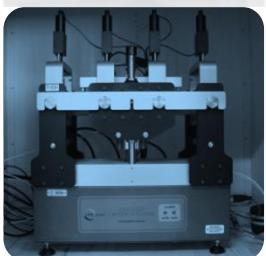




**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS



## **RELATÓRIO FINAL DE PESQUISA RDT - CONCEPA / ANTT**

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

**OUTUBRO | 2014**

RELATÓRIO FINAL - CONCEPA/ANTT

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



**RELATÓRIO FINAL DE PESQUISA:**

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

**INSTITUIÇÃO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR PROPONENTE:**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

**UNIDADE PROPONENTE:**

LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO - LAPAV - PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL.

**COORDENADOR DO PROJETO:**

PROF. JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI

**EQUIPE EXECUTORA:**

PROF. DSc. JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI

PROF. DR. WASHINGTON PÉRES NÚÑEZ

PROF. PhD LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO

ENG<sup>a</sup> GRACIELI BORDIN COLPO

**EQUIPE DE APOIO:**

ENG. MSc. FÁBIO HIRSCH (CONCEPA)

ENG. MSc. THIAGO VITORELLO (CONCEPA)

ENG. FERNANDO CRONST (CONCEPA)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivos Gerais.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 RESUMO E HOMOGENIZAÇÃO DAS NORMAS UTILIZADAS NO ENSAIO DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS.....	21
2.1.1 Norma norte-americana AASHTO T-321-07 .....	22
2.1.2 Proposta norma norte-americana AASHTO T-321 .....	24
2.1.3 Norma norte-americana ASTM D 7460 .....	25
2.1.4 Norma europeia EN 12697-24:2004.....	26
2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO A FADIGA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	27
2.2.1 Método de confecção dos corpos-de-prova .....	27
2.2.2 Modos de Carregamento.....	29
2.2.3 Variáveis da mistura asfáltica .....	31
2.2.4 Carregamento e variáveis ambientais .....	32
2.3 DIFERENTES TIPOS DE ENSAIOS DE FADIGA .....	33
2.3.1 Ensaio de Compressão Diametral.....	35
2.3.2 Ensaio de Flexão em Corpos-de-prova Trapezoidais.....	36
2.3.3 Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos.....	37
2.4 ENERGIA DISSIPADA EM MISTURAS ASFÁLTICAS .....	39
2.4.1 Determinação da energia dissipada .....	41
2.4.2 Modelos de fadiga baseados em energia dissipada .....	43
2.4.3 Método para obter a vida de fadiga, considerando energia dissipada, desenvolvido por Rowe (1996) .....	46
<b>3 AVALIAÇÃO FUNCIONAL DO EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE FADIGA EM VIGA QUATRO PONTOS .....</b>	<b>49</b>
3.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICA DA PRENSA IPC GLOBAL .....	49

3.2 SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS DA PRENSA IPC GLOBAL .....	51
<b>4 SISTEMAS DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>58</b>
4.1 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DE VIGAS UTILIZADAS NA UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA EM BERKELEY .....	58
4.2 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA PRIMÁTICOS EMPREGADOS POR FONTES (2009) .....	61
4.3 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DE VIGOTAS UTILIZADO POR MELLO (2008).....	63
4.4 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DE VIGOTAS UTILIZANDO UMA MESA COMPACTADORA FRANCESA.....	64
4.5 CONCEPÇÃO/ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DESTA PESQUISA .....	66
4.6 ADEQUAÇÃO DA PISTA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DAS PLACAS DE MISTURA ASFÁLTICA E AS ETAPAS DE FABRICAÇÃO DESTAS PLACAS.....	68
<b>5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS NA PESQUISA .....</b>	<b>78</b>
5.1 AGREGADO MINERAL .....	78
5.2 CIMENTO ASFÁLTICO .....	80
5.3 MISTURA ASFÁLTICA COM CIMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO POR ASFALTO NATURAL DO TIPO TLA (CAP TLA FLEX) EMPREGADA PELA USINA DE ASFLATO .....	82
5.4 MISTURA ASFÁLTICA COM CIMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO POR POLÍMERO (CAP 60/85) EMPREGADA PELA USINA DE ASFLATO .....	84
<b>6 PROCEDIMENTO DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE FADIGA À FLEXÃO E MÓDULO COMPLEXO .....</b>	<b>86</b>
6.1 ENSAIO DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS.....	86
6.2 ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS .....	88
6.3 MÓDULO COMPLEXO .....	92
6.3.1 Curvas Isotérmicas.....	95
6.3.2 Curva Equivalência Frequência - Temperatura.....	95
6.3.3 Curvas Isócronas .....	96
6.3.4 Curva Espaço de Black .....	97
6.3.5 Representação Cole-Cole.....	97

6.3.6	Ensaio de módulo dinâmico.....	98
<b>7</b>	<b>LEVANTAMENTO EM CAMPO DO TRINCAMENTO DO PAVIMENTO .....</b>	<b>100</b>
7.1	LEVANTAMENTOS DO TRINCAMENTO DO PAVIMENTO NOS KM 14 DA BR 290.....	100
<b>8</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS OBTIDOS NESTA PESQUISA</b>	<b>104</b>
8.1	ENSAIOS DE DENSIDADE APARENTE E GRAU DE COMPACTAÇÃO NAS AMOSTRAS	104
8.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	110
8.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS.....	113
8.4	COMPARATIVOS DA VIDA DE FADIGA .....	118
8.4.1	Comparativo entre os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos à deformação e tensão controlada.....	118
8.4.2	Comparativo entre o ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos e o ensaio de fadiga por compressão diametral.....	119
8.5	IMPACTO DA VIDA DE FADIGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS.....	120
8.6	RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO DAS MISTURAS CA-E E CA-TLA	126
8.6.1	Curva de equivalência frequência-temperatura (curva mestra) .....	130
8.6.2	Curva isócrona .....	132
8.6.3	Espaço de Black.....	134
8.6.4	Representação no plano Cole-Cole.....	136
8.7	RESULTADOS OBTIDOS NO LEVANTAMENTO DO TRINCAMENTO DO PAVIMENTO NO KM 14 DA BR-290/RS.....	138
8.8	ESTIMATIVA DE UM SHIFT FACTOR .....	141
<b>9</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>143</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Características do equipamento para o ensaio de fadiga em viga quatro pontos.	22
Figura 2: Procedimento de fixação da amostra no equipamento para ensaio de fadiga em viga quatro pontos.	23
Figura 3: Rígidez à flexão x ciclos de carga ( $S_{xn}$ ) versus número de ciclos.	24
Figura 4: Módulo normatizado x ciclo de carga versus número de ciclos.	25
Figura 5: Comparativo do comportamento da tensão controlada e deformação controlada em ensaios de fadiga.	29
Figura 6: Formas de carregamento empregadas em ensaios de fadiga.	32
Figura 7: Diferenciação entre o fenômeno de fadiga e deformação permanente.	33
Figura 8: Configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à compressão diametral.	35
Figura 9: Configuração do ensaio de fadiga à flexão em amostras trapezoidais desenvolvido pelo Laboratório Central de Pavimentos e Rodovias - LCPC em Nantes/França.	37
Figura 10: Configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos.	38
Figura 11: Comportamento elástico e viscoelástico dos materiais na relação tensão-deformação.	39
Figura 12: Esquema de um ensaio com carregamento harmônico em um material viscoelástico.	40
Figura 13: (a) Esquema da solicitação e resposta de um carregamento harmônico em um material viscoelástico; (b) Histerese formada pela defasagem da resposta à solicitação aplicada.	40
Figura 14: Energia dissipada durante ensaios à deformação e tensão controlada em 37°C e a 10 Hz (Mello, 2008).	41
Figura 15: Histerese formada para uma mistura em diferentes temperaturas e sob mesma amplitude de deformação com $N = 50$ e 10 Hz (Mello, 2008).	42
Figura 16: Histerese formada ao longo das solicitações no ensaio de fadiga a 21°C e 10 Hz (Mello, 2008).	42

Figura 17: Razão de energia dissipada x módulo de rigidez da mistura. ....	44
Figura 18: Aplicação do conceito da relação de mudança de energia dissipada para resultados de testes em misturas asfálticas a tensão e deformação controlada. ....	45
Figura 19: Representação do valor de Platô. ....	45
Figura 20: Razão de energia, módulo complexo e energia dissipada em função do ciclo de carregamento em ensaio de fadiga trapezoidal com deformação controlada. ....	47
Figura 21: Razão de energia, módulo complexo e energia dissipada em função do ciclo de carregamento em ensaio de fadiga trapezoidal com tensão controlada. ....	48
Figura 22: Sequência de cálculo para obter N1.....	48
Figura 23: Equipamento para realização do ensaio de flexão em viga quatro pontos.....	49
Figura 24: Câmara climática utilizada para realização do ensaio de flexão em viga quatro pontos. ....	51
Figura 25: Gabinete do sistema de controle multi-eixos integrado (IMACS) pneumático. 51	
Figura 26: Tela do software UTS015.....	52
Figura 27: Interface do <i>virtual pendant</i> onde: A= <i>Virtual pendant</i> ativo e B= Funções do <i>virtual pendant</i> desabilitadas durante o ensaio. ....	53
Figura 28: Interface do visualizador dos níveis de sinais dos transdutores. ....	54
Figura 29: Página de exibição dos dados gerais. ....	54
Figura 30: Página de exibição dos dados da amostra. ....	55
Figura 31: Página de exibição dos parâmetros do ensaio. ....	55
Figura 32: Página de exibição dos dados do ensaio. ....	56
Figura 33: Página de ajuste dos parâmetros e formas de onda.....	56
Figura 34: Página de escolha das opções de gráficos.....	57
Figura 35: Corpo de prova modelo para a realização das leituras de temperatura interna e de superfície durante a execução do ensaio. ....	57
Figura 36: Sistema de moldes empregados pela Universidade da Califórnia para confecção de vigas em laboratório destinadas a ensaios de fadiga a flexão em quatro pontos. ...	58
Figura 37: Detalhe do molde empregado pela Universidade da Califórnia para confecção de quatro vigas, sendo obtidas duas amostras por vão. ....	59

Figura 38: Compactação das placas de misturas asfálticas utilizando rolo compactador, Universidade da Califórnia.....	59
Figura 39: Sistema de moldes empregados pela Universidade da Califórnia para confecção de vigas em campo destinadas a ensaios de fadiga a quatro pontos. ....	60
Figura 40: Sistema utilizado para a retirada das placas de misturas asfálticas moldadas em campo, Universidade da Califórnia.....	60
Figura 41: Amostras para o ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos, após o processo de corte, Universidade da Califórnia. ....	61
Figura 42: Processo de homogeneização dos materiais. ....	62
Figura 43: Sistema de moldagem e compactação de vigas utilizado por Fontes (2009). ....	62
Figura 44: Compactação e moldagem de corpos de prova em formato de viga empregado por Mello (2008). ....	63
Figura 45: Mesa compactadora francesa tipo LCPC (Moura, 2010).....	64
Figura 46: Processo de compactação de placas de mistura asfáltica utilizado por Almeida (2013). ....	65
Figura 47: Detalhamento dos moldes utilizados nesta pesquisa. ....	66
Figura 48: Moldes usinados para moldagem de vigotas: (a) positivo 1 e (b) positivo 2....	67
Figura 49: Face inferior do molde metálico (negativo) com engastes que servem para fixá-lo na base de compactação. ....	67
Figura 50: Adaptação da pista de concreto para colocação das bases e moldes metálicos. ....	68
Figura 51: Posicionamento das bases metálicas (a) e dos moldes metálicos (b) na pista de concreto.....	69
Figura 52: Pista de moldagem confeccionada da Usina de Asfalto da Construtora Triunfo para produção de placas de misturas asfálticas. ....	69
Figura 53: Utilização de papel nos moldes metálicos com o intuito da massa asfáltica não aderir nas faces dos moldes. ....	70
Figura 54: Usina de Asfalto da Construtora Triunfo. ....	71
Figura 55: Balança eletrônica utilizada para pesar a mistura asfáltica e, assim, controlar a compactação das placas em campo. ....	71
Figura 56: Processo de preenchimento dos moldes com massa asfáltica. ....	72

Figura 57: Processo de preenchimento dos moldes metálicos e verificação da temperatura de compactação da mistura asfáltica. ....	72
Figura 58: Pré-compactação da mistura asfáltica no interior dos moldes metálicos. ....	73
Figura 59: Rolo compactador utilizado para compactar a mistura asfáltica.....	73
Figura 60: Processo de compactação das placas de mistura asfáltica. ....	74
Figura 61: Placas de mistura asfáltica compactadas. ....	75
Figura 62: Placas de mistura asfáltica. ....	75
Figura 63: Transporte das placas de mistura asfáltica da Usina de Asfalto para a marmoraria. ....	76
Figura 64: Processo de corte das placas de mistura asfáltica. ....	76
Figura 65: Vigotas obtidas após o processo de corte das placas de mistura asfáltica.....	77
Figura 66: Localização da Pedreira Triunfo em Santo Antônio da Patrulha/RS (Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul. Disponível em: < <a href="http://www1.seplag.rs.gov.br/atlas/">http://www1.seplag.rs.gov.br/atlas/</a> >). ....	78
Figura 67: Distribuição granulométrica dos agregados utilizados no estudo. ....	80
Figura 68: Composição granulométrica estabelecida para a mistura CA-TLA produzida na usina de asfalto - Faixa C DNIT.....	83
Figura 69: Composição granulométrica estabelecida para a mistura CA-E produzida na usina de asfalto - Faixa C DNIT.....	84
Figura 70: Posicionamento da amostra no equipamento de flexão em quatro pontos....	87
Figura 71: Corpos de prova prismáticos utilizados nesta pesquisa para os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos.....	87
Figura 72: (a) câmara climática e (b) sistema de carregamento do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral.....	88
Figura 73: Sistema de aquisição e controle de dados do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral.....	89
Figura 74: Programa de controle do ensaio de fadiga por compressão diametral e detalhes das telas de configurações.....	90
Figura 75: 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. ....	90

Figura 76: Extração de corpos de prova cilíndricos de placas moldadas na usina de asfalto.	91
Figura 77: Sequência de montagem das peças de suporte no corpo de prova cilíndrico.	92
Figura 78: Esquema de um ensaio com carregamento dinâmico em um material viscoelástico.	93
Figura 79: Curvas isotérmicas.	95
Figura 80: Curvas de equivalência frequência – temperatura.	96
Figura 81: Curvas isócronas de uma mistura asfáltica.	96
Figura 82: Espaço de Back de uma mistura asfáltica.	97
Figura 83: Representação do módulo complexo no Plano Cole-Cole.	98
Figura 84: Esquema do carregamento aplicado no ensaio de flexão em quatro pontos em vigas prismáticas.	98
Figura 85: Localização das superfícies de avaliação em rodovias de pista dupla.	101
Figura 86: Demarcação no pavimento das superfícies de avaliação.	101
Figura 87: Treliça utilizada para determinar as flechas.	102
Figura 88: Formulário para levantamento do trincamento do pavimento.	102
Figura 89: Levantamento do trincamento do pavimento realizado no sentido Osório-Porto Alegre da BR-290/RS.	103
Figura 90: Ensaio para determinação da densidade aparente.	104
Figura 91: Densidade aparente das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.	105
Figura 92: Densidade aparente das vigotas moldadas com a mistura CA-E.	105
Figura 93: Resultados de VV (%) e GC (%) das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.	106
Figura 94: Resultados de VV (%) e GC (%) das vigotas moldadas com a mistura CA-E.	106
Figura 95: Vigota dividida em quatro partes para ensaio de densidade aparente.	107
Figura 96: Densidade aparente das partes de uma vigota.	107
Figura 97: Resultados de VV (%) e GC (%) das partes de uma vigota.	107

Figura 98: Densidade aparente dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA.....	108
Figura 99: Densidade aparente dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.....	108
Figura 100: Resultados de VV (%) e GC (%) dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA.....	109
Figura 101: Resultados de VV (%) e GC (%) dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.....	109
Figura 102: Valores de MR das misturas estudadas obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral.....	110
Figura 103: Curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da tensão de tração.....	111
Figura 104: Curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da diferença de tensões.....	111
Figura 105: Curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da deformação específica inicial.....	112
Figura 106: Energia dissipada obtida nos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada.....	112
Figura 107: Resultados de vida de fadiga, obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral, realizados por (a) Brito (2006), (b) Rohde (2007) e (c) Bernucci <i>et al.</i> (2010). ....	114
Figura 108: Curvas de fadiga das misturas estudadas em função da deformação de tração.....	116
Figura 109: Rígidez na flexão das misturas estudadas - ensaio a deformação controlada.....	117
Figura 110: Energia dissipada obtida nos ensaios de fadiga à flexão sob deformação controlada.....	117
Figura 111: Curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas no ensaio de flexão à tensão (TC) e deformação (DC) controlada.....	118
Figura 112: 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.....	119

Figura 113: 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. ....	119
Figura 114: Estrutura de pavimento empregada na análise. ....	121
Figura 115: Vida de fadiga das estruturas estudadas. ....	121
Figura 116: Vida de fadiga das estruturas analisadas (modelo gerado no ensaio de flexão à deformação controlada). ....	122
Figura 117: Vida de fadiga das estruturas analisadas (modelo SHRP A-003A adaptado). 123	
Figura 118: Vida de fadiga das estruturas analisadas (modelo MEPDG adaptado). ....	124
Figura 119: Vida de fadiga das estruturas analisadas (modelo SHRP A-003A para energia dissipada adaptado).....	125
Figura 120: Módulo dinâmico da mistura CA-E em função das frequências de solicitação. ....	127
Figura 121: Módulo dinâmico da mistura CA-TLA em função das frequências de solicitação. ....	128
Figura 122 Ângulos de fase da mistura CA-E em função das frequências de solicitação.128	
Figura 123: Ângulos de fase da mistura CA-TLA em função das frequências de solicitação. ....	129
Figura 124: Módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA. ....	129
Figura 125: Ângulo de fase das misturas CA-E e CA-TLA.....	130
Figura 126: Curva frequência-temperatura da mistura CA-E.....	131
Figura 127: Curva frequência-temperatura da mistura CA-TLA.....	131
Figura 128: Representação do módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA na curva frequência-temperatura. ....	132
Figura 129: Representação do módulo dinâmico da mistura CA-E na curva isócrona. ....	133
Figura 130: Representação do módulo dinâmico da mistura CA-TLA na curva isócrona. 133	
Figura 131: Curvas isócronas das misturas CA-E e CA-TLA.....	134
Figura 132: Espaço de Black da mistura CA-E.....	135
Figura 133: Espaço de Black da mistura CA-TLA.....	135

Figura 134: Representação do módulo dinâmico no espaço de Black das misturas CA-E e CA-TLA.....	136
Figura 135: Representação do módulo complexo da mistura CA-E no plano Cole-Cole..	137
Figura 136: Representação do módulo complexo da mistura CA-TLA no plano Cole-Cole.	137
Figura 137: Representação no plano Cole-Cole das misturas CA-E e CA-TLA.....	138
Figura 138: Vida de fadiga calculada em função da tensão e deformação de tração obtida nos ensaios de flexão em quatro pontos e compressão diametral.....	142
Figura 139: Esquema representativo dos fatores de transportes obtidos nos ensaios de fadiga à flexão e por compressão diametral. ....	142
Figura 140: Simuladores de tráfego do ATIRC – UCDavis.....	150
Figura 141: Equipamentos no ATIRC - UCDavis. ....	150
Figura 142: Equipamentos no ATIRC - UCDavis.....	150
Figura 143: Equipamentos para ensaios de misturas asfálticas no ATIRC - UCDavis.....	151
Figura 144: Equipamento AMPT no ATIRC - UCDavis.....	151
Figura 145: Monitoramento da temperatura e refletividade de diferentes tipos de pavimentos - ATIRC/UCDavis. ....	151
Figura 146: Monitoramento da temperatura e refletividade de diferentes tipos de pavimentos - ATIRC/UCDavis. ....	152
Figura 147: Pista de moldagem de placas de mistura asfáltica - ATIRC/UCDavis. ....	153
Figura 148: Ensaio Hamburgo - UCBerkeley.....	153
Figura 149: Pista de moldagem de placas de mistura asfáltica - UCBerkeley.....	154
Figura 150: Rolo compactador utilizado para compactação das placas - UCBerkeley. ....	154
Figura 151: Placas de mistura asfáltica extraídas de campo - UCBerkeley.....	154
Figura 152: Equipamento utilizado no processo de corte das placas para obtenção das vigotas - UCBerkeley.....	155
Figura 153: Vigotas de mistura asfáltica - UCBerkeley.....	155
Figura 154: Equipamento para ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos da IPC Global - UCBerkeley.....	155

Figura 155: Equipamento para ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos da Cox&Sons - UCBerkeley..... 156

Figura 156 Primeiro equipamento montado para realização de ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos elaborado pelo prof. Monismith - UCBerkeley..... 156

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre as normas do ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos.	21
Tabela 2: Fatores que afetam os ensaios de tensão controlada e deformação controlada.	30
Tabela 3: Fatores que influenciam a rigidez e a vida de fadiga das misturas asfálticas.	31
Tabela 4: Características dos ensaios à fadiga comumente empregados	34
Tabela 5: Características dos agregados utilizados no estudo	79
Tabela 6: Distribuição granulométrica dos agregados	79
Tabela 7: Propriedades do cimento asfáltico modificado por asfalto natural do tipo TLA (CAP TLA FLEX) utilizado na pesquisa.	81
Tabela 8: Propriedades do cimento asfáltico modificado por polímero (CAP 60/85) utilizado na pesquisa.	82
Tabela 9: Especificações para Faixa C do DNIT e composição da mistura asfáltica com CAP TLA FLEX empregada	82
Tabela 10: Resumo das principais propriedades da mistura CA-TLA estudada	83
Tabela 11: Especificações para Faixa C do DNIT e composição da mistura asfáltica com CAP 60/85 empregada	84
Tabela 12: Resumo das principais propriedades da mistura CA-E estudada	85
Tabela 13: Parâmetros dos modelos de fadiga das misturas estudadas (curvas de Wöhler).	111
Tabela 14: Resultados de vida de fadiga das misturas estudadas nesta pesquisa.	115
Tabela 15: Parâmetros obtidos para os modelos de fadiga determinados no ensaio de flexão à deformação controlada	115
Tabela 16: Valores de tensão, deformação e vida de fadiga calculados	121
Tabela 17: Valores de deformação e vida de fadiga calculados (modelo obtido no ensaio de flexão à deformação controlada)	122
Tabela 18: Valores de deformação, rigidez inicial e vida de fadiga calculados (modelo SHRP A-003A adaptado – ensaio de flexão em quatro pontos à deformação controlada)	123

Tabela 19: Valores de deformação, módulo dinâmico e vida de fadiga calculados (modelo MEPDG adaptado) .....	124
Tabela 20: Valores de deformação e vida de fadiga calculados (modelo SHRP A-003A para energia dissipada adaptado).....	125
Tabela 21: Resultados do ensaio de módulo dinâmico da mistura CA-E.....	126
Tabela 22: Resultados do ensaio de módulo dinâmico da mistura CA-TLA.....	127
Tabela 23: Inventário do estado da superfície do pavimento – km 14 da BR-290/RS – Segmento 1.....	139
Tabela 24: Inventário do estado da superfície do pavimento – km 14 da BR-290/RS – Segmento 2.....	139
Tabela 25: Cálculo de índice de gravidade global (IGG) – km 14 BR-290/RS – Segmento 1. ....	140
Tabela 26: Cálculo de índice de gravidade global (IGG) – km 14 BR-290/RS – Segmento 2. ....	140
Tabela 27: Valores de tensão, deformação e vida de fadiga calculados (comparativo ensaios de flexão e compressão diametral). .....	141
Tabela 28: Resumo dos itens proposto para esta pesquisa.....	146
Tabela 29: Resumo diário das atividades desenvolvidas na visita a UCDavis e UCBerkeley. ....	149

## 1 INTRODUÇÃO

O presente projeto de pesquisa intitula-se “Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos”. O projeto teve duração de dezenove meses, a partir de Março de 2013 e se caracteriza pela realização de ensaios em viga quatro pontos cujo principal objetivo foi analisar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas densas, utilizadas no estado do Rio Grande do Sul. Isto permitiu prever qual o tipo de mistura que melhor se adapta as condições impostas pelo tráfego da rodovia, bem como pela estrutura do pavimento da mesma. Em adição, o estudo buscou desenvolver uma proposta de padronização do ensaio de flexão em viga quatro pontos, visto que este ensaio ainda não está normatizado no Brasil.

Nesta pesquisa além dos ensaios de flexão em viga a quatro pontos foram realizados ensaios de tração indireta por compressão diametral buscando fazer um comparativo entre esses dois ensaios para verificar as variações na vida de fadiga de misturas asfálticas em função das diferentes características preconizadas para cada ensaio. Optou-se por comparar o ensaio de flexão em viga quatro pontos com o ensaio de tração indireta por compressão diametral em virtude de que este segundo ensaio é realizado no Laboratório de Pavimentação LAPAV/UFRGS há alguns anos e por ainda ser o tipo de ensaio mais empregado no Brasil para determinar a vida de fadiga de misturas asfálticas.

Também, dentre os focos principais dessa pesquisa está a estimativa do fator laboratório-campo que melhor representa a vida de fadiga do pavimento caracterizando, assim, o desempenho estrutural do pavimento no que diz respeito aos critérios de fadiga. Este fator é estimado através dos resultados obtidos nos ensaios propostos e no levantamento dos trincamentos realizados em campo. A estimativa do fator laboratório-campo é necessária em função das previsões estabelecidas com base em ensaios realizados em laboratório empregando corpos de prova com dimensões reduzidas, em condições particulares de carregamento e análise de tráfego, sendo diferentes do desempenho de campo sob as condições do clima e do tráfego real.

Com uma gama de ensaios de flexão em viga quatro pontos realizados ao longo do decorrer do projeto buscou-se determinar um modelo de previsão de vida de fadiga adequado para as misturas asfálticas estudadas, a fim de contribuir para que o pavimento empregado pela Concessionária apresente melhor desempenho no decorrer de sua vida útil. Além disso, as compilações dos dados de levantamentos de trincas realizados em campo auxiliaram na determinação dos parâmetros necessários para a validação do modelo de previsão de vida de fadiga para as misturas asfálticas empregadas nesta pesquisa.

Na fase final da pesquisa buscou-se realizar a análise global dos dados obtidos ao longo do desenvolvimento do projeto a fim de poder discutir o impacto das vidas de fadiga no dimensionamento de pavimentos, além de contemplar as conclusões e sugestões da pesquisa.

## 1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O transporte rodoviário é considerado um dos mais importantes no Brasil, porém como o tráfego pode ser variável em relação ao tipo de veículos e as cargas transportadas à degradação dos pavimentos é, muitas vezes, prematura e inevitável. Com isso, uma das principais causas que pode levar o pavimento à ruptura é o trincamento por fadiga.

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 está 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.

Um dos problemas de maior relevância nas misturas asfálticas é a fadiga, a qual ocorre devido às cargas repetidas do tráfego e acabam gerando tensões de tração na base do revestimento. Isto faz com que no estágio inicial ocorra o surgimento de microtrincas, 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, sendo que esta resistência aumenta com a durabilidade da mistura e, também, com a quantidade e tipo de ligante empregado.

Com o crescente aumento do volume de tráfego e da sobrecarga nos pavimentos faz-se necessário à aplicação de revestimentos mais resistentes. Em função disto é de extrema importância que além de conhecermos as propriedades das misturas asfálticas convencionais aprofundarmos nossos conhecimentos em misturas especiais como as modificadas por polímero que tem grande potencial de emprego nas Concessionárias e obras públicas nos dias atuais. 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.

Os ensaios laboratoriais comumente empregados para analisar a vida de fadiga das misturas asfálticas são os de tração indireta por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos e ensaios de flexão em corpos de prova trapezoidais. Porém, esses ensaios apresentam alguns problemas que acabam prejudicando a relação dos resultados obtidos em laboratórios com a realidade de campo.

No ensaio de tração indireta por compressão diametral acabam sendo geradas tensões cisalhantes junto aos frisos e o plano de tensões de tração é perpendicular à aplicação da carga, assim, em função de uma série de simplificações elásticas do ensaio e de suas características executivas, há valores de fator laboratório-campo (*shift factor*) elevados. Já no ensaio de flexão em trapézios a confecção dos corpos de prova é extremamente complicada e durante o ensaio surgem esforços cortantes junto aos fletores o que não é

desejável. Neste sentido, foi empregado nesta pesquisa o ensaio de flexão a quatro pontos em corpos de prova prismáticos para analisar a vida de fadiga de misturas asfálticas, pois se acredita que neste tipo de ensaio são sanados os problemas comumente encontrados nos ensaios de compressão diametral e flexão em amostras trapezoidais.

O Laboratório de Pavimentação - LAPAV - através da cooperação com a Petrobras (Rede de Asfalto) adquiriu um equipamento da empresa IPC Global (modelo CS 7800) para realização do ensaio de flexão em vigas quatro pontos, porém este equipamento ainda não se encontrava em uso e este trabalho buscou justamente ser pioneiro na sua utilização. 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.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos Gerais

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 e, com isto, validar um modelo de fadiga para as misturas estudadas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- i. Investigar na literatura nacional e internacional a metodologia empregada para realizar o ensaio de flexão em vigas a quatro pontos para misturas asfálticas.
- ii. Buscar uma metodologia adequada para realização da moldagem das placas para obtenção das vigas de misturas asfálticas, considerando trabalhos já realizados como, por exemplo, pela UCPRC – University of California | Pavement Research.
- iii. Realizar uma visita de curta temporada nos EUA, através de um contato já estabelecido com a Universidade da Califórnia, buscando aprimorar os conhecimentos no assunto e discutir os resultados experimentais obtidos no equipamento do LAPAV/UFRGS.
- iv. Determinar a energia dissipada ao longo do ensaio de vida de fadiga para caracterização do comportamento de diferentes misturas asfálticas, permitindo o estabelecimento de critérios de falha em função da energia dissipada em contraponto aos tradicionais métodos que consideram o número de repetições versus tensão de tração, diferença de tensões ou deformação inicial.
- v. Comparar a vida de fadiga no ensaio de flexão em viga a quatro pontos e tração indireta por compressão diametral.
- vi. Obter o módulo complexo a partir do ensaio de flexão em quatro pontos, visando determinar com maior propriedade as características das misturas asfálticas; a obtenção do valor de Módulo Complexo poderá permitir estabelecer parte da curva

- mestra do material permitindo um estudo mais aprofundado em relação aos critérios de fadiga existentes no Guia da AASHTO de 2002.
- vii. Estudar uma mistura com aplicação em campo para permitir a avaliação dos efeitos de fadiga em pistas em serviço.
  - viii. Realizar levantamentos em campo do trincamento do pavimento - IGG (Índice de Gravidade Global) - em um segmento teste da pista em serviço.
  - ix. Estimar o fator laboratório-campo a partir de estudos realizados através da cooperação com a Concessionária.
  - x. Validar um modelo de fadiga adequado para as misturas asfálticas estudadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão sobre as normas comumente utilizadas na realização dos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos. Busca-se, também, realizar uma descrição dos 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. Descreve-se brevemente os diferentes tipos de ensaios realizados para determinar a vida de fadiga de misturas asfálticas, como suas configurações, tipo e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos de análise. Também é realizada uma breve revisão sobre como ocorre a energia dissipada nos ensaios de fadiga e uma descrição dos modelos empregados para determinar a vida de fadiga de misturas asfálticas considerando a energia dissipada. Os dados aqui apresentados são baseados em diversas bibliografias nacionais e internacionais sobre o assunto.

### 2.1 RESUMO E HOMOGENIZAÇÃO DAS NORMAS UTILIZADAS NO ENSAIO DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

Faz-se nesse item uma breve 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 determinação do ponto de ruptura de 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 1 consta um breve resumo dos principais critérios estabelecidos para o ensaio pelas diferentes normas utilizadas.

Tabela 1: Comparativo entre as normas do ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos.

Critérios/Normas	AASHTO T 321-07	Proposta AASHTO T 321	ASTM D7460-10	EN 12697-24: 2004
Condição de ruptura	Redução em 50% da Rígidez Inicial	Ponto máximo da curva: Rígidez na flexão x Ciclos vs N° Ciclos	Pico da curva módulo normalizado x Ciclos vs N° Ciclos	Redução em 50% da Rígidez Inicial ou Ruptura da amostra
Modo de carregamento	Deformação controlada	Deformação controlada	Deformação controlada	Deformação ou tensão controlada
Limites de deformação controlada	250 $\mu\epsilon$ - 750 $\mu\epsilon$	250 $\mu\epsilon$ - 2000 $\mu\epsilon$	50 $\mu\epsilon$ - 3000 $\mu\epsilon$	Níveis de deformação em que a vida de fadiga fique entre $10^4$ a $2 \times 10^6$
Limites de tensão controlada	-	-	-	Níveis de tensão em que a vida de fadiga fique entre $10^4$ a $2 \times 10^6$
Controle de temperatura	$20^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C}$ ou $20^\circ\text{C}$
Tempo em estufa antes do início do ensaio	2 horas	2 horas	1,5 a 2 horas	2 h para $0^\circ\text{C}$ e 1 h para $20^\circ\text{C}$
Comprimento vigotas (mm)	$380 \pm 6$	$380 \pm 6$	$380 \pm 6$	Não deve exceder o Comprimento Efetivo em mais de 10%
Largura vigota (mm)	$63 \pm 6$	$63 \pm 6$	$63 \pm 2$	$> 3 \times D_{\text{max}}$
Espessura vigota (mm)	$50 \pm 6$	$50 \pm 6$	$50 \pm 2$	$> 3 \times D_{\text{max}}$
Mínimo faceamento dos lados da vigota (mm)	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	0 a 60
Número de amostras	3	3	9	6

### 2.1.1 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 repetitiva. Pode ser considerada uma norma de médio grau de detalhamento. O ensaio deve ocorrer à temperatura controlada de  $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e com frequência variando entre 5 a 10 Hz. 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 1.

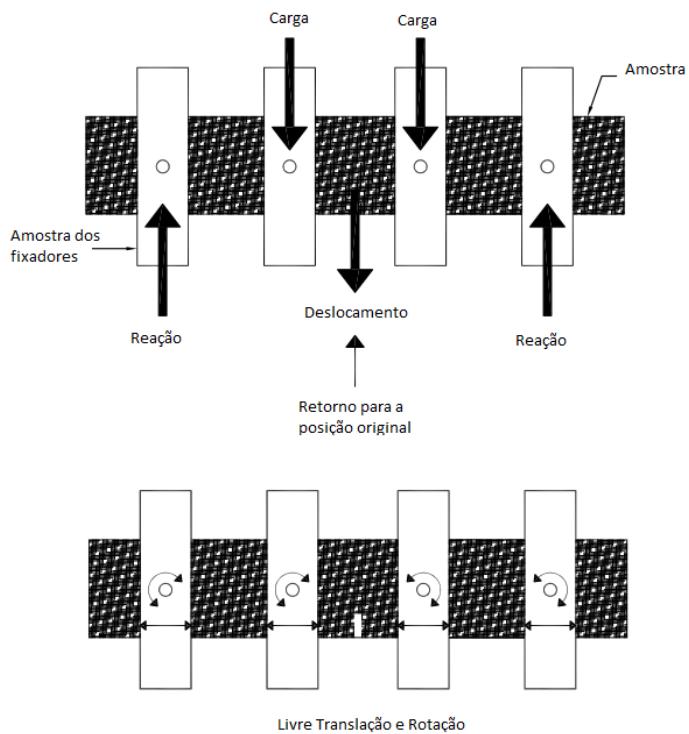


Figura 1: Características do equipamento para o ensaio de fadiga em viga quatro pontos.

No ensaio, a cada ciclo de carga, o sistema de controle e aquisição de dados deve medir o deslocamento da viga, registrando a sua deformação e ajustando a carga aplicada assim que a amostra atingir um nível de deformação constante em cada ciclo de carga. 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. Após isso, 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 2.

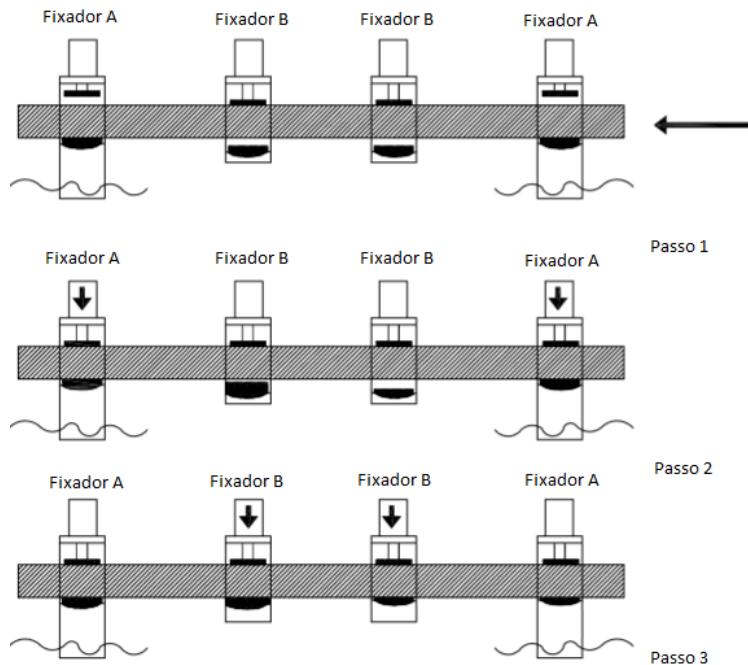


Figura 2: Procedimento de fixação da amostra no equipamento para ensaio de fadiga em viga quatro pontos.

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

Todos os lados da amostra devem ser faceados em no mínimo 6mm proporcionando superfícies paralelas e, com isso, busca-se a eliminação de elevados volumes de vazios nas mesmas. Após o faceamento a norma preconiza que as amostras apresentem dimensões de  $380 \pm 6$ mm de comprimento,  $50 \pm 6$ mm de altura,  $63 \pm 6$ mm de largura, sendo recomendado a confecção de três vigas idênticas 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 nas vigas.

Nesta norma, também, constam as equações matemáticas designadas para determinar a máxima tensão de tração, máxima deformação de tração, rigidez de flexão, ângulo de fase,

energia dissipada e energia dissipada acumulada para o intervalo de ciclos de carga determinado pelo operador.

### 2.1.2 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:

- No ensaio realizado a deformação controlada recomenda-se emprego de uma deformação inicial entre 250 a 2000 microstrain;
- Nesta proposta não estão contempladas as equações para o cálculo da energia dissipada por ciclo e a energia dissipada acumulada;
- O término da coleta de dados e encerramento do ensaio deve ser no ponto em que o valor de pico da curva - rigidez de flexão x ciclos de carga ( $S_{xn}$ ) versus número de ciclos - reduz em 15%;
- 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 3.

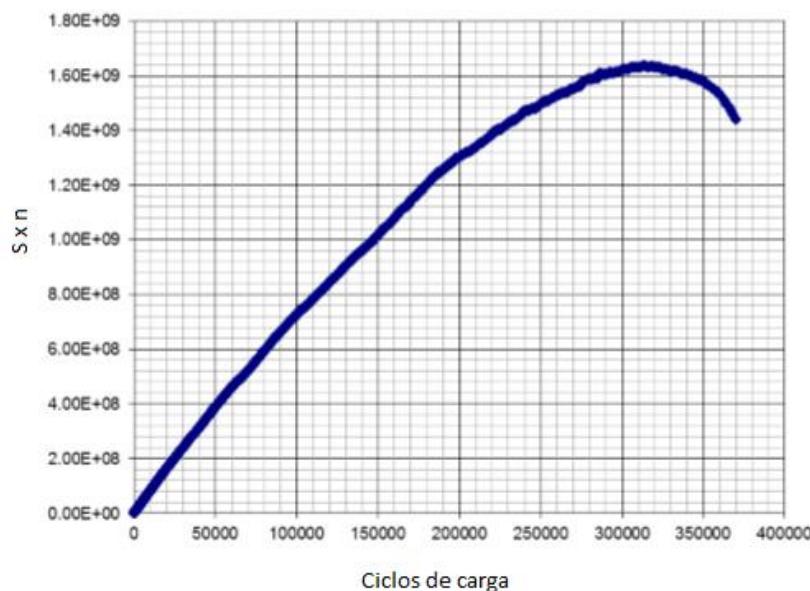


Figura 3: Rigidez à flexão x ciclos de carga ( $S_{xn}$ ) versus número de ciclos.

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.

### 2.1.3 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 de alto grau de detalhamento.

O ensaio deve ser realizado com pulso de carregamento de formato semi-seno-verso à temperatura controlada de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e com frequência variando entre 5 a 10 Hz. No ensaio em deformação controlada, recomenda-se que a deformação inicial escolhida apresente uma variação entre 50 a 3000 microstrain, sendo 200 a 800 microstrain para concreto asfáltico convencional; 70 a 150 microstrain para tráfego pesado, mas baixas condições de deformação; 1500 a 3000 para materiais intermediários. O ponto de ruptura corresponde ao máximo valor do módulo normatizado x ciclo de carga quando plotado versus número de ciclos (Figura 4).

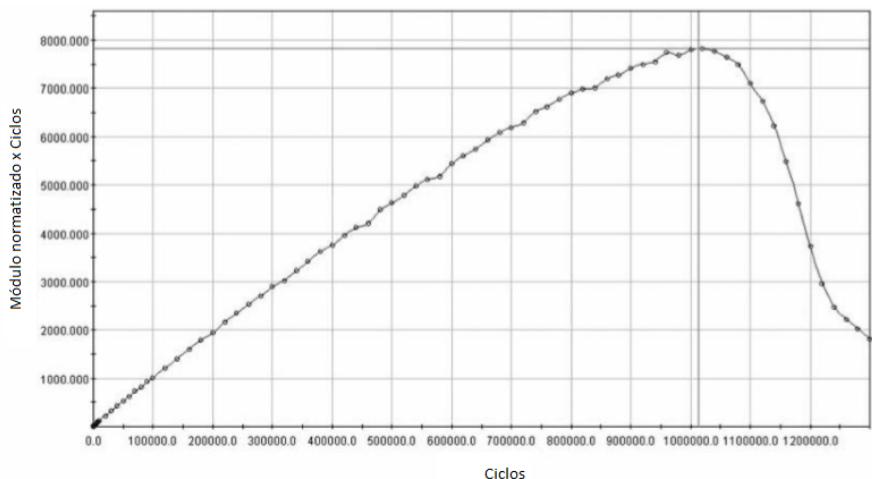


Figura 4: Módulo normatizado x ciclo de carga versus número de ciclos.

O módulo normatizado x ciclo de carga (NM) é determinado pela seguinte equação 1:

$$NM = \frac{S_i x N_i}{S_0 x N_0} \quad (1)$$

Onde:

$S_i$  (Pa)= Rígidez de flexão da viga para o ciclo  $i$ ;

$N_i$ = Ciclo  $i$ ;

$S_0$  (Pa)= Rígidez de flexão inicial da viga, estimada no ciclo 50 aproximadamente;

$N_0$ = Real número do ciclo onde a rígidez de flexão inicial da viga é determinada.

Além da equação 1, outras são apresentadas na norma para determinação da máxima tensão de tração, máxima deformação de tração, rigidez de 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 6mmficando as dimensões finais requeridas de  $380\pm6$ mm de comprimento,  $50\pm2$ mm de altura,  $63\pm2$ 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 alguma viga rompa diretamente nos fixadores. Além disso, as amostras devem ser colocadas em uma câmara climática a  $\pm0,5^{\circ}\text{C}$  por um período de 1,5 horas a 2 horas antes do início do ensaio.

#### 2.1.4 Norma europeia EN 12697-24:2004

A norma EN 12697-24 descreve cinco tipos de ensaios 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 vida de fadiga. 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  $0^{\circ}\text{C}$  ou  $20^{\circ}\text{C}$  e com frequência variando entre 0 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 e, recomenda-se o ensaio de seis amostras para cada nível. Os níveis de deformação e tensão devem ser escolhidos de maneira que a vida de fadiga fique entre  $10^4$  a  $2\times10^6$  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 da amostra. A rigidez inicial é determinada no ciclo de carga número 100.

Esta norma preconiza que a altura e largura das amostras 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 valor máximo da altura ou da largura e, recomenda que o comprimento total seja igual ou menor a 10% do comprimento efetivo. As amostras são serradas de placas moldadas em laboratório ou em campo, deixando um espaço de no mínimo 20mm 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  $25^{\circ}\text{C}$ , 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.

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO A FADIGA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Os principais fatores que influenciam o comportamento à fadiga das misturas asfálticas são aqueles relativos à preparação dos corpos-de-prova, as características dos ensaios empregados e os relacionados com as propriedades da mistura asfáltica. Estes fatores precisão 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 o emprego de fator laboratório-campo para estimar a vida de fadiga de misturas asfálticas. A seguir, é feita uma breve descrição dos fatores mais relevantes que influenciam a determinação da vida de fadiga dos materiais betuminosos.

### 2.2.1 Método de confecção dos corpos-de-prova

Muitos pesquisadores preocupam-se em atender os critérios de homogeneização dos corpos-de-prova confeccionados para a realização dos ensaios de fadiga em laboratório 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 no compactador giratório e compactação por rolamento, sendo que os três últimos métodos são considerados os que melhor reproduzem a compactação que ocorre em campo.

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 compactação do método de Marshall. Salienta-se que a vantagem deste procedimento está relacionada ao fato de que a alta energia pode ser aplicada por um aparelho portátil, relativamente simples e de baixo custo e de acionamento manual, tornando-o conveniente para moldaram ostras em laboratório, bem como no campo. Em contraponto, a principal desvantagem é que a transferência de alta 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. Outra desvantagem potencial é a dificuldade na preparação de amostras uniformes e homogêneas para outros tamanhos e formas de cilindros curtos.

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. Durante cada execução da base do soquete aumenta-se gradativamente a carga e a mantém durante um curto intervalo de tempo, liberando-a em seguida. 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 e na confecção de corpos-de-prova para o ensaio de estabilômetro. Estudos de correlação foram realizados indicando que as amostras fabricadas em laboratórios apresentam propriedades físicas e mecânicas equivalentes às obtidas em campo.

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. 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 medido 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.

Autores afirmam que a compactação por rolagem 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. 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 lajes 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 rolos de aço ou pneumáticos.

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 no intervalo de tempo entre a usinagem e a aplicação em campo, bem como as diferentes formas de compactação em campo. 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, em virtude de dificilmente conseguir que os materiais em pista alcancem as ideais potencialidades das suas propriedades mecânicas.

## 2.2.2 Modos de Carregamento

Nos ensaios para determinação da vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório o modo de carregamento empregado pode 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 e 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.

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 5, utilizando uma forma de carga senoidal.

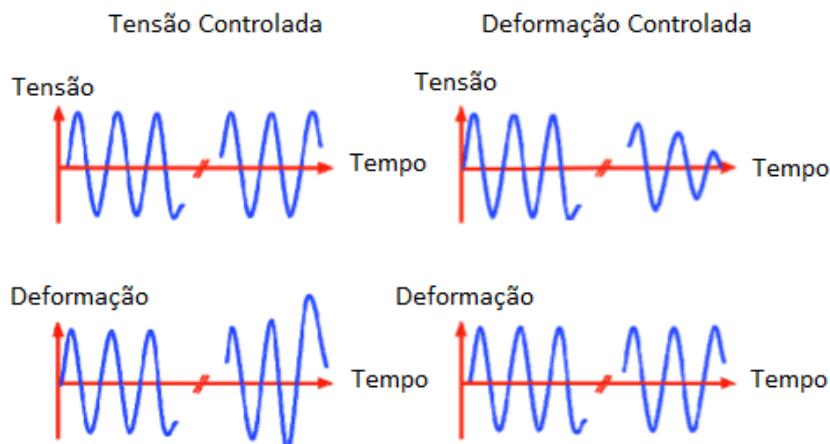


Figura 5: Comparativo do comportamento da tensão controlada e deformação controlada em ensaios de fadiga.

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 de concreto asfáltico. No ensaio em que se estabelece o modo de carregamento à deformação controlada geralmente não ocorre uma ruptura bem definida da amostra ensaiada e, o ponto de ruptura é, muitas vezes, escolhido como uma redução de normalmente 50% da rigidez inicial da amostra ou uma redução de 50% do módulo inicial de vigas de misturas asfálticas.

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 que empregam a tensão controlada, a taxa de propagação das fissuras é mais elevada, conduzido a ensaios com menor prazo de 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. As espessuras que diferem camadas delgadas de espessas variam, mas é comumente empregado que as camadas delgadas apresentem espessuras menores do que 80mm e camadas espessas são denominadas por espessuras de revestimento asfáltico maiores que 80mm. Pesquisadores avaliaram diversas características dos dois modos de carregamento e um breve resumo é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Fatores que afetam os ensaios de tensão controlada e deformação controlada.

Fatores	Tensão Controlada (TC)	Deformação Controlada (DC)
Espessura do revestimento asfáltico	Indicadas para camadas mais espessas e rígidas em relação ao seu suporte	Indicadas para camadas menos espessas e menos rígidas em relação ao seu suporte
Definição de ruptura; Número de ciclos	Bem definida devido ao rompimento da amostra	Arbitrário, o ensaio é interrompido geralmente quando o nível de rigidez é reduzido a 50% da rigidez inicial.
Dispersão dos resultados	Menor dispersão	Maior dispersão
Número de amostras	Menor	Maior
Simulação de influências em longo prazo	Envelhecimento leva a um aumento da rigidez e um aumento da vida de fadiga	Aumentando a rigidez, provoca uma diminuição na vida de fadiga.
Magnitude da vida de fadiga (N)	Menor	Maior
Efeito de variáveis na mistura	Mais sensível	Menos sensível
Taxa de dissipação de energia	Mais rápida	Mais lenta
Taxa de propagação de fissuras	Mais rápida do que ocorre em campo	Mais representativa das condições de campo
Efeitos benéficos de períodos de repouso	Maiores efeitos benéficos	Menores efeitos benéficos

### 2.2.3 Variáveis da mistura asfáltica

O desempenho de misturas asfálticas em relação à fadiga é influenciado por fatores que fazem parte da mesma, como viscosidade, teor de ligante, distribuição granulométrica do agregado, volume de vazios da mistura e temperatura. Na Tabela 3 é apresentado um resumo do efeito destes fatores no comportamento das misturas asfálticas.

Tabela 3: Fatores que influenciam a rigidez e a vida de fadiga das misturas asfálticas.

Fator	Variação do fator	Efeito da variação do fator		
		Rididez	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
Temperatura	Diminuição	Aumento	Aumento	Diminuição

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 tornam a mistura mais flexível, fazendo com que a vida de fadiga obtida em ensaios à tensão controlada melhore em relação às misturas com ligantes convencionais.

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 de densidade e diminuição do volume de vazios. Além disso, a redução deste fator é responsável pelo decréscimo das tensões que atuam na combinação ligante-fíler originando, assim, um acréscimo na vida de fadiga da mistura asfáltica.

As propriedades dos agregados e sua granulometria influenciam a vida de fadiga das misturas asfálticas. Pesquisadores constataram que agregados com maior rugosidade aumentam a 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.

Outro fator relativo na vida de fadiga é a temperatura, em função da grande susceptibilidade térmica que ocorre nas misturas asfálticas, assim, o desempenho a fadiga varia de acordo com a variação da rigidez das misturas em diferentes patamares de temperatura.

#### 2.2.4 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 de carga. Isto implica que a maioria dos carregamentos aplicados não reproduzem fielmente as condições do pavimento, apesar disso, é possível analisar os módulos e as características de fadiga através de diferentes condições de carregamento.

Neste sentido, a forma e duração do pulso de carga utilizado em laboratório e a temperatura de ensaio influenciam significativamente a vida de fadiga de misturas asfálticas. As principais formas de pulso de carga empregadas nos ensaios de fadiga em misturas asfálticas são senoidal, semi-seno-verso e cíclica, sendo suas configurações em relação a tensão e a deformação em função do tempo demonstradas na Figura 6.

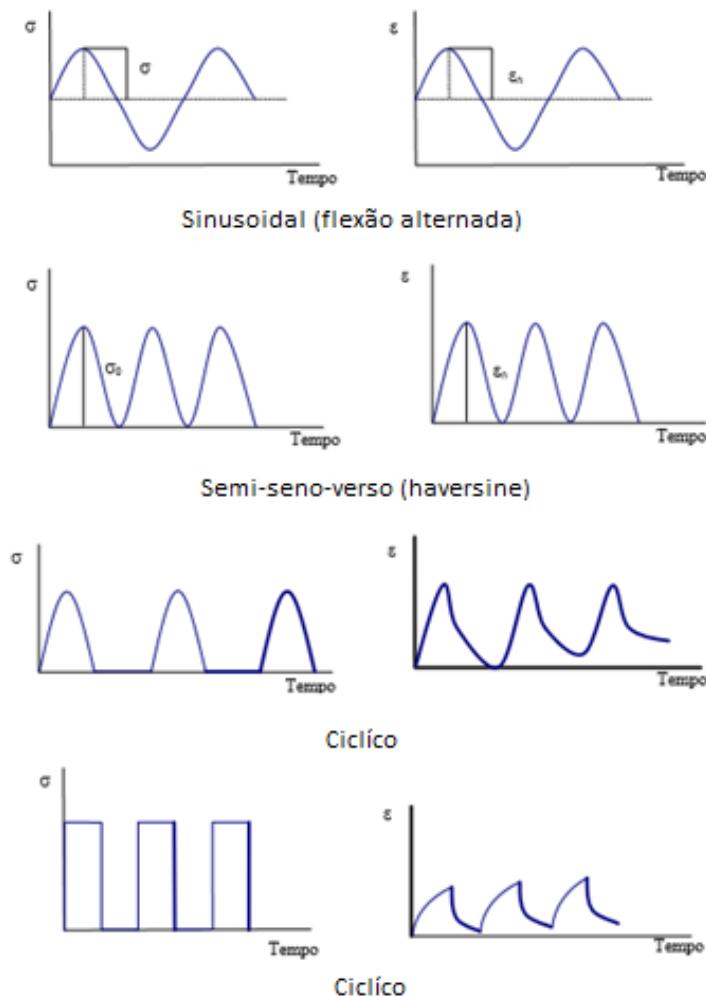


Figura 6: Formas de carregamento empregadas em ensaios de fadiga.

Outra variável fundamental para o desempenho das misturas asfálticas é o envelhecimento. A influência do envelhecimento na determinação da 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. Pesquisadores relatam que os principais fatores de influência no envelhecimento do ligante são a temperatura e a exposição ao ar, levando à oxidação do mesmo e, por conseguinte ao aumento da consistência, causando uma diminuição na vida de fadiga da mistura. Sendo que, para temperaturas elevadas e altas superfícies específicas o envelhecimento torna-se mais rápido, enquanto que nas condições oferecidas em campo que apresentam temperaturas baixas e exposição ao ar elevada, o envelhecimento é mais baixo.

### 2.3 DIFERENTES TIPOS DE ENSAIOS DE FADIGA

Os materiais betuminosos que fazem parte da estrutura dos pavimentos são submetidos, em um curto intervalo de tempo, a carregamentos resultantes dos veículos que trafegam sobre eles. Este carregamento faz com que ocorram microtrincas na base dos revestimentos asfálticos resultado, assim, na perda da rigidez do material e o seu acúmulo acaba gerando o fenômeno de fadiga.

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 pavimento ou até mesmo a sua ruptura, após um número suficiente de repetições de carregamento. A fadiga é considerada um dos principais problemas que pode levar a degradação da estrutura dos pavimentos.

Como mencionado o efeito de fadiga está relacionado com a redução a 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 repetidas originando significativas deformações acumuladas irreversíveis que podem ocultar o efeito relacionado com a fadiga, conforme mostrado na Figura 7.

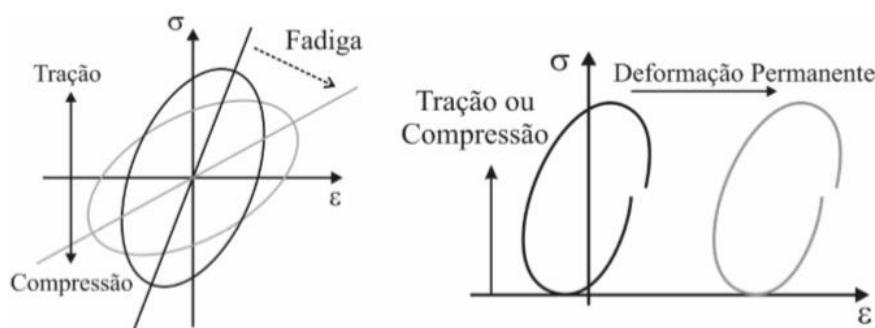


Figura 7: Diferenciação entre o fenômeno de fadiga e deformação permanente.

Neste sentido, ensaios laboratoriais são fundamentais para determinar as leis de fadiga estabelecidas 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 para as misturas asfálticas empregadas nos revestimentos das rodovias.

Diferentes tipos de ensaios podem ser realizados em laboratórios para determinar a vida de fadiga em misturas asfálticas. Na Tabela 4 constam características dos ensaios existentes para obter a fadiga.

Tabela 4: Características dos ensaios à fadiga comumente empregados.

Tipo Teste	Geometria	Tipo Carregamento	Amplitude do Carregamento ( $\epsilon$ em $10^{-6}$ m/m e $\sigma$ em MPa)
T/C		Tensão – Compressão Homogêneo	Deformação: 100 – 180 Tensão: 0,90
2PB		Flexão - dois pontos Não Homogêneo	Deformação: 140 – 220 Tensão: 1,40
3PB		Flexão - três pontos Não Homogêneo	Deformação: 140 – 220 Tensão: 1,40
4PB		Flexão - quatro pontos Não Homogêneo	Deformação: 140 – 220 Tensão: 1,40
IDT		Tração indireta Não Homogêneo	Máxima Deformação no primeiro ciclo: ≈ 25 a 65

Estes testes foram utilizados por diversos pesquisadores em projeto inter-laboratorial para o estudo de fadiga em misturas asfálticas. Nota-se que somente nos ensaios uniaxiais de tração/compressão em corpos-de-prova cilíndricos considera-se um estado de deformação uniforme, ou seja, homogênea. Os ensaios à flexão em prismas, bem como os de tração indireta são considerados não homogêneos, em virtude de que a tensão/deformação no material não é constante.

Os ensaios laboratoriais empregados para estabelecer a 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. A seguir são descritos os três tipos de ensaios comumente utilizados para determinar a vida de fadiga de materiais betuminosos em relação à configuração, tipos e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos de análise.

### 2.3.1 Ensaio de Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral, desenvolvido pelo brasileiro Fernando Luiz Lobo B. Carneiro em 1943 para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, é ainda o mais utilizado no Brasil para determinar a vida de fadiga de misturas asfálticas. Neste ensaio 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 8.

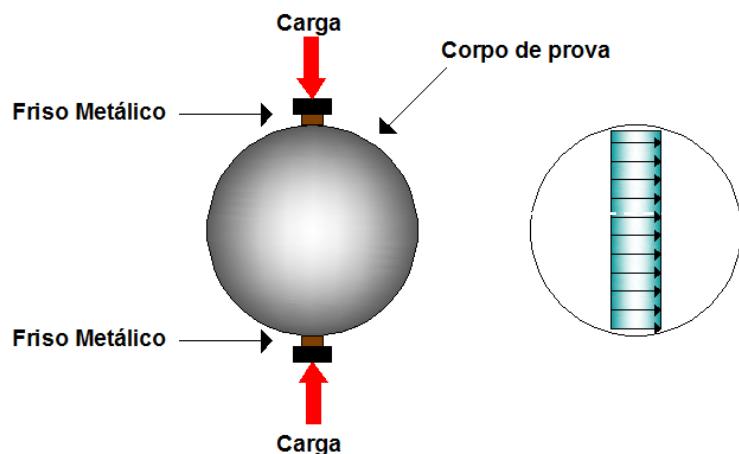


Figura 8: Configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à compressão diametral.

O ensaio de fadiga por compressão diametral é realizado a tensão controlada podendo ser executado no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de módulo de resiliência à temperatura controlada de 25°C. Neste ensaio, a carga aplicada conduz a níveis de tensões normais horizontais de 10% a 50% do valor da resistência à tração, ocasionando o trincamento total e posterior ruptura do corpo-de-prova.

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. A execução do ensaio

é simples, sendo considerado um método capaz de caracterizar os materiais em relação ao módulo de rigidez e o coeficiente de Poisson.

Além do estado biaxial de tensão, 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, enquanto que as tensões inversas são impraticáveis. O resultado previsível destas diferenças é a determinação de uma menor resistência à fadiga nos ensaios de compressão diametral em comparação com os ensaios de flexão.

Diversos autores citam que 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 fato da ruptura que ocorre nos corpos-de-prova não ser bruscamente afetada pelas condições superficiais, e pelo fato de simular o estado de tensão que ocorre na parte inferior da camada asfáltica de um pavimento, sendo uma zona de tração.

Também, autores relatam algumas das desvantagens apresentadas neste ensaio como o surgimento de deformação permanente junto aos frisos de carregamento que é indesejável para a avaliação do potencial de fissuração das misturas asfálticas, os ensaios só devem ser realizados sob tensão controlada e, além disso, a distribuição de deformações no centro do corpo-de-prova é razoavelmente não-linear. Entretanto, estes autores afirmam que os erros que surgem na medição de deslocamentos podem ser corrigidos através do correto posicionamento dos sensores. Além disso, o fato da deformação-controlada versus tensão-controlada pode vir a ser sanada caso um modelo real do material possa vir ser desenvolvido e, a terceira desvantagem descrita pode ser superada por meio do uso de soluções teóricas adequadas.

### 2.3.2 Ensaio de Flexão em Corpos-de-prova Trapezoidais

O ensaio de fadiga à flexão em corpos-de-prova trapezoidais foi desenvolvido na França e normatizado pela norma NF P 98-261-1 em 1993, posteriormente preconizado pela norma europeia EN 12697:04. Neste ensaio, as extremidades maior e menor da amostra são engastadas, mantendo-se estática a extremidade maior durante todo o ensaio, e na extremidade menor é aplicada a carga por meio de um sistema eletromagnético com capacidade de gerar uma deformação elástica constante, conforme Figura 9.



Figura 9: Configuração do ensaio de fadiga à flexão em amostras trapezoidais desenvolvido pelo Laboratório Central de Pavimentos e Rodovias - LCPC em Nantes/França.

O ensaio é realizado a temperatura controlada e com uma frequência de 25Hz, sendo o carregamento empregado sob o modo de deformação controlada ou tensão controlada. O critério de ruptura convencional é determinado no momento em que a força inicial é reduzida para a metade, sendo a vida de fadiga das misturas asfálticas definida como o número de aplicações de carga referentes ao final do ensaio. A curva de fadiga é obtida a partir da execução do ensaio em três níveis de deformação, com seis corpos-de-prova por nível. A deformação admissível que caracteriza o comportamento das misturas corresponde a um milhão de ciclos.

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 especifica 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.

### 2.3.3 Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos

O ensaio de flexão em viga quatro pontos é comumente empregado nos Estados Unidos, sendo normatizado pelas normas norte-americanas AASHTO T-321 e ASTM D7460 e, também, pela norma europeia EN 12697:24. Conforme pode ser visto na Figura 10, o ensaio 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. Sendo considerado, assim, um

ensaio adequado para representar o comportamento de campo em relação à resistência a fadiga das misturas asfálticas.



Figura 10: Configuração e distribuição de tensões no ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos.

A frequência de ensaio geralmente empregada é 10 Hz 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 tensão controlada usualmente consta-se o número de solicitações até a ruptura total da amostra, enquanto que no modo de deformação controlada comumente o critério de ruptura empregado é a redução em 50% da rigidez inicial da amostra. 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.

As principais vantagens descritas para os ensaios de flexão são: os ensaios são conhecidos por diferentes países, sendo seu emprego generalizado e facilmente compreendido; estabelecendo um adequado fator de correlação entre resultados obtidos em laboratório com o comportamento em campo, os resultados dos ensaios de fadiga podem ser usados diretamente no dimensionamento estrutural de pavimentos; 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 a deformação controlada devem ser usados em pavimentos que apresentam uma espessura betuminosa delgada; em especial no ensaio de flexão a quatro pontos, a ruptura da viga tende a ocorrerem 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 as vantagens dos ensaios de flexão para determinar a fadiga de misturas asfálticas algumas limitações são encontradas 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, *shift factor*.

## 2.4 ENERGIA DISSIPADA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A energia é dissipada em misturas asfálticas durante o carregamento e a relaxação devido ao comportamento viscoelástico 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 viscoelástico, quando descarregado, traça um caminho diferente do seu carregamento, sendo este fenômeno comumente conhecido como histerese onde a energia dissipada é equivalente à área dentro do laço histerético. Este fenômeno pode ser observado através da Figura 11.

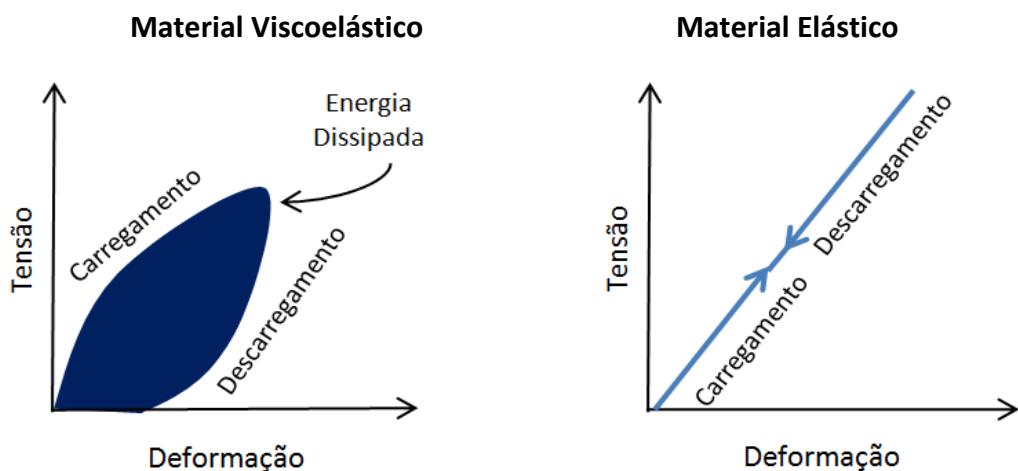


Figura 11: Comportamento elástico e viscoelástico dos materiais na relação tensão-deformação.

Um dos principais aspectos de um material viscoelástico é sua propriedade de acumular e dissipar energia sob a ação de um carregamento. Quando um material viscoelástico é submetido a ciclos de carregamentos a resposta da deformação à tensão aplicada é defasada, sendo essa defasagem denominada de ângulo de fase ( $\phi$ ). A determinação do ângulo de fase através da relação tensão-deformação está demonstrada na Figura 12.

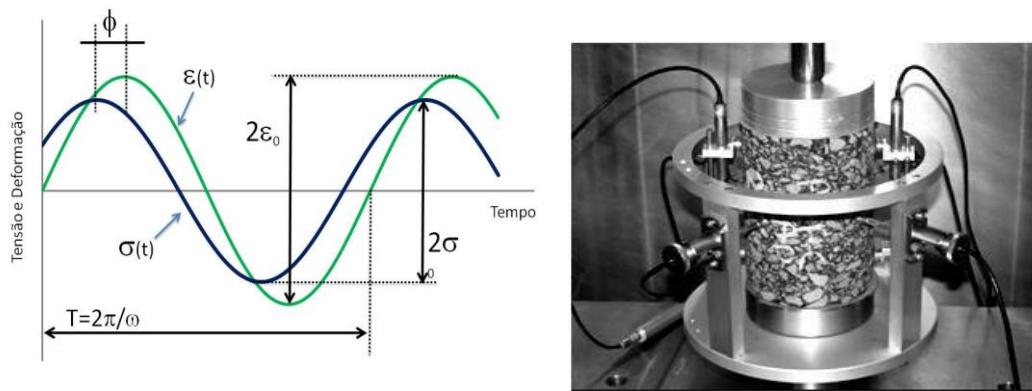


Figura 12: Esquema de um ensaio com carregamento harmônico em um material viscoelástico.

Na Figura 13 é demostrada a obtenção da energia dissipada em um ciclo completo de carregamento, tendo a resposta da deformação à tensão aplicada defasada de um ângulo de fase. Relacionando a tensão solicitante com a resposta de deformação defasada obtém a figura 13 (b), a qual representa a histerese formada pela aplicação de um carregamento cíclico em um material viscoelástico.

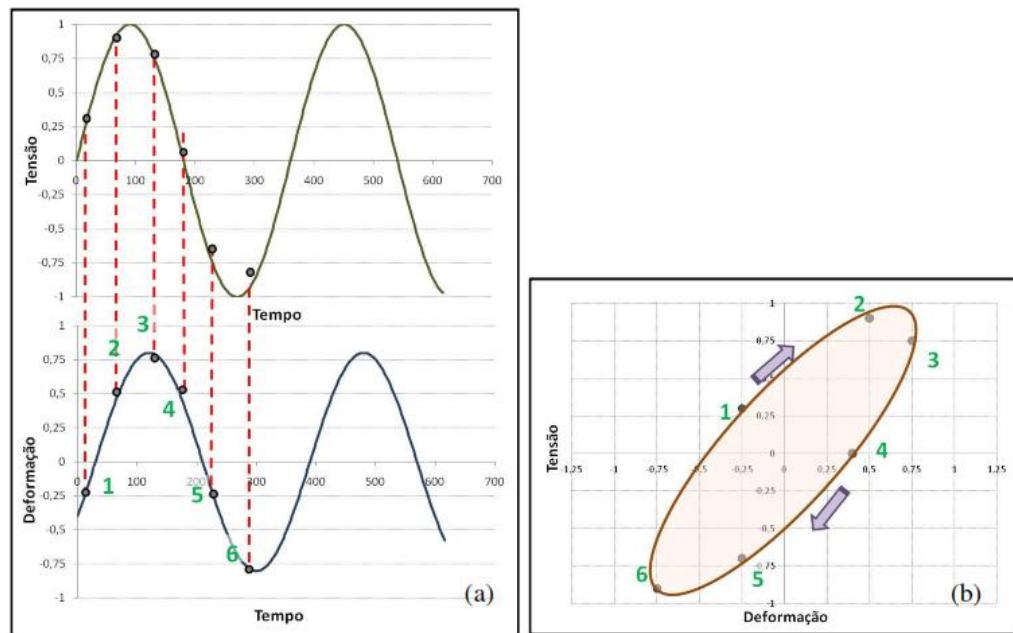


Figura 13: (a) Esquema da solicitação e resposta de um carregamento harmônico em um material viscoelástico; (b) Histerese formada pela defasagem da resposta à solicitação aplicada.

Pesquisadores concluíram que parte dessa energia é dissipada na forma de calor e parte é dissipada pelo aumento de dano no interior do material. A energia dissipada na forma de

calor reduz a rigidez da mistura durante o ensaio de fadiga, mas não deve ser interpretada como fadiga.

#### 2.4.1 Determinação da energia dissipada

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 2, sendo função da tensão e da deformação inicial.

$$W_{ciclo} = \int_0^T \sigma(t) \cdot d\varepsilon(t) \quad \longrightarrow \quad W_{ciclo} = \pi \cdot \varepsilon_o \cdot \sigma_o \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

Onde:

$W_{ciclo}$  = energia dissipada durante um ciclo

T = período de um ciclo

$\varepsilon_o$  = amplitude de deformação

$\sigma_o$  = amplitude de tensão

$\phi$  = ângulo de fase

Conforme demonstrado na Figura 14, em ensaios de fadiga a deformação controlada ( $\varepsilon$ ), a tensão aplicada reduz com o tempo, reduzindo assim a energia dissipada durante os ensaios. Já para ensaios a tensão controlada ( $\sigma$ ), a deformação cresce com o tempo, aumentando a energia dissipada com o número de ciclos.

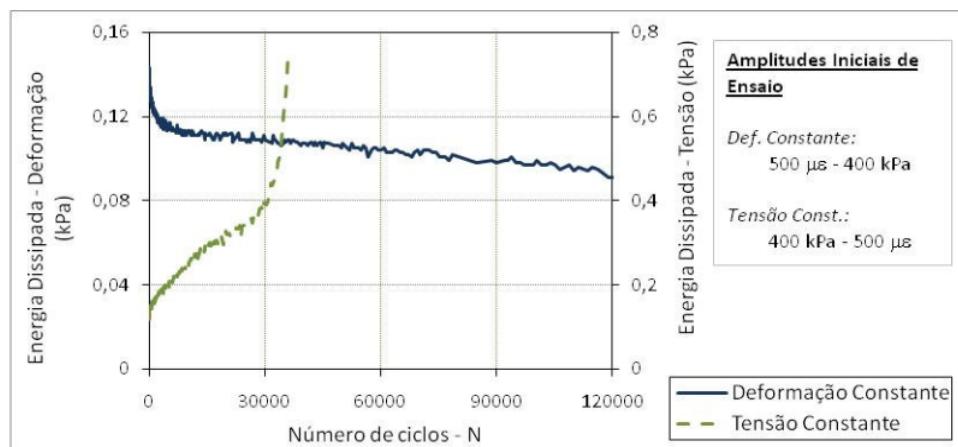


Figura 14: Energia dissipada durante ensaios à deformação e tensão controlada em 37°C e a 10 Hz (Mello, 2008).

Outra forma de avaliar o comportamento da energia dissipada em ensaios de fadiga é através da variação das temperaturas, para as quais as misturas asfálticas possuem diferente rigidez à flexão e diferente ângulo de fase, assim, o formato da histerese é único para cada situação de ensaio. Através da Figura 15, é possível verificar que sob condições menos rígidas, a área interna da histerese é bem reduzida em comparação com os resultados sob condições mais rígidas ficando evidente, assim, que quanto menos viscoso o material, menor sua energia dissipada durante um ciclo. Os ângulos de fase encontrados foram de 19°, 30° e 43° para as temperaturas de 4°C, 21°C e 37°C, respectivamente.

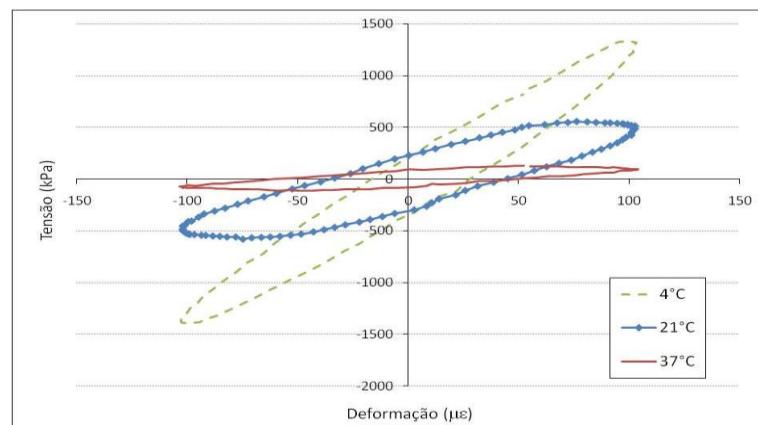


Figura 15: Histerese formada para uma mistura em diferentes temperaturas e sob mesma amplitude de deformação com  $N = 50$  e 10 Hz (Mello, 2008).

Durante a aplicação do carregamento no ensaio de fadiga, o material vai acumulando dano e, assim, acaba ocorrendo uma redução na sua rigidez inicial, conforme demonstrado na Figura 16. Dessa forma, ocorre uma redução no tamanho da histerese produzida e em conjunto acontece uma redução da inclinação da histerese com o número de ciclos.

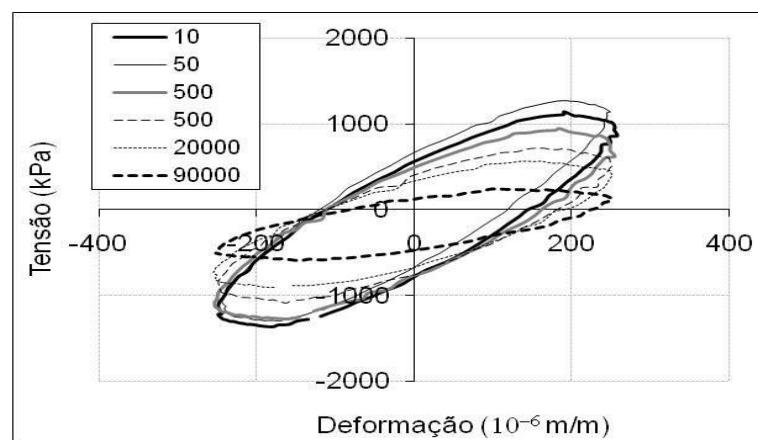


Figura 16: Histerese formada ao longo das solicitações no ensaio de fadiga a 21°C e 10 Hz (Mello, 2008).

#### 2.4.2 Modelos de fadiga baseados em energia dissipada

Vários pesquisadores utilizaram o critério da energia dissipada, para prever o comportamento à fadiga das misturas asfálticas. Sugere-se 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 à ruptura e a energia dissipada acumulada. Sendo que esta relação não depende do tipo de ensaio, da temperatura, do modo de carregamento e da frequência de carregamento, para valores entre 10 e 50 Hz. A relação entre a vida de fadiga e a energia dissipada acumulada foi determinada pela equação 3.

$$W = A(N)^z \quad (3)$$

Onde:

$N$  = vida de fadiga

$W$  = energia dissipada acumulada

$A, z$  = coeficientes determinados experimentalmente

A energia dissipada acumulada até a ruptura foi definida pelo somatório da energia dissipada por cada ciclo, equação 4.

$$W = \sum_{i=0}^N \pi \cdot \sigma_i \cdot \varepsilon_i \cdot \sin \varphi_i \quad (4)$$

Onde:

$\varepsilon_i$  = amplitude de deformação no ciclo  $i$

$\sigma_i$  = amplitude de tensão no ciclo  $i$

$\varphi_i$  = ângulo de fase no ciclo  $i$

Uma taxa de energia dissipada ( $\psi$ ), mostrada na equação 5, a qual depende do modo de carregamento e da rigidez da mistura, também, foi desenvolvida por pesquisadores. Esta dependência fica evidente na Figura 17.

$$\psi = \frac{W_{inicial}}{W} \quad \longrightarrow \quad W_{inicial} = \pi \cdot N \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \sin \varphi_o \quad (5)$$

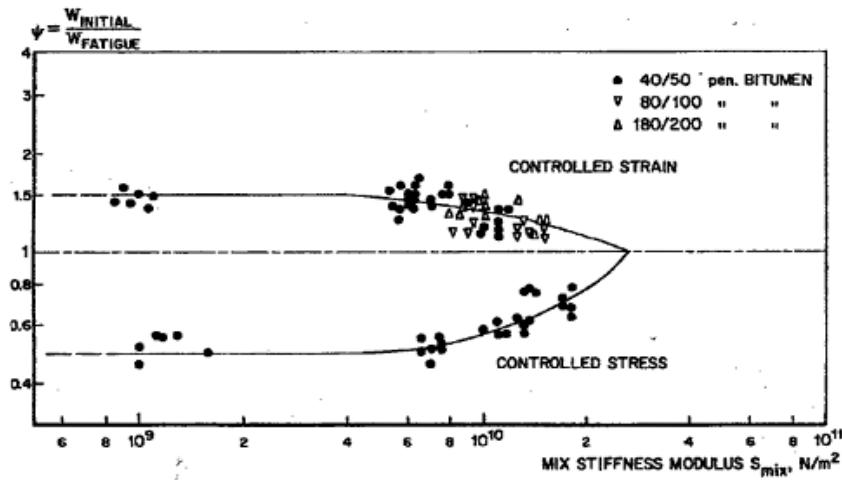


Figura 17: Razão de energia dissipada x módulo de rigidez da mistura.

Outro modelo de vida de fadiga foi desenvolvido baseado na energia dissipada inicial que ocorre durante os ensaios de fadiga a flexão. A equação 6 obtida relaciona o número de ciclos até a ruptura com a percentagem de vazios preenchidos com ligante e a energia dissipada inicial. Sendo que, geralmente é considerado o ciclo de número 50 para determinar a energia dissipada no início do ensaio.

$$N_f = 2,365 \cdot \exp^{0,069VFA} \cdot (w_o)^{-1,882} \quad R^2 = 0,76 \quad (6)$$

Onde:

$w_o$  = energia dissipada inicial

VFA = vazios preenchidos com ligante

Também, foi apresentada por pesquisadores uma metodologia para determinar um modelo de previsão de vida de fadiga baseada na relação da diferença da energia dissipada entre os ciclos “i” e “i+1” pela energia dissipada no ciclo “i”, sendo esta relação representada pela equação 7.

$$\frac{\Delta DE}{DE} = \frac{W_i - W_{i+1}}{W_i} \quad (7)$$

Esta relação representa a percentagem da energia dissipada que causa dano ao material, sob certa deformação ou tensão imposta em um ensaio de fadiga. A vida de fadiga pode

ser determinada a partir da mudança repentina da curva formada através da relação entre energia dissipada e o número de ciclos de carregamento como mostra a Figura 18.

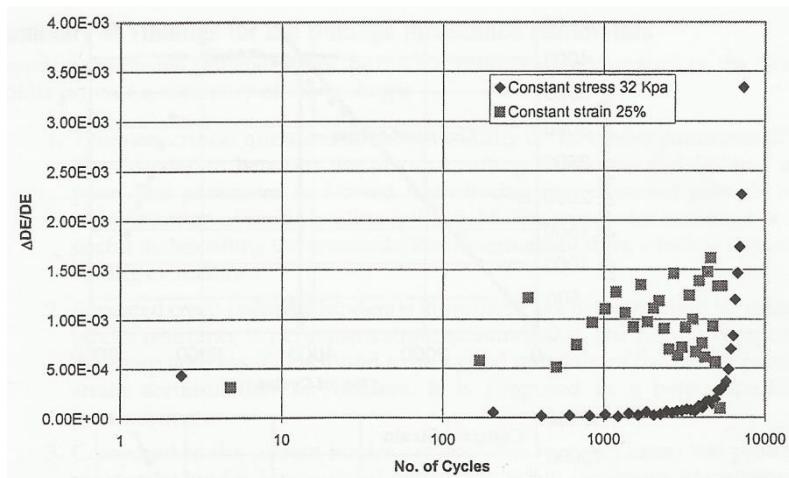


Figura 18: Aplicação do conceito da relação de mudança de energia dissipada para resultados de testes em misturas asfálticas a tensão e deformação controlada.

A partir dos dados apresentados na Figura 18, nota-se que os resultados obtidos no ensaio a deformação controlada são bastante dispersos, sendo quase impossível determinar com clareza o valor de vida de fadiga. Já no ensaio a tensão controlada os resultados apresentam-se bastante concisos. Assim, esta abordagem de relação de energia dissipada é útil para ensaios à tensão controlada, mas não é aconselhável utilizá-la em ensaios a deformação controlada.

Pesquisadores ao relacionarem esta razão ( $\Delta DE/DE$ ) com o número de ciclos observaram que havia um período em que os valores permaneciam constantes com o número de aplicação de ciclos e, denominaram esta região como o Valor do Platô (Plateau Value - PV), conforme demonstrado na Figura 19.

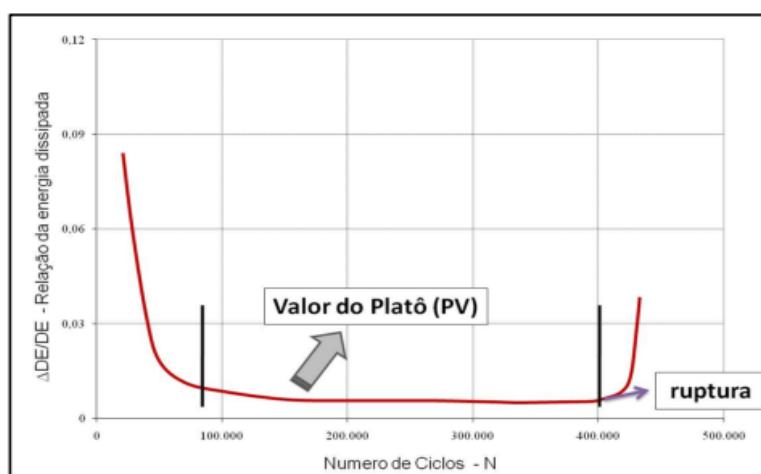


Figura 19: Representação do valor de Platô.

Em função dos estudos realizados acredita-se que o valor de Platô é uma propriedade do material e que está diretamente relacionada com o número de ciclos até a ruptura. O modelo de vida de fadiga desenvolvido considerando o valor de Platô (PV) é demonstrado pela equação 8.

$$N_f = k_1 \cdot (PV)^{-k_2} \quad (8)$$

Onde:

PV= valor de Platô

K<sub>1</sub> e K<sub>2</sub>= coeficientes determinados experimentalmente

Todos os modelos apresentados neste trabalho são determinados em função de um critério de ruptura. Porém, ainda não há um consenso entre os pesquisados na definição de um único critério que seja capaz de caracterizar a ruptura em ensaios de fadiga em misturas asfálticas realizados em laboratório.

#### 2.4.3 Método para obter a vida de fadiga, considerando energia dissipada, desenvolvido por Rowe (1996)

Rowe<sup>1</sup> (1996) considerou a relação entre a energia dissipada durante o primeiro ciclo de carga e a energia dissipada no ciclo de carregamento “i”, equação 9, para determinar o número de ciclos (N1), considerando que neste ponto inicia o trincamento.

$$Taxa.de.energia.dissipada = \frac{n \cdot W_o}{W_i} \quad (9)$$

Onde:

n= número de ciclos

W<sub>o</sub> = energia dissipada no ciclo de carregamento inicial

W<sub>i</sub>= energia dissipada no ciclo de carregamento i

Nos ensaios de fadiga a deformação controlada a definição de N1 pode ser obtida pela equação 10, a qual é determinada pela razão do número de ciclos com o módulo complexo.

---

<sup>1</sup> ROWE, G. M. (1996). *Application of the Dissipated Energy Concept to Fatigue Cracking in Asphalt Pavements*. PhD Thesis. University of Nottingham. Nottingham. UK.

$$R_{\varepsilon} = \frac{n}{E_i^*} \quad (10)$$

Onde:

$E_i^*$  = módulo complexo para um ciclo i

O valor de N1, para o ensaio de fadiga a deformação controlada, é definido como o ponto em que a inclinação da relação de energia dissipada x número de ciclos de carregamento desvia de uma linha reta, como demonstrado na Figura 20.

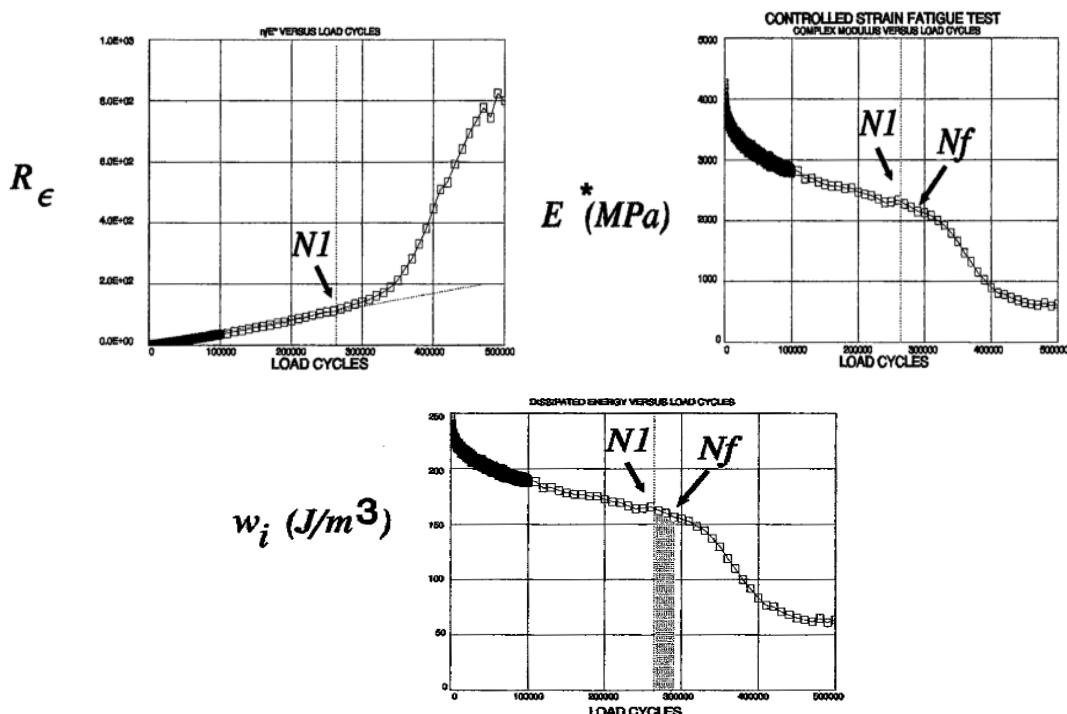


Figura 20: Razão de energia, módulo complexo e energia dissipada em função do ciclo de carregamento em ensaio de fadiga trapezoidal com deformação controlada.

Nos ensaios de fadiga a tensão controlada a definição de N1 é obtida da equação 11.

$$R_{\sigma} = n \cdot E_i^* \quad (11)$$

O valor de N1 é determinado pelo pico da relação de energia dissipada com número de ciclos de carregamento, Figura 21.

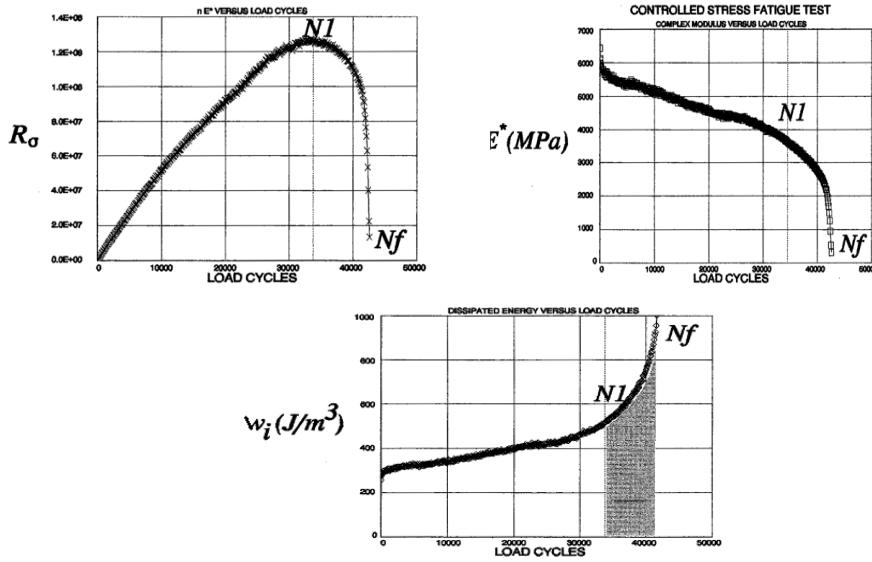


Figura 21: Razão de energia, módulo complexo e energia dissipada em função do ciclo de carregamento em ensaio de fadiga trapezoidal com tensão controlada.

Considera-se geralmente que o ponto N1 ocorre entre uma redução de 40% a 50% do módulo de rigidez inicial, o qual é definido como o ponto de ruptura do ensaio. Este tipo de critério dependente principalmente do tipo de carregamento e da rigidez inicial da mistura, uma vez que a vida de fadiga para o ensaio a deformação e a tensão controlada apresentam comportamento diferente. Rowe (1996) considera o ponto N1 o critério mais adequado para falha, pois a energia adquirida para o critério de Nf (ponto final de falha) poderá conter certa quantidade de erros.

Rowe (1996) desenvolveu um modelo para obtenção de N1 baseado no módulo complexo, volume de ligante ( $V_b$ ), ângulo de fase ( $\delta$ ), energia dissipada inicial ( $W_o$ ), tensão, deformação e razão de trabalho ( $\psi_{N1}$ ) obtidos nos ensaios de fadiga. Através da Figura 22 é possível observar a sequência de cálculo para obter N1.

**Dados de entrada:**  
 $E^*$ ;  $V_b$ ;  $\sin \delta$   
 Energia dissipada inicial  
 Tensão e deformação

$$a = 10^{\left[ \frac{\log \delta_o - 0,224 \log E_o^*}{1 - 0,222 \log E_o^*} \right]}$$

$$A = \left[ \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{60}}{\varepsilon_0} \right] \cdot 100 \quad B = \left[ \frac{\sigma_0 - \sigma_{60}}{\sigma_0} \right] \cdot 100 \quad \Gamma = \left[ \frac{100 - A - B}{100} \right]$$

$$E_{60}^* = 0,6 \cdot E_o^* \cdot \sin \left[ a \cdot (0,6 \cdot E_o^*)^{(0,224 - 0,222 \cdot \log a)} \right]$$

$$\psi_{N1} = \left\{ \frac{2 \cdot \sin \delta_o}{\sin \delta_o \cdot \Gamma \cdot \sin \left[ a \cdot (E_{60}^*)^{(0,224 - 0,222 \cdot \log a)} \right]} \right\}$$

$$N_1 = 205 \cdot V_b^{6,44} \cdot W_o^{-2,01} \cdot \psi_{N1}^{1,64}$$

Figura 22: Sequência de cálculo para obter N1.

### 3 AVALIAÇÃO FUNCIONAL DO EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE FADIGA EM VIGA QUATRO PONTOS

O ensaio de fadiga em quatro pontos deve ser realizado em um equipamento capaz de atender a todos os requisitos recomendados nas normas vigentes que preconizam este tipo de ensaio. O Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS - através da colaboração da Petrobrás (Rede de Asfalto) adquiriu uma prensa IPC Global, modelo CS 7800, para realizar o ensaio de flexão em vigas quatro pontos. Discute-se a seguir as principais características deste equipamento que será empregado para realização dos ensaios de fadiga desta pesquisa.

#### 3.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICA DA PRENSA IPC GLOBAL

O equipamento da IPC Global para o ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos compreende um suporte com motor, controlando os fixadores verticais e, comum atuador, para a aplicação da carga, digital pneumático servo-controlado embutido na base. Este suporte pode ser observado na Figura 23.



Figura 23: 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 355,5mm. A amostra é presa verticalmente por fixadores

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

O equipamento empregado nesta pesquisa para o ensaio de fadiga em viga quatro pontos apresenta as seguintes características principais:

- Capacidade de carga estática de até 5kN;
- Frequência de carregamento senoidal de 0,01 a 70 Hz;
- Modos de carregamento tanto em tensão controlada quanto deformação controlada;
- Fornecimento de ar: ar limpo e seco à 800-900 kPa;
- Tamanho da amostra a ser ensaiada: no mínimo 380mm de comprimento, máximo 70mm de altura e máximo 85mm de largura;
- Célula de carga: Capacidade de  $\pm 4,5\text{kN}$  tensão/compressão, resolução de 0,14N e precisão de  $\pm 1\text{N}$ . 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;
- 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. O resultado deste LVDT pode ser não linear e, por isso, não é recomendado para a medição dos deslocamentos;
- Transdutores de deslocamento na amostra: LVDT com curso de 1mm  $\pm 0,5$  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.

O suporte onde a viga é ensaiada à fadiga deve permanecer dentro de uma câmara climática capaz de atingir temperaturas entre 0°C e 60°C, além de apresentar espaço suficiente para os corpos-de-prova que devem ser aclimatizados antes do ensaio. A Figura 24 mostra a câmara climática utilizada pelo LAPAV.



Figura 24: Câmara climática utilizada para realização do ensaio de flexão em viga quatro pontos.

### 3.2 SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS DA PRENSA IPC GLOBAL

A IPC Global utiliza um sistema de controle multi-eixos integrado – 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 25.

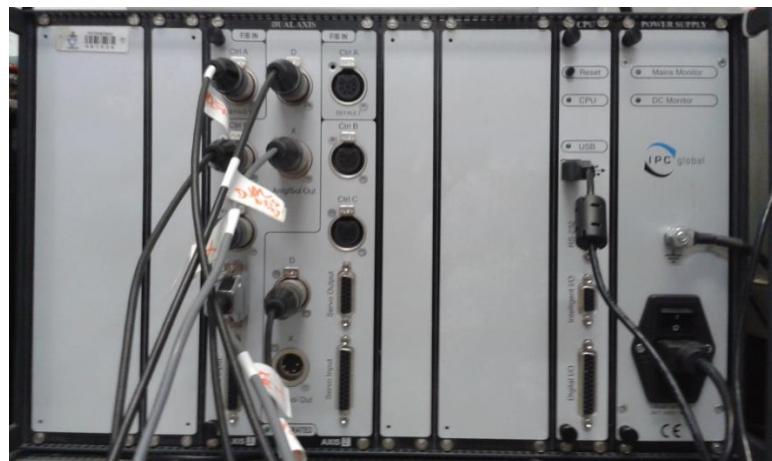


Figura 25: Gabinete do sistema de controle multi-eixos integrado (IMACS) pneumático.

O software fornecido pela IPC Global para a realização do ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos é nomeado de UTS015. O ambiente do software refere-se a parâmetros locais que são selecionados pelo operador em função das preferências e opções escolhidas para um determinado ensaio, enquanto o software aplicativo está sendo executado. Estes valores de parâmetros e opções são armazenados em um arquivo toda vez que o aplicativo é encerrado, sendo restaurados sempre que a aplicação é novamente solicitada. A tela do software é apresentada na Figura 26.

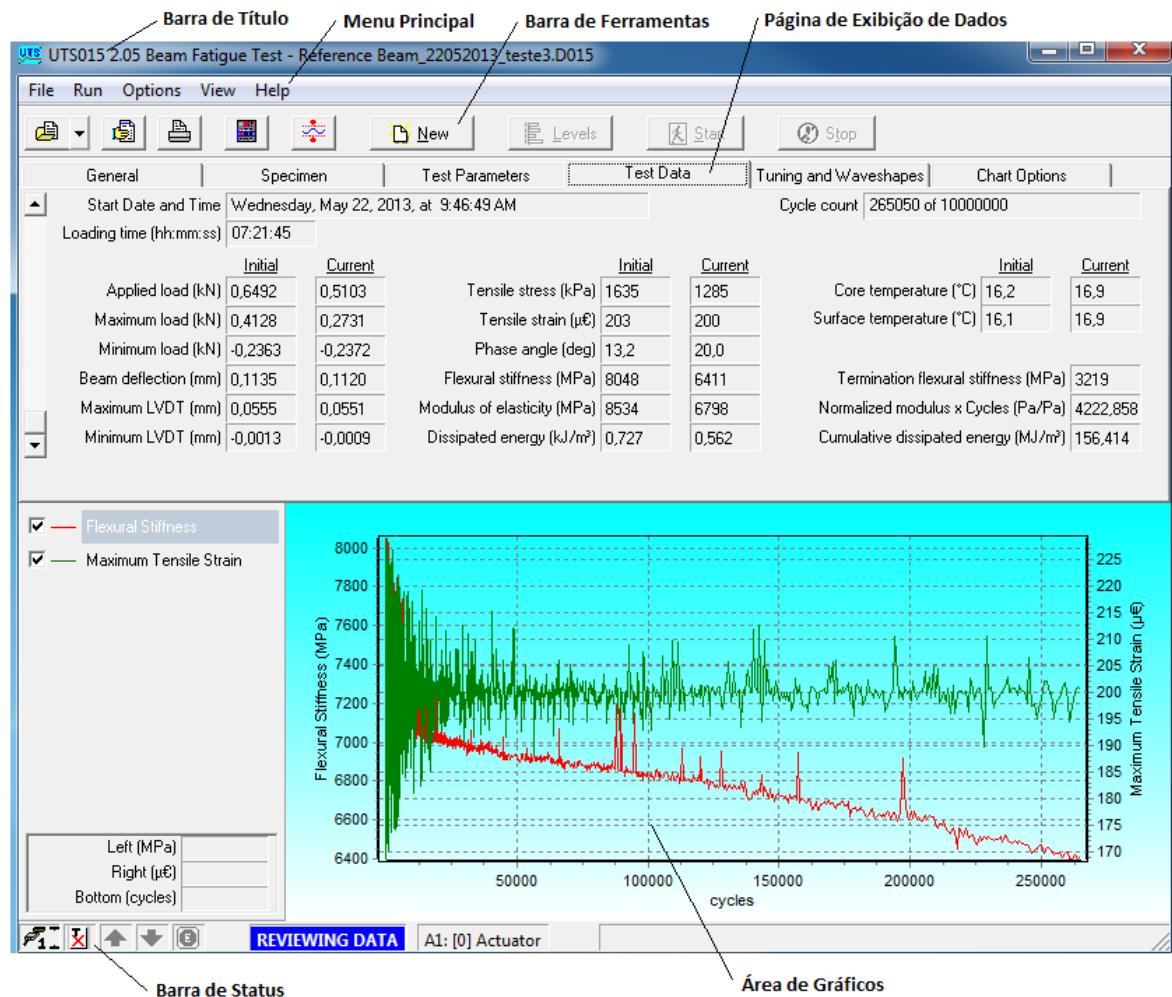


Figura 26: Tela do software UTS015.

A barra de título contempla o número do ensaio, o número da versão do software, o nome do ensaio e, se um arquivo de dados de ensaio existente é carregado, o nome do arquivo dele, também, aparece. O menu principal dá acesso as pastas de arquivo, executar, opções, exibir e ajuda. A seção da barra de ferramentas fornece acesso rápido aos itens de menu usados usualmente e inclui botões para abrir arquivos, visualizar e imprimir relatórios, ativar o *virtual pendant*, visualizar e editar os limites do sistema de controle e aquisição de dados (CDAS), iniciar um novo ensaio, visualizar o nível de exibição dos transdutores e parar o ensaio.

O *virtual pendant* permite que o operador movimente o atuador através de cada eixo de controle de deslocamento. O botão *axis* e o visor podem ser utilizados para selecionar o eixo de controle requerido. 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 *virtual pendant* ficam desabilitados e não são reativados até a conclusão de todos os ensaios, na Figura 27 é possível visualizar este sistema.

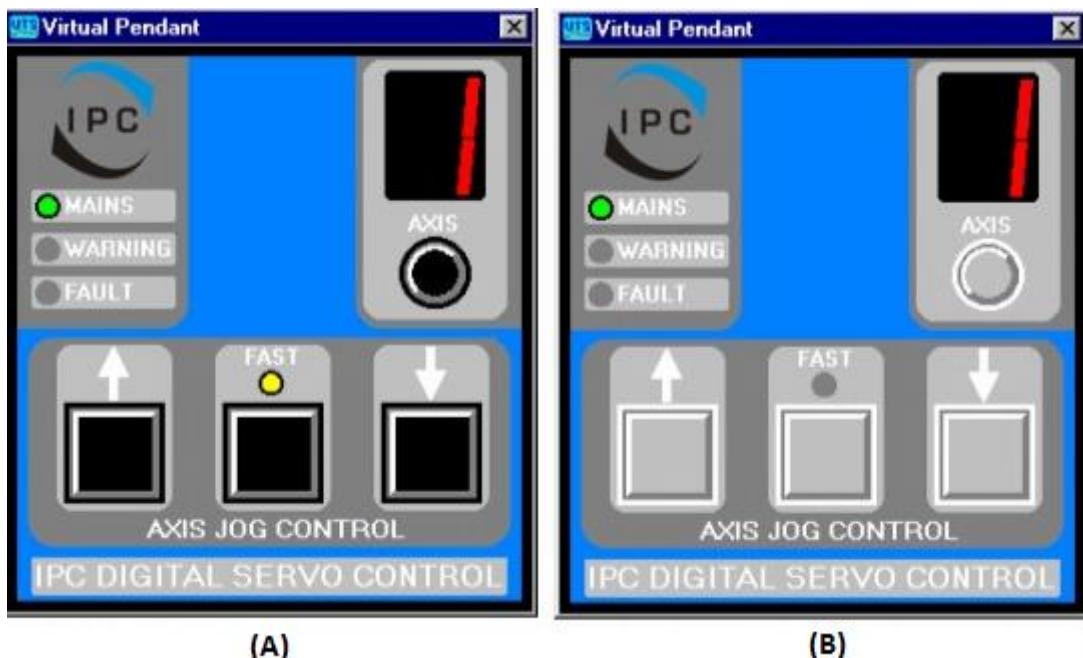


Figura 27: Interface do *virtual pendant* onde: A= *Virtual pendant* ativo e B= Funções do *virtual pendant* desabilitadas durante o ensaio.

Os níveis de sinais em tempo real de cada transdutor usado pelo sistema podem ser exibidos em uma janela separada, como mostrado na Figura 28. Cada transdutor está representado por uma barra de cor 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 apresenta-se uma caixa de exposição com um visor digital mostrando a variação do valor do sinal do transdutor e suas respectivas unidades.

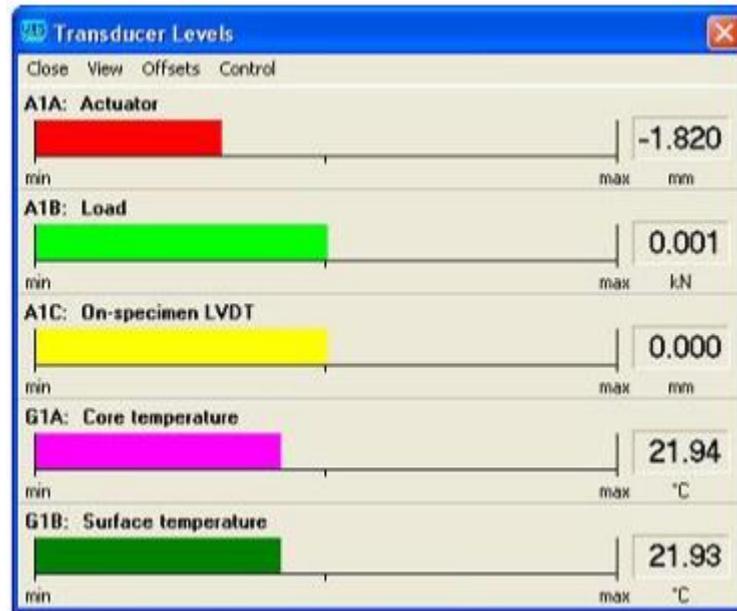


Figura 28: Interface do visualizador dos níveis de sinais dos transdutores.

A área de gráficos permite que o operador visualize o comportamento da rigidez à flexão 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 em andamento.

As páginas de exibição de dados consistem em seis painéis de dados com guias sobrepostas umas sobre as outras, 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. Em cada guia destas contém as características e opções do ensaio que devem ser preenchidas.

A página de exibição dos dados gerais, Figura 29, permite que o operador selecione o método de ensaio para fadiga a quatro pontos que lhe convém 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.

The figure is a screenshot of the 'General' tab of a software interface. The tab is part of a larger window with tabs for General, Specimen, Test Parameters, Test Data, Tuning and Waveshapes, and Chart Options. The General tab contains the following information:

- Test method: AASHTO Designation: T 321-03 Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending
- Project: Teste 21052013
- Comments: (empty text area)
- Operator: Graci
- Template file: (empty text field)
- Data file: F:\Mestrado\IPC\Graci\Reference Beam\_22052013\_teste3.D015

Figura 29: Página de exibição dos dados gerais.

A página que contém os campos para preenchimento dos dados de entrada para a identificação da amostra é mostrada na Figura 30. Além disso, pode ser inserido o tempo de condicionamento para preparar a amostra, suas propriedades específicas e comentários como, por exemplo, a massa seca ou uma observação sobre a origem da amostra a ser ensaiada. 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 mesma.

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 (mm<sup>2</sup>) 2930,1  
Volume (cc) 141,1

Figura 30: Página de exibição dos dados da amostra.

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 sinusoidal, 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, geralmente o ciclo 50, para obter a rigidez de flexão inicial 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 31.

Figura 31: Página de exibição dos parâmetros do ensaio.

Os dados do ciclo inicial e do ciclo em andamento podem ser visualizados no decorrer do ensaio, como consta na Figura 32. Estes dados contemplam as leituras máximas e mínimas 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, módulo de elasticidade, 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		Wednesday, May 22, 2013, at 9:46:49 AM									
Loading time (hh:mm:ss)		07:21:45						Cycle count		265050 of 10000000	
Applied load (kN)	Initial	Current	Tensile stress (kPa)	Initial	Current	Core temperature (°C)	Initial	Current	Surface temperature (°C)	Initial	Current
0.6492	0.5103		1635	1285		16,2	16,9		16,1	16,9	
Maximum load (kN)	0.4128	0.2731	Tensile strain (με)	203	200						
Minimum load (kN)	-0.2363	-0.2372	Phase angle (deg)	13,2	20,0						
Beam deflection (mm)	0,1135	0,1120	Flexural stiffness (MPa)	8048	6411						
Maximum LVDT (mm)	0,0555	0,0551	Modulus of elasticity (MPa)	8534	6798						
Minimum LVDT (mm)	-0,0013	-0,0009	Dissipated energy (kJ/m²)	0,727	0,562						

Figura 32: Página de exibição dos dados do ensaio.

A página de exibição de ajustes e forma de onda, Figura 33, contém informações e gráficos de um ciclo de ensaio. Durante um ensaio a caixa de seleção de 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 como próximo ciclo de ensaio, seguido pelo armazenamento dos dados.

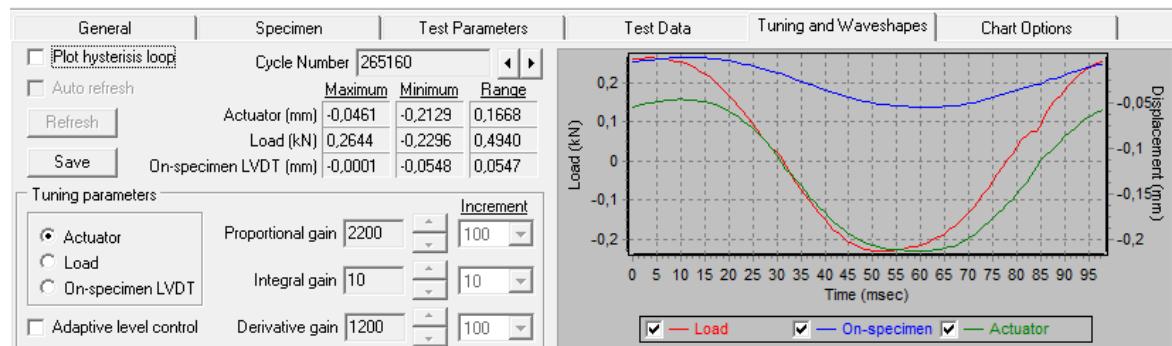


Figura 33: Página de ajuste dos parâmetros e formas de onda.

A página de exibição das opções dos gráficos permite que o operador escolha o formato ideal dos gráficos que poderão ser gerados. Na Figura 34 é possível ver as diferentes opções apresentadas pelo software para gerar gráficos que contemplam os diferentes resultados obtidos durante o período de ensaio de fadiga à flexão em viga quatro pontos.

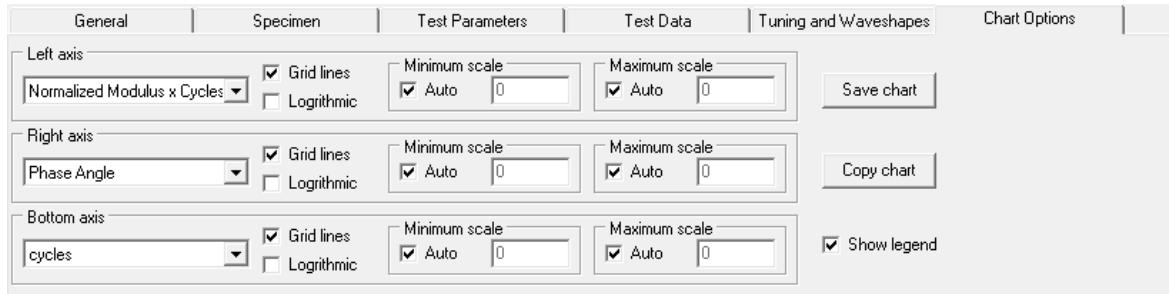


Figura 34: Página de escolha das opções de gráficos.

Vários parâmetros são calculados a partir dos dados adquiridos no ensaio, 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 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; 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 sensores de temperatura, conforme Figura 35.



Figura 35: Corpo de prova modelo para a realização das leituras de temperatura interna e de superfície durante a execução do ensaio.

## 4 SISTEMAS DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O ensaio de fadiga em quatro pontos é realizado em corpos de prova de formato prismáticos. As normas que preconizam este ensaio não especificam uma metodologia de compactação e moldagem destas amostras, por isso diferentes métodos são empregados por pesquisadores buscando adaptá-los para condições que melhor representam a realidade de campo. Apresenta-se a seguir diferentes sistemas de compactação e moldagem de corpos de prova prismáticos, utilizados em diferentes países, com o intuito de adequar uma metodologia de compactação e moldagem para esta pesquisa. Também é relatado sobre a usinagem e montagem do sistema de compactação e moldagem empregados neste trabalho.

### 4.1 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DE VIGAS UTILIZADAS NA UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA EM BERKELEY

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 vida de fadiga de misturas asfálticas. O sistema de moldes para confecção das vigas prismáticas em laboratório empregado nesta universidade é composto por um conjunto de chapas metálicas, formando três gabaritos que se diferem pelo tamanho total das placas. Através da Figura 36 é possível observar a configuração deste sistema de moldes, salientando-se que ele deve apresentar uma resistência capaz de suportar um rolo compactador.



Figura 36: Sistema de moldes empregados pela Universidade da Califórnia para confecção de vigas 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 37 mostra em detalhe o gabinete dividido por dois vãos, onde é possível moldar duas placas de menor tamanho e peso em comparação com o gabinete de formato único mostrado na figura anterior.



Figura 37: Detalhe do molde empregado pela Universidade da Califórnia para confecção de quatro vigas, sendo obtidas duas amostras por vâo.

O processo de compactação ocorre com o preenchimento dos gabinetes por mistura asfáltica e, logo após, a realização da compactação por meio de rolos compactadores semelhantes aos utilizados em campo, conforme mostra a Figura 38. 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.

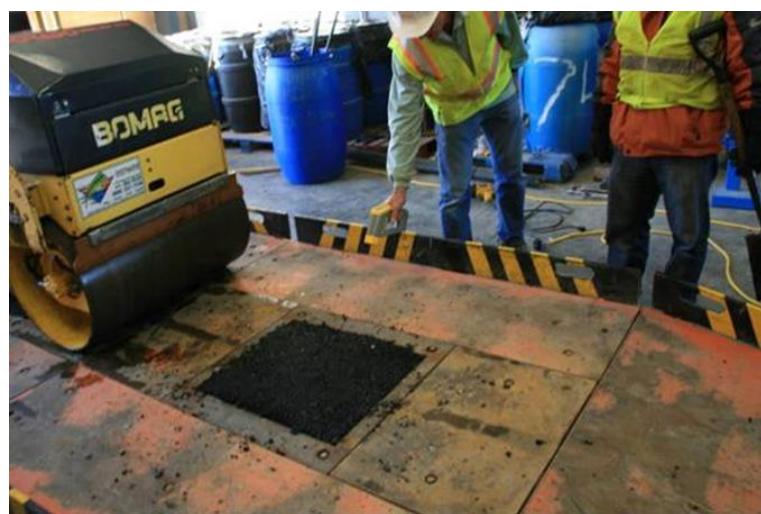


Figura 38: Compactação das placas de misturas asfálticas utilizando rolo compactador, Universidade da Califórnia.

O sistema de moldes para confecção de placas de misturas asfálticas, também, pode ser montado em campo, como demostrado na Figura 39. Nesta configuração de montagem dos moldes é possível utilizar trilhos de trem para fazer o suporte externo da pista de concreto onde os gabinetes, 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 39: Sistema de moldes empregados pela Universidade da Califórnia para confecção de vigas em campo destinadas a ensaios de fadiga a quatro pontos.

Após o processo de moldagem e cura, as placas devem ser retiradas dos gabinetes. 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 40 mostra o processo de retirada da placa de mistura asfáltica, com o auxílio de um sistema de guindaste, de um molde confeccionado em campo.



Figura 40: Sistema utilizado para a retirada das placas de misturas asfálticas moldadas em campo, Universidade da Califórnia.

As placas de mistura asfálticas após serem retiradas dos moldes devem ser serradas para obter as vigas, como mostrado na Figura 41. As vigas prismáticas devem ser faceadas em no mínimo 6mm de cada lado, visando o alinhamento dos lados e a redução do índice de vazios, devido as recomendações feitas por normas que preconizam os ensaios de fadiga em vigas.



Figura 41: Amostras para o ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos, após o processo de corte, Universidade da Califórnia.

#### 4.2 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA PRIMÁTICOS EMPREGADOS POR FONTES (2009)

Fontes<sup>2</sup> (2009) utilizou uma misturadora mecânica com capacidade de 50kg para homogeneização dos materiais utilizados para produção de mistura asfáltica destinada a moldagem de placas para obtenção de vigotas. Na Figura 42 são mostradas as quatro etapas do processo de produção das misturas na misturadora mecânica: (a) após a colocação e pré-mistura dos agregados; (b) após a introdução do ligante; (c) início do processo de mistura; (d) mistura completa.

---

<sup>2</sup> FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. *Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos*. Tese de Doutorado – Universidade do Minho, Portugal. 2009.



Figura 42: Processo de homogeneização dos materiais.

Placas de misturas asfálticas foram moldadas em laboratório, com o intuito de 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 43). 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 43: Sistema de moldagem e compactação de vigas utilizado por Fontes (2009).

Após os processos de serragem e secagem em ambiente climatizado com temperatura de  $20,0^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$  é realizada a seleção das amostras para serem ensaiadas, selecionando as vigotas homogêneas, através da medição das dimensões e da densidade aparente de cada amostra.

#### 4.3 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DE VIGOTAS UTILIZADO POR MELLO (2008)

Mello<sup>3</sup> (2008) utilizou um molde metálico para moldagem e compactação de corpos de prova prismáticos, para posterior ensaio de flexão a quatro pontos. Este molde 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 semi-seno-verso (*haversine*) à tensão controlada, com uma amplitude de 1,40MPa e frequência de 2,0Hz conforme mostra a Figura 44.



Figura 44: Compactação e moldagem de corpos de prova em formato de viga empregado por Mello (2008).

---

<sup>3</sup> MELLO, L. G. R. *O Estudo do dano em meio contínuo no estudo da fadiga em misturas asfálticas*. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2008.

Este procedimento de moldagem e compactação consiste no aquecimento prévio do molde e da mistura asfáltica na temperatura de compactação e, em seguida, o preenchimento do molde em duas etapas visando a distribuição uniforme da mistura em toda a extensão do molde. Após manter o molde na estufa para o reequilíbrio da temperatura estabelecida, o molde é então levado para o procedimento de compactação. Posterior ao processo de compactação e moldagem a viga é serrada nas dimensões especificadas por norma obtendo, assim, superfícies lisas que visam reduzir a variabilidade dos ensaios e eliminar possíveis micro-trincas na base da amostra que foram produzidas durante a compactação da mistura asfáltica.

#### 4.4 SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DE VIGOTAS UTILIZANDO UMA MESA COMPACTADORA FRANCESA

As placas de misturas asfálticas podem ser também compactadas utilizando uma mesa compactadora tipo LCPC – *Laboratoire Central des Ponts Chaussées*, Figura 45. 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, visando o modo de compactação em campo (Moura<sup>4</sup>, 2010).



Figura 45: Mesa compactadora francesa tipo LCPC (Moura, 2010).

---

<sup>4</sup> MOURA, Edson de. *Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório*. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2010.

Almeida<sup>5</sup> (2013) utilizou a mesa compactadora francesa para moldar placas de mistura asfáltica com o intuito de obter vigas no formato trapezoidal para ensaio de fadiga. A Figura 46 mostra a sequência do processo de compactação das placas: (a) preparação da forma e colocação de papel de proteção; (b) homogeneização das misturas depois de retiradas da estufa; (c) colocação da mistura na forma; (d) acomodação da mistura na forma; (e) compactação da mistura e término da mesma.

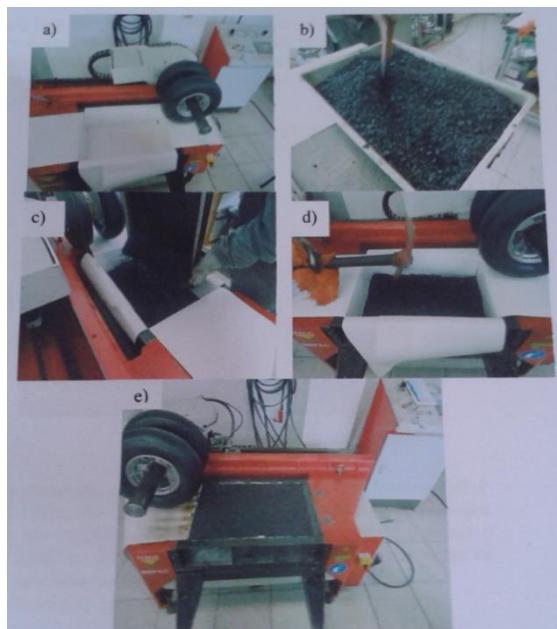


Figura 46: Processo de compactação de placas de mistura asfáltica utilizado por Almeida (2013).

Como pode ser visto diferentes métodos de compactação e moldagem de vigas são empregados por pesquisadores, sendo que cuidados relacionados a volume de vazios, direção da compactação, serragem das placas para obtenção das vigotas nas dimensões estabelecidas por norma devem ser tomados para que não interfiram nos resultados da determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas.

---

<sup>5</sup> ALMEIDA, Adosindro Joaquim de. *Comportamento mecânico de misturas asfálticas com aplicação dos aditivos PR Plast S e PR Flex 20 no módulo complexo e na fadiga*. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013.

## 4.5 CONCEPÇÃO/ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DESTA PESQUISA

Para a realização dos ensaios de flexão em vigotas prismáticas foi necessário produzir grandes quantidades de misturas asfálticas, em consequência disto o sistema de moldagem e compactação para produção das amostras foi montado na usina da Construtora Triunfo em Santo Antônio da Patrulha/RS.

As normas que preconizam o ensaio de flexão em vigas a quatro pontos não determinam o modelo do molde nem a metodologia de compactação, assim, diversos métodos podem ser encontrados na literatura para a produção das vigotas como apresentado no capítulo 3 desta pesquisa. A escolha da metodologia de moldagem e compactação foi em função de diferentes fatores como a produção de amostras, a disponibilidade de equipamentos, bem como a possibilidade de adaptação dos moldes diretamente nas usinas de misturas asfálticas e, também, no laboratório.

Visando a produção das vigas para esta pesquisa, foram dimensionados moldes metálicos, onde as amostras foram moldadas e compactadas, com comprimento de 588,4mm e largura de 691,4mm, sendo que os detalhes e dimensões dos moldes metálicos podem ser vistos na Figura 47.

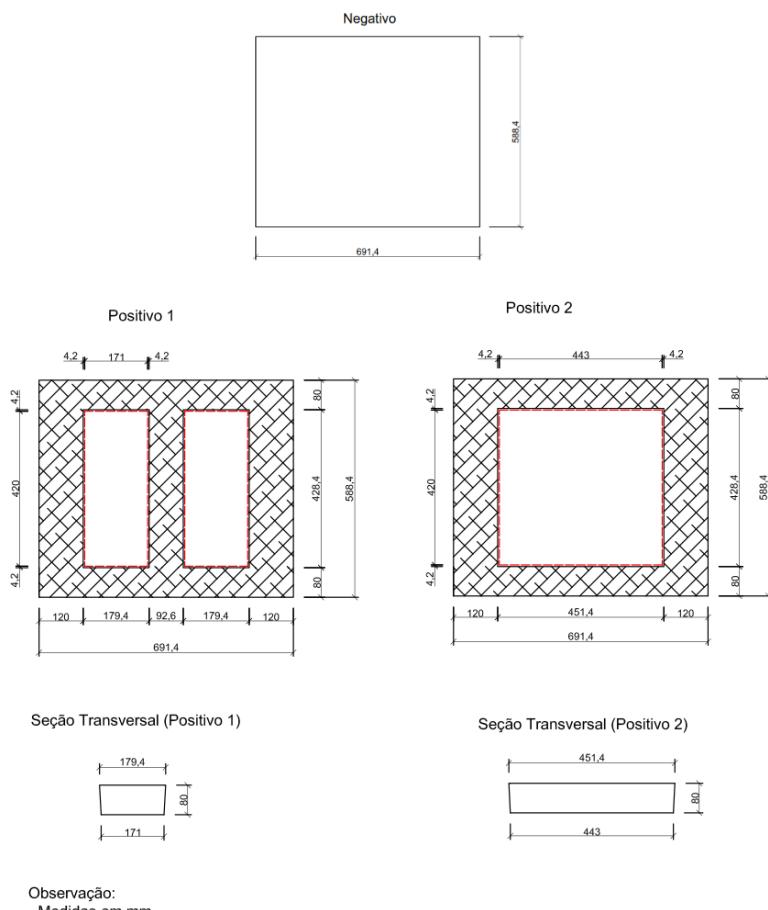
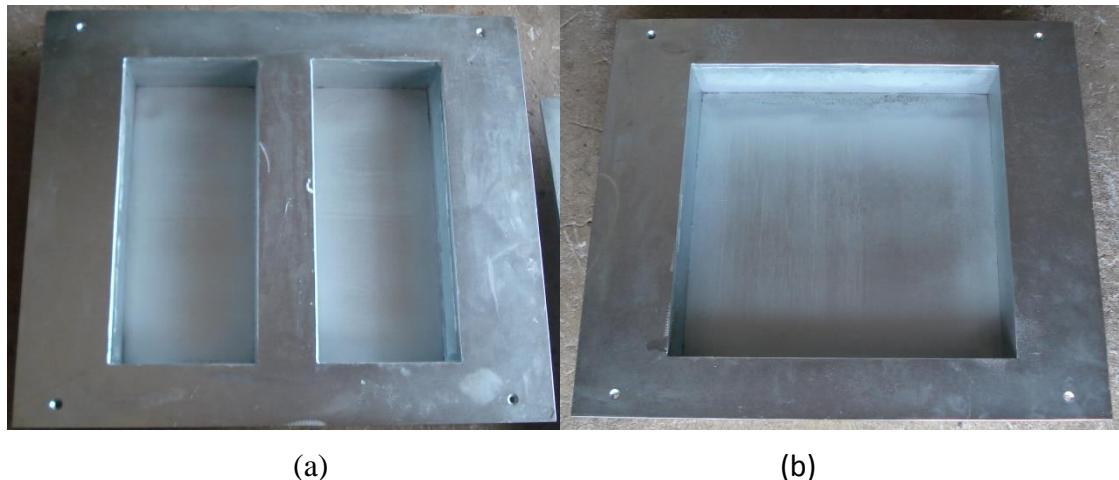


Figura 47: Detalhamento dos moldes utilizados nesta pesquisa.

Os moldes, onde placas de mistura asfáltica foram moldadas e compactadas para posterior obtenção das vigotas, foram confeccionando através da usinagem de chapas metálicas, sendo os negativos com chapa de 6,35mm de espessura e os positivos com chapa de 9,53mm de espessura. A Figura 48 apresenta os moldes metálicos usinados.



(a)

(b)

Figura 48: 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 vâo comporta uma quantidade de mistura asfáltica necessária para a confecção de duas amostras. No molde nomeado de positivo 2, podem ser confeccionadas até no máximo cinco 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 no negativo, o qual é fixado na base de compactação com o auxílio de engastes localizados nos quatro cantos do molde (Figura 49).



Figura 49: Face inferior do molde metálico (negativo) com engastes que servem para fixá-lo na base de compactação.

As placas de misturas asfálticas foram compactadas nos moldes por meio de um rolo compactador, procurando controlar a densidade da mistura. Após a desmoldagem as placas passaram pelo processo de corte em todas as faces, buscando obter as vigotas nas dimensões desejadas e eliminar possíveis vazios.

Nesta pesquisa, produziu-se vigotas nas dimensões 380mm de comprimento, 63mm de largura e 50mm de altura, após as faces serem serradas, buscando atender as dimensões e critérios de faceamento recomendados pela norma da AASHTO T-321-07. Pesquisadores afirmam 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 micro-trincas na base da vigota produzidas durante a compactação da mistura asfáltica. Salienta-se que as placas produzidas na usina serão desmoldadas e transportadas até o LAPAV/UFRGS para o processo de corte e posterior realização dos ensaios.

#### **4.6 ADEQUAÇÃO DA PISTA DE COMPACTAÇÃO E MOLDAGEM DAS PLACAS DE MISTURA ASFÁLTICA E AS ETAPAS DE FABRICAÇÃO DESTAS PLACAS**

Com o intuito de realizar a moldagem das placas de misturas asfálticas na Usina de Asfalto da Construtora Triunfo, localizada em Santo Antônio da Patrulha/RS, em virtude da grande quantidade de placas que deverão ser produzidas ao longo desta pesquisa, procurou-se utilizar uma pista existente, construída em concreto, e adaptá-la às dimensões necessárias para colocação das bases e moldes metálicos descritos anteriormente. Na Figura 50 é possível observar as adaptações que foram realizadas na pista de concreto existente na Usina.



Figura 50: Adaptação da pista de concreto para colocação das bases e moldes metálicos.

As bases e os moldes metálicos fabricados para as moldagens das placas de misturas asfálticas foram posicionados na pista de concreto, Figura 51, através de fixadores de aço com o intuito de aumentar a rigidez do conjunto (base e molde) para que não ocorram possíveis deslocamentos do mesmo durante a compactação das placas.

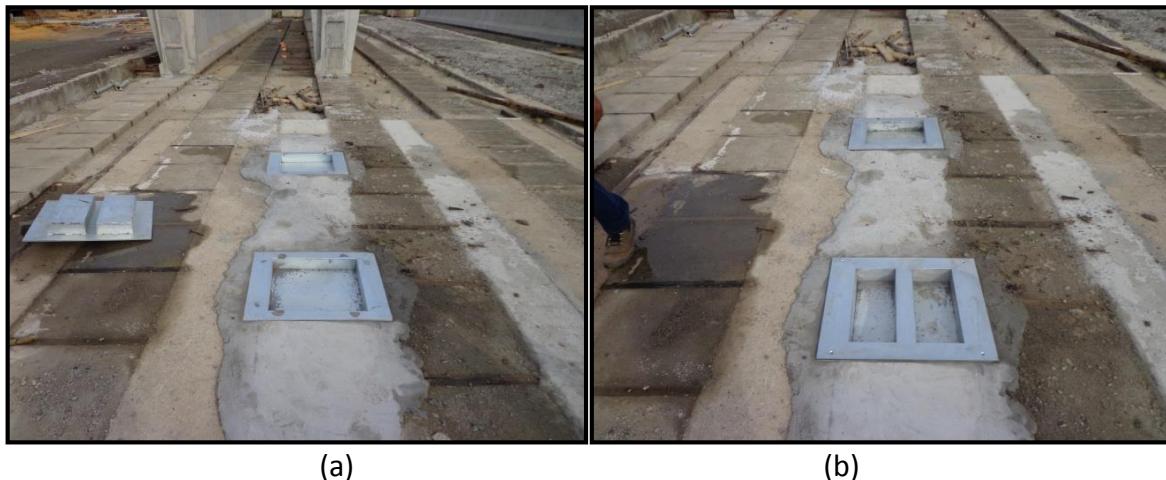


Figura 51: Posicionamento das bases metálicas (a) e dos moldes metálicos (b) na pista de concreto.

Na Figura 52 é possível observar a pista de concreto adaptada para a moldagem de placas de misturas asfálticas. Salienta-se que para melhorar a circulação do rolo utilizado na etapa de compactação das placas foi necessário confeccionar uma rampa em massa asfáltica no início da pista de concreto.



Figura 52: Pista de moldagem confeccionada da Usina de Asfalto da Construtora Triunfo para produção de placas de misturas asfálticas.

Para realizar as moldagens das placas de mistura asfáltica utilizou-se um tipo de papel (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 53 é possível verificar como este papel foi colocado nas faces dos moldes.

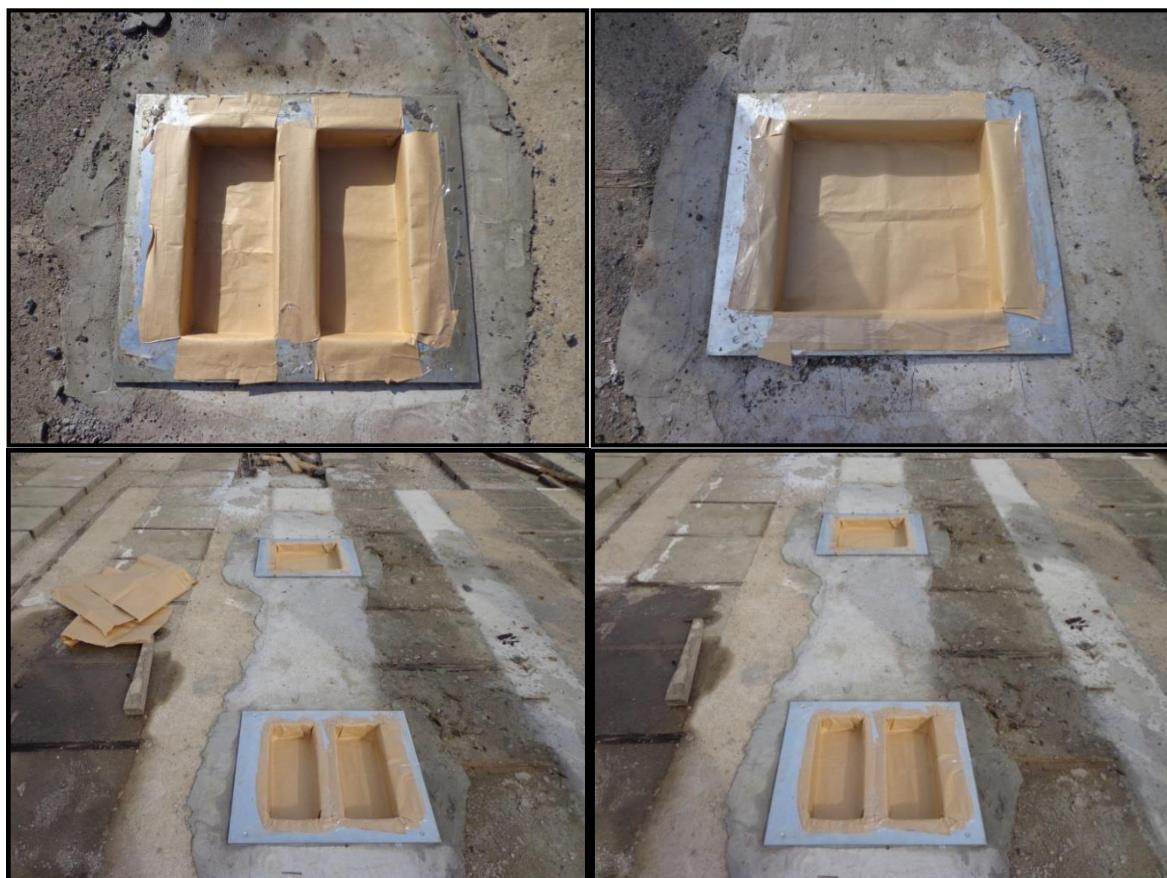


Figura 53: Utilização de papel nos moldes metálicos com o intuito da massa asfáltica não aderir nas faces dos moldes.

As misturas asfálticas utilizadas nas moldagens das placas foram produzidas na Usina de Asfalto da Construtora Triunfo, seguindo as características da dosagem descritas a seguir. A Figura 54 mostra está Usina de Asfalto em funcionamento.



Figura 54: Usina de Asfalto da Construtora Triunfo.

Com o intuito de controlar a compactação das placas de mistura asfáltica, através da densidade aparente obtida no projeto de dosagem elaborado em laboratório, utilizou-se uma balança eletrônica, conforme mostra a Figura 55, para pesar a mistura asfáltica a ser colocada no interior de cada molde para posterior processo de compactação.



Figura 55: Balança eletrônica utilizada para pesar a mistura asfáltica e, assim, controlar a compactação das placas em campo.

Após o processo de pesagem da mistura asfáltica a mesma deve ser colocada imediatamente no interior dos moldes para que não ocorra 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 que serão extraídas das placas. A Figura 56 mostra como é realizado o processo de preenchimento dos moldes metálicos com a mistura asfáltica.



Figura 56: Processo de preenchimento dos moldes com massa asfáltica.

A temperatura de compactação da mistura asfáltica deve ser controlada no momento de compactação da mistura no interior dos moldes metálicos, conforme pode ser verificado na Figura 57. Esta temperatura deve estar de acordo com o intervalo estabelecido pelo fornecedor do ligante asfáltico. Salienta-se que este intervalo determinado varia conforme o tipo de ligante asfáltico empregado na mistura.



Figura 57: Processo de preenchimento dos moldes metálicos e verificação da temperatura de compactação da mistura asfáltica.

Ao preencher os moldes com a mistura asfáltica foi realizado uma pré-compactação da mistura com auxílio de um soquete de madeira. Este processo foi estabelecido com o objetivo de que ocorra uma adequada acomodação do material no interior dos moldes metálicos. A pré-compactação da mistura asfáltica pode ser verificada através da Figura 58.



Figura 58: Pré-compactação da mistura asfáltica no interior dos moldes metálicos.

Para realizar a compactação das placas de mistura asfáltica utilizou-se um rolo compactador modelo CAT CC34, o qual pode ser visualizado através da Figura 59. Este rolo compactador é usualmente utilizado para fazer compactações de mistura asfáltica em campo, sendo composto por um tambor dianteiro de aço e pneus traseiros. Esta forma de composição do rolo permite que o equipamento funcione como um tambor duplo e um compactador pneumático, resultando em uma superfície lisa e coesa.



Figura 59: Rolo compactador utilizado para compactar a mistura asfáltica.

Através da Figura 60 é possível observar como é realizado o processo de compactação da mistura asfáltica nos moldes metálicos. Durante o procedimento de compactação é utilizado tanto o tambor dianteiro de aço quanto os pneus traseiros com o intuito de realizar uma adequada acomodação do material no molde, bem como atingir a compactação necessária das placas.



Figura 60: 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 61, 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 61: Placas de mistura asfáltica compactadas.

As placas de mistura asfáltica após completo resfriamento são retiradas dos moldes e armazenadas em local apropriado, Figura 62, até o processo de corte para extração das vigotas que serão ensaiadas a flexão em quatro pontos para obter a vida de fadiga.



Figura 62: Placas de mistura asfáltica.

As placas de mistura asfáltica são transportadas da Usina de Asfalto da Construtora Triunfo para uma marmoraria onde passam pelo processo de corte para obtenção das vigotas. Para transportar estas placas utilizou-se caixas de madeira preenchidas com areia, conforme mostra a Figura 63, com o intuito de não ocorrer o movimento das placas durante o processo de transporte.



Figura 63: Transporte das placas de mistura asfáltica da Usina de Asfalto para a marmoraria.

Para realizar os procedimentos de corte das placas de mistura asfáltica e produzir vigotas nos tamanhos estipulados por norma utilizou-se uma serra automatizada com velocidade constante. O emprego deste processo de corte 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 isto poderia ocasionar uma exsudação de ligante nas faces das vigas. A Figura 64 mostra as etapas de corte das placas para obtenção das amostras prismáticas.



Figura 64: Processo de corte das placas de mistura asfáltica.

Nesta pesquisa, foram produzidas vigotas nas dimensões 380mm de comprimento, 63mm de largura e 50mm de altura, após as faces serem serradas, conforme mostra a Figura 65. O processo de faceamento das vigotas é necessário, pois permite obter superfícies lisas, reduzindo a probabilidade de imperfeições nas suas dimensões e, com isso, reduz a variabilidade dos ensaios.



Figura 65: Vigotas obtidas após o processo de corte das placas de mistura asfáltica.

## 5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS NA PESQUISA

Este capítulo refere-se a caracterização dos materiais utilizados ao longo desta pesquisa. Os materiais empregados tais como ligantes asfálticos e agregados minerais foram avaliados de acordo com ensaios prescritos em normas do Dnit. Os ensaios necessários para caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS. Também, constam as composições e as principais propriedades de duas misturas asfálticas, sendo uma denominada de concreto asfáltico com cimento asfáltico de petróleo (CAP) modificado por asfalto natural do tipo TLA FLEX (CA-TLA) e a outra de concreto asfáltico com CAP modificado por polímero (CA-E). Estas misturas são produzidas pela usina de asfalto da Construtora Triunfo, sendo a mistura CA-E utilizada pela Concessionária da Rodovia Osório-Porto S/A – Concepá no pavimento de trechos experimentais da BR-290, na qual são realizados monitoramentos periodicamente.

### 5.1 AGREGADO MINERAL

Os agregados graúdos e agregados miúdos utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela pedreira da Construtora Triunfo localizada na cidade de Santo Antônio da Patrulha/RS, sendo de origem basáltica da formação Serra Geral (Figura 66)

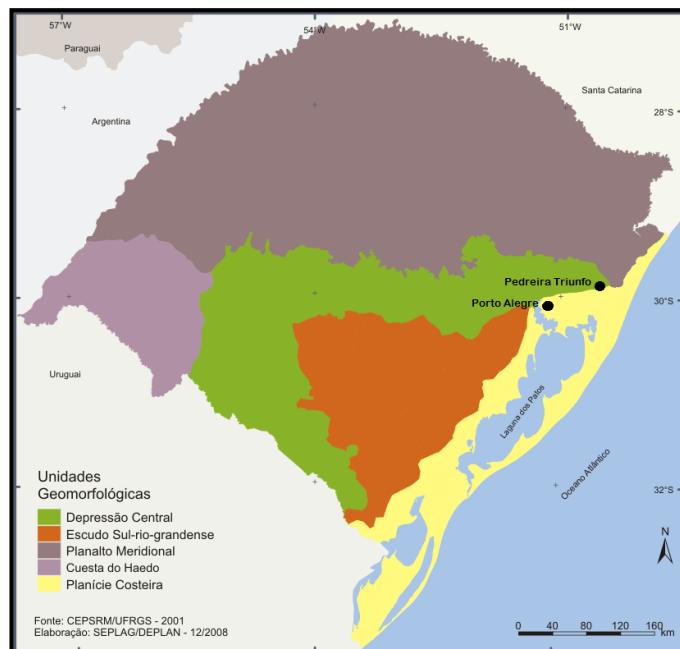


Figura 66: Localização da Pedreira Triunfo em Santo Antônio da Patrulha/RS (Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www1.seplag.rs.gov.br/atlas/>).

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFRGS). Algumas propriedades físicas e mecânicas destes agregados encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Características dos agregados utilizados no estudo.

Propriedade	Método	Resultado
<b>Massa Esp. Real - Agregado Graúdo</b>	DNER-ME 081/98	2843 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa Esp. Real - Agregado Miúdo</b>	DNER-ME 084/95	2846 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa Esp. Aparente do Grão</b>	DNER-ME 081/98	2735 kg/m <sup>3</sup>
<b>Absorção</b>	DNER-ME 081/98	0,9%
<b>Índice de Forma</b>	DNER-ME 086/94	0,8
<b>Equivalente de Areia</b>	DNER-ME 054/97	89%
<b>Adesividade a Ligante Betuminoso</b>	DNER-ME 078/94	Satisfatório
<b>Durabilidade (Sanidade)</b>	DNER-ME 089/94	6,1%
<b>Desgaste à abrasão</b>	DNER-ME 035/98	10%

O resultado médio das análises granulométricas realizadas nos agregados coletados da pedreira e utilizados na pesquisa encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Distribuição granulométrica dos agregados.

Peneira		Percentagem passante em massa (%)		
nº	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra
<b>3/4"</b>	19,1	100,00	100,00	100,00
<b>1/2"</b>	12,7	51,40	100,00	100,00
<b>3/8"</b>	9,5	12,70	98,20	100,00
<b>n 4</b>	4,76	2,80	11,90	97,30
<b>n 10</b>	2	2,10	1,60	58,20
<b>n 40</b>	0,42	1,80	1,40	23,80
<b>n 80</b>	0,18	1,60	1,40	16,10
<b>n 200</b>	0,07	1,00	1,20	11,50

Na Figura 67 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados classificados como brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra, empregados neste estudo, coletados na pedreira da Construtora Triunfo.

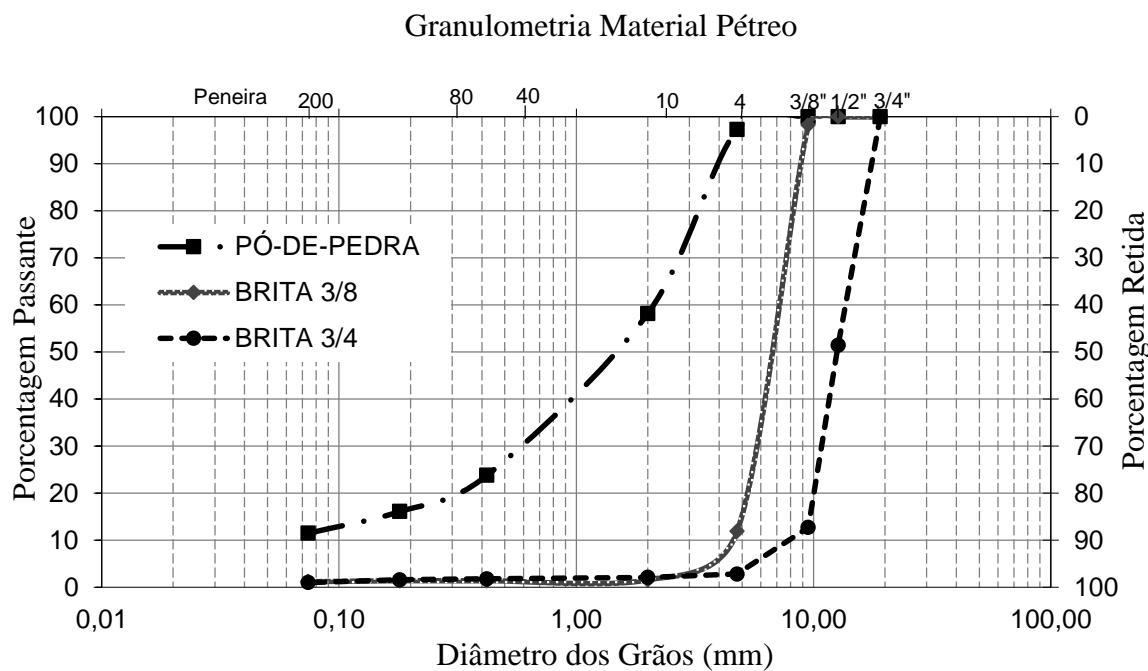


Figura 67: Distribuição granulométrica dos agregados utilizados no estudo.

## 5.2 CIMENTO ASFÁLTICO

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de cimento asfáltico para a composição das misturas asfálticas estudadas: um cimento asfáltico modificado por asfalto natural do tipo TLA – CAP TLA FLEX e outro modificado por polímero - CAP 60/85. Os cimentos asfálticos empregados neste estudo são usualmente utilizados em obras de pavimentação no estado do Rio Grande do Sul.

A avaliação das características dos cimentos asfálticos estudados foi realizada empregando diversas técnicas laboratoriais, dentre elas está a determinação da penetração, do ponto de amolecimento, da viscosidade rotacional e da recuperação elástica.

O ensaio de penetração é preconizado pela norma NBR 6576: Materiais Asfálticos – Determinação da Penetração (ABNT, 2007). Este ensaio consiste em submeter uma amostra de ligante asfáltico, condicionada à temperatura de 25°C em banho de água, à penetração de uma agulha padrão com sobrecarga de  $100 \pm 0,5$ g durante 5 segundos. A penetração de um material, distância em décimos de milímetros que uma agulha padrão afunda verticalmente em uma amostra sob condições prefixadas de carga e temperatura, é resultante da média de três determinações.

O ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos é determinado de acordo com a norma NBR 6560: Materiais Betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola (ABNT, 2008). Este ensaio consiste em colocar a amostra de ligante em um molde com formato de um anel de latão. O anel é preenchido com a amostra e colocado em um suporte que é mantido em um banho em temperatura controlada. Sobre a amostra

é colocada uma esfera padronizada de aço e, este conjunto é aquecido a uma velocidade constante, assim, a amostra amolece dentro do anel e cede ao peso da esfera que se deslocará a uma determinada distância. O ponto de amolecimento é determinado como sendo a temperatura obtida no momento em que a esfera metálica atravessa o anel cheio de material asfáltico e toca uma placa de referência localizada abaixo do conjunto.

O ensaio de viscosidade rotacional é prescrito pela norma NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando o viscosímetro rotacional (ABNT, 2004). Este ensaio consiste em medir o torque necessário para rodar uma haste, denominada de spindle, a qual é imersa em uma amostra de ligante aquecida a uma velocidade constante. A viscosidade é considerada uma medida de consistência dos ligantes asfálticos.

O ensaio de recuperação elástica tem como objetivo determinar as características elásticas dos ligantes asfálticos, sendo preconizado pela norma NBR 15086: Materiais betuminosos – Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro (ABNT, 2006). Neste ensaio a amostra de ligante asfáltico é alongada até um tamanho preestabelecido, sob condições padronizadas de velocidade e temperatura. Após o alongamento a amostra é imediatamente seccionada em seu ponto médio. A recuperação elástica é determinada a partir da medição do alongamento residual da amostra de ligante asfáltico após a junção das extremidades.

Na Tabela 7 e Tabela 8 encontram-se os resultados das principais propriedades ensaiadas para o cimento asfáltico modificado por asfalto natural do tipo TLA e o cimento asfáltico modificado por polímero CAP 60/85, respectivamente.

**Tabela 7: Propriedades do cimento asfáltico modificado por asfalto natural do tipo TLA (CAP TLA FLEX) utilizado na pesquisa.**

Propriedade	Método	Especificação CAP TLA FLEX (DNIT 168/2013)	Resultados
<b>Ponto de Amolecimento (°C)</b>	DNIT 131/2010	50 min.	63
<b>Penetração (0,1 mm)</b>	DNIT 155/2010	40 - 55	42
<b>Viscosidade Brookfield 135°C (cp)</b>	NBR 15184	400 min.	1655
<b>Viscosidade Brookfield 150°C (cp)</b>	NBR 15184	210 min.	795
<b>Viscosidade Brookfield 175°C (cp)</b>	NBR 15184	80 min.	277,5
<b>Recuperação Elástica à 25°C (%)</b>	NBR 15086	60 min.	81

Tabela 8: Propriedades do cimento asfáltico modificado por polímero (CAP 60/85) utilizado na pesquisa.

Propriedade	Método	Especificação CAP 60/85 (ANP, 2010)	Resultados
<b>Ponto de Amolecimento (°C)</b>	NBR 6560	60 min.	65
<b>Penetração (0,1 mm)</b>	NBR 6576	40 - 70	50
<b>Viscosidade Brookfield 135°C (cp)</b>	NBR 15184	3000 máx.	898
<b>Viscosidade Brookfield 150°C (cp)</b>	NBR 15184	2000 máx.	360
<b>Viscosidade Brookfield 177°C (cp)</b>	NBR 15184	1000 máx.	173
<b>Recuperação Elástica à 25°C (%)</b>	NBR 15086	85 min.	92

A partir dos valores obtidos nos ensaios realizados com os dois tipos de cimentos asfálticos verificou-se que tanto o CAP TLA FLEX quanto o CAP 60/85 encontram-se dentro das especificações estabelecidas para os cimentos asfálticos de petróleo, podendo ser usados na elaboração das misturas asfálticas.

### 5.3 MISTURA ASFÁLTICA COM CIMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO POR ASFALTO NATURAL DO TIPO TLA (CAP TLA FLEX) EMPREGADA PELA USINA DE ASFALTO

Na dosagem da mistura asfáltica com cimento asfáltico modificado por asfalto natural TLA (CAP TLA FLEX), denominada nesta pesquisa de concreto asfáltico com CAP modificado por asfalto natural TLA FLEX (CA-TLA), foram utilizados os agregados e o CAP TLA FLEX descritos anteriormente.

A composição granulométrica utilizada na usina de asfalto para a mistura CA-TLA, mostrada na Tabela 9 e na Figura 68, 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 19mm. A composição apresentou 22% de brita 3/4", 21% de brita 3/8" e 57% de pó de pedra.

Tabela 9: Especificações para Faixa C do DNIT e composição da mistura asfáltica com CAP TLA FLEX empregada.

PENEIRA	mm	Limite	Centro faixa	Faixa de Trabalho	Mistura
3/4"	19,1	100	100	100,0	100,0
1/2"	12,7	80 - 100	90	82,2	96,2
3/8"	9,50	70 - 90	80	75,1	89,1
n 4	4,76	44 - 72	58	56,0	68,0
n 10	2,00	22 - 50	36	32,8	42,8
n 40	0,42	8 - 26	17	10,8	20,8
n 80	0,18	4 - 16	10	7,2	15,2
n 200	0,074	2 - 10	6	4,8	8,8
					6,8

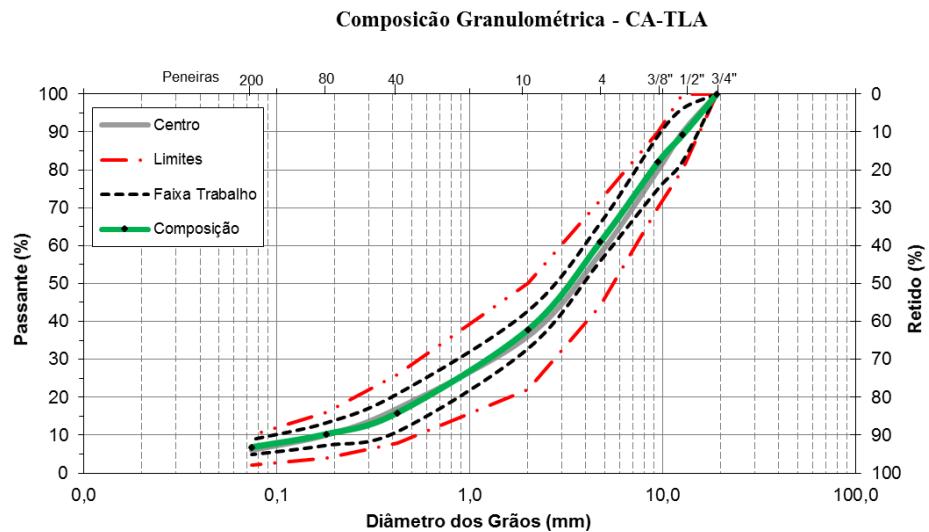


Figura 68: Composição granulométrica estabelecida para a mistura CA-TLA produzida na usina de asfalto - Faixa C DNIT.

A temperatura de usinagem para a mistura CA-TLA deve estar entre 178°C e 184°C e a temperatura de compactação entre 169°C e 175°C, sendo estas temperaturas recomendadas pela empresa que comercializa o cimento asfáltico. Na Tabela 10 é apresentado o resumo das principais propriedades resultantes da mistura asfáltica estudada como o teor de ligante de projeto, volume de vazios (VV), vazios de agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV) e densidade máxima medida (DMM). O volume de vazios adotado para determinação do teor de ligante de projeto foi o que estava mais próximo de 4%.

Tabela 10: Resumo das principais propriedades da mistura CA-TLA estudada.

PROPRIEDADES FINAIS DA MISTURA	
<i>Propriedade</i>	<i>Valor de Projeto</i>
Teor de Betume (%)	<b>5,10</b>
Volume de Vazios (%)	<b>4,10</b>
Relação Betume Vazios (%)	<b>75,0</b>
Vazios do Agregado Mineral (%)	<b>16,4</b>
Massa Esp. Max. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	<b>2,53</b>
Massa Esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	<b>2,43</b>
Estabilidade (kgf)	<b>1150</b>
Fluênciaria (1/100 in)	<b>12</b>

## 5.4 MISTURA ASFÁLTICA COM CIMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO POR POLÍMERO (CAP 60/85) EMPREGADA PELA USINA DE ASFALTO

Na dosagem da mistura asfáltica com cimento asfáltico modificado por polímero (CAP-60/85), comumente utilizada no estado do Rio Grande do Sul e denominada nesta pesquisa de concreto asfáltico com CAP modificado por polímero (CA-E), foram utilizados os agregados e o CAP 60/85 descritos anteriormente.

A composição granulométrica utilizada na usina de asfalto para a mistura CA-E 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 19mm. A composição apresentou 24% de brita 3/4", 30% de brita 3/8" e 46% de pó de pedra.

Esta composição granulométrica da mistura asfáltica, mostrada na Tabela 11 e na Figura 69, buscou atender os projetos de misturas asfálticas que foram executados nas pistas experimentais de onde serão realizados levantamentos de trincas para determinação do fator laboratório-campo.

Tabela 11: Especificações para Faixa C do DNIT e composição da mistura asfáltica com CAP 60/85 empregada.

PENEIRA	mm	Limite	Centro faixa	Faixa de Trabalho	Mistura
3/4"	19,1	100	100	100,0	100,0
1/2"	12,7	80 - 100	90	81,1	95,1
3/8"	9,50	70 - 90	80	71,1	85,1
n 4	4,76	44 - 72	58	46,0	56,0
n 10	2,00	22 - 50	36	23,5	33,5
n 40	0,42	8 - 26	17	8,0	17,4
n 80	0,18	4 - 16	10	5,7	11,7
n 200	0,074	2 - 10	6	4,2	8,2
					6,2

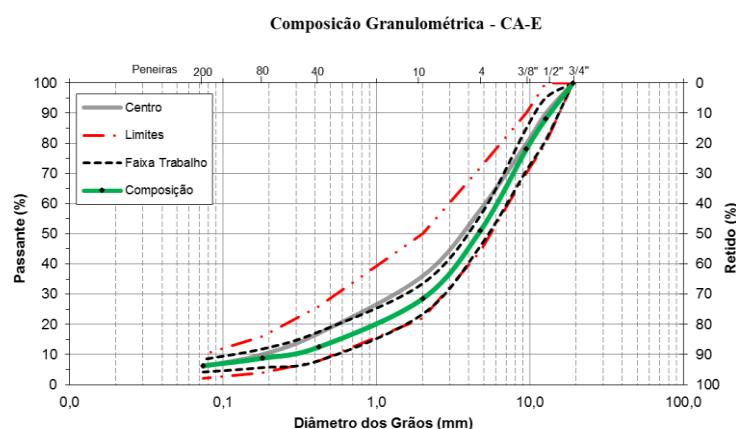


Figura 69: Composição granulométrica estabelecida para a mistura CA-E produzida na usina de asfalto - Faixa C DNIT.

A temperatura de Usinagem para a mistura CA-E deve estar entre 165°C e 172°C e a temperatura de compactação entre 155°C e 160°C, sendo estas temperaturas recomendadas pela empresa que comercializa o cimento asfáltico. Na Tabela 12 é apresentado o resumo das principais propriedades resultantes da mistura asfáltica estudada como o teor de ligante de projeto, volume de vazios (VV), vazios de agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV) e densidade máxima teórica (DMT). O volume de vazios adotado para determinação do teor de ligante de projeto foi o que estava mais próximo de 4%.

Tabela 12: Resumo das principais propriedades da mistura CA-E estudada.

PROPRIEDADES FINAIS DA MISTURA	
<i>Propriedade</i>	<i>Valor de Projeto</i>
<i>Teor de Betume (%)</i>	<b>5,25</b>
<i>Volume de Vazios (%)</i>	<b>4,00</b>
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	<b>75,0</b>
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	<b>16,2</b>
<i>Massa Esp. Max. Teorica (kN/m<sup>3</sup>)</i>	<b>2,45</b>
<i>Massa Esp. Aparente (kN/m<sup>3</sup>)</i>	<b>2,36</b>
<i>Estabilidade (kgf)</i>	<b>1270</b>
<i>Fluênciia (1/100 in)</i>	<b>6,5</b>
<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	<b>1,45</b>
<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>	<b>4520</b>
<i>Relação Mr/Rt (adm)</i>	<b>3117</b>
<i>Relação Est/Fluênciia (kgf.m)</i>	<b>59</b>
<i>Relação Filler/Betume (%)</i>	<b>1,19</b>

## 6 PROCEDIMENTO DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE FADIGA À FLEXÃO E MÓDULO COMPLEXO

No presente capítulo consta o desenvolvimento dos ensaios de fadiga à flexão em viga quatro pontos realizados no equipamento da IPC Global (modelo CS 7800) descrito anteriormente. Em relação ao ensaio de fadiga por compressão diametral são mostradas as principais características do equipamento, com ênfase no sistema de carregamento e de controle e aquisição de dados. Faz-se um estudo sobre o conceito de módulo complexo, sendo os dados aqui apresentados baseados em diversas bibliografias nacionais e internacionais sobre o assunto e, apresenta-se a metodologia utilizada para determinar o módulo dinâmico das misturas asfálticas estudadas.

### 6.1 ENSAIO DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

Os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos foram realizados em vigotas prismáticas extraídas de placas moldadas na usina de asfalto da Construtora Triunfo. Na Figura 70 é possível observar o posicionamento da vigota no equipamento de ensaio de flexão em quatro pontos. Os procedimentos utilizados para realização dos ensaios de fadiga à flexão seguem a seguinte sequência:

- 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.
- 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.
- Aguardar o tempo de condicionamento da amostra, em função de que a temperatura estabelecida para o ensaio se torne constante e para que quaisquer tensões internas aplicadas pelo processo de fixação sejam aliviadas. O tempo de condicionamento determinado pela norma da AASHTO T321 (2007) é de 2 horas.
- Após o processo de condicionamento verificar se o LVDT central precisa ser reajustado e, assim, iniciar o ensaio.



Figura 70: Posicionamento da amostra no equipamento de flexão em quatro pontos.

Os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos foram realizados de acordo com a norma AASHTO T321 (2007) em vigas prismáticas (380mm x 63mm x 50mm), Figura 71, submetidas a uma forma de carregamento senoidal, em deformação controlada, com temperatura de 25°C e frequência de 10Hz. Salienta-se que o programa utilizado para realização destes ensaios foi o UTS015 fornecido pela empresa IPC Global.



Figura 71: Corpos de prova prismáticos utilizados nesta pesquisa para os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos.

Na avaliação da vida de fadiga das misturas CA-TLA e CA-E, para cada um dos níveis de deformação estabelecidos, 400, 600 e 800 $\mu\epsilon$ , foram ensaiadas três amostras.

## 6.2 ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

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 controlada, permitindo a realização de ensaios em temperaturas distintas. A Figura 72 mostra a câmara climática e o sistema de carregamento do ensaio de fadiga por compressão diametral para misturas asfálticas que o LAPAV/UFRGS dispõe.

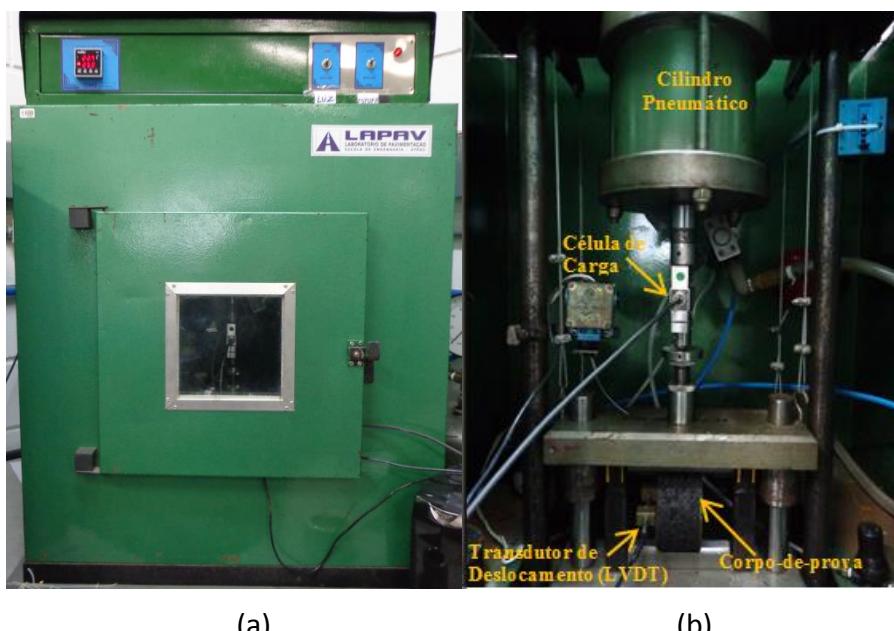


Figura 72: (a) câmara climática e (b) sistema de carregamento do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral.

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 73 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 de dados.

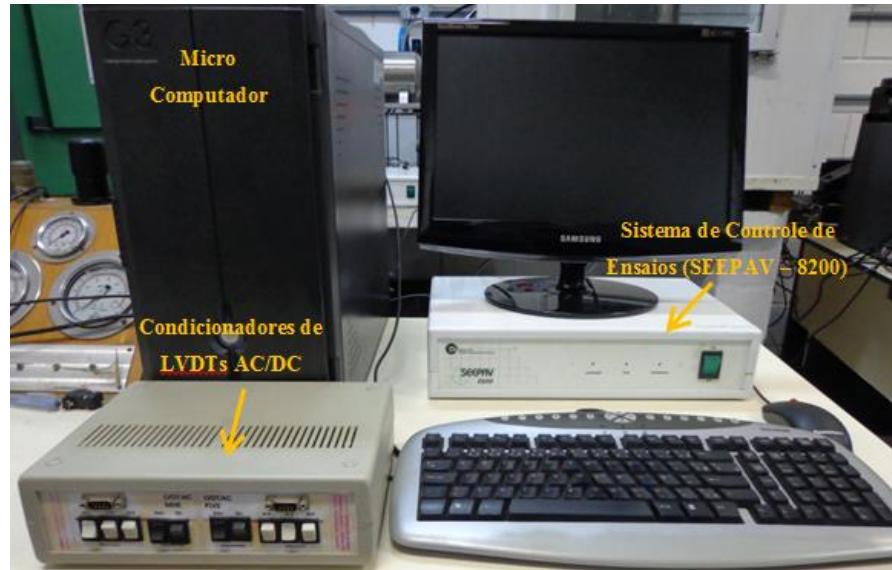


Figura 73: Sistema de aquisição e controle de dados do equipamento de ensaio de fadiga por compressão diametral.

A tela principal de ensaio de fadiga do SEEPAV 8200, onde constam o programa de controle e as configurações de ensaio, é apresentada na Figura 74. 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 em que a carga será aplicada, o número máximo de ciclos para o ensaio e o percentual do módulo de resiliência inicial, sendo estes dois últimos itens critérios de término do ensaio.

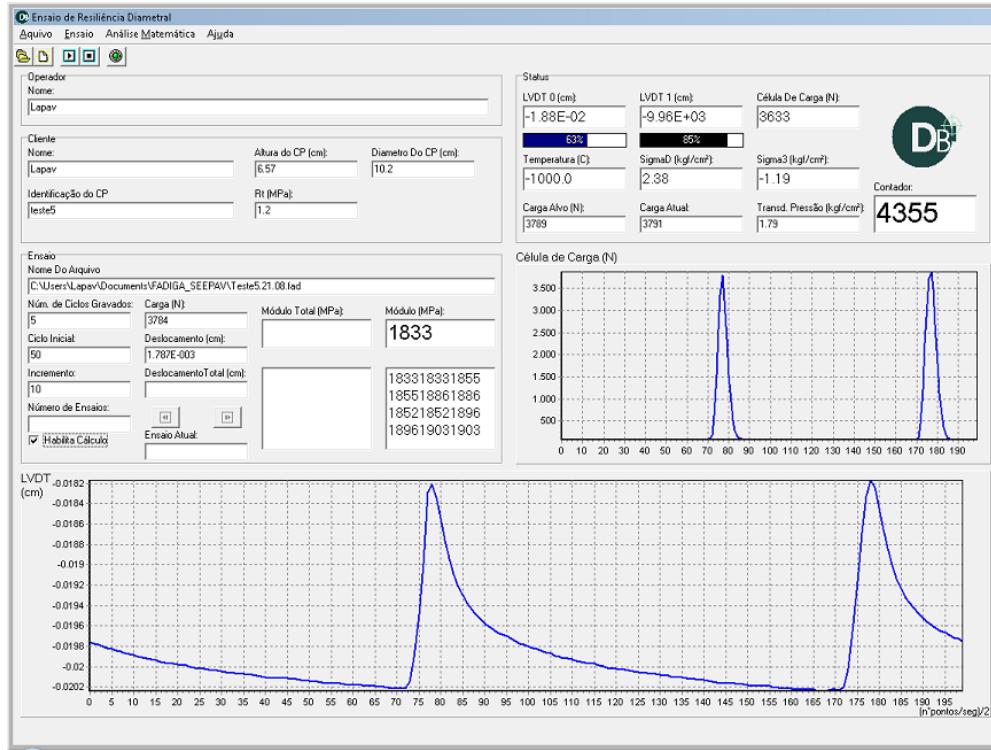


Figura 74: Programa de controle do ensaio de fadiga por compressão diametral e detalhes das telas de configurações.

O SIEPAV 8200 dispõe de uma tela, Figura 75, onde é possível monitorar o comportamento da carga em função do deslocamento, para posterior cálculo da energia dissipada ao longo do ensaio, e o módulo de resiliência em função do número de ciclos, salientando o MR em que o ensaio poderá ser finalizado, em função do percentual de redução do MR inicial.

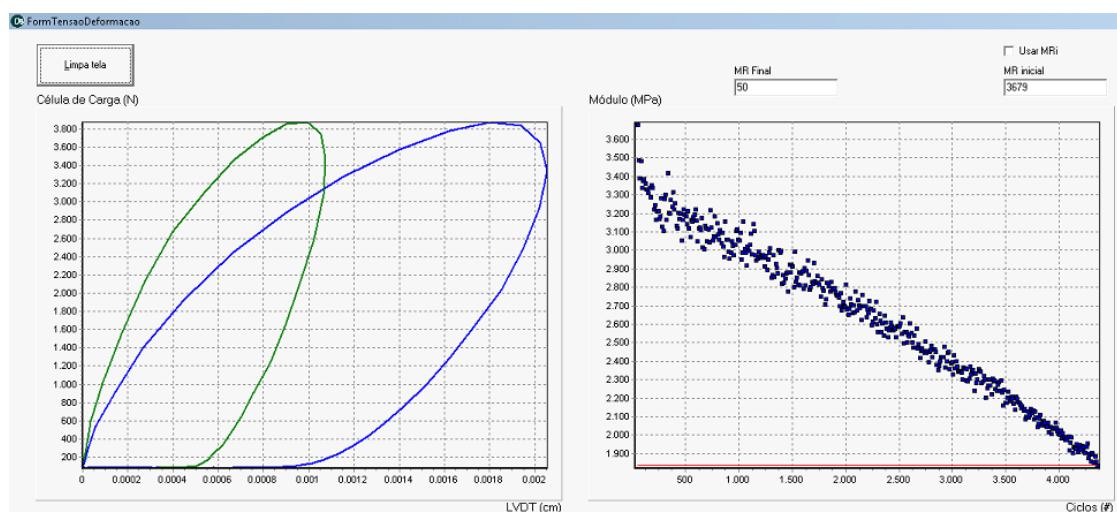


Figura 75: Tela do programa onde é possível visualizar o comportamento da carga pelo deslocamento e do módulo de resiliência pelo número de ciclos no decorrer do ensaio de fadiga.

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, como mostra a Figura 76. Estes corpos de prova apresentaram diâmetro de  $101,6 \pm 2\text{mm}$  e altura  $53,4 \pm 3\text{mm}$ .



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

Os corpos de prova foram submetidos a três níveis de tensão (10%, 20% e 30% da RT), proporcionais à resistência a tração (RT) e, a forma de carregamento empregada foi semi-seno-verso (*haversine*). Salienta-se que para cada nível foram ensaiados três corpos de prova cilíndricos.

Os deslocamentos horizontais foram medidos através de um LVDT de ponta retrátil. A Figura 77 mostra como o LVDT é acoplado ao corpo de prova através de peças de suporte, as quais são coladas na amostra com resina epóxi por no mínimo 24 horas de antecedência do início dos ensaios. Os ensaios foram realizados sob temperatura de  $25^\circ\text{C}$  em estufa termo-controlada e as amostras ensaiadas apresentaram um volume de vazios próximo a 4%. O coeficiente de *Poisson* foi fixado em 0,30 para temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , conforme recomendação da norma NBR-16018 (2012).



Figura 77: Sequência de montagem das peças de suporte no corpo de prova cilíndrico.

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

### 6.3 MÓDULO COMPLEXO

A caracterização dos materiais viscoelásticos é realizada através do módulo complexo ( $E^*$ ) e do ângulo de fase ( $\phi$ ), estas propriedades estabelecem respostas mecânicas sob condições de solicitações harmônicas em regime constante.

O ensaio para determinar o módulo complexo consiste em submeter o material a uma sequência de solicitações senoidais com diferentes frequências, isto somente é valido quando efetuado no domínio das baixas deformações. Ao analisar uma mistura asfáltica no domínio das baixas deformações, onde se espera um comportamento viscoelástico linear, uma solicitação senoidal aplicada origina uma resposta também senoidal.

O módulo complexo  $E^*$  é o número complexo definido como a razão entre a amplitude complexa de uma tensão senoidal a uma pulsação ou velocidade angular ( $\omega$ ) aplicada a um material e a amplitude complexa de uma deformação senoidal. Tendo em vista a característica viscoelástica do material, a deformação possui uma defasagem em relação à tensão, sendo representada pelo ângulo de fase. Dessa maneira o módulo complexo não é determinado em função do tempo, mas depende da pulsação ou da frequência a uma determinada temperatura. Através da Figura 78 é possível observar a tensão aplicada ( $\sigma_0$ ) e a deformação ( $\epsilon_0$ ) em um carregamento dinâmico que apresenta uma defasagem ( $\phi$ ).

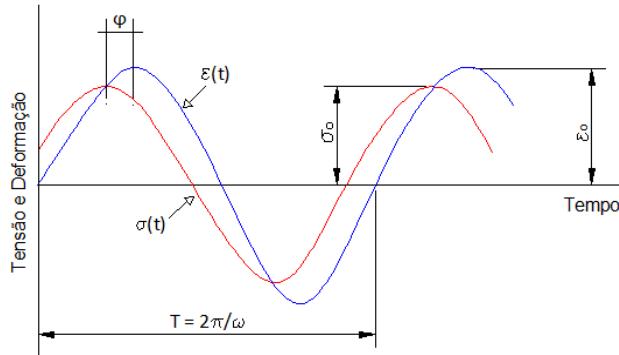


Figura 78: Esquema de um ensaio com carregamento dinâmico em um material viscoelástico.

Em função das misturas asfálticas possuírem um comportamento variável em relação à temperatura e ao tempo de carregamento, para processo de caracterização do seu comportamento torna-se necessário a execução de ensaios com controle de temperaturas e de frequências.

Considerando uma deformação estabelecida e que segue uma forma senoidal, mostrada na equação 12, observa-se que os materiais viscoelásticos apresentam uma resposta mecânica conforme está apresentada na equação 13. Assim, a deformação senoidal imposta induz uma resposta de tensão, também senoidal, mas defasada por um ângulo de fase.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \operatorname{sen}(\omega t) \quad (12)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \quad (13)$$

Onde:

$\varepsilon_0$ : amplitude de deformação

$\sigma_0$ : amplitude de tensão

$\omega$  ( $2\pi F_r$ ): velocidade angular

$t$ : tempo

$\phi$ : ângulo de fase

Em função de o módulo complexo, definido pela equação 14, ser um número complexo, ele possui partes reais e imaginárias. O módulo complexo por ser dividido em duas componentes  $E_1$  e  $E_2$ , as quais são parâmetros proporcionais à energia armazenada no material e dissipada por atrito interno durante um ciclo e são conhecidas como módulo de armazenagem e módulo de perda, respectivamente (equações 15 e 16). A componente  $E_1$  é denominada de módulo elástico real, pois é 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.

$$E^* = E_1 + i \cdot E_2 \quad (14)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi = |E^*| \cdot \cos \varphi \quad (15)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \varphi = |E^*| \cdot \sin \varphi \quad (16)$$

Onde:

$E^*$ : módulo complexo

$E_1$  e  $E_2$ : módulos de armazenamento e de perda

O valor absoluto do módulo complexo é conhecido como módulo dinâmico  $|E^*|$ , sendo definido como a relação entre as amplitudes de tensão e deformação (equação 17).

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (17)$$

Onde:

$|E^*|$ : módulo dinâmico

O módulo complexo, também, pode ser apresentado pelo seu valor em módulo  $|E^*|$  e pelo seu ângulo de fase ( $\varphi$ ), respectivamente conforme mostram as equações 18 e 19.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (18)$$

$$\varphi = \arctan \left( \frac{E_2}{E_1} \right) \quad (19)$$

Os diferentes componentes do módulo complexo variam com a temperatura e a frequência de solicitações fixadas para cada ensaio. 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. Os resultados experimentais  $|E^*|$ ,  $\varphi$ ,  $E_1$  e  $E_2$  são usualmente expressos com auxílio das representações clássicas nas curvas Isotérmica, Frequência-Temperatura, Isócrona, Espaço de Black e Cole-Cole.

### 6.3.1 Curvas Isotérmicas

As curvas isotérmicas são obtidas através do gráfico, em que o valor absoluto do módulo complexo, para cada nível de temperatura estabelecida para o ensaio, é traçado em função da frequência aplicada, em escala logarítmica. Na Figura 79 é apresentado um exemplo de curvas isotérmicas.

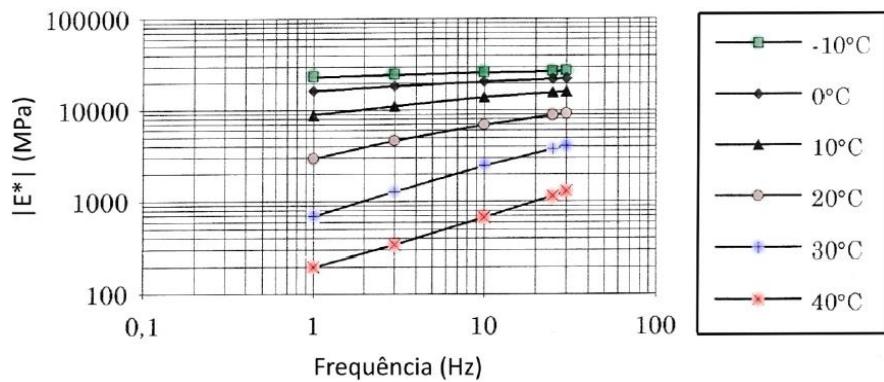


Figura 79: Curvas isotérmicas.

Através das curvas isotérmicas é possível estimar a susceptibilidade cinética a uma dada temperatura. As descontinuidades das linhas da curva representam uma variação de estado. A variação do módulo em função da temperatura, para uma determinada frequência, permite avaliar a susceptibilidade térmica das misturas asfálticas.

### 6.3.2 Curva Equivalência Frequência - Temperatura

Considerando o domínio da viscosidade linear e aceitando o princípio da equivalência frequência-temperatura pode-se determinar o gráfico do valor absoluto do módulo complexo em função da frequência, para isso é necessário fazer a translação horizontal de cada curva isotérmica obtendo, assim, uma curva contínua na escala logarítmica.

Nesta relação é possível construir uma curva ( $\log|E^*|$ ,  $\log f$ ) para uma temperatura de referência escolhida arbitrariamente, geralmente 10°C, com a translação dos eixos das frequências de cada isotérmica relacionada com a isotérmica correspondente e a temperatura de referência, até que os pontos de mesmo  $|E^*|$  coincidam, obtendo a curva denominada de curva mestre. Ela permite obter valores de módulo para frequências que não são alcançadas em ensaios, conforme mostra o exemplo da Figura 80.

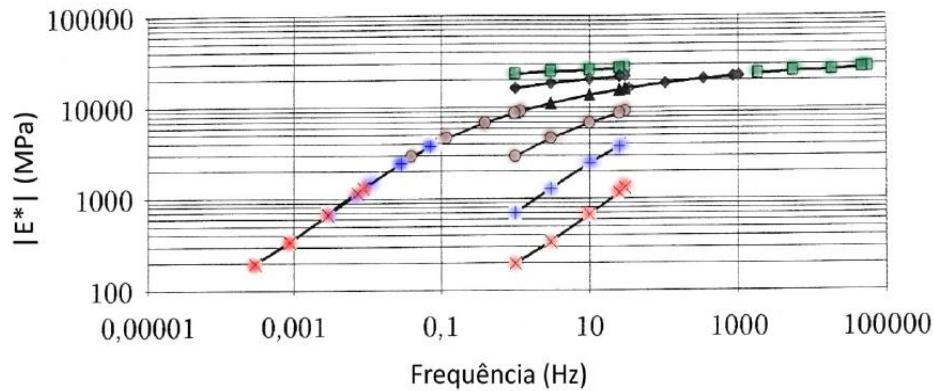


Figura 80: Curvas de equivalência frequência – temperatura.

A curva equivalência frequência – temperatura 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 frequência.

### 6.3.3 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 (Figura 81), permitindo, assim, visualizar a redução do  $|E^*|$  da mistura com o acréscimo da temperatura. Cada uma das curvas representa as frequências de ensaio. Semelhante às curvas isotérmicas, está representação permite verificar a susceptibilidade térmica das misturas asfálticas, em função da variação do módulo pela variação da temperatura.

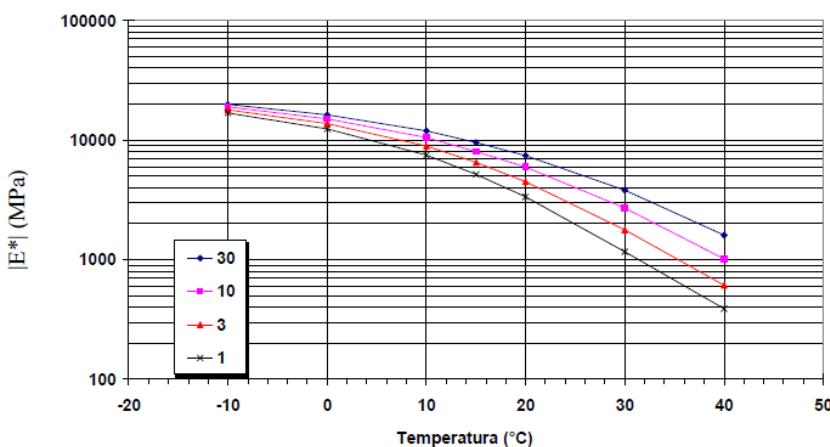


Figura 81: Curvas isócronas de uma mistura asfáltica.

### 6.3.4 Curva Espaço de Black

O Espaço de Black é representado por meio do gráfico, em escala logarítmica, do valor absoluto do módulo complexo ( $|E^*|$ ) em função do ângulo de fase ( $\varphi$ ). 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. Através da Figura 82 é possível analisar um exemplo do gráfico Espaço de Black.

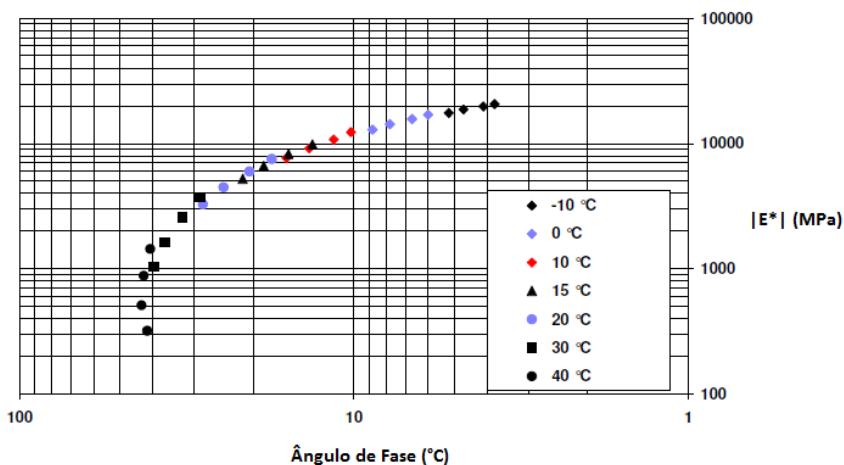


Figura 82: Espaço de Back de uma mistura asfáltica.

A curva do Espaço de Back permite visualizar a zona dos módulos onde acontece o decréscimo do ângulo de fase para elevadas temperaturas. Esta curva mostra a relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase permitindo, assim, a determinação da componente elástica do módulo de rigidez, sendo esta característica obtida por correlação linear entre o módulo e o ângulo de fase, correspondentes a temperaturas inferiores a 30°C.

### 6.3.5 Representação Cole-Cole

A representação do módulo complexo no plano cole-cole consiste na apresentação dos 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 83.

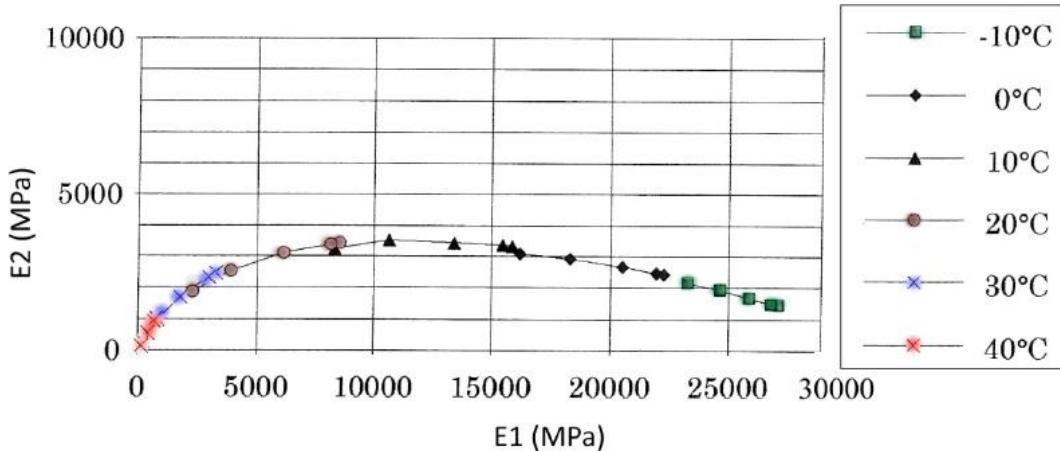


Figura 83: Representação do módulo complexo no Plano Cole-Cole.

### 6.3.6 Ensaio de módulo dinâmico

Na determinação do módulo dinâmico das misturas CA-TLA e CA-E utilizou-se o mesmo equipamento (modelo CS 7800) empregado na realização dos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos, porém o programa utilizado foi o UTS018 seguindo os procedimentos de cálculo da norma EN 12697-24 (2004). Os ensaios para determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase foram realizados em corpos de prova prismáticos, simplesmente apoiados nas extremidades, utilizando a forma de carregamento senoidal, sendo este empregado sob o modo de deformação controlada. Neste ensaio uma carga  $F_0/2$  (Figura 84) é aplicada nos terços médios da amostra, induzindo uma deformação de tração pré-estabelecida. Estipulou-se uma deformação de tração constante na base da amostra de 50 microstrain, em função de que a determinação do módulo da mistura asfáltica é realizada no domínio linear, ou seja, a baixas deformações.

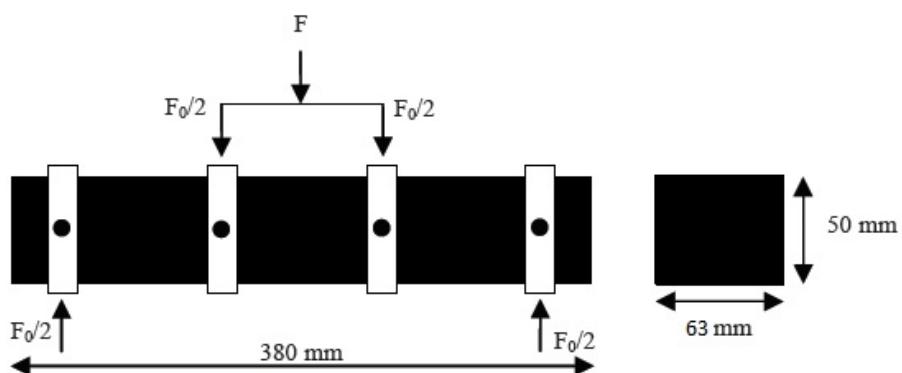


Figura 84: Esquema do carregamento aplicado no ensaio de flexão em quatro pontos em vigas prismáticas.

As frequências aplicadas nos ensaios foram 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2 e 0.1Hz, salienta-se que estes ensaios foram conduzidos em ordem decrescente de frequência. O número de ciclos de

carga empregado foi de 100 ciclos para todas as frequências estabelecidas e as temperaturas utilizadas na realização dos ensaios foram de 15, 20 e 25 °C.

Na realização dos sete ensaios, para cada temperatura, foi utilizada uma mesma viga, pois o número reduzido de ciclos de carga não provoca uma considerável redução da rigidez do material. A amostra foi condicionada por um período de 2 horas, para cada temperatura ensaiada, em função do tempo necessário para o corpo de prova atingir a temperatura de ensaio.

## 7 LEVANTAMENTO EM CAMPO DO TRINCAMENTO DO PAVIMENTO

Este capítulo refere-se ao levantamento realizado em trechos da BR-290/RS, rodovia sob concessão da Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre S/A – Concepá, do trincamento do pavimento. O trecho escolhido foi o km 14 no sentido Porto Alegre-Osório.

### 7.1 LEVANTAMENTOS DO TRINCAMENTO DO PAVIMENTO NOS KM 14 DA BR-290/RS

Os levantamentos do trincamento do pavimento realizados em um trecho da BR-290/RS, no km 14 - sentido Porto Alegre-Osório, seguiram os critérios estabelecidos pelas normas do DNIT 005/2003 – TER “Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia” e DNIT 006/2013 – PRO “Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento”.

Este tipo de levantamento é destinado a determinar o estado da superfície do pavimento, expresso através da presença ou ausência de uma série de defeitos definidos, contabilizados e medidos. Os defeitos de superfície são considerados os danos ou deteriorações que surgem na superfície dos pavimentos asfálticos, podendo ser identificados a olho nu e classificados segundo uma terminologia normatizada.

De acordo com a norma DNIT 005/2003 - TER os defeitos avaliados no pavimento são os seguintes:

- Trincas FC-1: são trincas com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0mm;
- Trincas FC-2: são trincas com abertura superior a 1,0mm e sem erosão nas bordas;
- Trincas FC-3: são trincas com abertura superior a 1,0mm e com erosão nas bordas;
- Afundamento de Trilha de Rodas (ATR): medida, em milímetros, da deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de soleamento, podendo apresentar-se sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação;
- Panela ou buraco: cavidade que se forma no revestimento por diversas causas (inclusive por falta de aderência entre camadas superpostas, causando o deslizamento das camadas), podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação dessas camadas.

Primeiramente o levantamento consiste em localizar as superfícies de avaliação, sendo que em rodovias de pista dupla estas superfícies devem ser localizadas e demarcadas a cada 20 metros, na faixa mais solicitada pelo tráfego, em cada uma das pistas, conforme mostra a Figura 85.

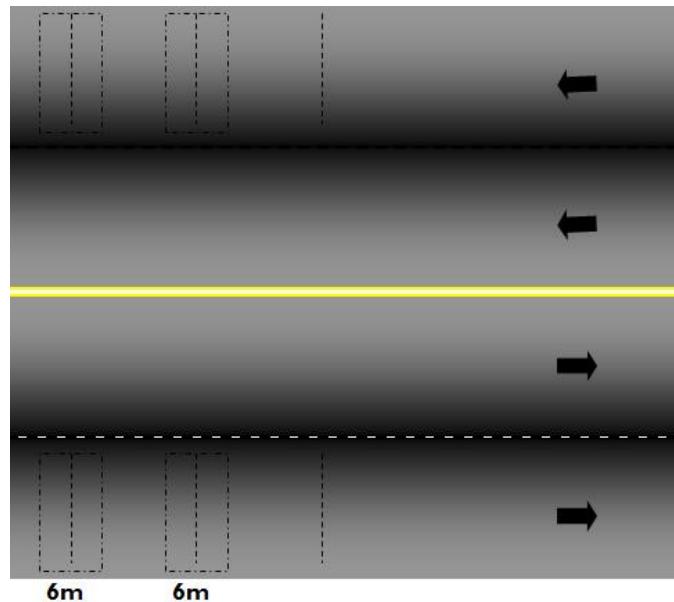


Figura 85: Localização das superfícies de avaliação em rodovias de pista dupla.

As superfícies de avaliação devem ser demarcadas sobre o pavimento utilizando pintura com tinta de demarcação. Cada estação recebe o número correspondente à estaca ou distância ao marco quilométrico. Esta demarcação deve coincidir com a seção transversal, tendo sua extremidade externa distante 6cm da borda do revestimento da pista de rolamento. Devem ser pintados mais dois traços, um 3,00m avante e outro 3,00m à ré, como apresentado na Figura 86.



Figura 86: Demarcação no pavimento das superfícies de avaliação.

Também, deve ser realizada a medida das flechas, em milímetros, em cada estação demarcada, com auxílio de uma treliça, Figura 87. Estas medidas são executadas nas trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE), devendo ser anotado o maior valor medido em cada trilha.



Figura 87: Treliça utilizada para determinar as flechas.

Para cada área demarcada deve ser anotada a presença de qualquer defeito no pavimento, de acordo com a norma DNIT 005/2003-TER, podendo ser utilizada um formulário padrão, Figura 88, estabelecido pela norma DNIT 006/2003-PRO.

Figura 88: Formulário para levantamento do trincamento do pavimento.

A Figura 89 mostra o levantamento do trincamento sendo realizado no km 14, sentido Porto Alegre-Osório.



Figura 89: Levantamento do trincamento do pavimento realizado no sentido Osório-Porto Alegre da BR-290/RS.

Após a identificação e classificação dos defeitos no pavimento, é verificada a condição do pavimento quanto ao estado de superfície através de um parâmetro denominado de Índice de Gravidade Global (IGG), o qual estabelece o grau de deterioração atingido pela superfície do pavimento.

## 8 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS OBTIDOS NESTA PESQUISA

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados nesta pesquisa, bem como: densidade aparente e grau de compactação das amostras, vida de fadiga à flexão em quatro pontos e por compressão diametral e resultados de módulo dinâmico. 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. Também, contempla os resultados obtidos no levantamento, realizado nos km 14 no sentido Porto Alegre-Osório da BR-290/RS, do trincamento do pavimento.

### 8.1 ENSAIOS DE DENSIDADE APARENTE E GRAU DE COMPACTAÇÃO NAS 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 das amostras extraídas das placas moldadas na usina de asfalto da Construtora Triunfo, apresentado na Figura 90, de acordo com a norma ABNT NBR 15573:2012. Também, foi determinado o grau de compactação destas amostras, conforme estabelecido pela norma DNIT 031/2006 – ES, e a percentagem de volume de vazios de cada amostra.



Figura 90: Ensaio para determinação da densidade aparente.

A Figura 91 e Figura 92 apresentam os resultados de densidade aparente obtidos para as vigotas moldadas com a mistura asfáltica CA-TLA e a mistura CA-E, respectivamente. Salienta-se que o valor da densidade de projeto para a mistura CA-TLA é 2,43, enquanto que a densidade de projeto para a mistura CA-E apresenta um valor de 2,36.

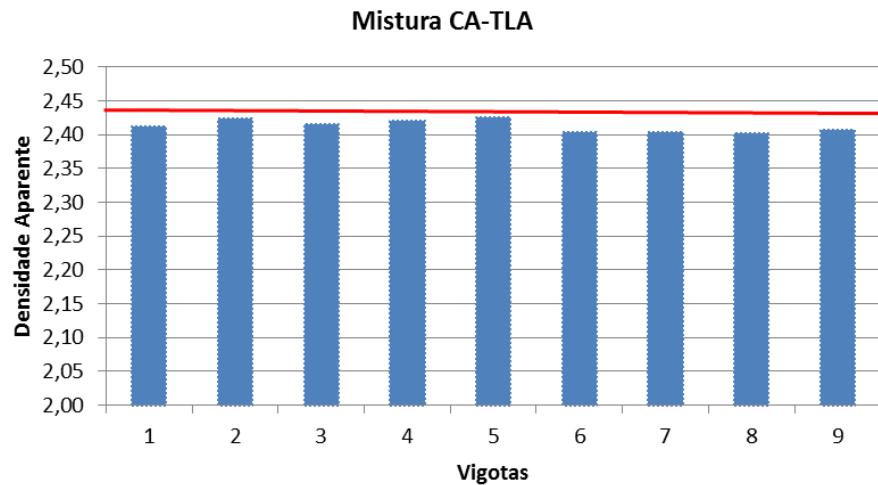


Figura 91: Densidade aparente das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.

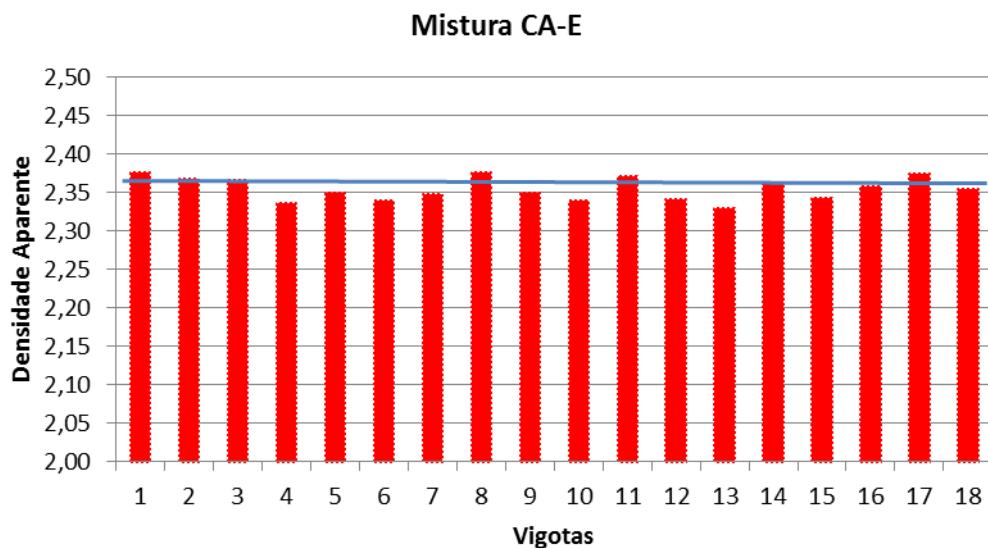


Figura 92: Densidade aparente das vigotas moldadas com a mistura CA-E.

Pode-se observar através das figuras mostradas acima 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.

Os resultados de volume de vazios (VV) e grau de compactação (GC) das vigotas produzidas com a mistura CA-TLA e CA-E estão apresentados na Figura 93 e Figura 94, respectivamente. Observa-se que os resultados de volume de vazios das duas misturas ficaram entre 3% e 5% e os graus de compactação obtidos para ambas as misturas ficaram 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.

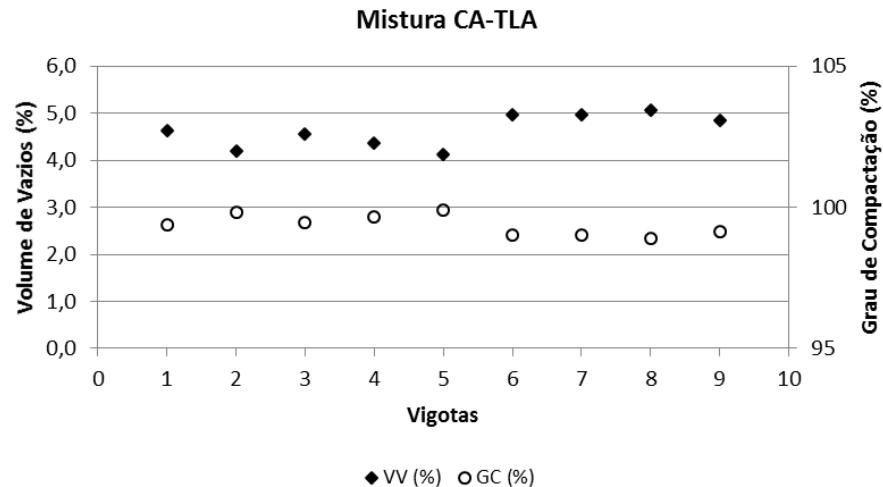


Figura 93: Resultados de VV (%) e GC (%) das vigotas moldadas com a mistura CA-TLA.

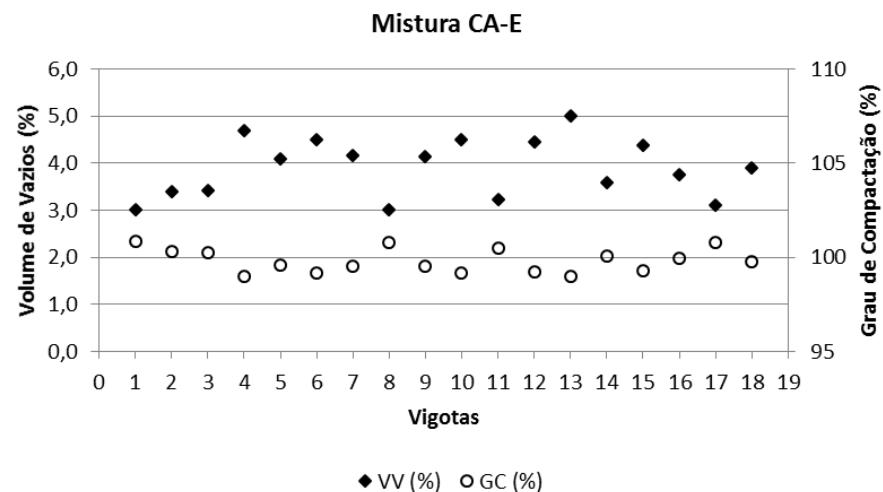


Figura 94: Resultados de VV (%) e GC (%) das vigotas moldadas com a mistura CA-E.

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 95, sendo determinada a densidade aparente, o volume de vazios e o grau de compactação destas partes.



Figura 95: Vigota dividida em quatro partes para ensaio de densidade aparente.

Os resultados obtidos para cada uma destas quatro partes estão mostrados na Figura 96 e Figura 97. Observa-se que os valores de densidade aparente, volume de vazios e grau de compactação apresentam uma pequena variação ao longo da vigota, sendo que o VV (%) apresentou resultados entre 3,0% e 3,4% e o GC (%) entre 100% e 101%.

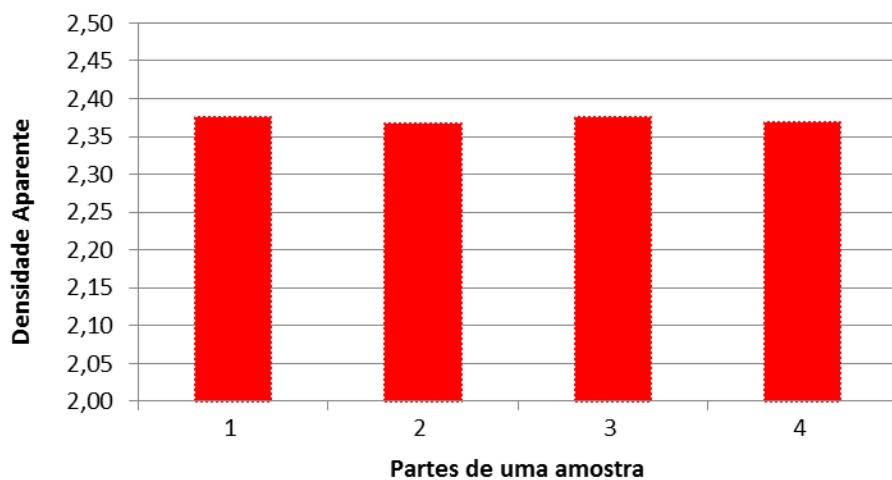


Figura 96: Densidade aparente das partes de uma vigota.

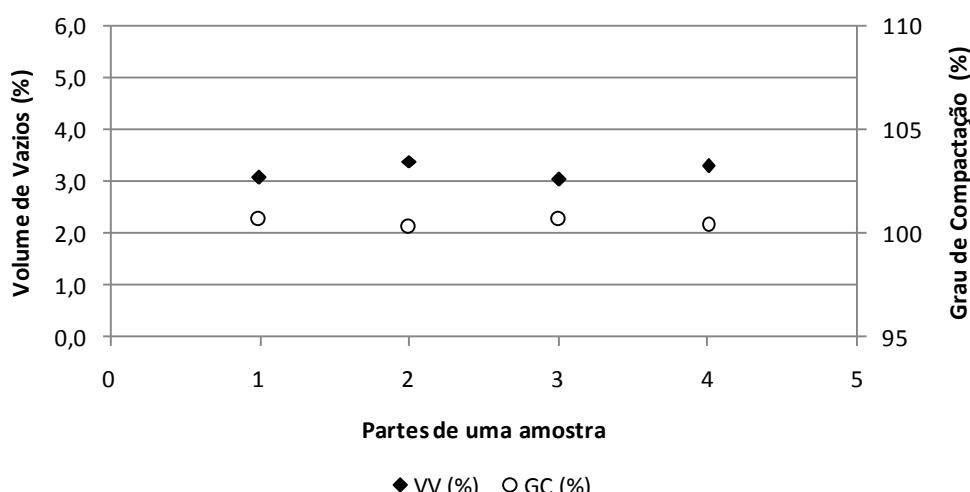


Figura 97: Resultados de VV (%) e GC (%) das partes de uma vigota.

Através da Figura 98, Figura 99, Figura 100 e Figura 101 é possível analisar 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.

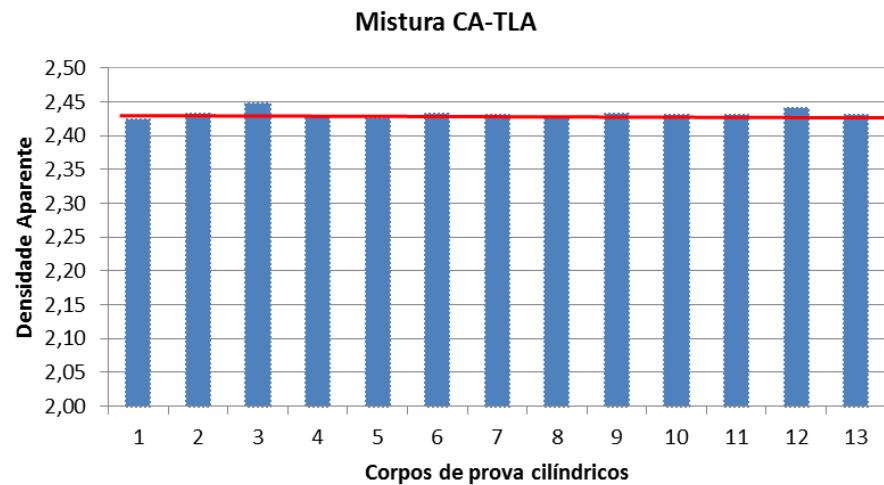


Figura 98: Densidade aparente dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA.

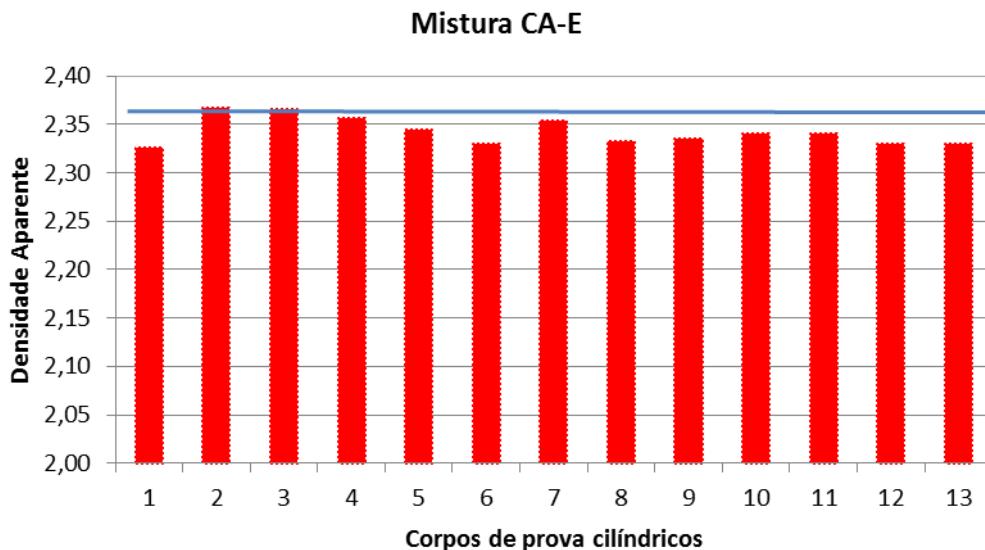


Figura 99: Densidade aparente dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.

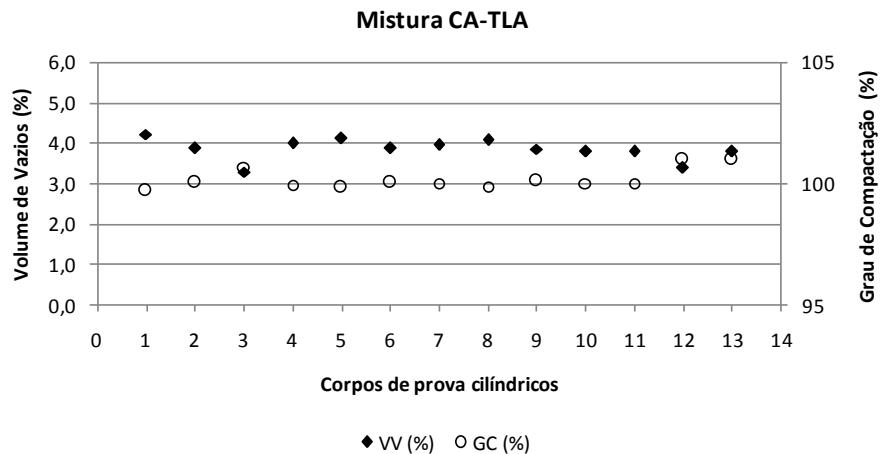


Figura 100: Resultados de VV (%) e GC (%) dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-TLA.

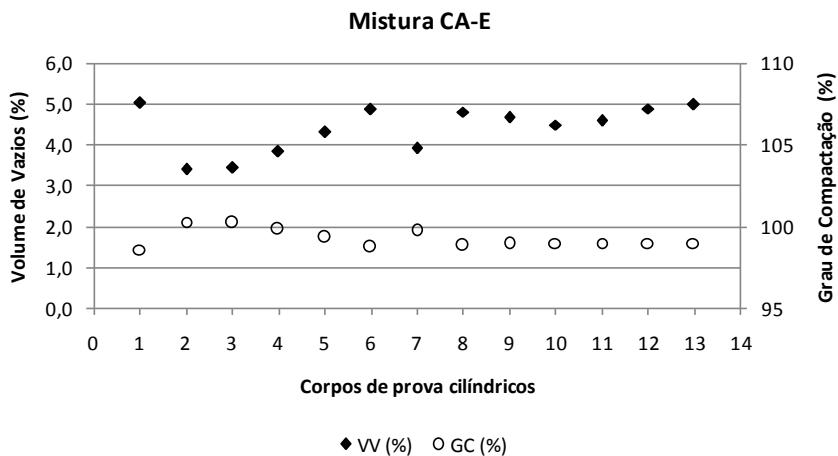


Figura 101: Resultados de VV (%) e GC (%) dos corpos de prova cilíndricos moldados com a mistura CA-E.

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 obtidos na mistura CA-E. Os resultados obtidos para o volume de vazios e o grau de compactação da mistura CA-TLA ficaram entre 3% e 4% e 100% e 101%, respectivamente. Já o VV (%) da mistura CA-E apresentou uma maior variação ficando entre 3% e 5% e o GC (%) mostrou valores entre 99% e 100%.

## 8.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O desempenho de um pavimento flexível está consideravelmente ligado às características de resistência à fadiga do material asfáltico empregado. A interpretação destas características está diretamente relacionada às manifestações de trincamento por fadiga que ocorrem no pavimento. Comumente as suas características são expressas em relação à tensão de tração ou deformação de tração inicial atuante em função do número de repetições de carga até a ruptura.

Nesta pesquisa, os ensaios de fadiga por compressão diametral foram realizados em corpos de prova extraídos de placas moldadas com a mistura CA-E e CA-TLA. Estes ensaios foram realizados com modo de carregamento a tensão controlada, com temperatura de 25°C 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 módulo de resiliência obtidos neste ensaio estão apresentados na Figura 102, através da qual é possível observar que a mistura CA-TLA apresentou valores superiores de MR em relação à mistura CA-E, resultados estes esperados de acordo com a literatura. Salienta-se que a RT utilizada foi de 0,83 MPa para a mistura CA-E e de 1,59 MPa para a mistura CA-TLA, obtidas a partir da média de quatro corpos de prova.

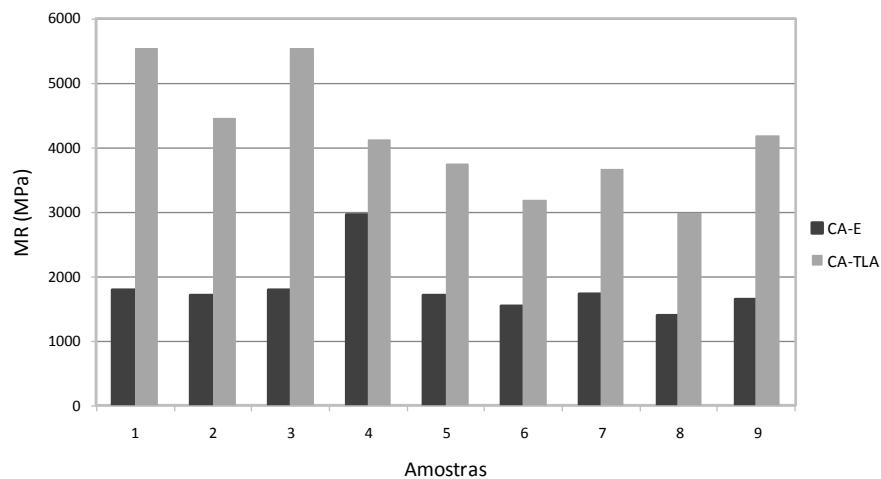


Figura 102: Valores de MR das misturas estudadas obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral.

Os resultados fadiga determinados nos ensaios de fadiga por compressão diametral foram ajustados de acordo com os modelos  $N=a*(\varepsilon_t)^b$  e  $N=a*(\sigma_t)^b$  gerados por meio das curvas de Wöhler. Na Tabela 13 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 13: Parâmetros dos modelos de fadiga das misturas estudadas (curvas de Wöhler).

Mistura	Tensão de Tração (MPa)			Diferença de Tensões (MPa)			Deformação de Tração (MPa)		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
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

A Figura 103, Figura 104 e Figura 105 apresentam as curvas de fadiga das misturas estudadas em relação à tensão de tração, diferença de tensões e deformação específica inicial, respectivamente.

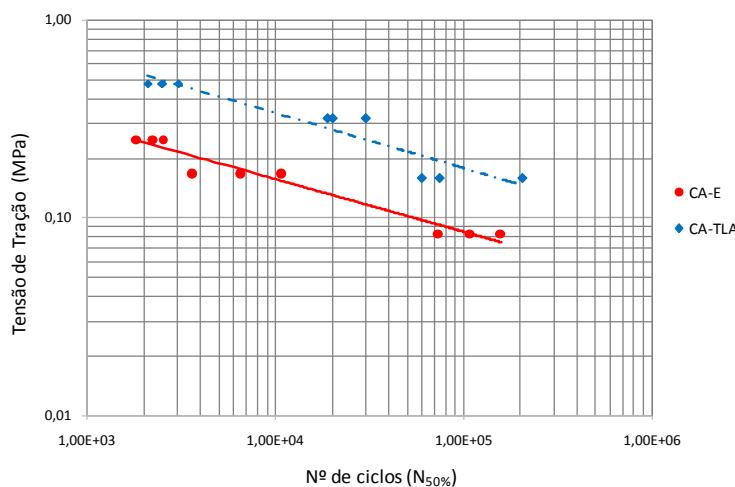


Figura 103: Curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da tensão de tração.

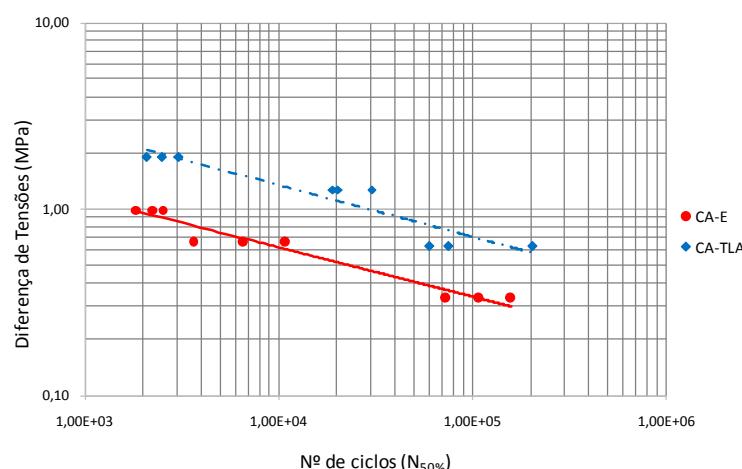


Figura 104: Curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da diferença de tensões.

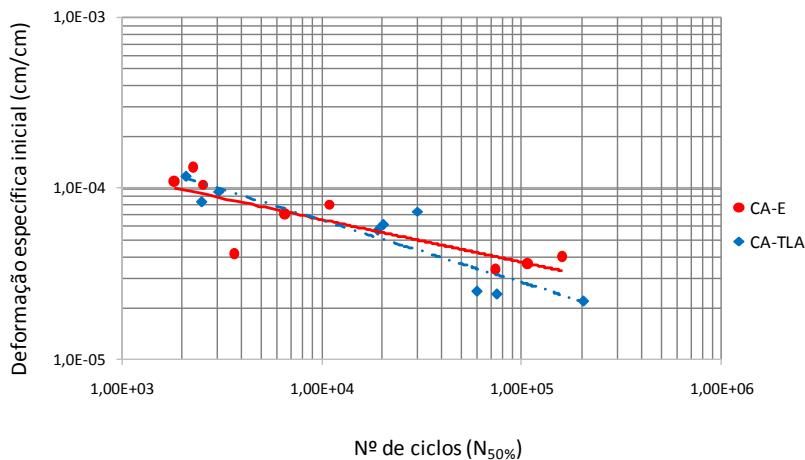


Figura 105: Curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA em função da deformação específica inicial.

A partir das curvas apresentadas é possível notar que, em 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 diferentes e, assim, distribuem tensões de maneira diferente.

Também, através do ensaio de fadiga por compressão diametral foi possível determinar a energia dissipada ao longo do ensaio para as misturas estudadas, considerando a área dentro do laço histerético formado pela tensão versus a deformação. Na Figura 106 estão apresentados os resultados de energia dissipada obtidos para as misturas CA-E e CA-TLA nos diferentes níveis de tensão ensaiados.

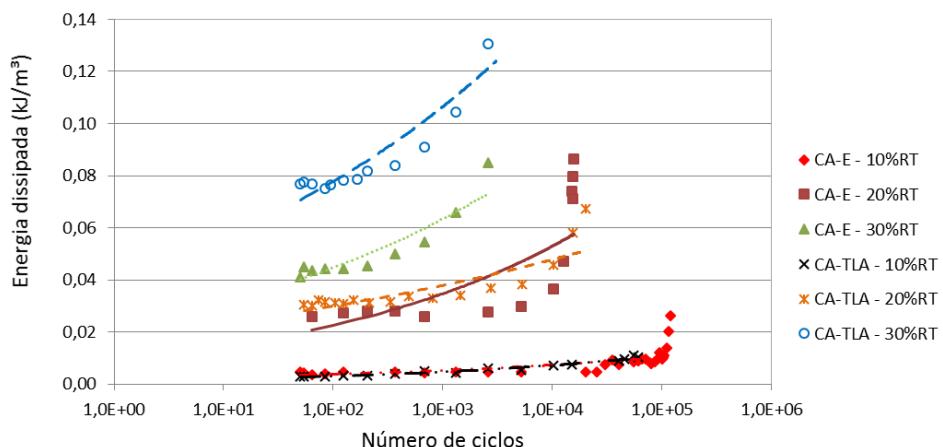


Figura 106: Energia dissipada obtida nos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada.

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 na literatura. Para baixas proporções de RT, 10% e 20%, o comportamento das misturas CA-TLA e CA-E em relação à energia dissipada 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 bilinear, 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 do CA-E, para cada nível.

### 8.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

Nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos, realizados à deformação controlada, os critérios estabelecidos para término do ensaio foram à redução em 50% da rigidez inicial da mistura, estabelecido pela norma AASHTO T321 (2007), e quando o número de ciclos atingisse um milhão ( $10^6$ ).

O tempo necessário para um ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos, com frequência de 10Hz, atingir  $10^6$  ciclos são de 27,8 horas, enquanto que um ensaio de fadiga por compressão diametral, com frequência de 1Hz, leva um período de 11,6 dias para alcançar 1 milhão de ciclos.

A escolha de término dos ensaios de fadiga em  $10^6$  ciclos, estabelecida no cronograma inicial desta pesquisa, deve-se ao fato que em diversas pesquisas realizadas no Brasil os ensaios de fadiga por compressão diametral foram levados até  $10^6$  ciclos, como mostram os gráficos da Figura 107. Além disso, levou-se em consideração o tempo estipulado para a realização de cada ensaio de flexão em quatro pontos e compressão diametral, em função dos comparativos que serão realizados entre as duas metodologias de ensaio.

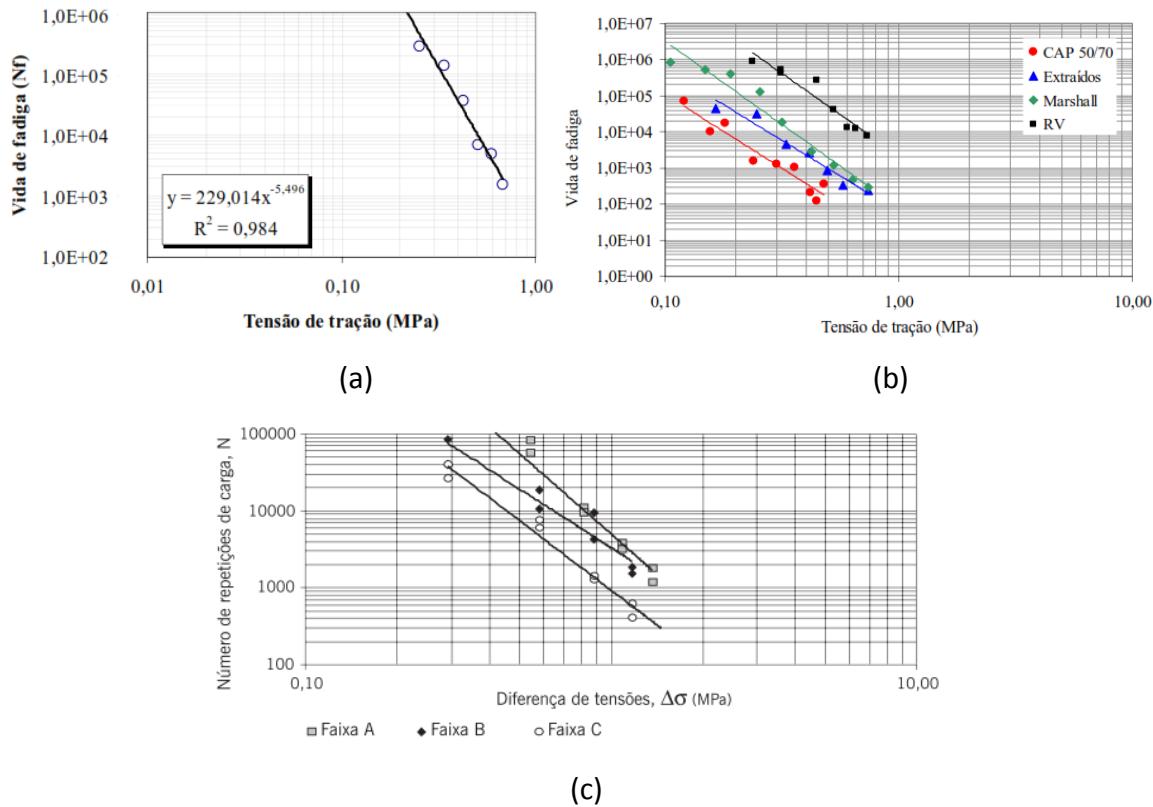


Figura 107: Resultados de vida de fadiga, obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral, realizados por (a) Brito<sup>6</sup> (2006), (b) Rohde<sup>7</sup> (2007) e (c) Bernucci<sup>8</sup> *et al.* (2010).

Em função das seis amostras de CA-TLA e CA-E, ensaiadas com deformação controlada de  $100\mu\epsilon$  e  $200\mu\epsilon$ , atingirem um milhão de ciclos e não apresentarem uma redução de 50% da rigidez inicial, conforme os dados apresentados na Tabela 14, optou-se por empregar como critério de término do ensaio a redução de 50% da rigidez inicial e, assim, os ensaios ultrapassaram  $10^6$  ciclos e o período de duração foi bem mais extenso. Por isso, também, optou-se por realizar os ensaios em níveis mais elevados de deformação, 400, 600 e  $800\mu\epsilon$ .

<sup>6</sup> BRITO, L. A. T. Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2006.

<sup>7</sup> ROHDE, L. Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2007.

<sup>8</sup> BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2010.

Tabela 14: Resultados de vida de fadiga das misturas estudadas nesta pesquisa.

Misturas	CA-TLA	CA-E
Deformação ( $\mu\epsilon$ )	Número de Ciclos	Número de Ciclos
100	1,00E+06	1,00E+06
	1,00E+06	1,00E+06
	1,00E+06	1,00E+06
200	1,00E+06	1,00E+06
	1,00E+06	1,00E+06
	1,00E+06	1,00E+06
400	2,07E+06	4,94E+06
	1,83E+06	2,84E+06
	2,28E+06	2,33E+06
600	1,51E+05	5,24E+05
	9,33E+04	3,76E+05
	4,05E+05	1,41E+05
800	1,72E+04	4,73E+04
	2,17E+04	5,80E+04
	2,11E+04	1,07E+05

Os parâmetros obtidos do modelo  $N=a^*(\epsilon_t)^b$  gerado em função da deformação de tração são apresentados na Tabela 15. A Figura 108 mostra as curvas de fadiga das misturas CA-E e CA-TLA.

Tabela 15: Parâmetros obtidos para os modelos de fadiga determinados no ensaio de flexão à deformação controlada.

Parâmetro	CA-E	CA-TLA
a	$3 \times 10^{-13}$	$2 \times 10^{-17}$
b	-5,6	-6,76
R <sup>2</sup>	0,93	0,96

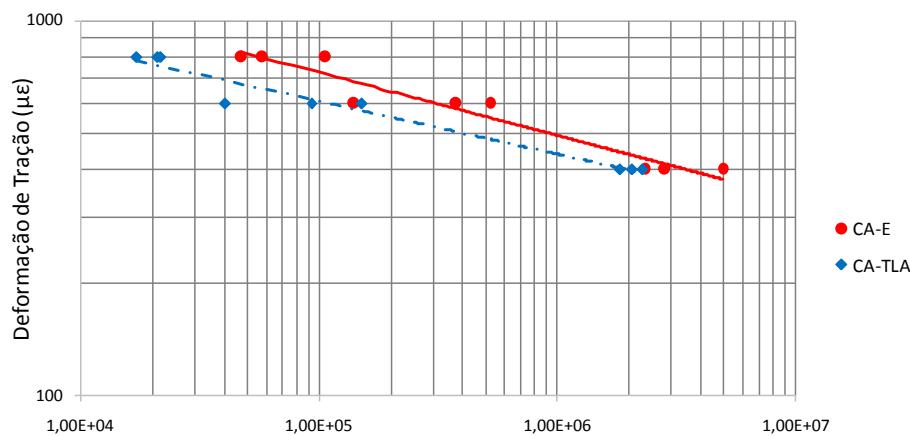


Figura 108: Curvas de fadiga das misturas estudadas em função da deformação de tração.

De acordo com a literatura estudada 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 CAP 60/85, apresentou resultados de vida de fadiga maiores no ensaio à tensão controlada, enquanto a mistura CA-E, com CAP 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.

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 109. Nota-se que a mistura CA-TLA apresentou uma rigidez na flexão maior, com valores entre 4394 MPa e 5745 MPa, que a obtida pela mistura CA-E, com resultados variando entre 2655 MPa e 3147 MPa.

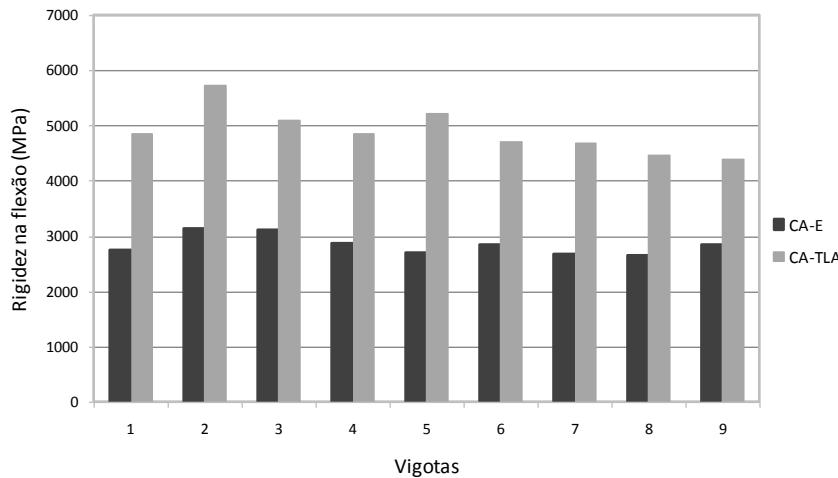


Figura 109: Rigidez na flexão das misturas estudadas - ensaio a deformação controlada.

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 110.

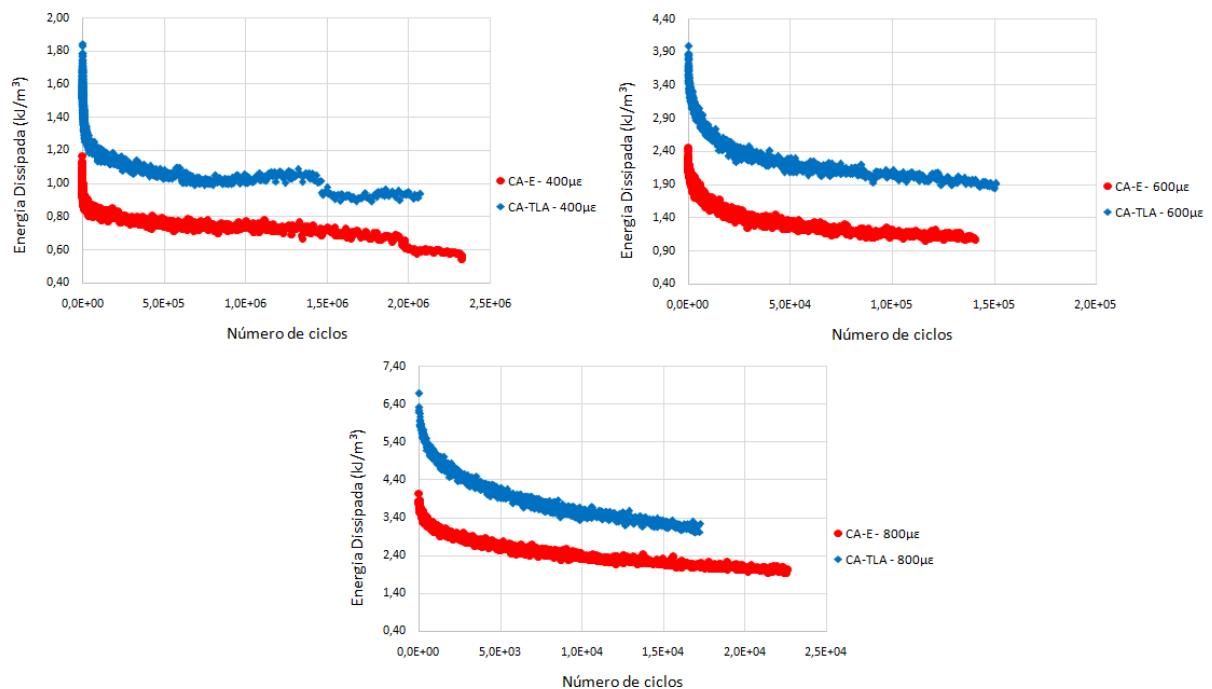


Figura 110: Energia dissipada obtida nos ensaios de fadiga à flexão sob deformação controlada.

Observa-se que para todos os níveis ensaiados, 400 $\mu\epsilon$ , 600 $\mu\epsilon$  e 800 $\mu\epsilon$ , a mistura CA-TLA dissipou mais energia ao longo do ensaio em comparação com a mistura CA-E.

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 houve 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.

## 8.4 COMPARATIVOS DA VIDA DE FADIGA

### 8.4.1 Comparativo entre os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos à deformação e tensão controlada

Além dos ensaios de flexão à deformação controlada, também, foram realizados ensaios de flexão à tensão controlada na mistura CA-E. 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<sup>9</sup> (1991), onde a resistência à tração na flexão pode ser considerada três vezes maior que a resistência à tração por compressão diametral ( $\sigma_f \approx 3\sigma_c$ ). Através da Figura 111 verifica-se a vida de fadiga da mistura CA-E no ensaio de flexão em quatro pontos à tensão e deformação controlada.

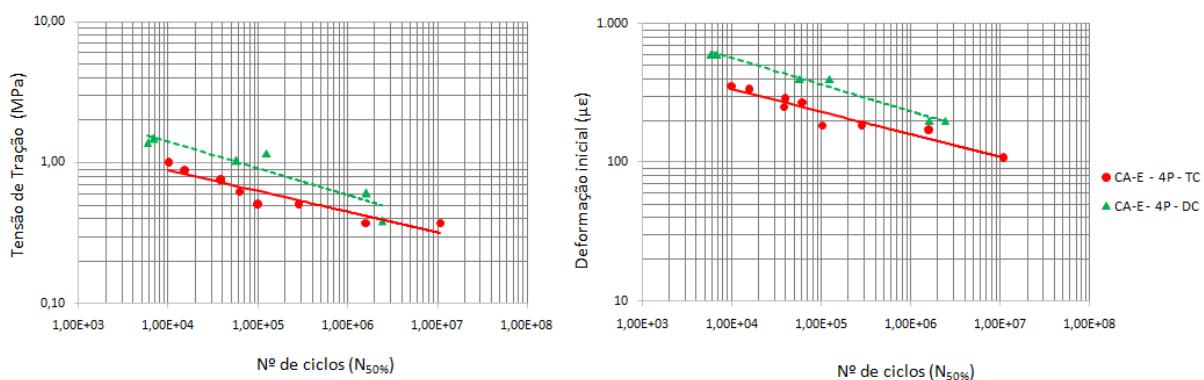


Figura 111: Curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas no ensaio de flexão à tensão (TC) e deformação (DC) controlada.

<sup>9</sup> 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.

No ensaio a deformação controlada a vida de fadiga foi maior em comparação com os resultados determinados no ensaio a tensão controlada, conforme salientado na literatura pesquisada.

#### 8.4.2 Comparativo entre o ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos e o ensaio de fadiga por compressão diametral

Na Figura 112 e Figura 113 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.

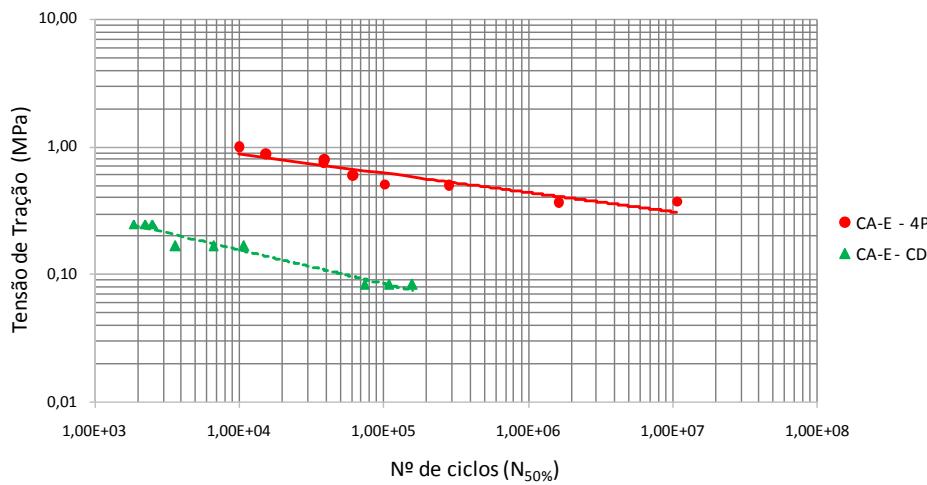


Figura 112: Curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos (4P) e por compressão diametral (CD) em função da tensão de

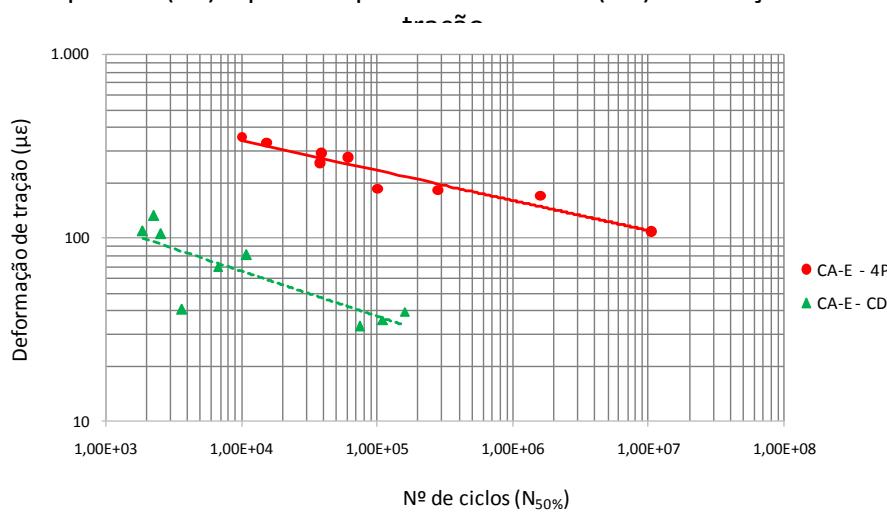


Figura 113: Curvas de fadiga da mistura CA-E obtidas nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos (4P) e por compressão diametral (CD) em função da deformação de tração.

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. Conforme mencionado por diferentes pesquisadores 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.

## 8.5 IMPACTO DA VIDA DE FADIGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

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 *softwares* intitulado Kenpave, um *software* para análise e projeto de pavimentos. O programa foi desenvolvido por Huang<sup>10</sup> (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 (*shift factor*), os quais consideram as diferenças existentes entre as condições de ensaio em laboratório e as observadas em campo, no entanto nestes modelos não foram adotados fatores laboratório-campo.

Neste estudo as análises foram realizadas empregando uma estrutura utilizada na BR 290 no trecho da *Freeway*, Figura 114, em função de serem conhecidas as propriedades mecânicas do material utilizado neste pavimento e por esta estrutura também ter sido estudada em outras pesquisas realizadas anteriormente. 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.

---

<sup>10</sup> HUANG, Y. H. Pavement Analysis and Design. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 775 p.

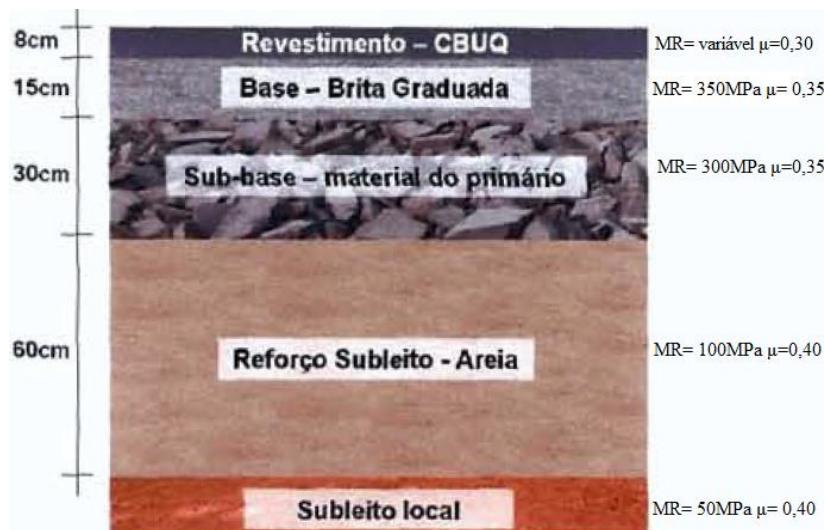


Figura 114: Estrutura de pavimento empregada na análise.

Na Tabela 16 estão apresentados os valores de tensão e deformação determinados no programa Kenlayer e a vida de fadiga (N), mostrada na Figura 115, obtida pela aplicação do modelo gerado em laboratório a partir das curvas de Wöhler. Nota-se que a mistura CA-TLA apresenta uma vida de fadiga maior em comparação com a mistura CA-E considerando o critério de ruptura de deformação específica inicial de tração, enquanto para o critério de ruptura de tensão de tração a mistura CA-E apresentou maior vida de fadiga.

Tabela 16: 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	0,44	2,5E+02	2,45E-04	309
CA-TLA	1,16	2,1E+02	1,85E-04	913

\* Número de ciclos do modelo obtido no ensaio de compressão diametral

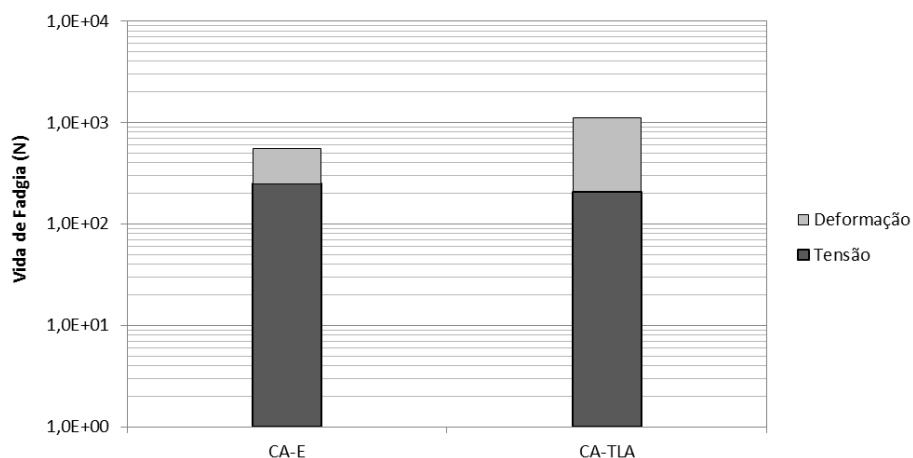


Figura 115: Vida de fadiga das estruturas estudadas.

Utilizou-se a mesma estrutura de pavimento e os dados de deformação obtidos no Kenlayer para obter 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 17 e a Figura 116 mostram os resultados de fadiga obtidos, sendo que a mistura CA-TLA apresenta uma maior vida de fadiga em relação à mistura CA-E. Salienta-se que esta análise pode ser modificada facilmente, caso novas espessuras ou novos valores de módulo de resiliência sejam adotados.

Tabela 17: 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	2,45E-04	4,9E+07
CA-TLA	1,85E-04	3,4E+08

\*Número de ciclos do modelo obtido no ensaio de flexão em quatro pontos

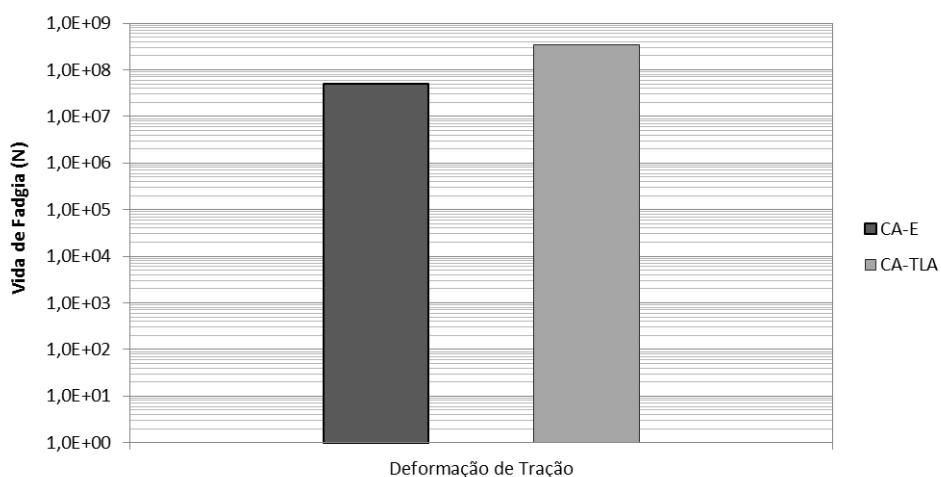


Figura 116: Vida de fadiga das estruturas analisadas (modelo gerado no ensaio de flexão à deformação controlada).

Além dos modelos estabelecidos a partir dos estudos conduzidos por Wöhler existem outros modelos bastante difundidos, como o desenvolvido por Tayebali<sup>11</sup> *et al.* (1994) – SHRP A-003A, o modelo para misturas asfálticas existente no programa MEPDG

<sup>11</sup> 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.

(*Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide*) e o modelo SHRP A-003A considerando a energia dissipada. A partir dos critérios estabelecidos para os ensaios de fadiga realizados nesta pesquisa e dos resultados obtidos, validou-se os modelos abaixo para as misturas estudadas:

- **Modelo SHRP A-003A:** este modelo é apresentado na equação 20 e considera os efeitos da rigidez inicial e a percentagem de vazios preenchidos com ligante, sendo empregado em ensaios à deformação controlada. Os parâmetros obtidos para o modelo são apresentados na Tabela 18 e na Figura 117.

$$N = 2,738 * 10^5 * e^{0,077*VFA} * (\varepsilon_0)^{-3,624} * (S_0)^{-2,72} \quad (20)$$

$$\text{com } VFA = \frac{V_b}{V_b + V_v}$$

Onde:

$V_b$ = porcentagem do teor de ligante

$V_v$ = porcentagem do volume de vazios

$S_0$ = rigidez inicial (psi)

Tabela 18: Valores de deformação, rigidez inicial e vida de fadiga calculados (modelo SHRP A-003A adaptado – ensaio de flexão em quatro pontos à deformação controlada).

Mistura	Def. Tração (cm/cm)	Vb (%)	Vv (%)	So (Psi)	VFA	*N
CA-E	2,45E-04	5,25	4,00	412632,36	0,57	1,9E+03
CA-TLA	1,85E-04	5,10	4,10	755501,57	0,55	9,9E+02

\* Número de ciclos do modelo de SHRP A-003A - deformação controlada

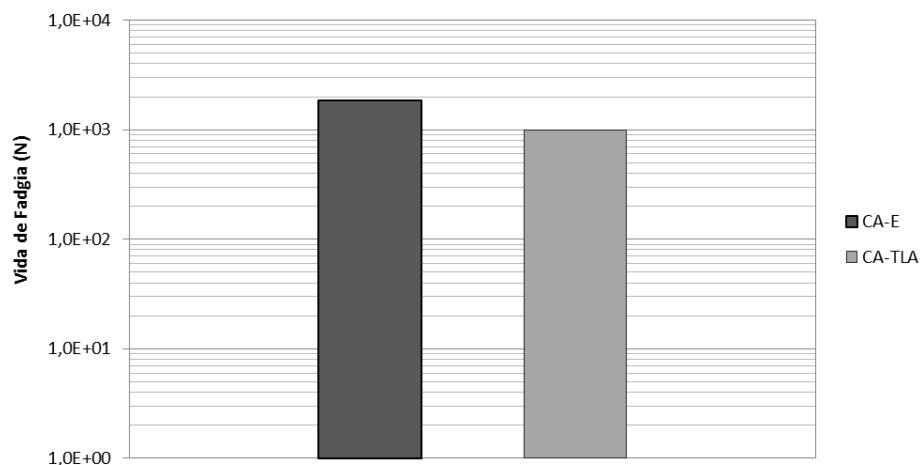


Figura 117: Vida de fadiga das estruturas analisadas (modelo SHRP A-003A adaptado).

- **Modelo do programa MEPDG:** este modelo para misturas asfálticas considera uma combinação para condições de carregamento à tensão e deformação controlada e está representado pela equação 21, sendo calibrado em campo para os Estados Unidos. Os parâmetros obtidos para o modelo são mostrados na Tabela 19 e na Figura 118.

$$N = 0,00432 * k'_1 * C * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} * \left(\frac{1}{|E^*|}\right)^{1,281} \quad (21)$$

com  $C = 10^M$

$$M = 4,84 * \left[ \frac{V_b}{V_b + V_v} - 0,69 \right]$$

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 * h_{rev})}}} \quad \text{para trincas iniciando na base do revestimento}$$

$$k'_1 = \frac{1}{0,01 + \frac{12,0}{1 + e^{(15,676 - 2,8186 * h_{rev})}}} \quad \text{para trincas iniciando no topo do revestimento}$$

Onde:

$h_{rev}$  = altura total do revestimento asfáltico (polegadas)

Tabela 19: Valores de deformação, módulo dinâmico e vida de fadiga calculados (modelo MEPDG adaptado).

Mistura	Def. Tração (cm/cm)	Vb (%)	Vv (%)	C	k'1	E*	*N
CA-E	2,45E-04	5,25	4,00	0,26	460,00	571593,72	3,9E+06
CA-TLA	1,85E-04	5,10	4,10	0,22	460,00	135900,36	6,4E+07

\* Número de ciclos do modelo empregado no MEPDG - deformação controlada

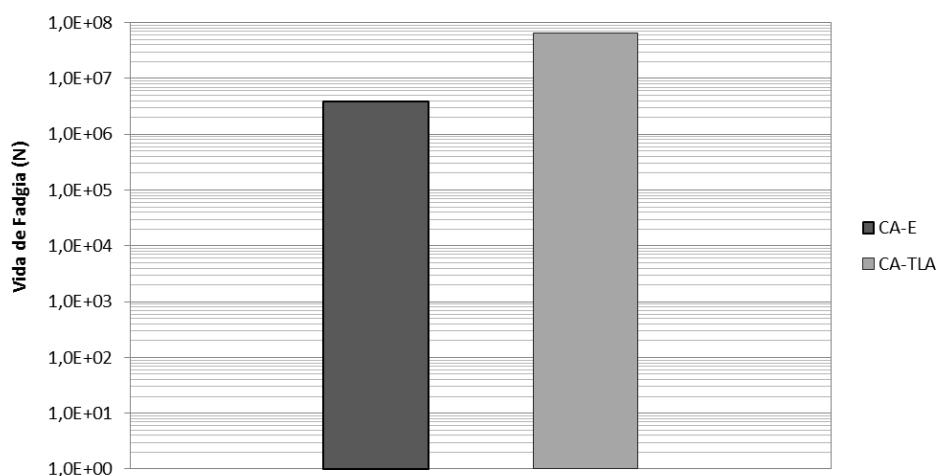


Figura 118: Vida de fadiga das estruturas analisadas (modelo MEPDG adaptado).

- **Modelo SHRP A-003A – energia dissipada:** este modelo (equação 22) considera a energia dissipada inicial obtida em ensaios de fadiga à flexão, relacionando o número de ciclos com a percentagem de vazios preenchidos com ligante e a energia dissipada inicial. Os parâmetros obtidos para o modelo são apresentados na Tabela 20 e na Figura 119.

$$N = 2,365 * e^{0,069*VFA} * (w_0)^{-1,882} \quad (22)$$

Onde:

$w_0$  = energia dissipada inicial

Tabela 20: Valores de deformação e vida de fadiga calculados (modelo SHRP A-003A para energia dissipada adaptado).

Mistura	Def. Tração (cm/cm)	Vb (%)	Vv (%)	W <sub>0</sub>	VFA	*N
CA-E	2,45E-04	5,25	4,00	0,045	0,57	8,4E+02
CA-TLA	1,85E-04	5,10	4,10	0,070	0,55	3,7E+02

\* Número de ciclos do modelo SHRP A-003A - energia dissipada - ensaio de flexão em 4P à deformação controlada

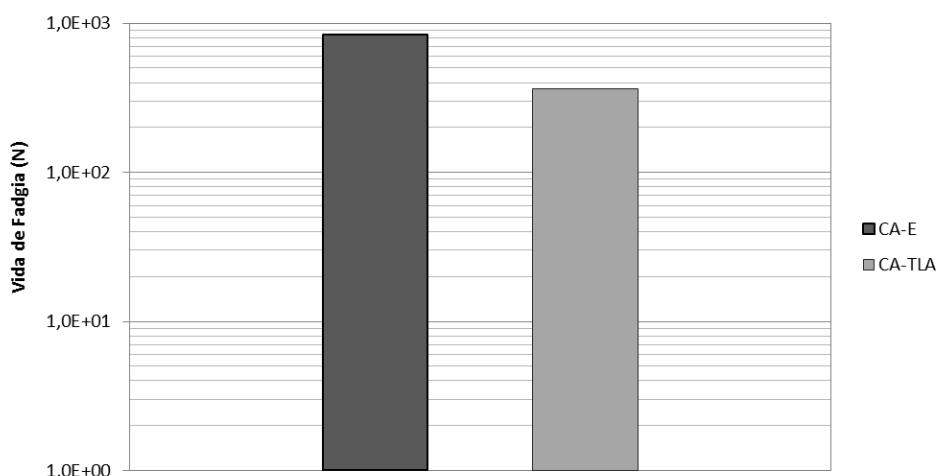


Figura 119: Vida de fadiga das estruturas analisadas (modelo SHRP A-003A para energia dissipada adaptado).

## 8.6 RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO DAS MISTURAS CA-E E CA-TLA

Nos ensaios de modulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA 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. Salienta-se que o ensaio de módulo dinâmico é realizado no mesmo dispositivo em que são realizados os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos.

Os resultados do ensaio de módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA encontram-se na Tabela 21 e Tabela 22, 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 21: 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 22: 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, as quais representam o módulo dinâmico em função da frequência de solicitação e, também, o ângulo de fase em função da frequência são apresentados na Figura 120 a Figura 123 para as temperaturas ensaiadas.

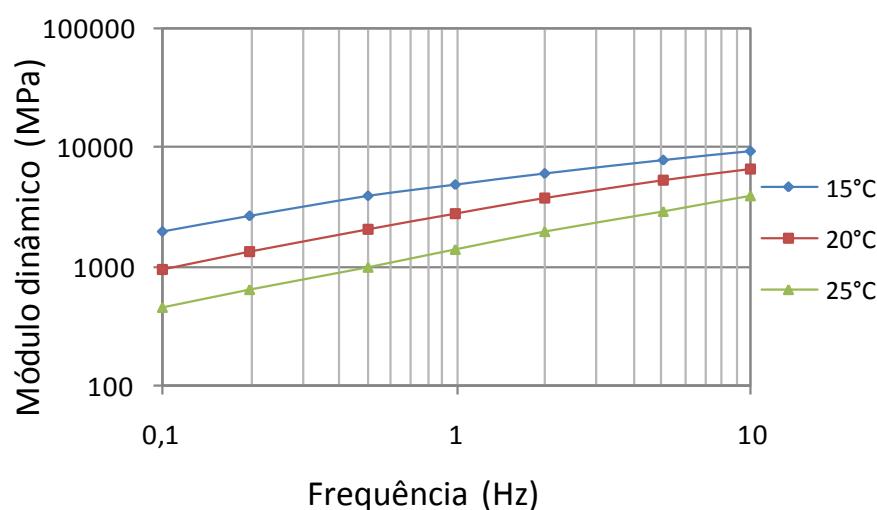


Figura 120: Módulo dinâmico da mistura CA-E em função das frequências de solicitação.

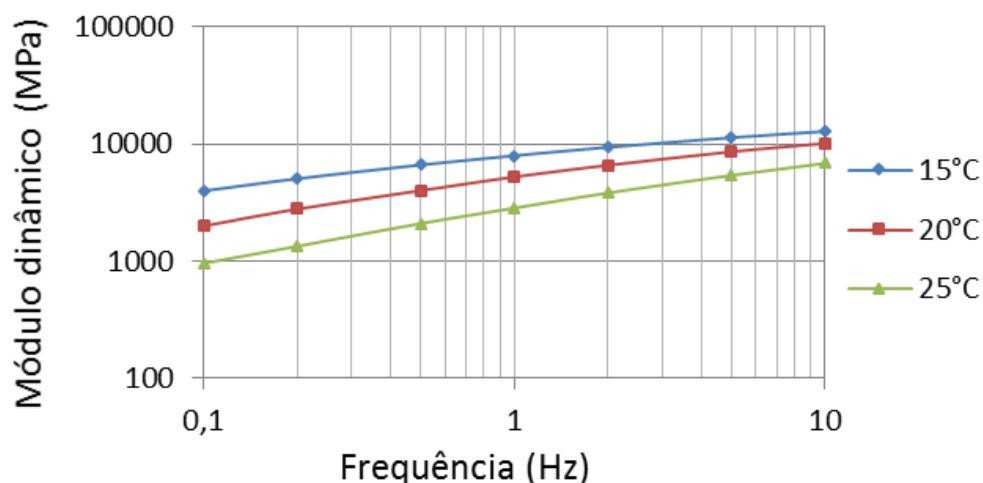


Figura 121: Módulo dinâmico da mistura CA-TLA em função das frequências de solicitação.

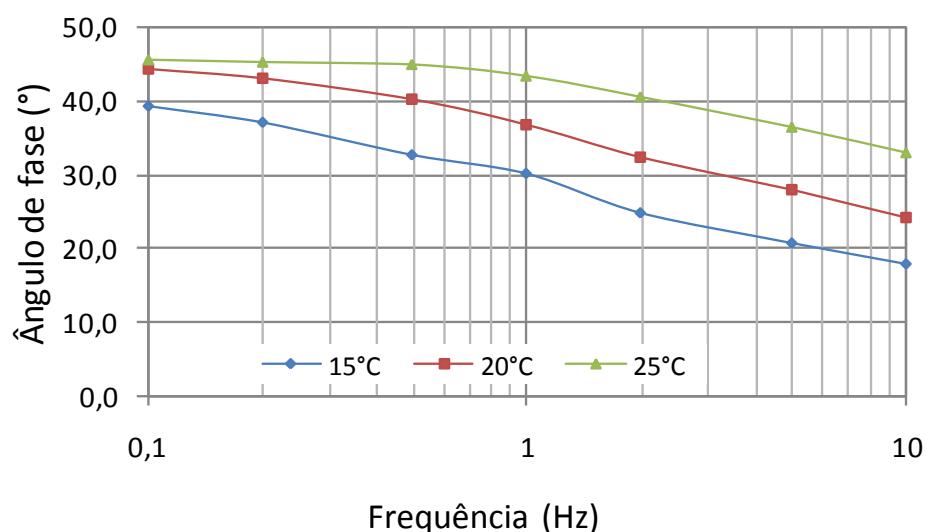


Figura 122: Ângulos de fase da mistura CA-E em função das frequências de solicitações.

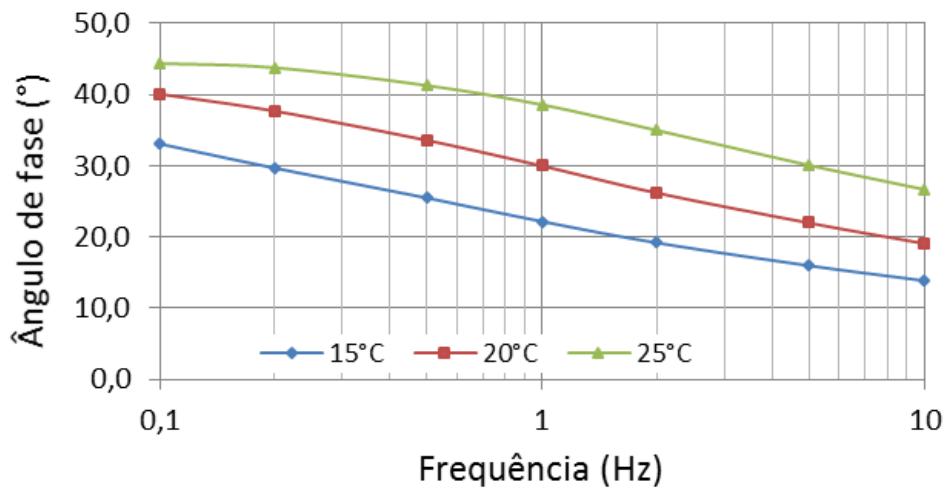


Figura 123: Ângulos de fase da mistura CA-TLA em função das frequências de solicitação.

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.

Na Figura 124 e Figura 125 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.

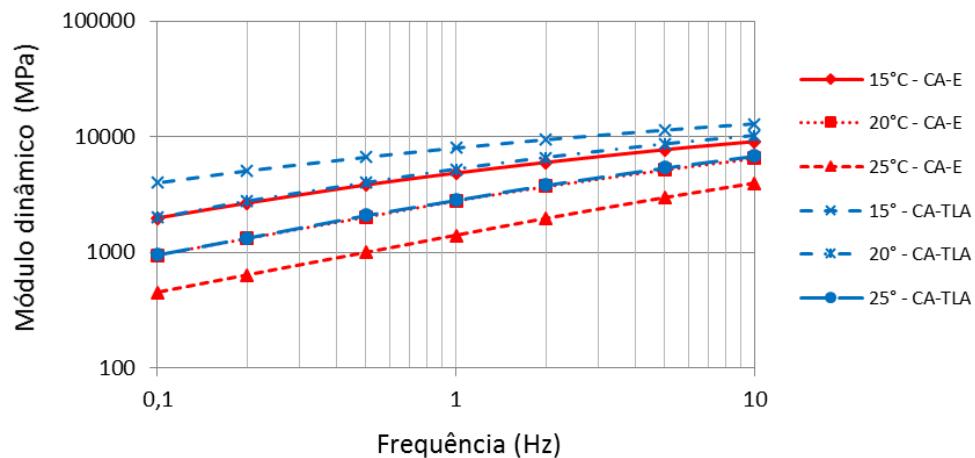


Figura 124: Módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA.

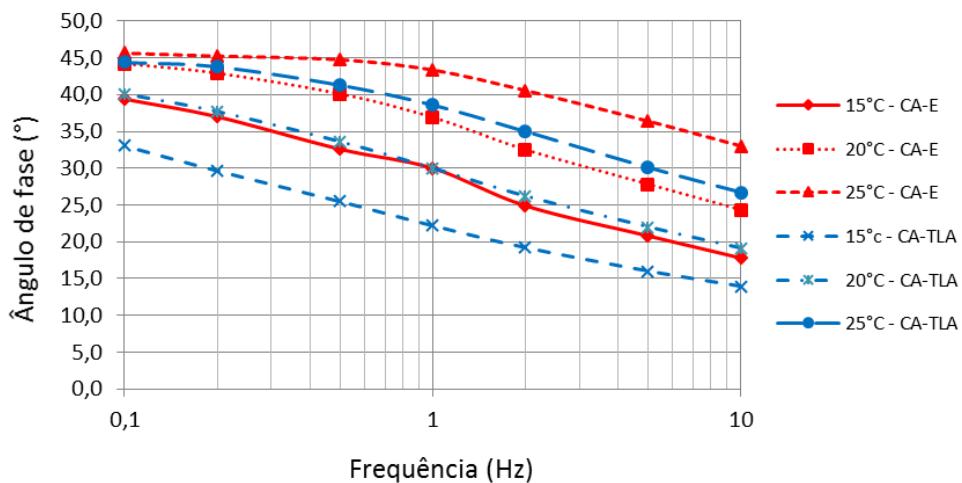


Figura 125: Ângulo de fase das misturas CA-E e CA-TLA.

Observa-se que a mistura CA-TLA apresentou um módulo dinâmico maior em relação ao da mistura CA-E, para todas as temperaturas ensaiadas. 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. Salienta-se que esta dispersão mostra a susceptibilidade cinética das misturas, pois quanto maior a frequência de ensaio menor é a dispersão dos resultados do módulo dinâmico, ou seja, quanto mais rápida é a aplicação da solicitação melhor é o valor de  $|E^*|$ .

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 solicitação 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 Mestra), das curvas isócronas, do espaço de Black e do plano Cole-Cole, conforme segue.

#### 8.6.1 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 viscoelástico 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.

Na Figura 126 e Figura 127 são apresentadas as curva frequência-temperatura das misturas CA-E e CA-TLA, respectivamente, para a temperatura de referência de 20°C

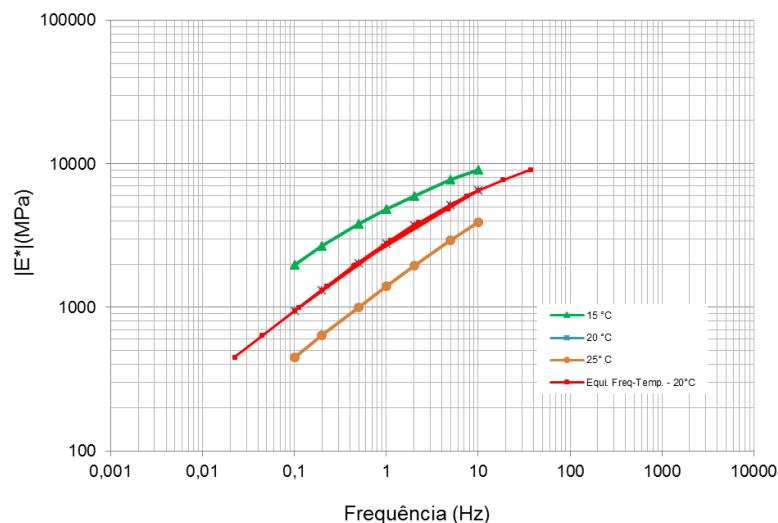


Figura 126: Curva frequência-temperatura da mistura CA-E.

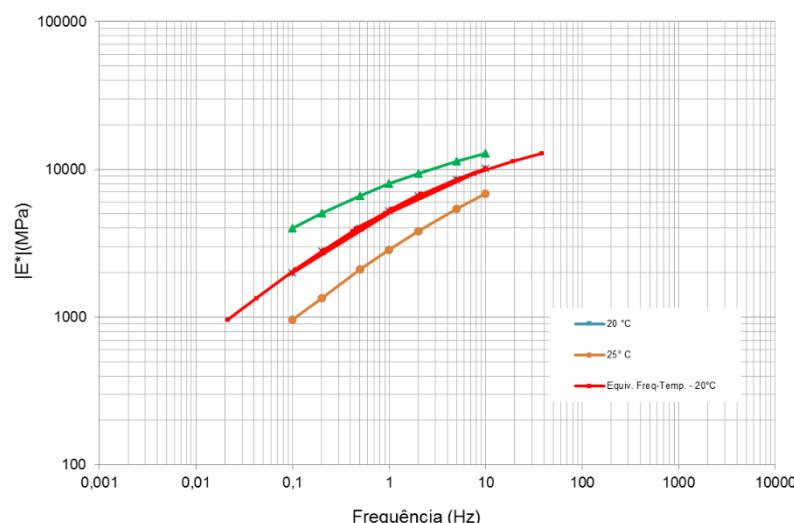


Figura 127: Curva frequência-temperatura da mistura CA-TLA.

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 suscetível às variações de temperatura e de frequência. Na Figura 128 é possível observar o comportamento das duas representações da curva frequência-temperatura das misturas CA-E e CA-TLA.

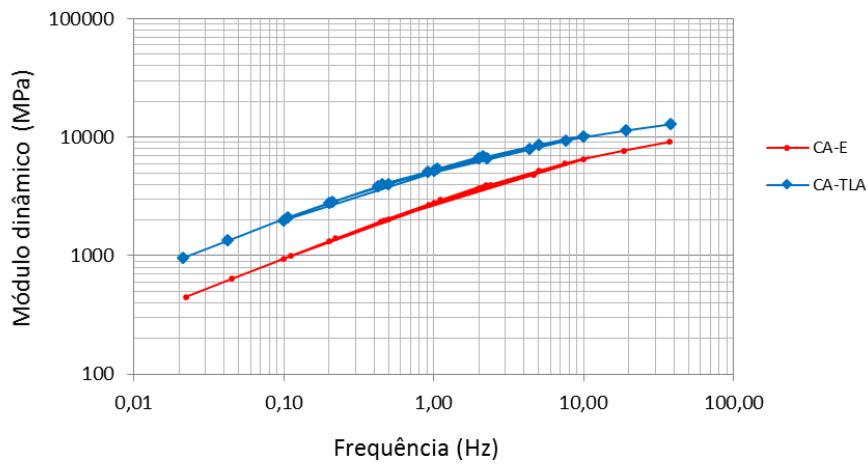


Figura 128: Representação do módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA na curva frequência-temperatura.

Observa-se na figura acima que as curvas da mistura CA-E e CA-TLA representam um material viscoelástico, pois suas curvas estão próximas da vertical. Pode-se perceber, também, que quanto maior a frequência maior é o valor do módulo dinâmico, comportamento frequente em materiais viscoelásticos.

#### 8.6.2 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. Na Figura 129 e Figura 130 são mostradas as representações do módulo dinâmico através das curvas isócronas para as misturas CA-E e CA-TLA, respectivamente.

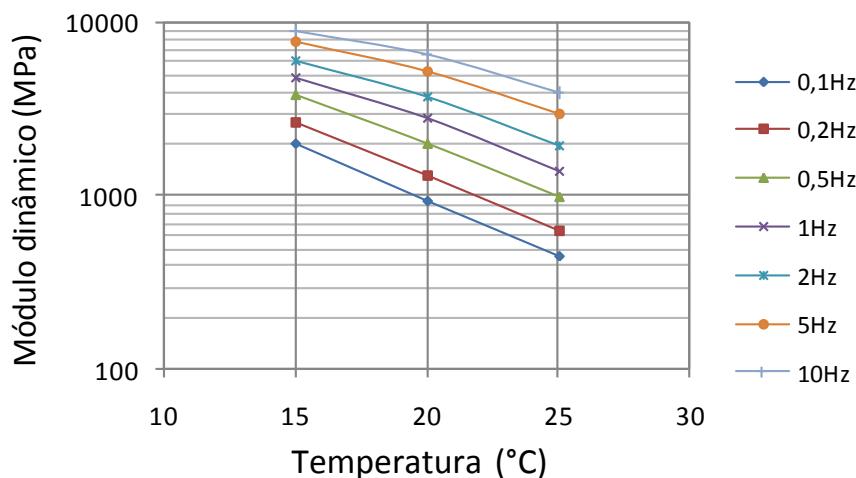


Figura 129: Representação do módulo dinâmico da mistura CA-E na curva isócrona.

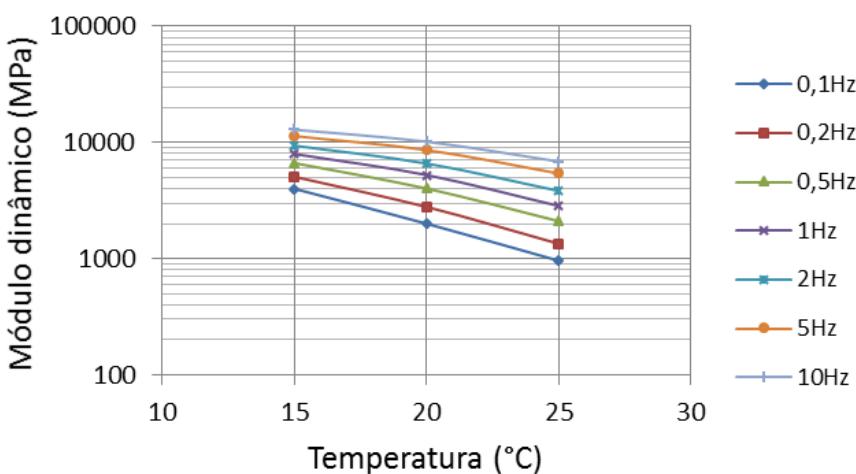


Figura 130: Representação do módulo dinâmico da mistura CA-TLA na curva isócrona.

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 solicitação 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 131 é possível analisar o comportamento do  $|E^*|$  das misturas estudadas na curva isócrona.

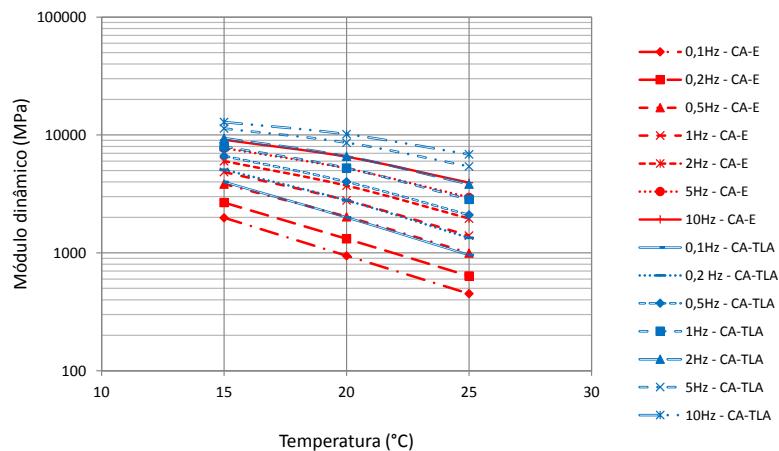


Figura 131: Curvas isócronas das misturas CA-E e CA-TLA.

Os valores do módulo dinâmico para a mistura asfáltica CA-E, em todas as temperaturas e frequências utilizadas nos ensaios, são superiores aos do módulo dinâmico da mistura CA-TLA. Além disso, as curvas da mistura CA-E apresentam maior influência da 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.

### 8.6.3 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. A Figura 132 e Figura 133 mostram a representação do módulo dinâmico das misturas CA-E e CA-TLA no espaço de Black.

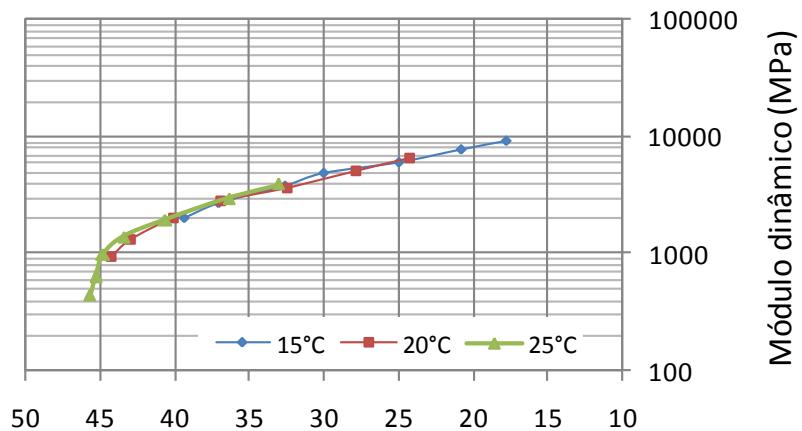


Figura 132: Espaço de Black da mistura CA-E.

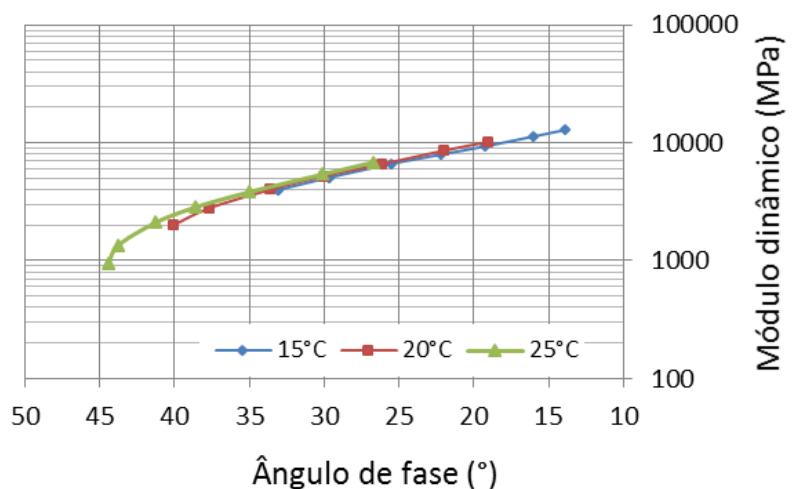


Figura 133: Espaço de Black da mistura CA-TLA.

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 134.

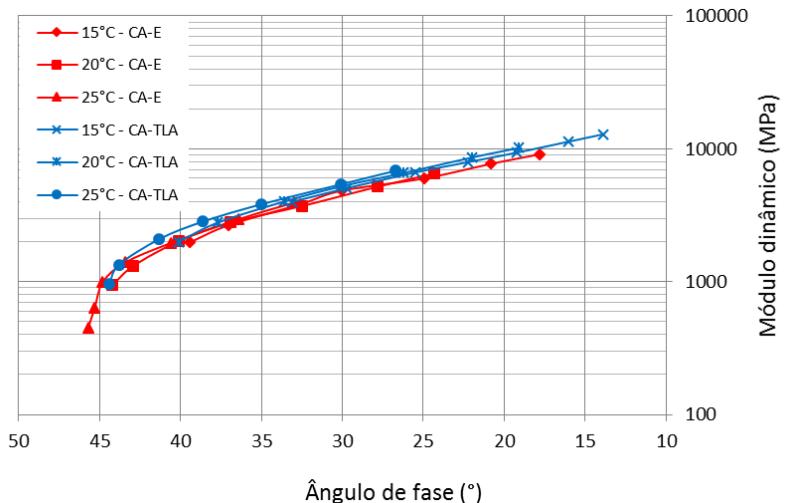


Figura 134: Representação do módulo dinâmico no espaço de Black das misturas CA-E e CA-TLA.

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.

#### 8.6.4 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 independe da frequência e da temperatura de ensaio. Na Figura 135 e Figura 136 estão apresentados os planos cole-cole das misturas CA-E e CA-TLA, respectivamente.

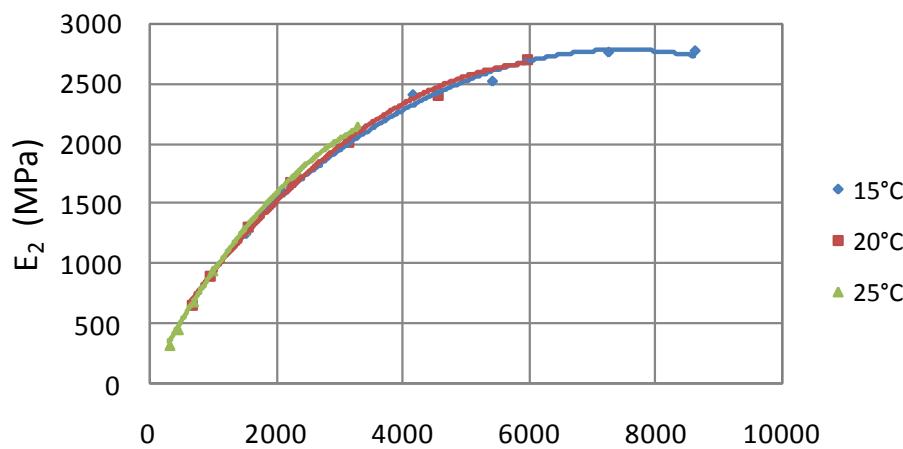


Figura 135: Representação do módulo complexo da mistura CA-E no plano Cole-Cole.

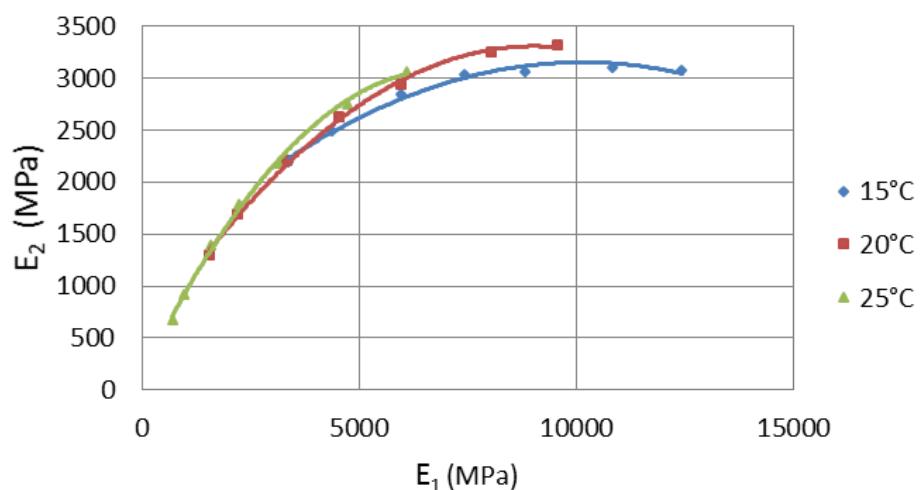


Figura 136: Representação do módulo complexo da mistura CA-TLA no plano Cole-Cole.

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 viscoelástico, 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 transformado em aquecimento da amostra ensaiada. 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 de fadiga no Brasil e, além disso, a determinação da temperatura crítica das misturas pela representação no plano cole-cole foi realizada posteriormente aos ensaios de fadiga.

A Figura 137 mostra o comportamento dos módulos elásticos e de perda das misturas asfálticas CA-E e CA-TLA para as diferentes temperaturas de ensaio.

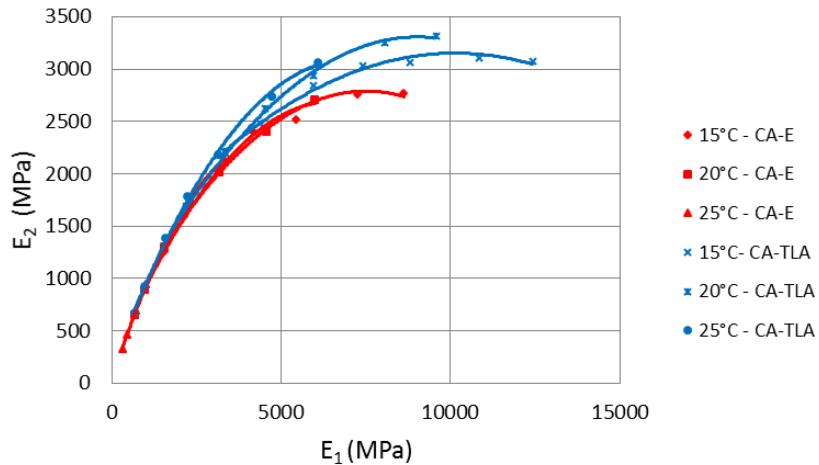


Figura 137: Representação no plano Cole-Cole das misturas CA-E e CA-TLA.

Através da figura acima é possível observar o comportamento das duas misturas asfálticas estudadas neste trabalho, onde fica evidenciado que a mistura CA-TLA apresenta valores de módulo de perda ( $E_2$ ) superiores ao da mistura CA-E. Salienta-se que 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.

## 8.7 RESULTADOS OBTIDOS NO LEVANTAMENTO DO TRINCAMENTO DO PAVIMENTO NOS KM 14 DA BR-290/RS

O levantamento do trincamento do pavimento realizado em um trecho da BR-290/RS, no km 14 - sentido Porto Alegre-Osório, seguiu os critérios estabelecidos pelas normas do DNIT 005/2003 – TER “Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia” e DNIT 006/2013 – PRO “Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento”.

Este tipo de levantamento é destinado a determinar o estado da superfície do pavimento, expresso através da presença ou ausência de uma série de defeitos definidos, contabilizados e medidos. Os defeitos de superfície são considerados os danos ou deteriorações que surgem na superfície dos pavimentos asfálticos, podendo ser identificados a olho nu e classificados segundo uma terminologia normatizada.

Na Tabela 23 e Tabela 24 estão apresentados os defeitos encontrados no pavimento do trecho do km 14 da BR-290/RS. Estes defeitos foram identificados a olho nu, conforme metodologia e fotos apresentadas anteriormente, e classificados de acordo com a norma DNIT 005/2003 – TER.

Tabela 23: Inventário do estado da superfície do pavimento – km 14 da BR-290/RS – Segmento 1.

Tabela 24: Inventário do estado da superfície do pavimento – km 14 da BR-290/RS – Segmento 2.

Após a identificação e classificação dos defeitos no pavimento verificou-se a condição do pavimento quanto ao estado de superfície através de um parâmetro denominado de Índice de Gravidade Global (IGG), o qual estabelece o grau de deterioração atingido pela superfície do pavimento. Este parâmetro foi calculado seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma do DNIT 006/2003 – PRO. Na Tabela 25 e Tabela 26 estão apresentados os resultados de IGG e os conceitos de degradação do pavimento nos trechos levantados estabelecidos de acordo com os critérios da referida norma.

Tabela 25: Cálculo de índice de gravidade global (IGG) – km 14 BR-290/RS – Segmento 1.

Trecho:	SH1 - Est 14+000 a Est 14+480						
Sentido:	Porto Alegre - Osório						
Faixa:	Externa						
Item	Natureza do defeito	Frequencia absoluta (fa)	Frequencia absoluta considerada	Frequencia relativa (fr)	Fator de ponderação (fp)	Índice de Gravidade Individual (IGI)	Observações
1	Trincas isoladas Fl, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR	0	0	0,0	0,2	0,0	
2	{FC-2} J, TB	0	0	0,0	0,5	0,0	
3	{FC-3} JE, TBE	0	0	0,0	0,8	0,0	
4	ALP, ATP	0	-	0,0	0,9	0,0	
5	O e P	0	-	0,0	1,0	0,0	
6	EX	0	-	0,0	0,5	0,0	
7	D	0	-	0,0	0,3	0,0	
8	P	0	-	0,0	0,6	0,0	
9	Média aritmética dos valores médios das flechas medidas em mm nas TRI e TER	5,20	5,14	5,17	1A{ X } 1B{ }	6,9	
10	Média aritmética das variâncias das flechas medidas em mm nas TRI e TER	4,12	3,23	3,68	2A{ X } 2B{ }	3,7	
Nº TOTAL DE ESTAÇÕES (n)		24			$\Sigma IGI = IGG$	11	Conceito
1A) IGI = $F \times 4/3$ quando $F \leq 30$				2A) IGI = $FV$ quando $FV \leq 50$			
1B) IGI = 40 quando $F > 30$				2B) IGI = 50 quando $FV > 50$			ÓTIMO

Tabela 26: Cálculo de índice de gravidade global (IGG) – km 14 BR-290/RS – Segmento 2.

Trecho:	SH2 - Est 14+460 a Est 14+980						
Sentido:	Porto Alegre - Osório						
Faixa:	Externa						
Item	Natureza do defeito	Frequencia absoluta (fa)	Frequencia absoluta considerada	Frequencia relativa (fr)	Fator de ponderação (fp)	Índice de Gravidade Individual (IGI)	Observações
1	Trincas isoladas Fl, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR	0	0	0,0	0,2	0,0	
2	{FC-2} J, TB	0	0	0,0	0,5	0,0	
3	{FC-3} JE, TBE	0	0	0,0	0,8	0,0	
4	ALP, ATP	0	-	0,0	0,9	0,0	
5	O e P	0	-	0,0	1,0	0,0	
6	EX	0	-	0,0	0,5	0,0	
7	D	0	-	0,0	0,3	0,0	
8	P	0	-	0,0	0,6	0,0	
9	Média aritmética dos valores médios das flechas medidas em mm nas TRI e TER	7,25	5,60	6,43	1A{ X } 1B{ }	8,6	
10	Média aritmética das variâncias das flechas medidas em mm nas TRI e TER	4,13	3,01	3,57	2A{ X } 2B{ }	3,6	
Nº TOTAL DE ESTAÇÕES (n)		26			$\Sigma IGI = IGG$	12	Conceito
1A) IGI = $F \times 4/3$ quando $F \leq 30$				2A) IGI = $FV$ quando $FV \leq 50$			
1B) IGI = 40 quando $F > 30$				2B) IGI = 50 quando $FV > 50$			ÓTIMO

Nota-se que no segmento analisado a condição do pavimento quanto ao estado de superfície encontra-se adequada de acordo com os conceitos estabelecidos por norma, ficando no trecho do km 14 com conceito ótimo.

## 8.8 ESTIMATIVA DE UM SHIFT FACTOR

Da análise dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos e por compressão diametral, sob modo de carregamento à tensão controlada, é possível comparar o comportamento de ambos os ensaios verificando-se a diferença do número de ciclos máximo para um valor, diga-se, de 0,50 MPa de tensão de tração e de  $200\mu\epsilon$  (valores representativos médio), através dos modelos obtidos para os ensaios e apresentados na Tabela 31 e Figura 138.

Tabela 27: Valores de tensão, deformação e vida de fadiga calculados (comparativo ensaios de flexão e compressão diametral).

Mistura	Tensão de Tração		Deformação de Tração	
	Tensão (MPa)	*N	Def. ( $\mu\epsilon$ )	*
4P	0,50	3,8E+05	2,00E+02	2,0E+05
CD		1,5E+02		4,7E+02

\* Número de ciclos do modelo obtido nos ensaios de fadiga

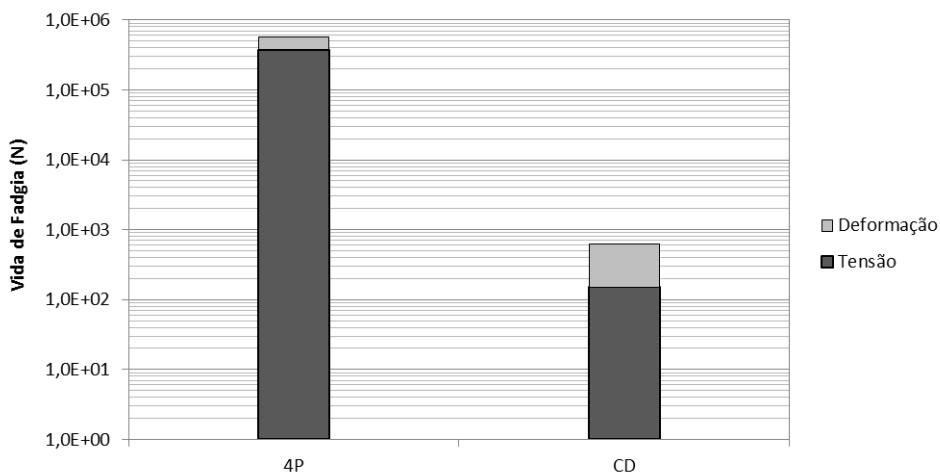


Figura 138: Vida de fadiga calculada em função da tensão e deformação de tração obtida nos ensaios de flexão em quatro pontos e compressão diametral.

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, um fator laboratório-campo dos ensaios de compressão diametral são de valores próximos a 10.000, então, apenas a título de ilustração argumentativa, poderia se dizer que o fator laboratório campo dos ensaios de vida de fadiga são de fato próximos de 4 e 23 para os resultados de tensão e deformação de tração, respectivamente, obtidos nesta pesquisa e mostrados na Figura 139.

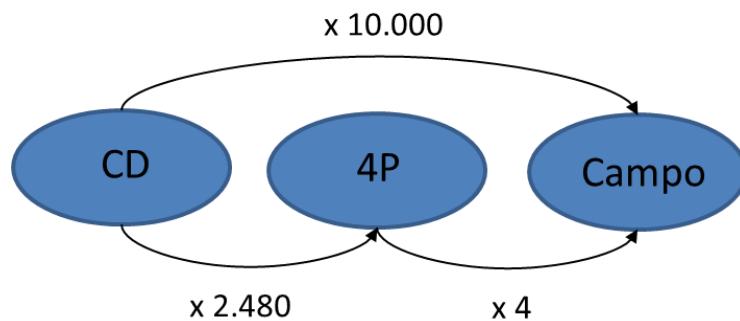


Figura 139: Esquema representativo dos fatores de transportes obtidos nos ensaios de fadiga à flexão e por compressão diametral.

Os resultados de campo analisados colaboram em linhas gerais para a confirmação dos fatores laboratório campo; no entanto, mais dados são necessários para que estes possam ser confirmados. Os levantamentos permitiram estabelecer áreas de potencial desenvolvimento de trincas e com isto delimitar segmentos com base nos históricos da Concessionária que refletam este comportamento. Uma continuidade desta pesquisa será proposta com adição de instrumentação em pavimentos para melhor detalhamento da fase de iniciação das trincas – seu processo de iniciação e desenvolvimento.

## 9 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos estudos realizados nesta pesquisa e apresentados no capítulo 8, 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 a demanda que se pode realizar no 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 volume de vazios, densidade aparente e grau de compactação dentro dos limites estabelecidos nos projetos das misturas estudadas neste trabalho. 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 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 a mistura CA-E, isto pode ter ocorrido em função do CAP TLA FLEX ser mais viscoso que o CAP 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 realizadas;
- 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;
- Em relação aos resultados obtidos nos ensaios de módulo dinâmico para as duas misturas estudadas, pode-se perceber que o módulo dinâmico aumenta com o acréscimo da frequência e reduz com a elevação da temperatura;
- Os resultados de ângulo de fase determinados a partir do ensaio de  $|E^*|$ , mostraram que o ângulo de fase diminui com o aumento da frequência e aumenta com o acréscimo da temperatura;

- Através da curva frequência-temperatura foi possível observar que a mistura CA-E, mais próxima da vertical, apresentou um comportamento mais sensível 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 e, por consequência, apresentam uma vida mais longa;
- 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 os comportamentos 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 viscoelástico, apresenta um valor máximo na temperatura de 15°C e 20°C para a mistura CA-E e CA-TLA, respectivamente. Salienta-se que são nestas temperaturas que ocorrem à maior perda irreversível do material devido à dissipação de energia por atrito interno transformado em aquecimento da amostra ensaiada;
- 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;
- 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;
- A avaliação da energia dissipada durante os ensaios de vida de fadiga se mostram como 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 5 para os casos estudados;

- Os resultados de campo analisados colaboram em linhas gerais para a confirmação dos fatores laboratório campo proposto na pesquisa; estudos mais aprofundados, talvez com instrumentação de campo, permita em pequeno prazo – como o deste estudo – investigar a iniciação e propagação deste fenômeno que normalmente decorre em longos períodos para avançar.
- Realizou-se uma visita de curta temporada na Universidade da Califórnia em Berkeley/Davis, buscando aprimorar os conhecimentos relacionados aos assuntos tratados neste trabalho e discutir os resultados experimentais obtidos no LAPAV/UFRGS. Encontra-se no Anexo 1 um relato das atividades realizadas durante o período de visita à Universidade da Califórnia, no Anexo 2 consta um registro fotográfico da visita realizada nos laboratórios da UCDavis e UC Berkeley e no Anexo 3 está apresentada a matriz experimental dos ensaios a serem realizados no Lapav em parceria com a UCDavis;
- Na Tabela 28 encontra-se um resumo dos itens propostos para esta pesquisa no cronograma físico e os respectivos objetivos específicos os quais atende, bem como sua localização ao longo deste relatório final.

Tabela 28: Resumo dos itens proposto para esta pesquisa.

4PBB - Projeto de Fadiga 4 Pontos em Misturas Asfálticas - LAPAV/CONCEPA-ANTT	Objetivo específico	Item do relatório final
<b>1. FASE 1</b>	-	-
1.1 Revisão da Literatura - Resumo e Homogeneização de Normas	i	2.1
1.2 Revisão da Literatura - Fatores de Influência no ensaio de Fadiga	i	2.2
1.3 Revisão da Literatura - Comparativos entre os diversos ensaios de Fadiga	i	2.3
1.3 Start up do equipamento - Ensaios com corpo-de-prova de referência	i	6.1
1.4 Avaliação funcional do equipamento existente; funcionalidades e limitações	i	3.0
1.5 Busca por sistemas de compactação e moldagem para fabricação de corpos de prova	ii	4.0
1.6 Relatório Fase 1	-	-
<b>2. FASE 2</b>	-	-
2.1 Concepção/adequação do sistema de compactação e moldagem dos CPs	ii	4.5
2.2 Usinagem e montagem do sistema de compactação e moldagem	ii	4.6
2.3 Testes de moldagem e compactação - em usina e laboratório	ii	4.6
2.4 Revisão bibliográfica sobre o modelo de energia dissipada	iv	2.4
2.5 Relatório Fase 2	-	-
<b>3. FASE 3</b>	-	-
3.1 Caracterização dos materiais a serem utilizados	vii	5.0
3.2 Dosagem & moldagem dos materiais a serem utilizados	vii	5.3, 5.4
3.3 Realização de ensaios - 1º tipo de CA	vii	8.2, 8.3
3.4 Análise dos resultados da Fase 2	ii	8.1
3.6 Visita à Universidade da Califórnia - Discussão de Resultados (Análise de Energia Dissipada)	iii	Anexos 1, 2 e 3
3.7 Relatório Fase 3	-	-
<b>4. FASE 4</b>	-	-
4.1 Realização de ensaio - 2º tipo de CA	vii	8.2, 8.3
4.2 Realização de ensaio para obtenção de Módulo Complexo	vi	6.3, 8.6
4.3 Análise dos resultados da Fase 3	vii	8.2
4.4 Levantamento em campo do trincamento do pavimento	viii	7.0
4.5 Relatório Fase 4	-	-
<b>5. FASE 5</b>	-	-
5.1 Caracterização dos materiais a serem utilizados	vii	5.0
5.2 Moldagem e ensaios de CPs cilíndricos para comparação de resultados	v	6.2
5.3 Análise dos resultados da Fase 4	vi, viii	8.3, 8.6
5.4 Avaliação dos resultados obtidos de campo para comparação	v	8.7
5.5 Relatório Fase 5	-	-
<b>6. FASE 6</b>	-	-
6.1 Análises global de resultados	x	8.0
6.2 Comparativos com as várias metodologias	v	8.4
6.3 Impacto das vidas de fadiga no dimensionamento de pavimentos	x	8.5
6.4 Estabelecimento de um Shift Factor	ix	8.8
6.5 Relatório Fase 6	-	-

**ANEXO 1 – RELATO DA VISITA REALIZADA NA UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA (UC) NOS LABORATÓRIO LOCALIZADOS EM DAVIS E BERKELEY.**

No período da visita a Universidade da Califórnia em Davis e Berkeley foram realizadas as seguintes atividades:

- No primeiro momento foi realizada uma visita ao ATIRC (“Advanced Transportation Infrastructure Research Center”), localizado na UC Davis, onde a Engª Gracieli teve a oportunidade de conversar com o prof. John Harvey – PI (Principal Investigator) do ATIRC para dar início as suas atividades nesta Universidade;
- O ATIRC possui dois simuladores de tráfego, diferentes tipos de equipamentos para realização de ensaios em ligantes asfálticos, em misturas asfálticas, em agregados pétreos e material reciclado;
- Neste centro, também, estão sendo realizadas pesquisas utilizando sensores instalados no pavimento para controle da temperatura e refletividade, além de ensaios para determinar o módulo dinâmico e o Flow Number em misturas asfálticas com o equipamento AMPT;
- O ATIRC desenvolve diferentes tipos de pesquisas em colaboração com o Caltrans - Departamento de Transporte Local da Califórnia – procurando desenvolver tecnologias inovadoras nas áreas de construção de rodovias, infra-estruturas civis, manutenção e operação, buscando a implementação final e monitoramento destas tecnologias;
- Também foi realizada uma vista da Engª Gracieli e do prof. Lélio Brito ao Laboratório da UCBerkeley, localizado na cidade de Richmond, onde tivemos a grande oportunidade de conversar com o prof. Monismith, grande pesquisador em relação aos estudos de fadiga;
- No Laboratório da UCBerkeley ficam localizados os equipamentos de fadiga à flexão em viga quatro pontos (4PBB) utilizados para o desenvolvimento das pesquisas relacionadas a este tema. Eles possuem quatro equipamentos de fadiga à flexão da marca Cox&Sons, dois equipamentos da marca IPC Global, semelhantes ao equipamento que o Laboratório de Pavimentação da UFRGS – LAPAV – possui, e ainda o primeiro equipamento de fadiga à flexão em quatro pontos, o qual foi desenvolvido neste laboratório pelo prof. Monismith;
- Todos os ensaios de fadiga a 4PBB são realizados na UCBerkeley. Pode-se acompanhar alguns ensaios de fadiga à flexão realizados por ela e o funcionamento do equipamento da Cox&Sons utilizado por eles para determinação da vida de fadiga de misturas asfálticas.

- Seguem abaixo alguns tópicos sobre os procedimentos de ensaio de fadiga à flexão e análise de dados utilizados no laboratório da UCBerkeley:
  - Todos os ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos são realizados no equipamento da Cox&Sons;
  - Todos os ensaios de fadiga são realizados com temperatura controlada de 20°C;
  - Os ensaios são realizados de acordo com os procedimentos preconizados pela norma AASHTO T-321;
  - O Software utilizado para coletar os dados é o ATS da SHRP Equipamentos;
  - O critério de finalização dos ensaios em misturas asfálticas com ligante convencional é quando ocorrer à redução em 50% da rigidez inicial das amostras, enquanto que para misturas com ligantes modificados por polímeros os ensaios devem ser finalizados com 10 milhões de ciclos para posterior extrapolação;
  - Todos os ensaios são realizados com modo de carregamento a deformação controlada e forma de carregamento haversine.
- Salienta-se que os ensaios de fadiga realizados na UCBerkeley são desenvolvidos no equipamento da Cox&Sons, contudo foram realizados alguns ensaios na IPC Global a critério de verificação do desempenho do equipamento. Segundo os pesquisadores da UCBerkeley o software UTS015 utilizado para coleta de dados no equipamento da IPC Global apresenta alguns problemas principalmente em relação a coleta dos dados de ângulo de fase e energia dissipada. Além disso, o posicionamento do LVDT neste equipamento é em cima da amostra, enquanto na Cox&Sons o LVDT fica localizado ao lado da amostra;
- Neste laboratório (UCBerkeley) estão sendo desenvolvidos e realizados outros ensaios em misturas asfálticas, tais como:
  - Ensaio de Hamburgo – utilizado para verificar o efeito da água sobre a mistura asfáltica e avaliar o comportamento da mistura quanto à deformação permanente;
  - Ensaio de cisalhamento: realizado no equipamento RSST (Repeat Simple Shear Testing) desenvolvido pela própria UCBerkeley com o objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas.

- Em reunião com o prof. John Harvey onde participaram a Engª Gracieli e o Prof. Lélio Brito foram tratados assuntos relacionados aos ensaios de fadiga e análise dos resultados. O Prof. Lélio juntamente com o prof. John Harvey sugeriram uma cooperação entre a UCDavis e o LAPAV com o objetivo de realizar ensaios de fadiga à flexão no LAPAV e os dados serem analisados pelos colaboradores da UCDavis. Para o desenvolvimento desta cooperação serão seguidos os seguintes tópicos:
  - Realização de ensaios de fadiga à flexão em viga quatro pontos com forma de carregamento senoidal e haversine, conforme matriz experimental apresentada no Anexo 3;
  - Análise de todos os dados obtidos nos ensaios;
  - Especificações relacionadas ao desempenho dos pavimentos.
- Espera-se que através desta parceria UCDavis – LAPAV seja dada continuidade no desenvolvimento dos estudos relacionados à fadiga em misturas asfálticas, principalmente na abrangência das análises de dados obtidos por meio do laboratório e do campo;
- Na Tabela 29 consta um resumo das atividades diárias desenvolvidas na visita a Universidade da Califórnia localizada nas cidades de Davis e Berkeley.

**Tabela 29: Resumo diário das atividades desenvolvidas na visita a UCDavis e UC Berkeley.**

Data	Atividade
16/07/2014	Saída de Porto Alegre - RS
17/07/2014	Chegada em Davis - CA
18/07/2014	Visita ao ATIRC ("Advanced Transportation Infrastructure Research Center") localizado na UCDavis
21/07/2014	Reunião com o Prof. John Harvey para dar início as atividades na UCDavis
22/07/2014	Discussão inicial sobre as considerações de Shift Factors - troca de literaturas
23/07/2014	Leitura de trabalhos e discussão com pesquisadores sobre metodologias de interpretação de resultados 4PBB
24/07/2014	Acompanhamento da rotina de trabalhos e ensaios desenvolvidos no ATIRC
25/07/2014	Acompanhamento da rotina de trabalhos e ensaios desenvolvidos no ATIRC
28/07/2014	Reunião com o Prof. John Harvey e Prof. Lélio Brito sobre ensaios de fadiga 4P e proposta de parceria entre a UCDavis e o Lapav
29/07/2014	Visita ao laboratório de pavimentação da UC Berkeley com o Prof. Lélio Brito e encontro com o Prof. Monismith
30/07/2014	Reunião com o Prof. Lélio Brito sobre os estudos e metodologias de ensaios de fadiga em andamento na UCDavis e sobre as atividades propostas para a parceria UCDavis/Lapav
31/07/2014	Estabelecimento de atividades de cooperação entre UFRGS - UC Berkeley e UFSC.
01/08/2014	Discussão sobre protocolo de compactação usado no Brasil - validação com a metodologia da UCDavis
04/08/2014	Acompanhamento dos ensaios de fadiga em quatro pontos na UC Berkeley
05/08/2014	Acompanhamento dos ensaios de fadiga em quatro pontos na UC Berkeley
06/08/2014	Avaliação das rotinas de ensaio comparativas entre equipamento 4P IPC e Cox&Sons
07/08/2014	Analise de dados - 4P IPC
08/08/2014	Analise de dados - 4P Cox&Sons
11/08/2014	Analise de dados - Integrada para avaliação dos resultados obtidos no trabalho desenvolvido
12/08/2014	Reunião com o Prof. John Harvey para delimitações da proposta de parceria UCDavis/Lapav
13/08/2014	Saída de Davis - CA
14/08/2014	Chegada em Porto Alegre - RS

**ANEXO 2 – FOTOS DA VISITA REALIZADA NA UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA NOS LABORATÓRIOS LOCALIZADOS NA UCDAVIS E NA UCBERKELEY.**



Figura 140: Simuladores de tráfego do ATIRC – UCDavis.



Figura 141: Equipamentos no ATIRC - UCDavis.



Figura 142: Equipamentos no ATIRC - UCDavis.



Figura 143: Equipamentos para ensaios de misturas asfálticas no ATIRC - UCDavis.



Figura 144: Equipamento AMPT no ATIRC - UCDavis.



Figura 145: Monitoramento da temperatura e refletividade de diferentes tipos de pavimentos - ATIRC/UCDavis.



Figura 146: Monitoramento da temperatura e refletividade de diferentes tipos de pavimentos  
- ATIRC/UCDavis.



Figura 147: Pista de moldagem de placas de mistura asfáltica  
- ATIRC/UCDavis.



Figura 148: Ensaio Hamburgo - UC Berkeley.



Figura 149: Pista de moldagem de placas de mistura asfáltica - UCBerkeley.



Figura 150: Rolo compactador utilizado para compactação das placas - UCBerkeley.



Figura 151: Placas de mistura asfáltica extraídas de campo - UCBerkeley.



Figura 152: Equipamento utilizado no processo de corte das placas para obtenção das vigotas - UC Berkeley.



Figura 153: Vigotas de mistura asfáltica - UC Berkeley.



Figura 154: Equipamento para ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos da IPC Global - UC Berkeley.

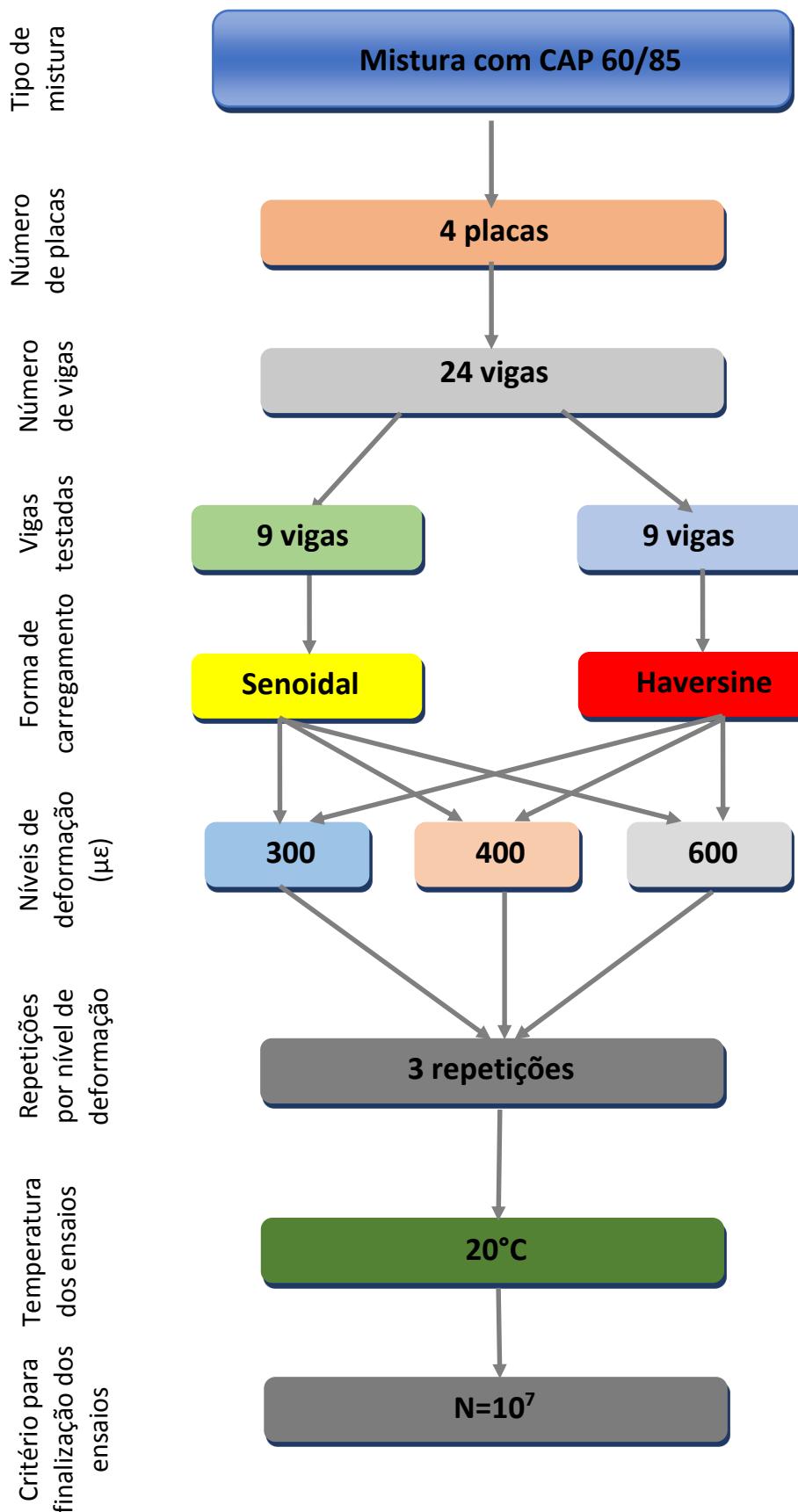


Figura 155: Equipamento para ensaio de fadiga à flexão em quatro pontos da Cox&Sons - UCBerkeley.



Figura 156: Primeiro equipamento montado para realização de ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos elaborado pelo prof. Monismith - UCBerkeley.

**ANEXO 3 – MATRIZ EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS A SEREM REALIZADOS NO LAPAV**  
**EM PARCERIA COM A UCDAVIS**



Laboratório de Pavimentação  
Área de Testes e Pesquisas de  
Pavimentos

Av. Bento Gonçalves, 9500.  
Prédio 43.816  
Bairro Agronomia.  
CEP 91501-970.

Fone: +55 51 3308-7049  
Fax: +55 51 3308-3999  
lapav1@cpgec.ufrgs.br