas do pavimento com um comportamento elástico linear. O carregamento utilizado foi de um eixo simples de rodas duplas, com carga total de 82 kN, sendo verificadas as tensões e deformações de tração na fibra inferior do revestimento. Os módulos de resiliência para as misturas CA-E e CA-TLA foram de 1761 MPa e 5182 MPa, respectivamente, considerando as análises para os modelos gerados nos ensaios de compressão diametral. Enquanto que os

módulos utilizados nos estudos para os modelos obtidos nos ensaios de flexão à deformação controlada foram de 3941 MPa para a mistura CA-E e 6849 MPa para a mistura CA-TLA.

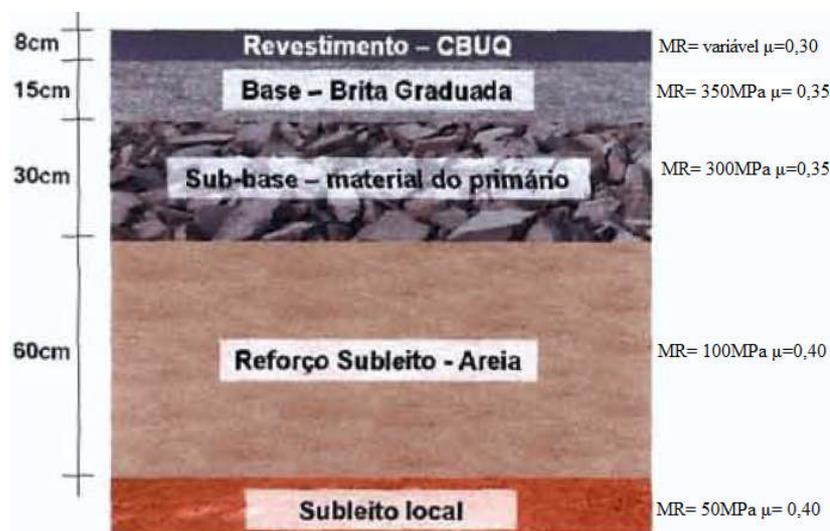


Figura 109: estrutura de pavimento empregada na análise (VICTORINO, 2008).

A partir dos valores de tensão e deformação de tração (Tabela 18) obtidos no programa Kenlayer para a estrutura analisada, determinou-se a vida de fadiga (Figura 110) utilizando os modelos gerados em função dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga por compressão diametral. Considerando estes valores, é possível notar que a mistura CA-TLA apresentou uma vida de fadiga maior em comparação com a mistura CA-E utilizando o critério de deformação de tração, já para o critério de tensão de tração a mistura CA-E apresentou maior vida de fadiga. Para as condições analisadas pode-se afirmar que a consideração da tensão de tração é mais severa. Salienta-se que esta análise pode ser modificada facilmente, caso novas espessuras ou novos valores de módulo de resiliência sejam adotados.

Tabela 18: valores de tensão, deformação e vida de fadiga calculados.

Mistura	Tensão de Tração		Deformação de Tração	
	Tensão (MPa)	*N	Def. (cm/cm)	*N
CA-E	0,43	2,5E+02	2,45E-04	3,1E+02
CA-TLA	1,16	2,1E+02	1,85E-04	9,2E+02

* Número de ciclos sem considerar o fator laboratório-campo

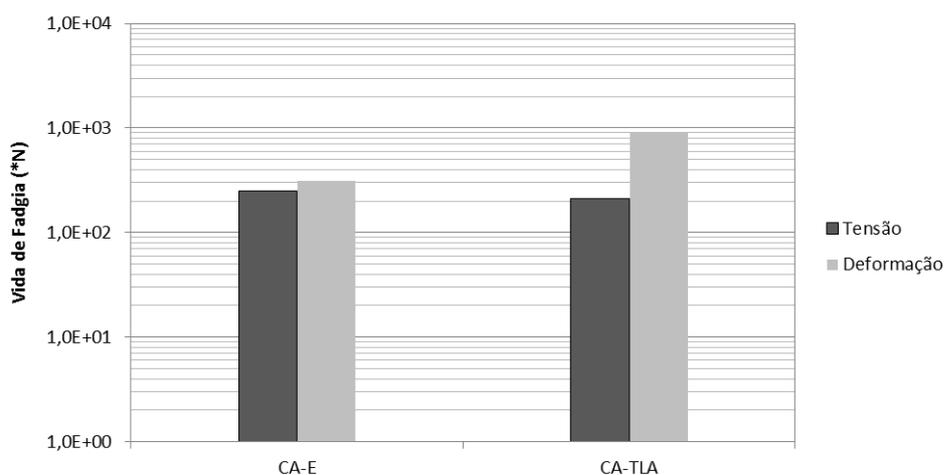


Figura 110: vida de fadiga da estrutura analisada (aplicação do modelo gerado no ensaio de fadiga por compressão diametral).

Os resultados de módulo de resiliência obtidos neste ensaio estão apresentados na Figura 111, através da qual é possível observar que a mistura CA-TLA apresentou valores superiores de MR, valor médio de 4159 MPa, em relação à mistura CA-E, com um resultado médio de 1802 MPa. Costa *et al.* (2008), Santos *et al.* (2009) e Nascimento *et al.* (2010) também apresentaram em suas pesquisas valores elevados de MR e RT do CAP TLA em comparação com outros ligantes asfálticos.

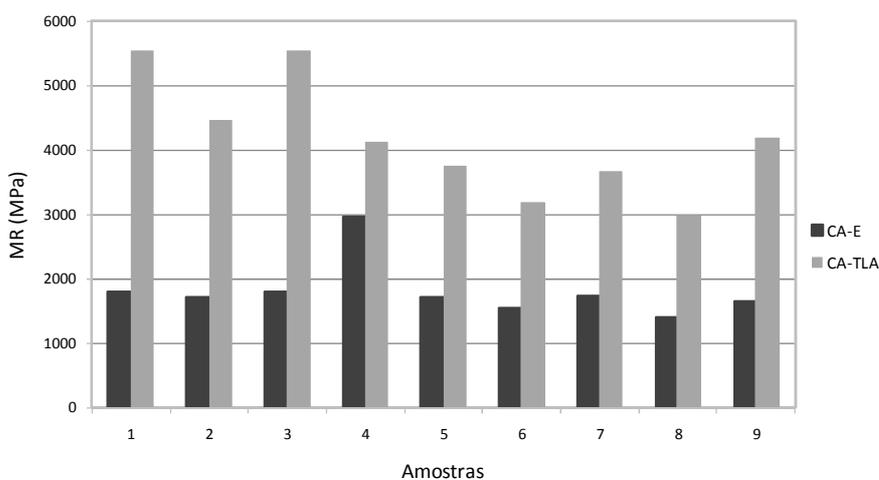


Figura 111: valores de MR das misturas estudadas obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral.

Também através do ensaio de fadiga por compressão diametral foi possível determinar a energia dissipada para as misturas estudadas, considerando a área dentro do laço histerético formado pela tensão versus a deformação. Na Figura 112 estão apresentados os resultados de energia dissipada obtidos para os diferentes níveis de tensão ensaiados.

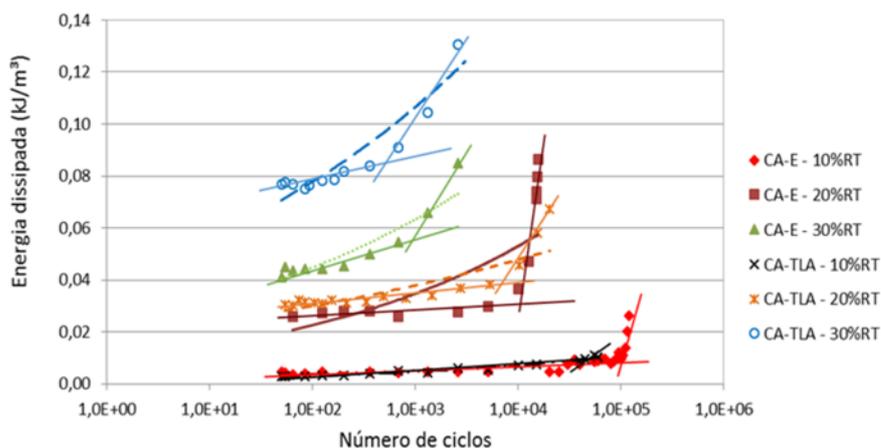


Figura 112: energia dissipada obtida nos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada.

Nota-se que a energia dissipada obtida no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, em ambas as misturas, aumenta com o acréscimo do número de ciclos, conforme evidenciado por Tayebali *et al.* (1994). Para baixas taxas de RT (10% e 20%) o comportamento das misturas CA-TLA e CA-E foi semelhante, enquanto para a proporção de 30% da resistência à tração a energia dissipada da mistura CA-TLA foi superior em relação à mistura CA-E.

Observa-se que a variação do comportamento pode ser traduzida por uma tendência bi-linear, no qual a rápido aumento do consumo de energia dissipada revela o momento no qual a mistura tende a iniciar sua possível fase de propagação/desenvolvimento do trincamento. Para todos os casos mostrados na figura acima, a mistura CA-TLA mostrou que esta evolução ocorre antes da CA-E, para cada nível.

4.5 ENSAIOS DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

Os ensaios de fadiga à flexão foram realizados empregando o modo de carregamento a deformação e a tensão controlada, com temperatura controlada de 25°C e frequência de 10 Hz. Ambos os ensaios tiveram como critério de finalização a redução em 50% da rigidez inicial das vigas obtida no ciclo 50, conforme especificado na norma da AASHTO T-321.

Os resultados de rigidez na flexão, ângulo de fase, energia dissipada inicial e vida de fadiga obtidos são mostrados na Tabela 19. Os parâmetros obtidos do modelo $N=a*(\epsilon_t)^b$ gerado em função da deformação de tração são apresentados na Tabela 20. A Figura 113 mostra as curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA.

Tabela 19: resultados obtidos nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos sob deformação controlada.

Corpo de prova	Def. Tração Inicial ($\mu\epsilon$)	Porcentagem de volume de vazios (%)		Rigidez na Flexão inicial (MPa)		Ângulo de fase (°)		Energia dissipada inicial (kJ/m ³)		Número de Ciclos	
		CA-E	CA-TLA	CA-E	CA-TLA	CA-E	CA-TLA	CA-E	CA-TLA	CA-E	CA-TLA
1	400	3,0	4,6	2756	4870	41,2	33,4	0,95	1,69	4,94E+06	2,07E+06
2		3,4	4,2	3147	5745	40,6	31,7	1,08	1,97	2,33E+06	1,83E+06
3		3,4	4,6	3105	5103	35,8	36,0	1,09	1,77	2,84E+06	2,28E+06
4	600	4,7	4,4	2871	4867	42,6	38,5	2,30	3,84	1,41E+05	1,51E+05
5		4,1	4,1	2710	5222	45,1	38,1	2,13	4,03	5,24E+05	9,33E+04
6		4,5	5,0	2839	4722	44,0	39,7	2,26	3,64	3,76E+05	4,05E+04
7	800	4,2	5,0	2683	4683	47,7	40,0	3,84	6,50	4,73E+04	1,72E+04
8		3,0	5,0	2655	4484	47,3	39,1	3,65	6,19	5,80E+04	2,11E+04
9		4,1	4,8	2842	4394	45,4	37,7	4,00	6,15	1,07E+05	2,17E+04

Tabela 20: parâmetros obtidos para os modelos de fadiga determinados no ensaio de flexão à deformação controlada.

Parâmetro	CA-E	CA-TLA
a	$2,89 \times 10^{-13}$	$1,80 \times 10^{-17}$
b	-5,6	-6,77
R ²	0,93	0,96

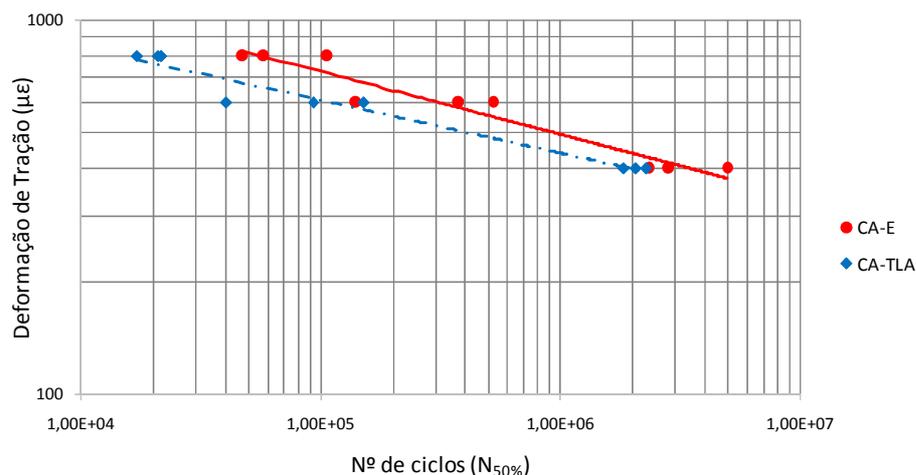


Figura 113: curvas de fadiga das misturas estudadas em função da deformação de tração – ensaio a deformação controlada.

De acordo com Tangella *et al.* (1990) quanto maior a viscosidade de um material, maior é a sua vida de fadiga no ensaio a tensão controlada e menor é a sua vida de fadiga no ensaio a deformação controlada. Isto pode ser observado nos resultados obtidos nesta pesquisa, visto que a mistura CA-TLA, composta com o CAP TLA FLEX de maior viscosidade em comparação com o COMPAFLEX 60/85, apresentou resultados de vida de fadiga maiores no ensaio à tensão controlada, enquanto a mistura CA-E, com COMPAFLEX 60/85, obteve uma maior vida de fadiga no ensaio à deformação controlada. No entanto, assim como no estudo de fadiga por compressão diametral é necessário realizar um estudo mecanístico com base em uma estrutura de pavimento, pois não se deve estabelecer uma comparação direta somente com os resultados destes ensaios, uma vez que as características de rigidez das misturas estudadas são diferentes.

Utilizou-se a mesma estrutura de pavimento e os dados de deformação obtidos no Kenlayer, apresentados anteriormente, para determinar a vida de fadiga através da aplicação do modelo gerado em laboratório a partir dos ensaios de fadiga a flexão sob deformação controlada. A Tabela 21 e a Figura 114 mostram os resultados de fadiga obtidos, sendo que a mistura CA-TLA apresenta uma maior vida de fadiga em relação à mistura CA-E.

Tabela 21: valores de deformação e vida de fadiga calculados (modelo obtido no ensaio de flexão à deformação controlada).

Mistura	Deformação de Tração	
	Def. (cm/cm)	*N
CA-E	2,03E-04	1,4E+08
CA-TLA	1,65E-04	7,2E+08

* Número de ciclos sem considerar o fator laboratório-campo

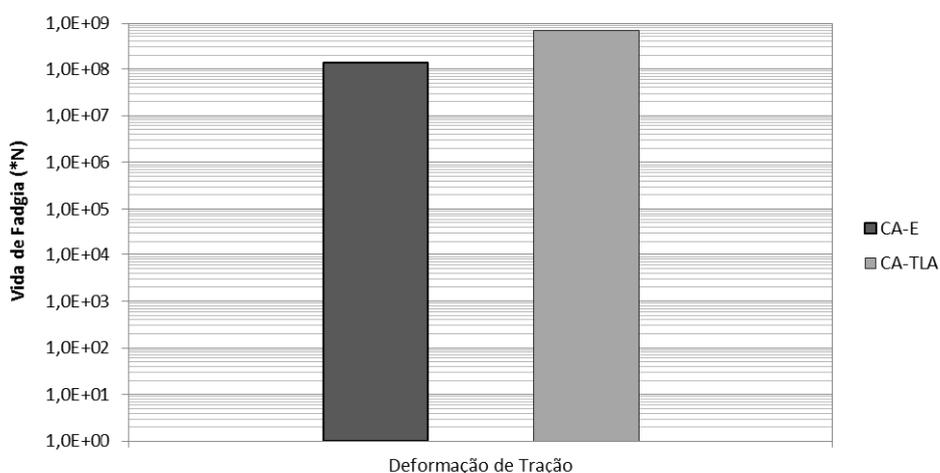


Figura 114: vida de fadiga da estrutura analisada (aplicação do modelo gerado no ensaio de flexão à deformação controlada).

Através do ensaio de flexão em quatro pontos à deformação controlada determinou-se a rigidez na flexão das misturas estudadas, podendo os resultados serem observados na Figura 115. Nota-se que a mistura CA-TLA apresentou uma rigidez na flexão maior, média de 4899 MPa, que a obtida pela mistura CA-E, apresentando um valor médio de 2845 MPa. Este comportamento era o esperado em função do CAP TLA FLEX possuir maior viscosidade.

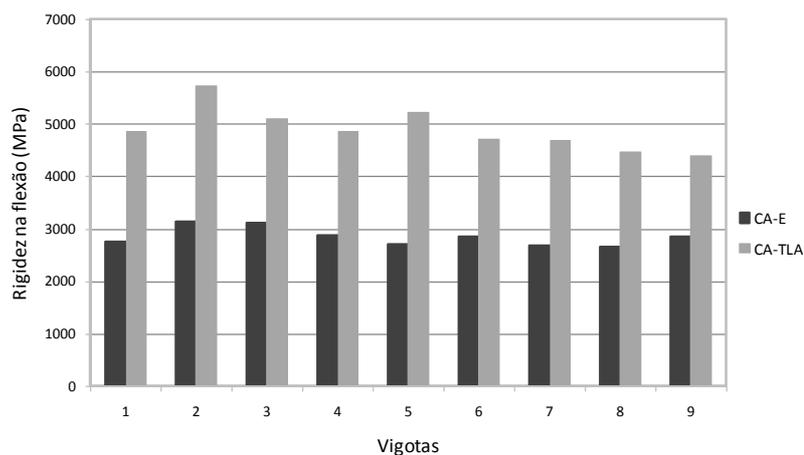


Figura 115: rigidez na flexão das misturas estudadas - ensaio a deformação controlada.

No ensaio de flexão em quatro pontos, à deformação controlada, obteve-se a energia dissipada para cada nível de deformação determinado, sendo este parâmetro apresentado na Figura 116. Observa-se que para todos os níveis de deformação ensaiados a mistura CA-TLA, mais rígida, dissipou mais energia ao longo do ensaio em comparação com a mistura CA-E.

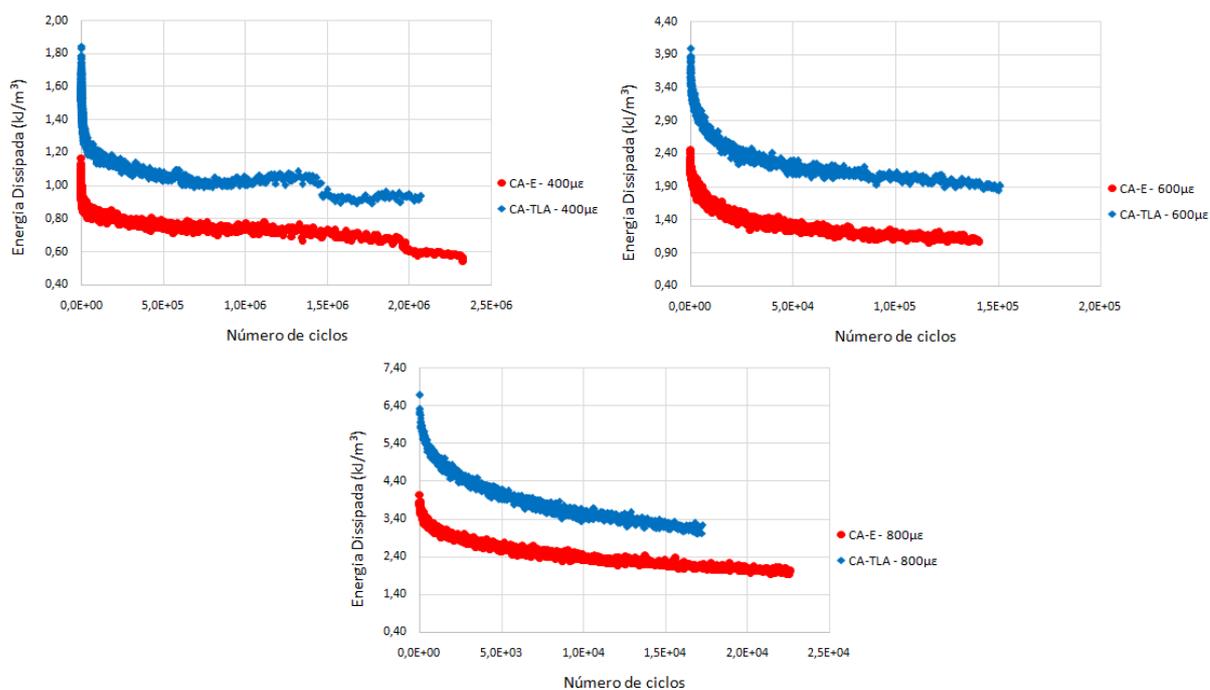


Figura 116: energia dissipada obtida nos ensaios de fadiga à flexão sob deformação controlada.

Importante notar que a taxa de queda da dissipação de energia reduz consideravelmente após os ciclos iniciais. Isto significa dizer que há uma estabilização da queda da tensão aplicada após um número de ciclos iniciais que equivale a redução do módulo na fase de consolidação da mistura. No entanto, seria de se esperar que houvesse uma tendência a um colapso incremental em direção ao fim da vida de fadiga monitorada, o que não ocorreu. Ou seja, mesmo após a queda de 50% do valor da rigidez inicial, a taxa de redução da energia dissipada – proporcional a redução da tensão aplicada para manutenção da mesma deformação – mantém-se constante, sem indícios do processo de falha estar mudando de comportamento; há apenas uma contínua tendência de redução da energia dissipada.

Além dos ensaios de flexão à deformação controlada, também, foram realizados ensaios de flexão à tensão controlada na mistura CA-E. Na Figura 117 verifica-se a vida de fadiga da mistura CA-E no ensaio de flexão em quatro pontos à tensão e deformação controlada. No ensaio a deformação controlada a vida de fadiga foi maior em comparação com os resultados determinados no ensaio a tensão controlada, dados estes que colaboram para observação descrita por Tangella *et al.* (1990).

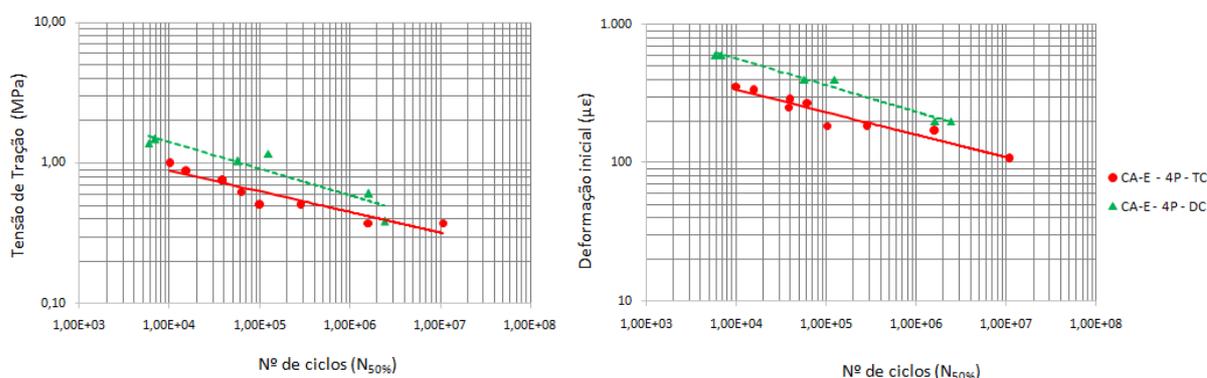


Figura 117: curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas no ensaio de flexão à tensão (TC) e deformação (DC) controlada.

Nas Figuras 118 e 119 é possível observar o comportamento à fadiga da mistura CA-E determinado por meio dos ensaios de flexão e por compressão diametral, ambos realizados com modo de carregamento à tensão controlada. Pode-se perceber que os resultados de vida de fadiga obtidos nos ensaios à flexão em quatro pontos foram maiores que os determinados por compressão diametral.

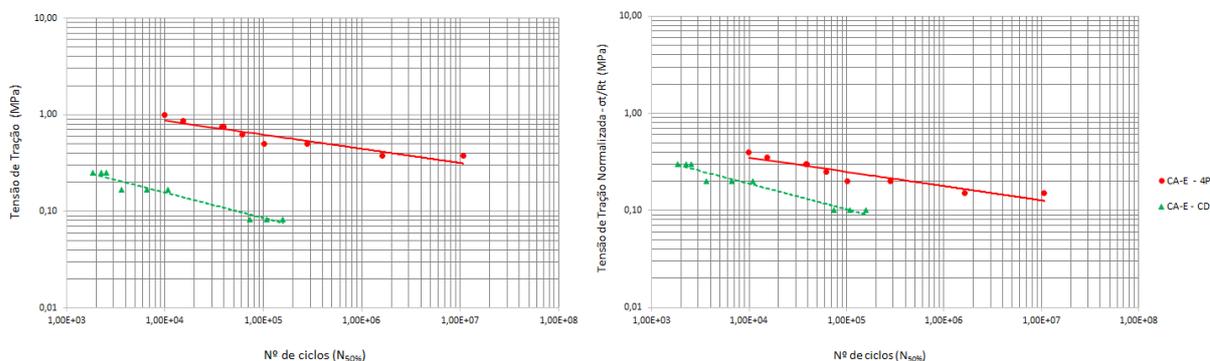


Figura 118: curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos (4P) e por compressão diametral (CD) em função da tensão de tração e tensão de tração normalizada (σ/Rt).

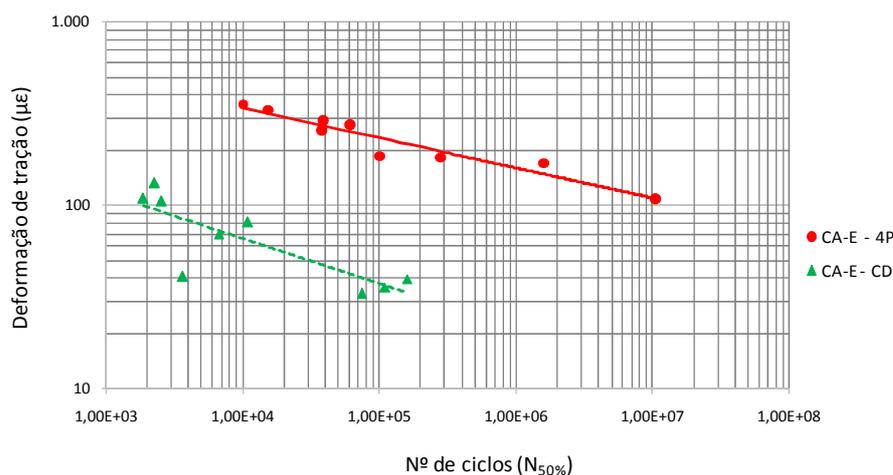


Figura 119: curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos (4P) e por compressão diametral (CD) em função da deformação de tração.

Conforme mencionado por Tayebali *et al.* (1994) e Momm (1998) a vida de fadiga no ensaio de flexão é relativamente maior que a determinada no ensaio por compressão diametral. Isto pode ser verificado nesta pesquisa através das curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas nos ensaios de flexão e compressão diametral à tensão controlada. Pode-se considerar que esta diferença ocorre principalmente devido as condições de carregamento estabelecidas para cada configuração de ensaio.

Da análise dos resultados é possível comparar o comportamento de ambos os ensaios verificando-se a diferença do número de ciclos máximo para um valor, diga-se, de 0,50MPa de tensão de tração e de $200\mu\epsilon$ (valores representativos médio). Isto levaria, a partir de uma extrapolação necessária, a verificação de um “fator de transporte” – equivalente a um *shift factor* entre ambos os ensaios, compressão diametral para quatro pontos – de 2480 quando analisado a tensão de tração e de 426 quando analisada a deformação. Com efeito, se discutivelmente, o fator laboratório-campo dos ensaios de compressão diametral à tensão controlada são de valores próximos a 10.000, valor este apresentado por Pinto (1991) considerando o critério de 20% de área trincada, então, apenas a título de ilustração argumentativa, poderia se dizer que o fator laboratório-campo dos ensaios de flexão em quatro pontos são de fato próximos de 4 e 23 para os resultados acima obtidos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa que teve como principal objetivo utilizar o ensaio de flexão a quatro pontos para analisar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas densas, utilizadas no estado do Rio Grande do Sul. Também, são feitas algumas sugestões para que se possa dar continuidade ao desenvolvimento deste trabalho.

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados nesta pesquisa e apresentados no capítulo 4, torna-se possível estabelecer as seguintes conclusões:

- as moldagens das placas de mistura asfáltica foram realizadas em uma pista de moldagem e compactação adaptada na usina de asfalto de acordo com o modelo apresentado pela Universidade da Califórnia, localizada em Berkeley. Esta opção foi considerada a mais viável devido à necessidade de produzir quantidades de mistura asfáltica superiores à disponibilidade do laboratório de pavimentação;
- após as moldagens as placas foram submetidas ao processo de corte, sendo este realizado em uma marmoraria com o objetivo de obter vigotas no tamanho padrão e com superfícies isentas de irregularidade, a fim de não comprometer a realização dos ensaios;
- os corpos de prova prismáticos e cilíndricos apresentaram valores de percentagem de volume de vazios, densidade aparente e grau de compactação dentro dos limites estabelecidos nos projetos das misturas estudadas. Estes parâmetros mostram que a metodologia escolhida para moldagem e compactação das placas foi adequada;
- a mistura CA-TLA apresentou valores de resistência à tração por compressão diametral consideravelmente maiores que os resultados obtidos para a mistura CA-E;
- em relação aos resultados obtidos nos ensaios de módulo dinâmico para as duas misturas estudadas, pode-se notar que a mistura CA-TLA apresentou valores de

módulo superiores aos da mistura CA-E, verificando-se assim, a maior rigidez da mistura CA-TLA;

- através da curva frequência-temperatura foi possível observar que mistura CA-E, mais próxima da vertical, apresentou um comportamento mais propenso às variações de frequência e temperatura em relação a mistura CA-TLA. De acordo com a bibliografia consultada os concretos asfálticos produzidos com CAP mais rígido, tendem a serem menos susceptíveis às variações de temperatura e frequência;
- em função da representação do módulo dinâmico no espaço de Black verificou-se que as misturas CA-E e CA-TLA apresentaram um comportamento semelhante em relação à variação do módulo dinâmico e do ângulo de fase com a temperatura. Também, houve uma redução do módulo com o aumento da temperatura e do ângulo de fase, isto ocorreu devido o acréscimo da temperatura provocar uma maior perda de energia, fazendo diminuir o valor do módulo dinâmico e aumentar o ângulo de fase;
- através da representação do módulo complexo no plano cole-cole nota-se que o comportamento das misturas asfálticas estudadas são semelhantes, pois quanto menor a temperatura de ensaio, maior é o módulo elástico (E_1) do material. O módulo de perda (E_2), que representa o comportamento visco-elástico, apresenta um valor máximo nas temperaturas de 15°C e 20°C para a mistura CA-E e CA-TLA, respectivamente. Nestas temperaturas ocorrem à maior perda irreversível do material devido à dissipação de energia por atrito interno transformado em aquecimento da amostra ensaiada e, por isso, os ensaios de fadiga deveriam ter sido realizados nestas temperaturas. No entanto, nesta pesquisa utilizou-se a temperatura de 25°C para realização dos ensaios de flexão devido aos comparativos com os ensaios de compressão diametral, os quais são geralmente realizados à 25°C, temperatura considerada ambiente;
- a mistura CA-TLA apresentou valores de módulo de perda (E_2) superiores ao da mistura CA-E, sendo que o módulo de perda representa a parte imaginária do módulo complexo e está ligado à perda de energia em função do atrito interno do material, situação considerada de maior severidade;

- em relação aos ensaios de fadiga por compressão diametral pode-se observar que a mistura CA-TLA apresentou maiores valores de módulo de resiliência e vida de fadiga em relação à mistura CA-E, isto pode ter ocorrido em função do CAP TLA FLEX ser mais viscoso que o COMPAFLEX 60/85;
- nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos sob deformação controlada a vida de fadiga da mistura CA-TLA, composta por CAP de maior viscosidade, foi menor em relação a determinada para a mistura CA-E, sendo este fenômeno relatado nas bibliografias consultadas;
- a mistura CA-TLA apresentou maiores resultados de rigidez na flexão nos ensaios de flexão à deformação controlada em comparação com a mistura CA-E;
- nos comparativos feitos entre os ensaios de fadiga à flexão realizados com modo de carregamento a deformação controlada e a tensão controlada observou-se que os ensaios em DC apresentaram maiores vida de fadiga em relação aos realizados em TC, conforme mostrado em outras pesquisas;
- conforme esperado nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos a vida de fadiga foi maior do que a determinada no ensaio de fadiga por compressão diametral. Isto ocorre, principalmente, em função das diferentes condições de carregamento estabelecidas para cada ensaio;
- a energia dissipada determinada nos ensaios de fadiga por compressão diametral foi semelhante para as misturas CA-TLA e CA-E nos baixos níveis de tensão de tração ensaiados, enquanto para o nível de 30% da RT a mistura CA-TLA dissipou mais energia ao longo do ensaio;
- a mistura CA-TLA apresentou maiores resultados de energia dissipada nos ensaios de flexão à deformação controlada em comparação com a mistura CA-E, em função da mistura CA-TLA ser mais rígida;
- a avaliação da energia dissipada durante os ensaios de vida de fadiga se mostra como um importante potencial para investigação do processo de dano que se desenvolve no material; ela permite identificar os diferentes estágios e quantificar o momento em que eles ocorrem, auxiliando nas avaliações de

extrapolação frequentemente realizadas para composição dos fatores laboratório-campo;

- nos ensaios de flexão à deformação controlada, a energia dissipada se manteve constante ao longo do ensaio, enquanto no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada é possível notar o momento em que a energia cresce com razão acelerada;
- do ponto de vista do fator laboratório-campo, é possível inferir que grande parte da variação observada entre ambas as situações pode ser acreditada ao ensaio de compressão diametral – em função das suas condições de carregamento. Este tipo de ensaio forneceu tendências semelhantes ao dos ensaios em flexão quatro pontos, porém, a vida de fadiga neste último apresenta um comportamento mais verossímil da condição de campo, levando a fatores laboratório-campo estimado entre 4 e 23 para os casos estudados.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de continuar os estudos realizados neste trabalho sugere-se:

- analisar a vida de fadiga de misturas asfálticas considerando a temperatura crítica de cada mistura;
- comparar ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos sob a forma de carregamento senoidal e haversine;
- realizar ensaios de flexão em quatro pontos à tensão controlada em concreto asfáltico com CAP modificado por polímero e adição de TLA a fim de comparar com os resultados de fadiga obtidos no ensaio de tração indireta por compressão diametral;
- comparar a vida de fadiga obtida no programa UTS015 com a determinada no UTS018 a partir de ensaios de flexão em quatro pontos à deformação e tensão controlada;
- ensaiar vigotas de placas extraídas de campo e comparar seu desempenho com as obtidas na pista de moldagem e compactação;

- monitorar o comportamento de pistas experimentais visando estimar um fator laboratório-campo em conjunto com os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos realizados no laboratório.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados Por Polímero Elastomético**. Resolução n° 32 de 21 de setembro de 2010 da ANP – Regulamento Técnico ANP n° 04/2010.

AL-QADI, I. L.; NASSAR, W. N. **Fatigue Shift Factors to Predict HMA Performance**. The International Journal of Pavement Engineering, v. 4, p. 69-75, jun. 2003.

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 D3497**: Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. Philadelphia, 1995.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E206-72**: Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and Statistical Analysis of Fatigue Data. Philadelphia, 1979.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560**: Materiais Betuminosos - Determinação do Ponto de Amolecimento - Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais Asfálticos - Determinação da Penetração. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15086**: Materiais Betuminosos - Determinação da Recuperação Elástica pelo Ductilômetro. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15087**: Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: Materiais Betuminosos - Determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas Usando um Viscosímetro Rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15573**: Misturas Asfálticas – Determinação da Densidade Aparente e da Massa Específica Aparente de Corpos de Prova Compactados. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16018**: Misturas Asfálticas – Determinação da Rigidez por Compressão Diametral sob Carga Repetida. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF 98-261-1**: Essais Relatifs Aux Chaussées: Determination de La Résistance em Fatigue des Mélanges Hydrocarbonés. Essai par Flexion à Fleche Constance. Partie 1, 1993.

BAAJ, H. **Comportement a la fatigue des Materiaux Granulaires Traités aux Liants Hydrocarbonés**. These soutenue devant L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon - Ecole Doctorale des Sciences pour L'Ingenieur de Lyon, Lyon, 2002.

BABURAMANI, Pud. **Asphalt Fatigue Life Prediction Models: A Literature Review**. Research Report ARR 334. Vermont South, Victoria: ARRB Transport Research Ltd., 1999. 40 p.

BALBO, J.T. **Fatos, Mitos e Falácias sobre os Modelos Experimentais de Fadiga**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 32., 2000, Brasília. Anais... Brasília: ABPV, 2000. p. 391-404.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CAPITÃO, S. **Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2003.

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de Alguns Modificadores de Ligante na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1991.

COSTA, C.; NOGUEIRA, L.; GIOIA, J. **Mistura Asfáltica com Uso do Modificador TLA (Trinidad Lake Asphalt)**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 39., 2008, Recife. Anais... Recife: ABPV, 2008.

DE LA ROCHE, C. **Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux**. Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse. Thèse (Doctorat) - École Centrale, Paris, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 35**: Agregados – Determinação da Abrasão *Los Angeles*. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 81:** Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 83:** Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 84:** Agregados Miúdo – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 86:** Agregados – Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031:** Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DI BENEDETTO, H.; PARTL, M. N.; FRANCKEN, L.; DE LA ROCHE, C. **Stiffness Testing for Bituminous Mixtures**. Materials and Structures, v. 34, p. 66-70, mar. 2001.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. **Fatigue of Bituminous Mixtures**. Materials and Structures, v. 37, p. 202-216, apr. 2004.

DOUCET, F; AUGER, B. **Détermination du Module Complexe des Enrobés au Ministère des Transports du Québec**. Service des Matériaux d'infrastructures. Direction du Laboratoire des Chaussées, Ministère des Transports du Québec, Québec, 2010.

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**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade do Minho, Portugal, 2009.

GRENFELL, James. **Fatigue Testing of Asphalt Mixtures**. Gramado: 13 nov. 2013. Palestra ministrada na 42ª Reunião Anual de Pavimentação.

HARVEY, J. J.; DEACON, J. A.; TSAI, B-W; MONISMITH, C. L. **Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and Its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California**. Report Prepared for California Department of Transportation. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1995.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 775 p.

IWANAGA, Fabio Issao. **Avaliação da Influência do Tipo de Agregado, do Tipo de Ligante, do Tipo de Moldagem e do Tipo de Fíler na Vida de Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

KIM, Y. Richard. **Modeling of Asphalt Concrete**. McGraw-Hill Companies, 2009. 460 p.

KIM, Y. R.; KIM, N.; KHOSLA, N. P. **Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and Permanent Deformation of Asphalt Concrete**. Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM STP 1147, Richard C. Menninger, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.

KIM, Y. R., LITTLE, D. N. **One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete**. In: ASCE Journal of Engineering Mechanics, v. 116, n°. 4, p. 751-772, 1990.

KLINSKY, L.; FARIA, V.; ODA, S.; CAVALCANTI, L.; BARELLA, R. **Avaliação da Influência do Tipo de Ligante Asfáltico na Vida de Fadiga de Misturas Asfálticas**. In: Encontro do Asfalto, 21°, 2014, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 2014.

LOUREIRO, T. G. **Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

MATTHEWS, J. M.; MONISMITH, C. L.; CRAUS, J. **Investigation of Laboratory Fatigue Testing Procedures For Asphalt Aggregate Mixtures**. Journal of Transportation Engineering, v. 119, p. 634-654, jul. 1993.

MEDINA, J.; MOTTA, L. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 574 p.

MELLO, L. G. R. **O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MINHOTO, M. J. C. **Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade do Minho, Portugal, 2005.

MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrot textura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MOURA, Edson de. **Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

NASCIMENTO, F. A. C.; ARAUJO, M. M. M.; GUIMARÃES, A. C. R. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Elaboradas com Cimento Asfáltico de**

Petróleo Modificado por Asfalto Natural (CAP TLA). In: Reunião Anual de Pavimentação, 40., 2010, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABPV, 2010.

NASCIMENTO, L. A. H. do; ROCHA, S. M. N.; NASCIMENTO, C. E. H. do; KIM, Y. R.; CHAUCUR, M.; MARTINS, A. T. **Uso da mecânica do Dano Contínuo na Caracterização de Misturas Asfálticas Brasileiras.** In: Encontro do Asfalto, 21°, 2014, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 2014.

NUÑEZ, J. Y. M. **Caracterização à Fadiga de Ligantes Asfálticos Modificados Envelhecidos a Curto e Longo Prazo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

OTTO, Gustavo Garcia. **Misturas Asfálticas Mornas - Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PAIS, J. C.; HARVEY, J. T. **Four-Point Bending.** Third Conference on Four-Point Bending, Davis, 2012.

PAIS, J. C.; PEREIRA, P.A.A.; AZEVEDO, M. C. M. **Influence of Loading Pattern in Four-Point Bending Test.** Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, v. 2, p. 1089-1098, jul. 1998.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PREUSSLER, E. S.; PINTO, S; MEDINA, J. **Determinação da vida de fadiga de concretos asfálticos brasileiros e aplicação no dimensionamento de reforço de pavimentos.** In: Reunião Anual de Pavimentação, 16., 1981, Recife. Anais... Recife: ABPV, 1981. p. 67-122.

ROQUE, R.; BUTTLAR, W. G. **The Development of a Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode.** Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 61, p. 304-332, 1992.

ROHDE, L. **Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

ROWE, G. M. **Application of the Dissipated Energy Concept to Fatigue Cracking in Asphalt Pavements.** PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, 1996.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das Influências do Tipo de Ligante e do Volume de Vazios na Vida de Fadiga de Algumas Misturas Asfálticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANTOS, C. R.; FERRI, S.; TUCHUMANTELO, O.; CUNHA, M. B.; SUZUKI, C. Y. **Estudo Comparativo para Avaliação do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Elaboradas com CAP TLA e Convencionais**. In: Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, 4., 2009, Fortaleza. Anais...Fortaleza: SINAPPRE, 2009.

SHINOHARA, K. J. **Estudo do Comportamento do Concreto Asfáltico Modificado pelo Polímero EVA no Módulo Complexo e na Fadiga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SILVA, B. L da. **Estratégia Alternativa para a Determinação do Limiar de Propagação de Trincas Através da Teoria da Distância Crítica**. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas), Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SPECHT, L. P.; HIRSH, F.; CRONST, F.; TUCHUMANTELO, O.; BERGMANN, E. C.; MATA, H. A. N. **Aplicação de Revestimento com SBS e TLA sob Deck Metálico da Ponte Móvel do Guaíba**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 41., 2012, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABPV, 2012.

TANGELLA, S. C. S. R.; CRAUS, J.; DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L. **Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures**. Prepared for Strategic Highway Research Program, Project A-003-A. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1990.

TAYEBALI, A. A.; DEACON, J. A.; COPLANTZ, J. S.; FINN, F. N.; MONISMITH, C. L. **Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures, Part I e II**. Strategy Highway Research Program, Project A-404. Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, 1994.

TONIAL, I. A.; MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R. S. **Alteração da Vida de Fadiga de Pavimentos Asfálticos Devido ao Envelhecimento**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 33., 2001, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABPV, 2001. p. 175-190.

TRICHÊS, Glicério. **Concreto Compactado a Rolo para Aplicação em Pavimentação: Estudo do Comportamento na Fadiga e Proposição de Metodologia de Dimensionamento**. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 1993.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R. **Analytical Techniques for Determining the Endurance Limit of Hot Mix Asphalt Concrete**. In: International Conference on Perpetual Pavements, 2nd. Columbus, Ohio, Estados Unidos, 2009.

VICTORINO, D. R. **Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS por um Simulador de Tráfego Móvel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

VITORELLO, T. **Análise de Desempenho de Estrutura de Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS no Trecho Osório-Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

WILLIAM, M. L.; LANDEL, R. T.; FERRY, J. D. **The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and other Glass-Forming Liquids**. Journal of American Chemistry Society, v. 77, p. 3701-3707, jul. 1955.