

Carlos Fernando Quintero Quintero

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA CONSISTÊNCIA DO
LIGANTE NA FADIGA E NO MÓDULO COMPLEXO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leto Momm

Florianópolis
2016

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

QUINTERO , CARLOS FERNANDO QUINTERO
INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA CONSISTÊNCIA DO LIGANTE
NA FADIGA E NO MÓDULO COMPLEXO DE MISTURAS ASFÁLTICAS /
CARLOS FERNANDO QUINTERO QUINTERO ; orientador, LETO
MOMM - Florianópolis, SC, 2016.
264 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Misturas asfálticas. 3. Módulo e
Fadiga. 4. Consistência do ligante Asfáltico. 5. Energia
Dissipada. I. MOMM, LETO . II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

Carlos Fernando Quintero Quintero

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA CONSISTÊNCIA DO
LIGANTE NA FADIGA E NO MÓDULO COMPLEXO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Civil”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Florianópolis-SC, 13 de Maio de 2016.

Prof. Dr. Glicério Trichês
Coordenador do Curso

Prof. Dr. Leto Momm – ECV/UFSC
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jorge Augusto Ceratti
Universidade Federal de Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Universidade Federal de Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof.^a Dr.^a Laura Maria Goretti da Motta
Universidade Federal de Rio de Janeiro – UFRJ

Prof. Dr. Glicério Trichês
Universidade Federal de Santa Catarina – ECV/UFSC

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira.
Universidade Federal de Santa Catarina – ECV/UFSC

Dedico ao meu filho Carlos Gustavo, à minha esposa Zamira, aos meus pais Alonso e Dilia, aos meus irmãos Jairo, Efrain, Ruben, Diego, Darwim Julian e Marcela, ao meu tio Jairo e a Omaira, a minhas tias Alcira e Laddy, ao Rodolfo e Nubia e toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por guiar-me e permitir que eu alcançasse este logro já que por ele e para ele são todas as coisas;

Ao Prof. Leto Momm, pela orientação e ensinamentos durante meus estudos;

Aos meus amigos José Marcos, José Barrios, Adrosindro, Keyla, Francisco, Alberto e família, Miguel e família e David e família;

Ao P. Gustavo e ao P. Ciro, pelo apoio durante meus estudos de Doutorado;

À Leni Figueredo Matias Leite, pela amizade e apoio;

À Prof^a. Liedi, pelo apoio e colaboração durante meus estudos;

Ao Prof. Luiz Gomez, pelos ensinamentos tanto nas aulas como em explicações complementares de laboratório;

Ao Prof. Ivo Padaratz, pelo auxílio nos equipamentos de laboratório;

Aos professores Marciano Maccarini, Marcos Noronha, Rafael Higashi, Antonio Marcon e Amir Mattar Valente, pelos ensinamentos e apoio durante meus estudos.

Agradeço a CENPES/PETROBRAS e refinarias REPAR e REPLAN que fizeram as doações dos ligantes asfálticos utilizados na pesquisa.

Agradeço ao CAPES/PEC-PG (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/Programa de Estudantes Convênio de Pós-Graduação) pela bolsa concedida.

A todos meus familiares e amigos, o meu Muito Obrigado.

*“O senhor é meu pastor, nada me falta”
Salmos 23,1*

RESUMO

A pesquisa estuda a influência da temperatura e da consistência do ligante asfáltico nos ensaios de fadiga e de módulo complexo dos concretos asfálticos. Três misturas asfálticas são preparadas com três ligantes asfálticos com consistências distintas, classificados por penetração em cimento asfáltico de petróleo CAP 10/20 CAP 30/45, CAP 50/70. Os ensaios de módulo complexo foram realizados a flexão alternada em corpos de prova trapezoidais a diferentes frequências e temperaturas. Na representação do ensaio de módulo complexo no plano Cole-Cole são selecionadas três temperaturas para o ensaio de fadiga; uma zona nas temperaturas mais elevadas que a definida pelo valor máximo da componente imaginária do módulo complexo; uma segunda zona definida como temperatura intermediária, onde ocorre o valor máximo da componente imaginária, zona onde deve ocorrer a menor deformação para um milhão de ciclos no ensaio de fadiga, uma terceira zona que correspondente às baixas temperaturas, onde o comportamento mecânico é, predominantemente elástico. O estudo relaciona o módulo complexo com a deformação para um milhão de ciclos do ensaio de fadiga, propondo um modelo analítico desenvolvido a partir da densidade de energia dissipada, para estimar a deformação para um milhão de ciclos a diferentes temperaturas. Conhecidas a deformação para um milhão de ciclos numa temperatura específica e a densidade de energia dissipada do ensaio de módulo complexo, com boa aproximação, é possível realizar dimensionamento de estrutura de pavimento a outras temperaturas, com as misturas preparadas com os ligantes asfálticos do estudo.

Palavras chaves: fadiga, módulo complexo, temperatura crítica, densidade de energia dissipada, modelo analítico.

ABSTRACT

The research studies the influence of temperature and consistency of asphalt binder in fatigue tests and complex modulus of asphaltic concrete. Three asphalt mixtures are prepared with three asphalt binders with different consistencies, ranked by penetrating asphalt cement CAP10/20, CAP30/45, CAP50/70. The complex modulus tests are performed alternating bending specimens trapezoidal at different frequencies and temperatures. In representation of the complex modulus test in Cole -Cole plan are selected three temperatures for the fatigue test, one zone at higher temperatures than the defined maximum value of the imaginary component of the complex modulus; a second zone defined as an intermediate temperature which occurs the maximum value of the imaginary component area which should occur at less deformation to a million cycles in the fatigue test, and a third zone corresponding to low temperatures, where the mechanical behavior are, predominantly, elastic. The study relates the complex modulus to the deformation for a million cycles of the fatigue test, offering an analytical model developed from the dissipated power density to estimate the deformation of a million cycles at different temperatures. Knowing the deformation of a million cycles at a specific temperature and the dissipated energy density of the complex modulus test, with good approximation, it is possible to define pavement structure at other temperatures, with the mixtures prepared with the asphalt binders of the study.

Keywords: fatigue, complex modulus, critical temperature, dissipated energy density, analytical model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Deslocamento da temperatura crítica no plano Cole-Cole.....	39
Figura 1.2 – Esquema de desenvolvimento da tese	42
Figura 2.1 – Corpo do pavimento numa estrutura multicamada.....	47
Figura 2.2 – Deformação longitudinal medida em campo e simulada por decomposição de Fourier.....	48
Figura 2.3 – Sinal longitudinal horizontal (ϵ_{xx}) a profundidades de 0,075m e 0,085 m, valores experimentais e modelados.	49
Figura 2.4 – Níveis de formulação das misturas asfálticas	50
Figura 2.5 – Critério de seleção quanto à compactidade na PCG.....	51
Figura 2.6 – Exemplo de aptidão à compactidade da uma mistura de módulo elevado asfáltico de penetração 10/20.....	52
Figura 2.7 – Exemplo de ensaio de deformação permanente para uma mistura tipo BBME.	54
Figura 2.8 – Exemplo de Módulo complexo mistura preparada com ligante CAP 30/45.	55
Figura 2.9 – Variação da deformação para um milhão de ciclos em função do teor de ligante asfáltico e da compactidade	56
Figura 2.10 – Representação das funções de força e deformação.	57
Figura 2.11 – Representação do módulo complexo em curvas isócronas.	62
Figura 2.12 – Representação do módulo em curvas isotérmicas.	62
Figura 2.13 – Módulo complexo representando no espaço Black.....	63
Figura 2.14 – Módulo complexo no plano COLE-COLE.	64
Figura 2.15 – Curvas equivalência frequência – temperatura.	65
Figura 2.16 – Translação gráfica das curvas isotérmicas	65
Figura 2.17 – Representação analógica do modelo de Huet.....	67
Figura 2.18 – Representação analógica do modelo de Huet-Sayegh.....	68
Figura 2.19 – Representação analógica do modelo 2S2P1D.....	69
Figura 2.20 – Curva de Wohler e loop-histerese durante o ensaio de fadiga.....	70
Figura 2.21 – Sinais de solicitação nos dois modos no domínio da frequência (a) ensaio a tensão controlada (b) ensaio a deformação controlada.	71

Figura 2.22 – (a) Comportamento em flexão de campo (b) corpo de prova.....	73
Figura 2.23 – Resultados da força e temperatura como número de ciclos	74
Figura 2.24 – Primeiro protótipo de máquina de módulo complexo e fadiga da Universidade Federal de Santa Catarina	78
Figura 2.25 – Tipo de sollicitação em ensaio a três pontos	78
Figura 2.26 – Equipamento para ensaio de módulo complexo e fadiga quatro pontos.....	79
Figura 2.27 – Equipamento para ensaio de módulo complexo e fadiga tração – compressão	80
Figura 2.28 – Equipamento para ensaio de tração indireta.....	80
Figura 2.29 – Deformação para um milhão de ciclos para 11 ensaios de fadiga	81
Figura 2.30 – Curva de fadiga.	83
Figura 2.31 – Módulo complexo e ângulo de fase para os diferentes ensaios.	83
Figura 2.32 – E1-E2 relação de E1 material e evolução durante o ensaio de fadiga.....	84
Figura 2.33 – Resultados de 15 testes de fadiga de F1; amplitudes de deformação iniciais variam de 80 10 ⁻⁶ m / m para 170 10 ⁻⁶ m / m.	85
Figura 2.34 – Resultados de ensaio de fadiga.....	86
Figura 2.35 – Definição Critério de fim de vida a fadiga 50% da força.....	87
Figura 2.36 – Relação da energia dissipada em função do número de ciclo, ensaio a deformação controlada.....	88
Figura 2.37 – Determinação de N1 (a) tensão controlada (b) deformação controlada.	88
Figura 2.38 – Modos de fratura	90
Figura 2.39 – Razão de propagação da trinca em função do fator de intensidade de tensão.	91
Figura 2.40 – Representação do ensaio na curva de Weibull	93
Figura 2.41– Variação linear do módulo durante a fase II.	94
Figura 2.42 – Curvas de fadiga definida por diferentes critérios.....	95
Figura 2.43– Determinação do número de ciclos por diferentes critérios	96

Figura 2.44 – Exemplo de evolução da temperatura media diária anual a varias profundidades.....	97
Figura 2.45 – Exemplo de variação da temperatura com a profundidade a cada 2 horas.....	97
Figura 2.46 – Exemplo de evolução da temperatura media diária anual a varias profundidades.....	98
Figura 2.47 – Variação da curva de fadiga com a temperatura.	99
Figura 2.48– Curvas de fadiga a diferentes temperaturas e materiais	100
Figura 2.49 – Variação da curva de fadiga com a temperatura.	101
Figura 2.50 – Variação de ϵ_6 em função da temperatura.	102
Figura 2.51– Variação da deformação para um milhão de ciclos com a temperatura.....	102
Figura 2.52– Exemplo de curva de fadiga EME 2 a 10°C e 30°C a 25Hz.....	104
Figura 2.53 – Curvas de fadiga com ligante convencional e modificadas.	105
Figura 2.54 – Misturas asfálticas no plano Cole – Cole.....	106
Figura 2.55 – Representação no plano Cole – Cole mistura CA-TLA e CA-E.....	107
Figura 2.56 – Curvas matrizes na temperatura de Ts 15°C.	108
Figura 2.57 – Superposição das curvas matrizes das misturas.	108
Figura 2.58 – Deformações horizontais calculadas com o programa <i>ViscoRoute</i>	112
Figura 2.59 – Deformações verticais calculadas com o programa <i>ViscoRoute</i>	112
Figura 2.60 – Confrontação das deformações calculadas com as admissíveis para o dimensionamento do pavimento.....	113
Figura 3.1 – Mesa compactador tipo LPC.....	118
Figura 3.2 – Corpos de prova de aço e aferição do ensaio de módulo complexo.....	121
Figura 3.3 – Máquina de módulo complexo e fadiga utilizada nesta tese.	122
Figura 3.4 – Sistema de climatização com controles manuais para (a) temperatura e (b) frequência.	123
Figura 3.5 – Seleção da temperatura para o ensaio de fadiga a partir da representação no plano complexo.....	126
Figura 3.6 – Fluxograma da matriz de ensaios.....	128

Figura 4.1 –	Curvas de viscosidades dos ligantes asfálticos.....	134
Figura 4.2 –	Curva granulométrica das misturas asfálticas ensaiadas.	136
Figura 4.3 –	Aptidão à compacidade das misturas asfálticas com teor de ligante asfáltico igual a 5,7%..	138
Figura 4.4 –	Compactação das placas e par de placas após a compactação.	139
Figura 4.5 –	Exemplo de serragem das placas para obtenção dos corpos de prova.	139
Figura 4.6 –	Exemplo de corpos de prova desta tese após a serragem para uma mistura asfáltica	139
Figura 4.7 –	Geometria dos corpos de prova	140
Figura 4.8 –	Representação da mistura com CAP 10/20 no plano Cole–Cole.....	142
Figura 4.9 –	Representação da mistura com CAP 30/45 no plano Cole–Cole.....	142
Figura 4.10–	Representação da mistura com CAP 50/70 no plano Cole–Cole.....	143
Figura 4.11–	Curva isócronas para a mistura preparada com ligante CAP 10/20.	145
Figura 4.12 –	Curva isócronas para a mistura preparada com ligante CAP 30/45.	145
Figura 4.13 –	Curva isócronas para a mistura preparada com ligante CAP 50/70.	146
Figura 4.14 –	Curva isócronas para a mistura CAP 10/20.....	147
Figura 4.15 –	Curvas isotermas para a mistura CAP 30/45.....	147
Figura 4.16 –	Curvas isotermas para a mistura CAP 50/70.....	148
Figura 4.17 –	Variação do Módulo complexo com ângulo de fase CAP 10/20.....	149
Figura 4.18 –	Variação do Módulo complexo com ângulo de fase CAP 30/45.....	150
Figura 4.19 –	Variação do Módulo complexo com ângulo de fase CAP 50/70.....	150
Figura 4.20 –	Curva mestra $C1 = 222,07$ $C2=1942,825$ $TR =$ $15^{\circ}C$, CAP 10/20.....	151
Figura 4.21 –	Curva mestra $C1 = 50,243$ $C2=491$ $TR = 15^{\circ}C$, CAP 30/45.....	152
Figura 4.22 –	Curva mestra $C1 = 90,45$ $C2=990.95$ $TR = 15^{\circ}C$, CAP 50/70.....	152

Figura 4.23 – Comparação das curvas equivalência frequência para a temperatura de referencia 15°C.....	153
Figura 4.24 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo CAP 10/20.....	154
Figura 4.25 – Modelo de Huet-Sayegh no espaço Black CAP 10/20. 162.....	155
Figura 4.26 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo CAP 30/45.....	155
Figura 4.27 – Modelo de Huet-Sayegh no espaço Black CAP 30/45.....	156
Figura 4.28 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo CAP 50/70.....	156
Figura 4.29 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo CAP 50/70.....	157
Figura 4.30 – Módulo experimental versus Modelo Huet-Sayegh CAP 10/20.....	158
Figura 4.31 – Módulo experimental versus Modelo Huet-Sayegh CAP 30/45.....	158
Figura 4.32 – Módulo experimental versus Modelo Huet-Sayegh CAP 50/70.....	159
Figura 4.33 – Variação do parâmetro τ do Modelo de Huet-Sayegh.160	
Figura 4.34 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo das misturas asfálticas.....	160
Figura 4.35 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 10/20 a 10°C e 25Hz.....	162
Figura 4.36 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 10/20 a 20°C e 25Hz.....	162
Figura 4.37 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 10/20 - 30°C e 25Hz.....	163
Figura 4.38 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 10/20 a 40°C e 25Hz.....	163
Figura 4.39 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 30/45 a 10°C e 25Hz.....	164
Figura 4.40 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 30/45 a 20°C e 25Hz.....	165
Figura 4.41 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 30/45 a 30°C e 25Hz.....	165
Figura 4.42 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 50/70 a 0°C e 25Hz.....	166

Figura 4.43 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 50/70 a 10°C e 25Hz.	167
Figura 4.44 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 50/70 a 20°C e 25Hz.	167
Figura 4.45 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 50/70 a 30°C e 25Hz.	168
Figura 4.46 – Definição do número de ciclos da ruptura pelo critério de energia dissipada, ensaio de fadiga a 20°C e 150□ m mistura ligante 10/20.....	169
Figura 4.47 – Correlação entre o número de ciclos de ruptura por fadiga critério 50%F e Wn “razão de energia dissipada” mistura CAP 10/20 a 10°C.	170
Figura 4.48 – Correlação entre o número de ciclos de ruptura por fadiga critério 50%F e Wn “razão de energia dissipada” mistura CAP 10/20 a 20°C.	170
Figura 4.49 – Correlação entre o número de ciclos de ruptura por fadiga critério 50%F e Wn “razão de energia dissipada” mistura CAP 10/20 a 30°C.	171
Figura 4.50 – Correlação entre o número de ciclos de ruptura por fadiga critério 50%F e Wn “razão de energia dissipada” mistura CAP 10/20 a 40°C.	171
Figura 4.51 – Deformação para um milhão de ciclos a diferentes temperaturas e na frequência de 25hz das misturas asfálticas.....	173
Figura 4.52 – Deformação para um milhão de ciclos modelado por regressão.....	175
Figura 5.1 – Variação da componente E2 do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP10/20.	182
Figura 5.2 – Variação da energia do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP10/20.....	182
Figura 5.3 – Variação da componente E2 do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP30/45.	183
Figura 5.4 – Variação da energia do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP30/45.....	183

Figura 5.5 – Variação da componente E2 do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP50/70.....	184
Figura 5.6 – Variação da Energia do Ensaio de Módulo Complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP50/70.....	184
Figura 5.7 – Plano Cole-Cole dos ensaios de módulo complexo. ...	185
Figura 5.8 – Evolução do ensaio de fadiga no plano complexo nas temperaturas de 20°C, 30°C e 40°C.....	188
Figura 5.9 – Variação da força inicial com a deformação para as diferentes condições de temperatura CAP 10/20.	189
Figura 5.10 – Variação do ângulo de fase inicial com a deformação para mistura com ligante CAP10/20.....	190
Figura 5.11 – Variação da densidade de energia inicial com a deformação para mistura com ligante CAP10/20.....	191
Figura 5.12 – Variação da densidade de energia inicial com a deformação para mistura com ligante CAP10/20 em escala logarítmica.....	191
Figura 5.13 – Definição da Região II no Plano Cole-Cole (esquemático).....	193
Figura 5.14 – Previsão da deformação para um milhão de ciclos com o modelo.....	194
Figura 5.15 – Estrutura de pavimento hipotética – tipo I – pavimento espesso.....	196
Figura 5.16 – Estrutura de pavimento, hipotética – tipo II – pavimento flexível.....	196
Figura 5.17 – Variação da espessura das camadas asfálticas do pavimento tipo I com a temperatura, para deformação ϵ_6 experimental.	203
Figura 5.18 – Variação da espessura das camadas asfálticas do pavimento tipo I com a temperatura, para deformação ϵ_6 modelada.....	203
Figura 5.19 – Variação da espessura das camadas asfálticas do pavimento tipo II com a temperatura, para deformação ϵ_6 experimental.	208
Figura 5.20 – Variação da espessura das camadas asfálticas do pavimento tipo II com a temperatura, para deformação ϵ_6 modelada	208

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Exemplo de mistura preparada com ligante CAP 10/20, ensaio Duriéz.....	53
Tabela 2.2– Fator de forma e de massa para alguns tipos de ensaios.....	59
Tabela 2.3– Estudo da incerteza sobre o valor de ϵ_6 em função do número de corpos de prova por nível de deformação.....	72
Tabela 2.4– Características de ensaios de fadiga.....	82
Tabela 2.5– Parâmetros de fratura de misturas asfálticas diversos pesquisadores.....	92
Tabela 2.6– Exemplo de características Físicas e Mecânicas das Misturas Tipo CBUQ Analisadas por Braz (1997).....	92
Tabela 2.7– Parâmetros das curvas de fadiga.....	107
Tabela 2.8– Temperatura de superposição do ligante e da mistura.....	109
Tabela 2.9– Deformação admissível da mistura da camada de sub-base.....	113
Tabela 3.1– Dimensões dos corpos de prova trapezoidais.....	120
Tabela 3.2– Massa dos corpos de prova de aço.....	120
Tabela 3.3– Impedância dos corpos de prova de aço.....	121
Tabela 3.4– Massa das partes móveis da máquina.....	124
Tabela 3.5– Temperaturas do ensaio de fadiga e frequência do ensaio	127
Tabela 3.6– Temperaturas para o dimensionamento da estrutura tipo I com camadas betuminosas espessas.....	132
Tabela 3.7 – Temperaturas para o dimensionamento da estrutura tipo II, estrutura de pavimento simples.....	132
Tabela 4.1– Características dos ligantes asfálticos.....	133
Tabela 4.2– Temperaturas de usinagem e compactação [°C]	134
Tabela 4.3 – Caracterização dos agregados de esta tese.....	135
Tabela 4.4 – Curva granulométrica, expoente da curva $n=0,5$	136
Tabela 4.5 – Parâmetros volumétricos das misturas.....	137

Tabela 4.6– Volume de vazios no ensaio de compactação a cisalhamento giratório no nível dos 80 giros.....	138
Tabela 4.7– Módulo complexo na temperatura em que é realizado o ensaio de fadiga por norma e na temperatura crítica definida no plano Cole-Cole.....	143
Tabela 4.8 – Constantes de Willian-Landel e Ferry.....	151
Tabela 4.9 – Constantes do módulo de Huet-Sayegh.....	154
Tabela 4.10–Comparação da deformação de um milhão de ciclos pelo critério de 50%F e pelo critério de razão de energia dissipada mistura CAP 10/20.....	172
Tabela 4.11–Temperaturas críticas calculadas das misturas asfálticas.....	174
Tabela 4.12 – Análise dos resíduos para os valores modelados e experimentais.....	175
Tabela 5.1– Definição da temperatura do ensaio de fadiga conforme cada região no plano Cole-Cole.....	186
Tabela 5.2– Número de eixos de projeto calculado segundo o tipo de estrutura.....	195
Tabela 5.3– Constantes do modelo de Huet-Sayegh.....	196
Tabela 5.4– Deformações admissíveis pavimento tipo I – espesso ($NE = 1,07 \times 10^7$).....	199
Tabela 5.5– Espessura do pavimento tipo I, espesso com CAP10/20.....	200
Tabela 5.6– Espessura pavimento tipo I, espesso com CAP30/45.....	201
Tabela 5.7– Espessuras do pavimento tipo I , pavimento espesso com CAP 50/70.....	202
Tabela 5.8– Deformações admissíveis para pavimento tipo II, pavimento simples.....	204
Tabela 5.9– Espessuras do pavimento tipo II , pavimento simples com CAP10/20.....	205
Tabela 5.10–Espessuras do pavimento tipo II, simples com CAP 30/45.....	206
Tabela 5.11–Espessuras do pavimento tipo II, simples com CAP 50/70.....	207

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EME	<i>Enrobés à Module Elevé</i>
GB	<i>Grave-Bitume</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
PCG	Prensa de Cisalhamento Giratório
SETRA	<i>Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LPC	<i>Laboratoire des Ponts et Chaussées</i>
NF	Norma Francesa
PST	Parte Superior de Terraplenagem
PF	<i>Plate-Forme</i>
MJA	Tráfego Médio Diário Anual
T	Tráfego
Dmáx	diâmetro máximo
n	expoente da curva granulométrica
%p	percentagem passante
K	módulo de riqueza
ϵ_6	deformação para um milhão de solicitações.
s	segundos
MVR	massa volumétrica real
MVA	massa volumétrica aparente
R	tensão de ruptura a compressão simples sem Condicionamento na água
r	tensão de ruptura a compressão simples com condicionamento na água
V _i	volume de vazios mínimo
V _s	volume de vazios máximo
μ_{def}	micro deformações
t	toneladas
E	módulo de elasticidade
ω	pulsação
t	tempo
v	velocidade
ϵ	deformação
σ	tensão
f	frequência
ϵ_0	amplitude de deformação
R	módulo de relaxação

ε^*	deformação complexa
σ^*	tensão complexa
φ	ângulo de defasagem
E1	parte real do módulo, associado à energia recuperada
E2	parte imaginária do módulo, associado à energia perdida
N	número de aplicação das solicitações
S	solicitação (tensão ou deformação)
b	inclinação da curva
a	constante
S^*	solicitação complexa senoidal
R^*	resposta complexa senoidal
S_m	amplitude da solicitação
R_m	amplitudes da resposta
Nf	duração de vida
E_∞	módulo instantâneo do modelo de Huet-Sayegh
E_0	módulo estático para situações de baixas frequências e elevadas temperaturas
k, h	parâmetros dos elementos parabólicos do modelo Huet-Sayegh
δ	função da natureza do betume e curva granulométrica,
τ	tempo de relaxação dos amortecedores
SN	desvio padrão dos resíduos do ensaio de fadiga
Sh	dispersão sobre a espessura da camada
u	variável associada ao risco
δ	desvio-padrão da distribuição do $\log(N)$ para 10^6 ciclos
αT	fator de translação
°	graus
°C	graus centígrados
$\sigma_{K\varepsilon}$	desvio padrão do coeficiente de forma
d	abertura da peneira
E^*	módulo complexo
$K\sigma$	coeficiente de força
$K\varepsilon$	coeficiente de forma
tr	translações
V	volume
C	compacidade
γ	fator de forma mm-1
μ	fator de massa
M	Massa do corpo de prova
m	Massa móvel do equipamento

dW	Trabalho por unidade de volume
ΔW	Densidade de energia dissipada
K	Fator de intensidade de tensão
γ	Parâmetro de forma
λ	Parâmetro de escala
SR	Relação entre o módulo para n ciclos e o módulo inicial
W	Densidade de energia dissipada
$f\theta$	Fator de conversão por temperatura a partir da energia
θ_f	Temperatura do ensaio de fadiga
θ_c	Temperatura crítica determinada no plano complexo para baixa frequência
θ	Temperatura na qual se quer encontrar a deformação de 1 milhão de ciclos
ε_{mod}	Deformação do ensaio de módulo complexo
W_{θ_c}	Densidade de Energia correspondente na temperatura θ_c nas baixas frequências; ou na frequência de 25hz e temperatura θ considerando o deslocamento da energia pelo efeito da frequência
W_{θ}	Densidade de Energia correspondente na temperatura θ nas baixas frequências; ou na frequência de 25hz e temperatura θ considerando o deslocamento da energia pelo efeito da frequência
φ_{θ_c}	Angulo de fase na temperatura crítica θ_c
φ_{θ}	Angulo de fase na temperatura requerida θ
ε_6	Deformação de 1 milhão de ciclos no ensaios de fadiga de referência;
b	expoente da curva de fadiga de referência

SUMARIO

RESUMO	11
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS.....
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	25
CAPITULO 1.....	35
1 INTRODUÇÃO	35
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	35
1.2 OBJETIVOS	40
1.2.1 Objetivo geral	40
1.2.2 Objetivos específicos	40
1.3 METODO PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	41
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	43
1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE	43
CAPÍTULO 2.....	45
2. MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO.....	45
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	45
2.2 FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	49
2.3 MÓDULO COMPLEXO	57
2.3.1 Viscoelasticidade das misturas asfálticas	61
2.3.2 Curvas isócronas	61
2.3.3 Curvas isotérmicas	62
2.3.4 Espaço de Black.....	63
2.4.5 Plano Cole-Cole	63
2.3.6 Curva equivalência frequência-temperatura.....	64
2.4 MODELOS DE COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	66

2.4.1	Modelo de Huet (1963).....	66
2.4.2	Modelo de Huet-Sayegh (1965).....	68
2.4.3	Modelo 2S2P1D Geral.....	69
2.5	FADIGA DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS	70
2.5.1	Fadiga dos concretos asfálticos	72
2.5.2	Tixotropia.....	74
2.5.3	Aquecimento interno.....	74
2.5.4	Energia de deformação	75
2.5.5	Energia de deformação na solitação por flexão	76
2.5.6	Tipos de ensaios de fadiga.....	77
2.5.7	Influência do tipo de ensaio	81
2.5.8	Variação da fadiga no plano complexo.....	84
2.5.9	Critérios de avaliação da resistência à fadiga.....	86
2.6	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA CONSISTENCIA DO LIGANTE ASFÁLTICO	96
2.7	RESUMO DA REVISÃO DE INTERESSE PARA A TESE	114
CAPITULO 3.....		115
3	MATERIAIS E MÉTODO DA PESQUISA	115
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	115
3.2	MATERIAIS	115
3.2.1	Ligante Asfáltico.....	115
3.2.2	Agregados.....	116
3.3	MÉTODOS DA PESQUISA.....	116
3.3.1	Preparação das Misturas	116
3.3.2	Ensaio de compactação por cisalhamento giratório (NF P 98-252)	117
3.3.3	Corpos de prova para o ensaio de módulo complexo e de fadiga NF P 98-250-3.....	118

3.3.4	Aferição dos Excêntricos da Máquina de Módulo e Fadiga.....	120
3.3.5	Ensaio de Módulo Complexo NF P 98-260-2	121
3.3.6	Ensaio de fadiga NF P 98-261-1.	124
3.3.7	Análise do módulo complexo e da fadiga a partir do princípio de energia	129
3.3.8	Modelo para a previsão da deformação a partir do princípio de energia dissipada.....	130
3.3.9	Modelização e dimensionamento do pavimento.	131
CAPITULO 4.....		133
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSÃO DOS RESULTADOS.....	133
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	133
4.2	MATERIAIS E CARACTERISTICAS FÍSICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	133
4.2.1	Caracterização do ligante asfáltico.....	133
4.2.2	Caracterização dos agregados e curva granulométrica	135
4.2.3	Características físicas das misturas	136
4.2.4	Compactação e serragem dos corpos de prova do ensaio de módulo complexo e fadiga.....	138
4.3.	MÓDULO COMPLEXO	140
4.3.1	Plano Cole–Cole	141
4.3.2	Curvas isócronas	144
4.3.3	Curvas isotérmias.....	146
4.3.4	Espaço de Black.....	148
4.3.5	Curvas Equivalência frequência – temperatura	151
4.4	MODELO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO.....	153
4.5	FADIGA	161

4.5.1	Critério de fim de vida na fadiga fundamentada em princípios de energia	168
4.5.2	Comparações entre as misturas asfálticas em relação à fadiga	172
4.5.3	Variação da deformação em função da temperatura e consistência do ligante.....	174
4.6.	COMENTARIOS SOBRE OS RESULTADOS	176
4.6.1	Módulo complexo	176
4.6.2	Fadiga	177
CAPITULO 5.....		179
5	ANÁLISE E EXPLORAÇÃO DE RESULTADOS.....	179
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	179
5.2	ANÁLISES DO COMPORTAMENTO NA FADIGA EM RELAÇÃO AO MÓDULO COMPLEXO	179
5.2.1	Componente imaginária e energia dissipada do Ensaio de MóduloComplexo.....	180
5.2.2	Análise em função da variação do MóduloComplexo em função da temperatura e da consistência do ligante asfáltico.	185
5.2.3	Variação do ensaio de fadiga no plano Cole–Cole.....	187
5.2.4	Variação da força inicial com a deformação, temperatura e consistência	188
5.2.5	Variação do ângulo de fase com a deformação, temperatura e consistência;	189
5.2.6	Variação da densidade de energia dissipada com a deformação, temperatura e consistência.	190
5.3	MODELO ANALÍTICO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA FADIGA	192
5.4	EFEITO NO DIMENSIONAMENTO	195
5.4.1	Propriedades dos materiais	197
5.4.2	Estrutura de pavimento tipo I – pavimento espesso.....	197

5.4.3	Estrutura de pavimento hipotética tipo II – pavimento simples	204
5.5	COMENTARIOS SOBRE OS RESULTADOS	209
	CAPÍTULO 6.....	211
	CONCLUSÕES	211
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	214
	APÊNDICE A	229
	APÊNDICE B	231
	APÊNDICE C	237
	APÊNDICE D	239
	APÊNDICE E	245
	APÊNDICE F	247
	APÊNDICE G.....	253

CAPITULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os métodos de preparação das misturas asfálticas têm se desenvolvido ao curso dos últimos 40 anos para responder à evolução das exigências crescentes do tráfego. A concepção e o dimensionamento das camadas dos pavimentos rendem-se cada vez mais e mais complexas e precisas, para levar em conta a segurança e o conforto dos usuários, a durabilidade, a manutenção dos pavimentos, as condições climáticas.

Ao longo dos anos e nos diferentes países, é possível distinguir-se diferentes métodos de formulação de misturas asfálticas, tais como (LCPC, 2007): (1) por receita, (2) a partir de ensaios empíricos, (3) a partir de cálculos analíticos, (4) volumétricos, (5) por ensaios relacionados às propriedades, (6) por ensaios fundamentais ao dimensionamento dos pavimentos.

Os métodos de formulação por receitas se apóiam em experiências locais, e, às vezes, apoiados em ensaios empíricos.

Dentre os métodos de ensaios empíricos, o mais difundido é o método Marshall.

Nos métodos analíticos, o desempenho da mistura é estimado pela modelização da mistura por cálculo de suas propriedades tais como a percentagem de vazios e outras.

O método volumétrico consiste em deduzir as respectivas proporções de materiais expressas em volume, do esqueleto mineral, do betume em corpos de prova compactados em condições fixadas e definir o comportamento da mistura sem necessariamente realizar ensaios mecânicos complementares.

O método relacionado com as propriedades apóia-se em ensaios que procuram simular em laboratório as situações de campo e buscam uma relação entre o campo e o laboratório, especialmente, para propriedades que não definem propriedades fundamentais ao dimensionamento. Um exemplo é o ensaio de afundamento de trilha de rodas.

Os métodos de formulação de misturas asfálticas chamados de fundamentais abrangem os ensaios cujos resultados são usados diretamente nos modelos de cálculo das espessuras das camadas dos

pavimentos. Tipicamente, os valores do módulo dinâmico e dos parâmetros de fadiga.

Frequentemente, as formulações de misturas asfálticas podem abranger diversos métodos em fases diferentes de preparação.

Por sua vez, a concepção da estrutura dos pavimentos por se dar por diferentes tipos de métodos de dimensionamento (PERRET, 2003), tais como: (1) método empírico, (2) método mecânico-empírico, (3) método fundamental.

Os métodos empíricos de dimensionamento são baseados exclusivamente em experiências de longo termo de diversas estruturas para diferentes condições de clima e tráfego. Por exemplo, os métodos obtidos como resultados das pistas de teste de AASHTO ROAD TEST.

Neste teste, números tipos de estruturas foram concebidos e foram solicitadas por diferentes configurações de cargas. A capacidade de suporte é definida por seu valor estrutural SN (Structural number). Exemplo de país que tem adotado este método é a Suíça.

O método mecânico-empírico faz uma aproximação analítica complementada por dados empíricos. Geralmente procedem em duas etapas: (1) determinação de solicitações em uma estrutura sob o efeito de carga do tráfego e (2) relacionar as solicitações com certas de gradações dos pavimentos.

Assim, em geral, é possível distinguir dois tipos de modelos: modelos de cálculo e modelos de desempenho.

O método fundamental de dimensionamento baseia-se em ensaios de laboratório para a definição dos parâmetros de dimensionamento tais como o módulo dinâmico e os parâmetros de fadiga, com os respectivos fatores de relação laboratório campo relacionados com o grau de confiança dos ensaios de fadiga, com o ajustamento do modelo computacional e o ajustamento que tem em conta a uniformidade da capacidade de suporte das camadas.

Este método vem sendo aperfeiçoado na França nos últimos 60 anos.

O método de dimensionamento fundamental de dimensionamento de estruturas de pavimentos em concretos asfálticos distingue três etapas: (1) A primeira etapa consiste na modelização matemática das camadas do pavimento assimilando o comportamento mecânico dos materiais em cada uma das camadas. Particularmente, a modelização assume o comportamento viscoelástico das misturas de concreto asfálticos. (2) Na segunda etapa, realiza-se a operação computacional, determinando tensores das tensões e das deformações em todos os pontos da estrutura do pavimento, dedicando especial atenção para os

pontos considerados críticos, quais sejam, a deformação de tração longitudinal na fibra inferior da camada betuminosa e a deformação vertical no topo da camada da plataforma. (3) Na terceira etapa, efetuou-se a comparação das deformações calculadas, particularmente a deformação longitudinal da fibra inferior da camada betuminosa com a deformação obtida no ensaio de fadiga de laboratório relativo ao número de eixos de tráfego, dita deformação admissível. Se for verificado que a deformação calculada é maior que a deformação admissível, procede-se a novos cálculos. A condição de aceitação é que a deformação calculada seja menor que a deformação admissível, contudo com valor próximo ao valor dela.

Na concepção de estrutura de pavimentos novos em concreto asfáltico, a deformação de tração longitudinal admissível é determinada pela equação 1.1 (LCPC-SETRA, 1997):

$$\varepsilon_{t,adm}(NE, T_{eq}, f) = \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{-b} \cdot \left(\frac{E(10^\circ C)}{E(T_{eq})}\right)^{0.5} \cdot k_s \cdot k_r \cdot k_c \quad (1.1)$$

Onde:

$\varepsilon_{t, adm}(NE, Teq, f)$ = deformação de tração longitudinal na flexão admissível na fibra inferior da camada de concreto asfáltico de maior profundidade determinada em função do número de eixos para da temperatura equivalente e para a frequência característica;

ε_6 = deformação de tração correspondente ao numero de um milhão de ciclos determinada no ensaio de fadiga a flexão alternada em modo contínuo na temperatura de 10°C e na frequência de 25 Hz;

$E(10^\circ C)$ = módulo dinâmico medido a 10°C e a frequência de 10 Hz;

$E(Teq)$ = módulo dinâmico na temperatura equivalente, geralmente considerado na temperatura de 15°C e na frequência de 10 Hz;

b = expoente da equação de fadiga determinada em laboratório, ou seja, é a declividade da reta de fadiga em escala logarítmica;

k_r = coeficiente de risco em função do desvio padrão dos resíduos no ensaio de fadiga e da dispersão da espessura das camadas do pavimento em campo;

k_c = coeficiente de ajuste do modelo computacional em comparação com o comportamento de campo para cada tipo de pavimento;

k_s = coeficiente de ajuste da heterogeneidade da capacidade de suporte das camadas da plataforma do pavimento;

A deformação admissível é determinada para o tráfego definido por NE, que é o número de eixos a passarem no pavimento no horizonte, configurado em eixo simples de duas rodas exercendo carga de 130 kN.

A metodologia francesa considera o conceito de temperatura equivalente como sendo a temperatura na qual se produz o mesmo dano no material concreto asfáltico que o dano produzido no concreto asfáltico nas variações sazonais durante o período do horizonte de projeto.

Conceitualmente, esta temperatura equivalente é de fácil compreensão, contudo existem dificuldades para a determinação deste valor. Tradicionalmente, a metodologia francesa tem adotado para as suas condições particulares a temperatura equivalente como sendo de 15°C.

A temperatura equivalente depende fortemente do comportamento do material a diferentes temperaturas. Na equação 1.1, o efeito da temperatura equivalente é considerado mediante a relação modular $(\sqrt{E(10^\circ C)/E(T_{eq})})$, que consiste em uma transladação da rigidez do material para a temperatura equivalente, uma vez que o ensaio de fadiga é normalizado para ser realizado na temperatura de 10°C.

A determinação da temperatura equivalente importa na determinação do dano produzido no concreto asfáltico em função das temperaturas locais do pavimento. Para tal são necessárias as determinações das curvas de fadiga em diferentes temperaturas e as determinações das temperaturas de campo nas estruturas dos pavimentos nos diversos locais do país.

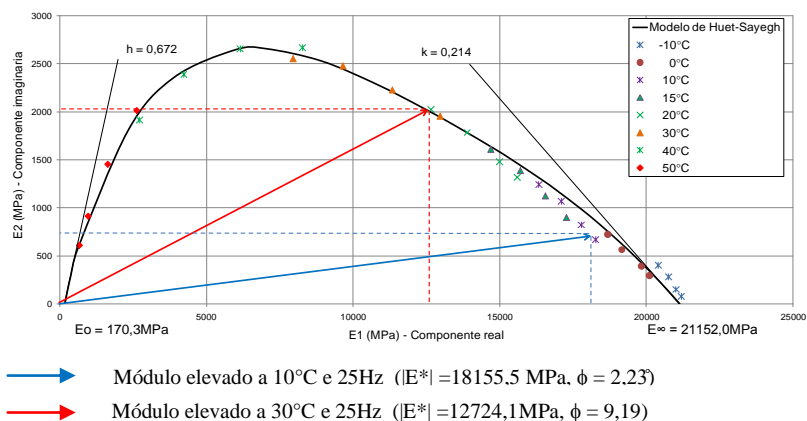
Este parâmetro de relação de rigidez adotada na equação de determinação da deformação admissível assume que o produto da deformação de um milhão de ciclo da fadiga em certa temperatura com a raiz quadrada do módulo nesta temperatura é uma constante (LCPC, 1997). Contudo, isto não se tem mais verificado, com se verá na revisão bibliográfica.

Outro fato relevante tem sido observado nos estudos de módulo complexo. Na representação do módulo complexo no plano Cole-Cole, para misturas de concreto asfáltico tradicionais com ligantes tradicionais, os valores máximos da componente imaginária do módulo complexo ocorriam nas proximidades das temperaturas de 10°C a 15°C (MOMM, 1997). Atualmente, tanto os ligantes asfálticos mudaram de

comportamento no plano Cole-Cole com a pretensão de usar ligantes com consistência maiores. Estas particularidades induzem maiores dificuldade de manutenção deste conceito de temperatura equivalente no dimensionamento dos pavimentos, particularmente em países de maiores temperaturas ambientais.

Experimentalmente, tem-se verificado que os valores da componente imaginária tem se deslocado das proximidades da temperatura de 10°C para valores mais altos de temperatura. Ou seja, a temperatura em que ocorre o máximo da componente imaginária, chamada de temperatura crítica, não corresponde mais à temperatura de 10°C, especialmente para misturas com ligantes de maiores consistência (QUINTERO, 2011) Na figura 1.1 pode-se observar que, para as misturas asfálticas com ligantes de elevada consistência, com cimento asfáltico de petróleo de penetração 10/20 (0,01 mm), o valor máximo da componente imaginária (temperatura crítica) ficou próximo dos 30°C. No dimensionamento, com certeza, a relação modular proposta de temperatura equivalente não atende, tendo em vista que a menor deformação para um milhão de ciclos ocorrerá nas proximidades dos 30°C.

Figura 1.1 – Deslocamento da temperatura crítica no Plano Cole Cole.



Fonte: Quintero (2011).

Depara-se, portanto, com uma questão a ser estudada ante as dificuldades de aplicação do conceito de temperatura equivalente para os ligantes asfálticos atuais, que apresentam comportamento

diferenciado do módulo complexo no plano Cole-Cole, ante a tendência de uso cada vez mais frequente dos ligantes de consistência maior.

Por seu comportamento viscoelástico, os concretos asfálticos apresentam os menores valores de deformação de um milhão de ciclos nas temperaturas críticas, posto que é nesta temperatura que o material tem maiores valores de energia perdida.

Uma questão pode ser posta: Seria viável realizar o ensaio de fadiga na temperatura crítica da mistura de concreto asfáltico como alternativa à utilização do conceito de temperatura equivalente?

Assim sendo, o presente trabalho de pesquisa ocupa-se em estudar o comportamento de misturas asfálticas formuladas com ligantes de diferentes consistências e diversas temperaturas no módulo complexo e na fadiga, com o propósito de estimar a deformação para um milhão de ciclos do ensaio de fadiga a partir da densidade de energia dissipada do ensaio de módulo complexo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas formuladas com ligantes de diferentes consistências em condições de diferentes temperaturas nos ensaios de módulo complexo e de fadiga em razão da sua aplicação no método de dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento das três misturas distintas no módulo complexo.
- Avaliar o comportamento das três misturas de concreto asfáltico na fadiga em três temperaturas distintas, ao entorno da temperatura crítica.
- Analisar o comportamento das misturas no plano complexo com base no princípio da energia dissipada.
- Analisar o comportamento das misturas asfálticas na fadiga a partir do princípio de energia dissipada.
- Analisar o comportamento das misturas asfálticas no modelo reológico de Huet-Sayegh, determinando seus parâmetros para cada uma das misturas ensaiadas a partir do ensaio de Módulo Complexo.
- Analisar as relações de fadiga das misturas asfáltica com o plano complexo

- Simular dimensionamentos de estruturas de pavimento considerando o efeito da temperatura e da consistência dos ligantes asfálticos.

1.3 METODO PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Para alcançar o objetivo, três misturas asfálticas são formuladas cuja única variação é a consistência do ligante asfáltico, usando os ligantes asfálticos classificados por penetração CAP10/20, CAP30/45 e CAP 50/70

As misturas asfálticas são preparadas com teor de ligante asfáltico único de 5,7%, cujo valor já foi estudado em pesquisa anterior. As temperaturas de serviço são definidas de tal forma a que sejam alcançadas as mesmas percentagens de vazios na prensa de compactação giratória.

A granulometria das misturas asfálticas é única para as três misturas asfálticas, assim, definida pela equação de Talbot (equação 1.2), com o expoente da curva “n” igual a 0,50 e material passante na peneira 0,075 milímetros igual a 7% e diâmetro máximo dos granulares de 15,9 mm.

$$\%p = a. \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (1.2)$$

Onde:

%p = percentagem passando na dimensão d, em peso;

a = constante igual a 100;

d = tamanho da abertura da peneira em mm;

D = tamanho da peneira onde passa 100% do material em mm;

n = expoente da curva granulométrica.

Inicialmente, realiza-se avaliação das temperaturas de compactação, como o propósito de garantir que todas as misturas asfálticas tenham o mesmo grau de compactação com os ligantes asfálticos de diferentes penetrações, cuja viscosidade é determinada da mistura de referencia correspondente à mistura com ligante asfáltico 10/20.

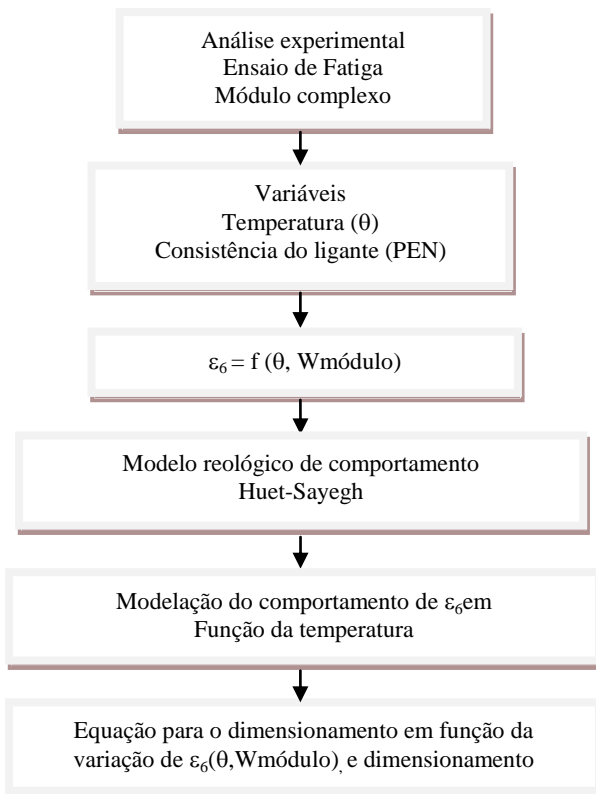
O ensaio de módulo complexo é realizado a intervalos de temperatura 5°C, nas temperaturas de -10°C, -5°C, 0°C, 5°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 35°C, 40°C e 45°C e frequências de 1.5Hz, 3Hz, 10Hz, 15Hz, 25Hz, 30Hz.

A seleção das temperaturas para realizar o ensaio de fadiga é a partir da representação do módulo complexo no plano Cole-Cole, para cada mistura asfálticas.

Os ensaios de fadiga são realizados: (1) um ensaio de fadiga na temperatura considera crítica no plano Cole-Cole (chamada de temperatura intermediária), (2) um ensaio de fadiga em temperatura mais elevada que a crítica (chamada de temperatura elevada) e (3) um ensaio de fadiga em temperatura inferior à temperatura crítica (chamada de temperatura baixa, totalizando no mínimo três ensaios de fadiga para cada material).

A modelação é realizada com a variável temperatura (θ) sobre o conceito de energia dissipada por unidade de volume (W). A figura 1.2 ilustra o esquematicamente de desenvolvimento da tese.

Figura 1.2 – Esquema de desenvolvimento da tese.



Fonte: Autor (2016).

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A presente pesquisa circunscreve-se a atividades internas ao laboratório, sem avaliação de campo. Por serem atividades laboratoriais, não se busca na presente pesquisa comparações com a temperatura equivalente de algum sítio local, o que demandaria pesquisa de campo, o que não é objetivo do trabalho e nem seria viável pela ausência de recursos.

O estudo é realizado no âmbito da metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas e de concepção de pavimentos em concretos asfálticos. A modelação do módulo complexo é realizada com o modelo reológico de Huet-Sayegh por ser o atual modelo usado na simulação do comportamento das misturas asfálticas no dimensionamento dos pavimentos.

Dois tipos de estruturas de pavimentos são simulados, correspondente a camadas betuminosas espessas, idealizada em conformidade com a metodologia francesa de concepção de pavimentos.

E um segundo tipo de estrutura denominada estrutura de pavimento simples, que corresponde à estrutura convencional onde nas camadas de base e sub-base são utilizados materiais granulares, aplicável para todas as misturas desta tese, utilizada tanto no Brasil como na França.

Simular os resultados da pesquisa em pavimentos diversos que da metodologia francesa seria inconveniente em razão da aplicação da modelação adotada pela metodologia francesa e não seria o objetivo do trabalho.

O trabalho fica circunscrito a este estrito conjunto de variáveis (três temperaturas e três consistências de ligantes) em razão do tempo do trabalho para a realização dos ensaios.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Capítulo 1 – Introdução

O Capítulo apresenta o alcance da tese, define as variáveis que serão analisadas, assim como os ligantes asfálticos, fixa o objetivo, destaca as limitações e evidencia a organização do trabalho.

Capítulo 2 – Misturas de Concretos Asfálticos

O capítulo aborda a revisão em relação ao comportamento dos concretos asfálticos, módulo e caracterização mecânico no regime viscoelástico linear, conceitos de viscoelasticidade no domínio da

frequência e do tempo e modelos de comportamento mecânico. Também é realizada uma revisão sobre a fadiga dos concretos asfálticos descrevendo os fenômenos inerentes à fadiga e os critérios de determinação de fim de vida a fadiga e os fatores que afetam a fadiga e o módulo complexo.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos da Pesquisa

É descrita a metodologia experimental, são descritos os materiais, ligante asfáltico e agregados, são descritos os ensaios de módulo complexo e de resistência a fadiga, os procedimentos para a seleção dos corpos de prova para os ensaios de módulo complexo e de fadiga, os procedimentos de aferição do excêntrico com corpo de prova padrão e as condições do ensaio de módulo complexo e de fadiga em relação às temperaturas e as frequências de ensaio.

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão de Resultados.

É realizada a caracterização dos materiais. É apresentada a caracterização do ligante asfáltico e agregados. São apresentados os resultados experimentais de módulo complexo, nas diferentes formas de representação. São determinados os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh. Também são apresentadas as curvas de fadiga nas diferentes condições de temperatura para cada tipo de ligante asfáltico. As curvas de fadiga são definidas conforme o critério de 50% da força inicial e a partir do critério de densidade de energia dissipada.

Capítulo 5 – Análise e Exploração dos Resultados.

São discutidos os resultados experimentais em relação à influência da consistência do ligante asfáltico e da temperatura em relação ao módulo complexo e à fadiga. O ensaio de módulo complexo é analisado a partir da componente imaginária e densidade de energia dissipada. É avaliada a variação da deformação para um milhão de ciclos em função da temperatura e consistência do ligante asfáltico. É discutido o ensaio de fadiga no plano Cole-Cole. É proposto um modelo analítico para a previsão da deformação de um milhão de ciclos em função da temperatura. São realizadas simulações hipotéticas de dimensionamento com variação da temperatura.

Capítulo 5 – Conclusões e Recomendações

O capítulo apresenta as conclusões da tese e as recomendações para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os métodos de formulação de misturas asfálticas ditos fundamentais objetivam, basicamente, a determinação dos parâmetros comportamentais dos concretos que são utilizados no dimensionamento das estruturas dos pavimentos, particularmente, a rigidez e a deformação admissível, contudo, levam em conta a avaliação dos materiais à deterioração por diversos fatores.

O fenômeno principal de deterioração dos pavimentos é o fenômeno da fadiga dos materiais sujeitos às solicitações do tráfego. Com o propósito de selecionar o concreto asfáltico de melhor desempenho quanto à fadiga na estrutura do pavimento é que se busca elaborá-lo de modo a otimizar a vida de fadiga, selecionando-o dentre as diversas alternativas de misturas asfálticas que atendam a parâmetros mínimos quanto a outros fenômenos de deterioração tais como o efeito da água e o fenômeno da formação da trilha de rodas.

Em sentido geral, o concreto asfáltico é constituído de granulares, materiais inertes que formam o esqueleto da mistura asfáltica e do ligante asfáltico que proporciona a adesão entre estes granulares, e que lhe confere as propriedades de um material viscoelástico, conservando ainda vazios entre estes materiais.

Assim sendo, as propriedades mecânicas intrínsecas da mistura asfáltica dependem de variáveis, tais como: das propriedades e da quantidade do ligante asfáltico, das propriedades dos agregados na estrutura do material, da distribuição dos vazios (HUANG *et al.*, 2006).

A origem e formação variada dos agregados e dos ligantes ocasionam reações diferentes entre os granulares e o ligante asfáltico (WANG, 2011; HUANG *et al.*, 2006). As diferenças entre as propriedades do ligante e dos agregados fazem deste um material com propriedades altamente variáveis.

Além das propriedades intrínsecas do material, variáveis externas como a temperatura e a frequência das solicitações produzem alterações em suas propriedades mecânicas, por ser este um material viscoelástico.

Assim, devido à susceptibilidade térmica e cinética dos concretos asfálticos herdada do ligante asfáltico, a deformação para um milhão de ciclos do ensaio fadiga e a rigidez dos concretos asfálticos determinada

no módulo complexo muda com a variação da temperatura e da frequência (HUET, 1953; MOMM, 1998).

No intuito de melhorar as propriedades mecânicas do concreto asfáltico e reduzir os efeitos da variação da temperatura aditivos têm sido usados, tais como os polímeros, ou aumentando a consistência do ligante asfáltico e, conseqüentemente, aumentando de sua resistência mecânica.

A alternativa de usar ligantes asfálticos de consistência elevada nos concretos asfálticos tem sido objetos de trabalhos recentes como Villela (2012); Pereira (2012); Quintero (2011); Leite (2011); Rodhe (2007); Freitas (2007); Magalhães (2004) para avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

Na metodologia fundamental de formulação de misturas asfálticas o objetivo principal é obter os parâmetros necessários para o dimensionamento do pavimento (HECK, 2001).

A deterioração dos pavimentos pelo acúmulo dos danos produzidos pelas solicitações das cargas em movimento ocorre em limites controlados se as camadas do pavimento forem projetadas e colocadas de forma que dissipem as deformações até um nível que os materiais suportem a fadiga e aceitável pelo solo de fundação.

Para um adequado dimensionamento é necessário conhecer o tipo de solicitações das cargas e a resposta do pavimento, avaliando como estas variam no tempo para selecionar o melhor modelo de cálculo e de análise (SETRA-LCPC, 1997).

Na metodologia francesas de concepção de estruturas de pavimento *Guide Technique sur la Conception et la Conception de Dimensionnement des Structures de Chaussée* (SETRA-LCPC, 1994) a estrutura de pavimento pode ser agrupada segundo os materiais a serem utilizados.

Para rodovias denominadas de não estruturantes, ou de baixo volume de tráfego, pode ser utilizada uma camada de revestimento relativamente fina, inferior a 15 cm apoiada sobre uma ou varias camadas de granulares que constituem as camadas de base e sub-base. Este tipo de estrutura é similar à estrutura de pavimento utilizada no Brasil e, geralmente, nos países de América Latina, onde nas camadas de base e sub-base são utilizados materiais granulares.

Em outro grupo, as rodovias estruturantes, ou com elevado volume de tráfego, a estrutura do pavimento é projetada com camadas betuminosas espessas, na qual as camadas de base e sub-base são constituídas de misturas asfálticas, dentre elas, as misturas asfálticas de

módulo elevado, tais como as com ligante 10/20 ou misturas asfálticas *grave-bitume* com ligante 30/45.

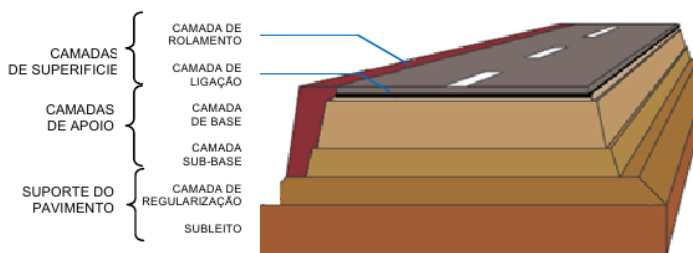
As camadas betuminosas espessas são compostas por uma camada de revestimento sobre um corpo de camadas asfálticas, que podem ser em uma ou duas camadas e correspondem às camadas de base e sub-base.

Uma estrutura tipo de pavimento, ilustrada na figura 2.1, tem todas as camadas definidas, previamente, conhecidas as suas características de módulo e resistência à fadiga, às quais são selecionadas segundo a posição que ocupam no corpo do pavimento. O suporte é constituído pela plataforma, eventualmente, acrescido de uma camada de reforço. As camadas com função estrutural são compostas pelas camadas de base e camadas de sub-base, que tem resistência mecânica elevada. A camada de superfície constituída pelas camadas de ligação e de rolamento que garante segurança e conforto.

A resposta das camadas betuminosas à passagem de cada carga em movimento se dá em flexão alternada. A alternância do sinal de deformação é de contração-extensão-contração, onde a amplitude do sinal depende da intensidade da carga aplicada, da velocidade de aplicação e da temperatura.

A alternância do sinal de deformação já foi verificada (HUET, 1963; De La ROCHE, 1996; PERRET, 2003) tanto em ensaios de campo como na modelação das respostas das camadas betuminosas.

Figura 2.1 – Corpo do pavimento numa estrutura multicamada.

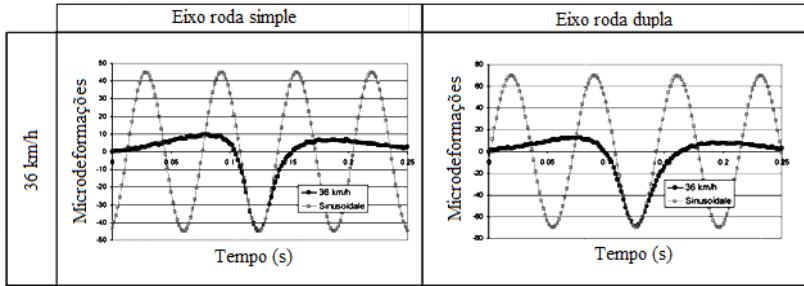


Fonte: Nguyen (2008).

Os sinais de deformação medidos em campo (PERRET, 2003) para eixo simples e eixo de roda dupla na velocidade de 36 km/h podem perfeitamente ser simulado pela decomposição da série de Fourier

(figura 2.2), verificando perfeitamente a frequência de resposta do pavimento.

Figura 2.2 – Deformação longitudinal medida em campo e simulada por decomposição de Fourier.



Fonte: Perret (2003).

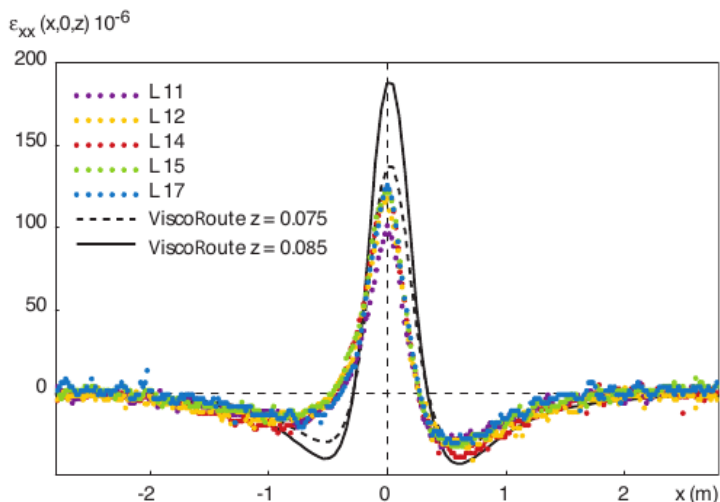
A modelação das respostas de tensão e deformação do pavimento pode ser realizada através de diferentes modelos de análise (elástico ou viscoelástico) e diferentes ferramentas computacionais. No entanto são destacados dois programas principalmente por considerar a velocidade da carga e o comportamento viscoelástico das camadas asfálticas.

A modelação das respostas do pavimento pode, precisamente, ser realizada utilizando programas tais como o CVCR (*Chaussée Viscoélastique sous Charge Roulante* – Pavimento Viscoelástico sob Carga Rolante) que utiliza um método de solução a partir de elementos finitos ou o programa *ViscoRoute* que utiliza um método de solução analítico a partir da dupla transformada de Fourier.

Tanto o programa CVCR como o programa *ViscoRoute* permitem considerar a efeito da carga em movimento e as propriedades viscoelásticas dos concretos asfálticos a partir do modelo reológico de Huet-Sayegh, cujos parâmetros são obtidos pelo ensaio de módulo complexo na metodologia de formulação fundamental de misturas betuminosas.

Os resultados obtidos na modelação com o programa *ViscoRoute* ao serem comparados com as deformações longitudinais (ϵ_{xx}), medidas em campo, na pista de Nantes (*Manège de Fatigue*), por medidores de deslocamentos (*capteurs de déformations* L11 a L17) incrustados na base das camadas de concreto asfáltico revelam elevada similitude (DUHAMEL, 2005, figura 2.3).

Figura 2.3 – Sinal longitudinal horizontal (ϵ_{xx}) a profundidades de 0,075m e 0,085 m, valores experimentais e modelados.



Fonte: Duhamel (2005).

A metodologia fundamental de formulação de misturas asfálticas desenvolvida pelos LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), atualmente denominado IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement, et des Réseaux*) da França permite otimizar as misturas asfálticas para serem usadas em cada uma das camadas da estrutura do pavimento, bem como obtêm os parâmetros necessários para a modelização das camadas de misturas asfálticas no domínio viscoelástico.

2.2 FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

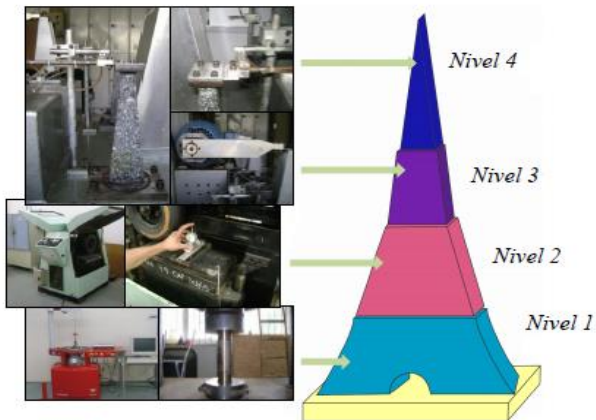
As misturas asfálticas colocadas na superfície de rolamento devem atender requisitos de qualidade quanto à segurança e conforto, enquanto resistem aos esforços do tráfego. Podem ter, além das qualidades de superfície, qualidades estruturais. De modo geral, as camadas de superfície são colocadas com fins de atender as condições de superfície, tais como os concretos asfálticos drenantes, que neste caso não contribuem com a solução estrutural (MOMM, 1998). As misturas asfálticas colocadas nas camadas subjacentes priorizam as qualidades mecânicas no módulo de rigidez dinâmico e na resistência a fadiga para

resistir os efeitos das cargas dinâmicas, como é o caso dos concretos de módulo elevado (QUINTERO, 2011).

Na metodologia francesa de formulação de misturas, quatro níveis (etapas) de ensaios são estabelecidos até abranger os ensaios fundamentais como módulo complexo e resistência à fadiga para aplicar ao dimensionamento do pavimento (MOMM, 1998). Todo projeto de mistura asfáltica bem sucedida deve garantir, além, do desempenho concernente à rigidez e à resistência na fadiga, o bom desempenho quanto à deterioração pela água e pela formação de trilhas de roda (*orniérage*).

A metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas abrange uma divisão: os níveis 1 e 2 abrangem os ensaios gerais e empíricos, nos quais, no nível 1, avalia-se a habilidade com que a mistura suporta a densificação (compacidade no ensaio de compactação a cisalhamento giratório) e o comportamento da mistura à capacidade de deterioração da água (resistência à água no ensaio Duriez) e no nível 2, avalia-se a resistência à deformação permanente (resistência à formação de trilhas de roda); os níveis 3 e 4 abrangem os ensaios fundamentais de módulo complexo e resistência a fadiga, respectivamente (LCPC – SETRA, 2007; figura 2.4).

Figura 2.4 – Níveis de formulação das misturas asfálticas.



Fonte: adaptada LCPC – SETRA (2007 *apud* Quintero *et al.*, 2012).

No nível 1, a mistura asfáltica será considerada apta se satisfizer a uma janela de percentagens de vazios na prensa de compactação por cisalhamento giratório definido para cada tipo de mistura asfáltica em função do número de giros, geralmente vinculado também à espessura da camada a ser aplicada em campo. Para aquelas aceitas pela qualidade de habilidade à compacidade, avalia-se a sensibilidade da mistura asfáltica à deterioração pela água, no ensaio de imersão e compressão simples (ensaio Duriez).

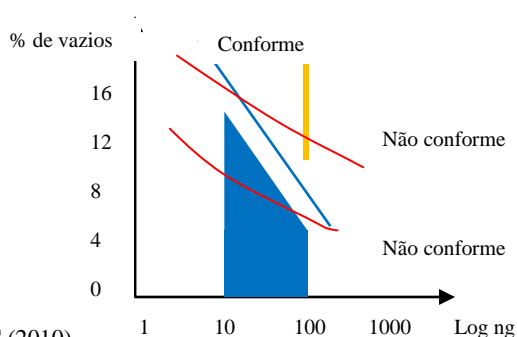
O ensaio de compactação por cisalhamento giratório viabiliza a seleção da curva granulométrica da mistura, a porcentagem de ligante asfáltico, a temperatura de compactação, a percentagem de vazios em vários números de giros (LCPC - SETRA, 2007).

A compacidade depende da granulométrica adotada, do teor de ligante, da distribuição espacial dos granulares em conjunto com o conteúdo de ligante e do tipo de ligante, que rege o comportamento mecânico da mistura.

Pela experiência adquirida ao longo dos anos, a habilidade com que a mistura aceita a compacidade permite identificar limites a partir dos quais as misturas asfálticas terão comportamentos com parâmetros verificados em níveis posteriores tais como a deformação permanente e a fadiga.

Assim, a metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas estabelece fronteiras de compacidade em função do número de giros para os diferentes tipos de misturas asfálticas empregadas na estrutura dos pavimentos (figura 2.5).

Figura 2.5 – Critério de seleção quanto à compacidade na PCG.

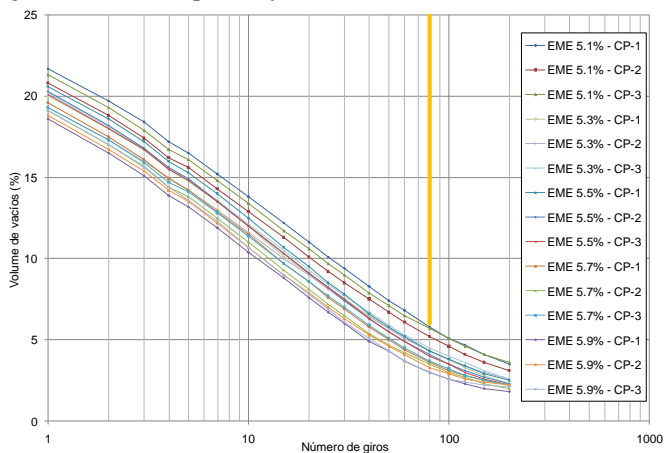


Fonte: LCPC (2010).

Indicam-se, a seguir, os resultados de um ensaio de compactação a cisalhamento giratório para preparada com ligante CAP 10/20 (figura 2.6).

Observa-se que há uma evolução gradual da curva de compactidade (volume de vazios) com aumento do número de giros. A inclinação das curvas é aproximadamente constante até as proximidades dos 80 giros e as curvas são paralelas entre si em função da percentagem de ligante. A janela de aceitação para a referida mistura ocorre no nível dos 80 giros em que o volume de vazios é inferior a 6% (Quintero, 2011).

Figura 2.6 – Exemplo de aptidão à compactidade da uma mistura de módulo elevado ligante asfáltico de penetração 10/20.



Fonte: Quintero (2011).

O ensaio Duriez consiste na compactação, por pressão estática de dupla ação, de 6 corpos de prova cilíndricos para serem condicionados a 18°C em umidade controlada, e de 6 corpos de prova são submersos na água a 18°C, com controle de percentagem de vazios, e na determinação da relação entre a resistência a seco e submerso, cujo valor que deve ser maior de um determinado limite fixado em função do tipo de mistura asfáltica.

A elevada consistência do ligante asfáltico aumenta consideravelmente os valores de tensão de ruptura, sendo muito superiores aos encontrados para misturas convencionais (tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Exemplo de mistura preparada com ligante CAP 10/20, ensaio Duriéz.

Teor de ligante (%)	r, (Mpa)	R, (Mpa)	r/R	Altura (mm)	V _v (%)
	Médio	Médio	-		Médio
5,1	21,74	23,32	0,93	86,62	8,86
5,3	23,13	23,92	0,97	85,41	8,02
5,5	23,84	26,12	0,91	84,99	7,38
5,7	24,69	26,57	0,93	84,80	6,78
5,9	24,98	25,40	0,98	84,89	6,35

Fonte: Quintero (2011).

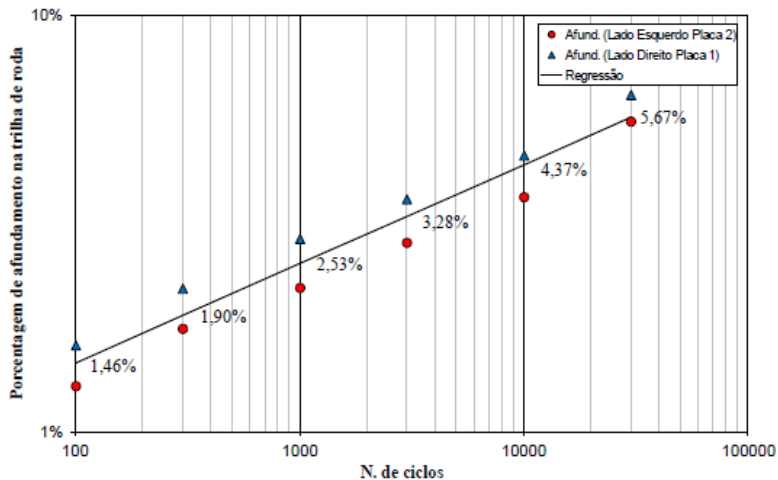
A evolução da tensão de ruptura no ensaio Duriez, na compressão simples, no exemplo, indica uma constante relação elevada entre a resistência a seco e submersa, contudo com uma redução com o aumento do teor de ligante.

O nível 2 da metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas avalia o risco de ocorrência do afundamento à deformação permanente, fenômeno de fluência da mistura asfáltica sob a ação da passagem das cargas rolantes. Na metodologia, somente as misturas aceitas no nível 1 é que são submetidas a este estágio. Este ensaio é realizado na temperatura de 60°C. Com a passagem da roda carregada sobre a placa, medem-se as posições da superfície em 15 pontos na temperatura ambiente e na temperatura de 60°C a intervalos de número de ciclos pré-definidos em norma. A avaliação do nível afundamentos pode ser feito para a situação dos 10000 ciclos ou dos 30000 ciclos, dependendo do tipo de mistura asfáltica em estudo. O ensaio é realizado com placas dimensões de 180mmx500mm e com espessuras de 50mm ou 100mm, sendo submetida a passagem de uma roda à frequência de 1Hz e carga de 5kN.

A percentagem de vazios afeta fortemente o comportamento do concreto asfáltico, aumentando os riscos de deformação permanente (MOMM, 1998), influi na sensibilidade do material (BROSSEAUD *et al.*, 1993).

Para mistura asfáltica de módulo elevado, (figura 2.7) os valores de afundamento no ensaio de deformação permanente esperados devem ser baixos, especialmente, para o caso de uso de ligantes de consistência elevada.

Figura 2.7 – Exemplo de ensaio de deformação permanente para uma mistura tipo BBME.



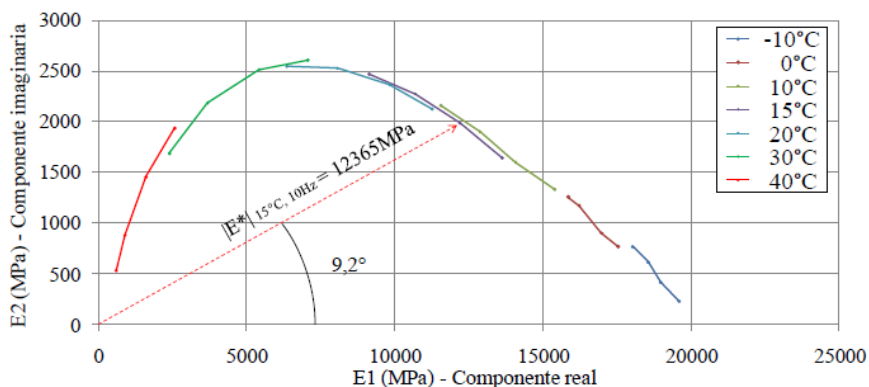
Fonte: Almeida (2013).

No nível 3, a metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas ocupa-se em determinar o comportamento da mistura asfáltica quanto ao módulo complexo. Tradicionalmente, para a situação do território francês, determina-se o módulo dinâmico a 15°C e 10Hz que sevem ao dimensionamento.

O ensaio de módulo complexo na metodologia francesa de formulação de misturas asfáltica consiste na determinação do módulo e do ângulo de defasagem entre a força e o deslocamento em corpos de prova trapezoidais padronizados, na flexão alternada sob deformação inferior a 50 microdeformações, em condicionamento de temperaturas de (-)10°C a 40°C e frequências de 1Hz a 30Hz.

Um modo muito interessante de representar o módulo complexo é no plano Cole-Cole, como o exemplo do módulo complexo de uma mistura preparada com ligantes asfáltico CAP 30/45 (figura 2.8).

Figura 2.8 – Exemplo de Módulo Complexo mistura preparada com ligante CAP 30/45.



Fonte: Quintero (2011).

A metodologia possibilita observar a evolução da componente real e da componente imaginária em relação às temperaturas e às frequências.

No exemplo, verifica-se que o máximo da componente imaginária não ocorre no domínio da temperatura de 10°C, cuja temperatura é a que tradicionalmente se faz o ensaio de fadiga. A figura 2.9 indica que as condições de ensaios da fadiga (10°C e 25Hz) estão enormemente afastadas da situação de valor máximo das componentes imaginárias e até os valores de módulo para a situação da temperatura de 20°C e 25Hz estão muito afastadas do ponto de máximo da componente imaginária, onde acontece a maior energia dissipada. Na prática, isto afeta as condições críticas de dimensionamento do pavimento. A temperatura crítica dos concretos asfálticos preparados com ligantes de consistência elevada CAP 30/45 é próxima dos 20°C.

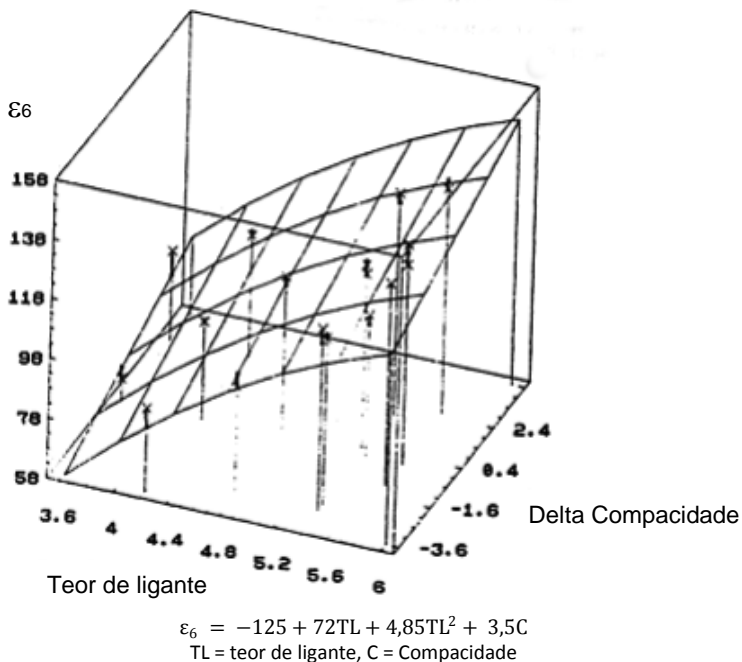
No nível 4, a metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas avalia a resistência à fadiga das misturas asfálticas. O ensaio de fadiga normatizado consiste na ruptura de um conjunto homogêneo de corpos de prova em relação às dimensões e a percentagem de vazio, de no mínimo 18 corpos de prova de forma trapezoidal padronizada, em flexão alternada, à deformação controlada, em modo contínuo, na temperatura de 10°C e 25Hz, em pelo menos 3 níveis de deformação de modo a que, pelo menos, um terço dos corpos de prova rompa com número de ciclos superior a um milhão de ciclos e todos rompam com número de ciclos em número superior a dez mil ciclos, cujo critério de ruptura é a redução da força pela metade.

Para a classificação das misturas asfálticas em certa categoria usa-se o parâmetro de deformação de ruptura para um milhão de ciclos, determinada na regressão dos valores do ensaio de fadiga. Por exemplo, para que uma mistura asfáltica seja considerada de módulo elevado é necessário que o valor da deformação de um milhão de ciclos, a 10°C e 25Hz, seja superior a 130 microdeformações.

Os fatores que influenciam na deformação para um milhão de ciclos são a curva granulométrica, a compactidade, a percentagem de finos, o teor e tipo de ligante asfáltico.

Na literatura encontram-se, exemplos de estudos da evolução da deformação de um milhão de ciclos com parâmetros, tal como o relatado por Moutier (1990) (figura 2.9). Observa-se comportamento não linear da deformação de um milhão de ciclos em função do teor de ligante asfáltico e compactidade (MOUTIER, 1990).

Figura 2.9 – Variação da deformação para um milhão de ciclos em função do teor de ligante asfáltico e da compactidade.



Fonte: Moutier (1990).

O estudo do comportamento mecânico dos concretos asfálticos no domínio viscoelástico linear pode ser abordado tanto com carregamento estático (domínio do tempo) quanto com carregamento frequencial sinusoidal (domínio da frequência); cada um deles com princípios físicos bem definidos para tentar reproduzir as condições a que os concretos asfálticos são submetidos.

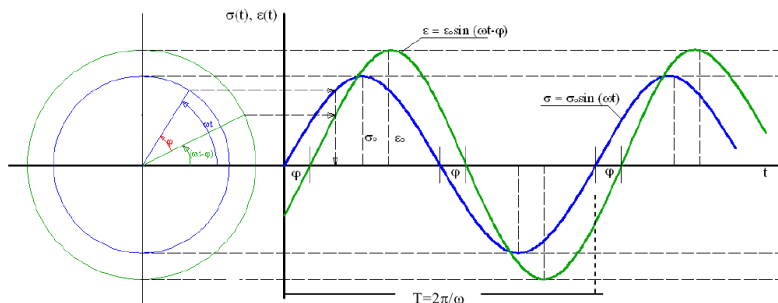
Na modelação matemática do pavimento, o comportamento do concreto asfáltico é considerado linear, homogêneo e isotrópico, sempre que esteja no domínio das pequenas deformações (MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996; RIVIERE, 1996).

Assumir um comportamento dentro do regime linear é mais simples já que podem se aplicar relações constitutivas mais simples entre a tensão e a deformação, analisando seu comportamento a partir dos conceitos da mecânica clássica, isto obedece a uma análise do comportamento do material numa escala macro, onde as propriedades dos compósitos são analisadas como se fosse um material homogêneo.

2.3 MÓDULO COMPLEXO

O comportamento dos materiais viscoelásticos diferencia-se do comportamento dos materiais puramente elásticos pela propriedade de apresentarem uma defasagem no tempo entre tensão aplicada e a respectiva resposta do material: a deformação. (HUET, 1963; De La ROCHE, 1996; MOMM, 1998; OLARD, 2003). A solicitação mais frequentemente usada é a do tipo senoidal (figura 2.10).

Figura 2.10 – Representação das funções de força e deformação.



Fonte: adaptada de Riande *et al.*, (2000).

Se a solicitação senoidal aplicada ao corpo viscoelástico for da forma (equação 2.1):

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t) = \text{Im}(\sigma^*) \rightarrow \sigma^* = \sigma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (2.1)$$

A resposta senoidal do material viscoelástico é da forma (equação 2.2):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) = \text{Im}(\varepsilon^*) \rightarrow \varepsilon^* = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (2.2)$$

Onde:

- σ_0 = amplitude da tensão;
- ε_0 = amplitude da deformação;
- ω = Pulsação (rad/s), $\omega = 2\pi\phi$;
- φ = ângulo de defasagem;
- t = tempo;
- i = $\sqrt{-1}$.

A defasagem φ entre a tensão e a deformação dá a idéia do caráter viscoso do material. Se o ângulo $\varphi = 0$, o material é elástico.

A relação das tensões e deformações complexas é definido como módulo complexo (equação 2.3):

$$E^*(t) = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} \quad (2.3)$$

Onde:

- E^* = Módulo complexo;
- σ^* = amplitude complexa da tensão sinusoidal;
- ε^* = amplitude complexa da deformação sinusoidal.

O módulo complexo pode ser representado também pela parte real e a parte imaginária. Fisicamente, pode ser interpretado com a soma vetorial da componente elástica associado à parte real do módulo e a componente viscosa do material associado à parte imaginária do módulo.

A partir do módulo complexo (equação 2.4) é possível descrever o comportamento viscoelástico no regime linear no domínio da frequência dos concretos asfálticos.

$$E^*(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\varphi} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \varphi + i \operatorname{sen} \varphi) = E_1 + iE_2 = |E^*|e^{i\varphi} \quad (2.4)$$

Onde:

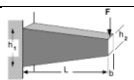
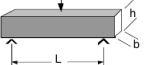
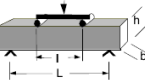
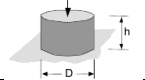
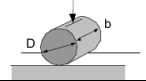
E_1 = é a parte real, associada à energia armazenada;

E_2 = é a parte imaginária, associada à energia perdida por atrito interno do material (comportamento viscoso irreversível).

Em laboratório, diferentes tipos de ensaios servem para determinar o módulo complexo a diferentes frequências e diferentes temperaturas, de modo a conhecer, num amplo espectro de frequências e temperaturas, o comportamento do material.

Os ensaios para determinar o módulo complexo podem ser classificados em homogêneos e não homogêneos (Di BENEDETTO, 1990). Os ensaios não homogêneos requerem tomar em conta a geometria do corpo de prova para o cálculo da tensão e da deformação na seção mais solicitada do material (tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Fator de forma e de massa para alguns tipos de ensaios.

Tipo	Geometria	Fator de forma L-1	Fator de massa
2PB		$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$	$0,135M + m$
3PB		$\frac{4L^3}{b \cdot h^3}$	$\frac{M}{4} + m$
4PB		$\frac{24 \cdot L^3}{\pi \cdot b \cdot h^3}$	$\frac{M + m}{2}$
T/C		$\frac{4h}{\pi \cdot D^2}$	$\frac{M}{2} + m$
ITT		$\frac{1}{b} \cdot (v + 0,27)$	-

Fonte: NF EN 12697-26 (2004).

Para corpos de prova trapezoidais, o fator de forma " γ " (equação 2.5) é dependente das dimensões do corpo de prova. Os fatores massa (HUET, 1963) são usados nos ensaios não homogêneos (tabela 2.2)

(HECK, 2001). O parâmetro M é a massa do corpo de prova e m a massa móvel equipamento (HUET, 1963).

$$\gamma = \frac{K_\sigma}{K_\varepsilon} = \frac{12L^3}{b(h_1-h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right] \quad (2.5)$$

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{F} \quad (2.6)$$

$$K_\sigma = \frac{3L}{2bh_2(h_1-h_2)} \quad (2.7)$$

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{m\acute{a}x}}{z} \quad (2.8)$$

$$K_\varepsilon = \frac{(h_1-h_2)^2}{8h_2L^2 \cdot \left(\frac{(h_2-h_1)(3h_1-h_2)}{2h_1^2} + \ln \frac{h_1}{h_2} \right)} \quad (2.9)$$

Onde:

K_σ = fator de dimensões do corpo de prova relativo à tensão;

K_ε = fator de dimensões do corpo de prova para a deformação;

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Amplitude de tensão máxima [μm]

$\varepsilon_{m\acute{a}x}$ = Amplitude de deformação máxima [μm]

L = Altura do corpo de prova [mm];

h_1 = base maior do corpo de prova [mm];

h_2 = base menor do corpo de prova [mm];

b = espessura do corpo de prova [mm]

γ = fator de forma mm-1

As componentes do módulo complexo são calculadas (equações 2.10 e 2.11) a partir da amplitude da força “ F_0 ”, da amplitude do deslocamento “ z ”, do ângulo de fase “ φ ”, do fator de massa “ μ ” e do fator de forma “ γ ” que tem em conta a inércia.

$$E_1 = \gamma \left(\frac{F_0}{z} \cos(\varphi) + \frac{\mu}{10^3} \omega^2 \right) \quad (2.10)$$

$$E_2 = \gamma \left(\frac{F_0}{z} \sin(\varphi) \right) \quad (2.11)$$

Onde:

E^* = Módulo complexo (MPa);

E_1 = Parte real do módulo (MPa);

E_2 = Parte imaginaria do módulo (MPa);

z = Amplitude do deslocamento imposto no corpo de prova (mm);

- F_0 = Amplitude da força aplicada no corpo de prova (N);
 φ = Ângulo de defasagem entre a força e a deformação (°);
 γ = fator de forma (mm-1);
 μ = fator de massa;
 M = Massa do corpo de prova (kg);
 m = Massa móvel do equipamento (kg);
 ω = Pulsação (rad/s), $\omega = 2\pi\phi$.

2.3.1 Viscoelasticidade das misturas asfálticas

Os concretos asfálticos herdaram as características do ligante asfáltico, sendo necessário caracterizar seu comportamento de igual modo a partir da teoria da viscoelasticidade (De La ROCHE, 1996; MOMM, 1998).

O módulo complexo das misturas é determinado no regime viscoelástico linear no domínio das pequenas deformações inferiores a 50 μ m. A partir das hipóteses de linearidade, homogeneidade, isotropia.

A linearidade é assumida considerando que a tensão é proporcional à deformação. A homogeneidade é considerada no nível macroscópico e a isotropia que o material tenha propriedades iguais em todas as direções.

O módulo complexo varia em função da temperatura e da frequência. A rigidez das misturas asfálticas aumenta com a velocidade da solitação e diminui com a elevação da temperatura.

Uma vez que o módulo complexo é dependente da temperatura e da frequência, o ensaio deve ter um espectro de temperaturas e de frequências que envolva as situações correntes de campo. O ensaio de módulo complexo é realizado na faixa de temperatura de -10°C até 50°C que abrange as temperaturas ambientes e na faixa de frequências de 1Hz a 40Hz, que abrange as frequências de solitações de campo.

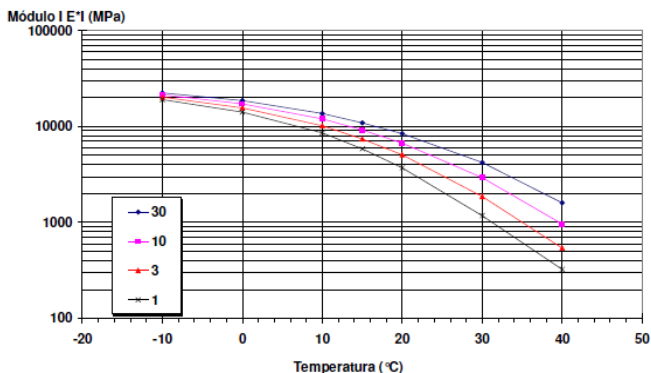
Os modos clássicos de representação do módulo complexo são as curvas isócronas, as curvas isotérmicas, no espaço de Black, no plano Cole-Cole e as curvas de equivalência frequência-temperatura.

2.3.2 Curvas isócronas

As curvas isócronas são curvas de igual frequência para diferentes temperaturas de ensaio cuja inclinação possibilita estimar a susceptibilidade cinética a uma dada temperatura, isto é, a variação do módulo com a duração da solitação.

Esta forma de representação (figura 2.11) permite visualizar a susceptibilidade térmica das misturas asfálticas para uma frequência fixa. É representada com a temperatura na abscissa e a norma do módulo complexo nas ordenadas.

Figura 2.11 – Representação do módulo complexo em curvas isócronas.



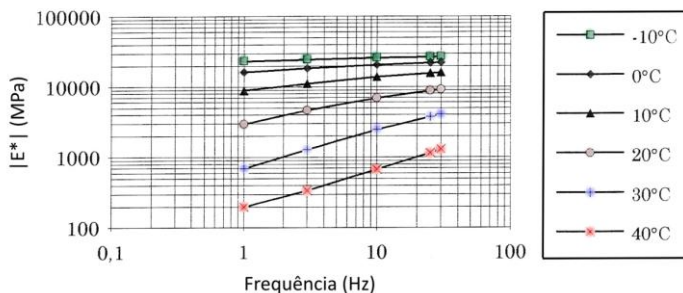
Fonte: Momm (1998).

2.3.3 Curvas isotérmicas

As curvas isotérmicas são as curvas de igual temperatura para frequências diferentes de ensaio.

Esta forma de representação (figura 2.12) possibilita visualizar a susceptibilidade cinética da mistura asfáltica para uma temperatura específica, ou seja, a variação do módulo complexo com a duração da solitação (MOMM, 1998).

Figura 2.12 – Representação do módulo em curvas isotérmicas



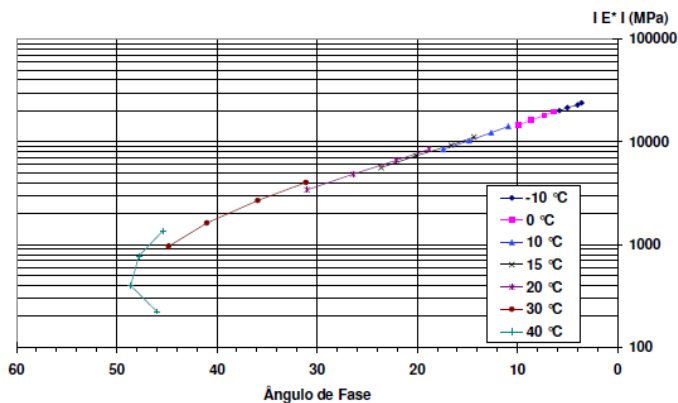
Fonte: De La Roche (1996).

2.3.4 Espaço de Black

No espaço Black a representação do módulo dá-se em relação ao ângulo de fase que revela a viscosidade da mistura asfáltica.

Nesta forma de representação o ângulo de fase corresponde às abscissas e a norma do módulo complexo às ordenadas (figura 2.13). Observa-se a evolução do ângulo de fase do módulo complexo. Também permite estimar o módulo infinito E_{∞} para utilizá-lo no modelo de Huet-Sayegh. Este valor de módulo corresponde ao módulo elástico para quando o material é solicitado a elevadas frequências e baixas temperaturas.

Figura 2.13 – Módulo complexo representado no espaço Black.



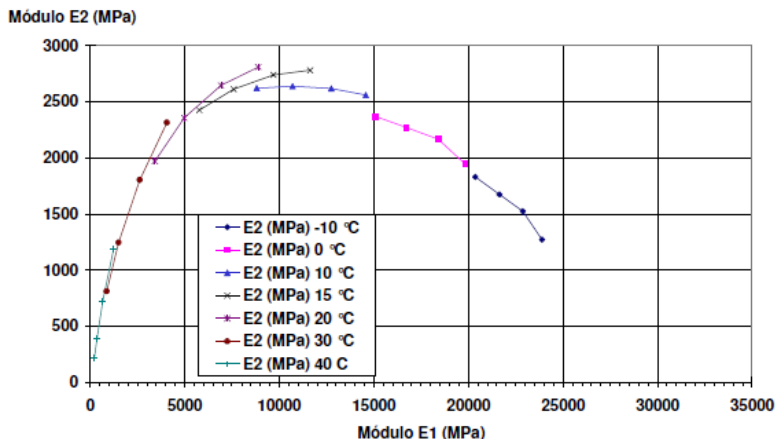
Fonte: Momm (1998).

2.4.5 Plano Cole-Cole

No plano COLE-COLE a representação do módulo dá-se entre as componentes reais e imaginárias em eixo cartesiano. É no plano Cole-Cole que se realiza a modelação do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, (HUET, 1963). Neste plano, o módulo complexo indica uma curva em forma de semi-arco.

A representação no plano Cole-Cole (figura 2.14) é a curva característica estudada por HUET (1963) para realizar a modelação do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas.

Figura 2.14 – Módulo complexo no plano COLE-COLE.



Fonte: Momm (1998).

2.3.6 Curva equivalência frequência-temperatura

Outra forma de representação do módulo complexo é nas curvas de equivalência frequência-temperatura (figura 2.15) para a qual aplicam-se translações das curvas isotérmicas apoiadas nos fatores de equivalência frequência-temperatura.

Para construir uma curva única em uma temperatura específica, (figura 2.16) as curvas isotérmicas são transladadas para uma curva de referência. A interpretação da curva pode ser feita por sua inclinação, o que indica a sua suscetibilidade ao tempo de solitação.

A translação destas curvas pode dar-se de diferentes maneiras, tais como pela equação de Arrhenius (equação 2.12), de Willian-Landel e Ferry (equação 2.13) ou por translação gráfica (equação 2.14) (MOMM, 1998).

$$\text{Log}(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad \text{Arrhenius} \quad (2.12)$$

$$\text{Log}(a_T) = \frac{-C_1(T-T_R)}{(T-T_R)+C_2} \quad \text{Willian-Landel e Ferry} \quad (2.13)$$

$$\text{Log}(\alpha_T) = \ln \left(\frac{F_{\text{ref}}}{(tr_1 + tr_2)} \right) \quad \text{Gráfica} \quad (2.14)$$

Onde:

δH = energia aparente de ativação característica do material;

R = constante dos gases;

T = temperatura;

TR = temperatura de referência em °K.

C1 e C2 = constantes dependentes do material;

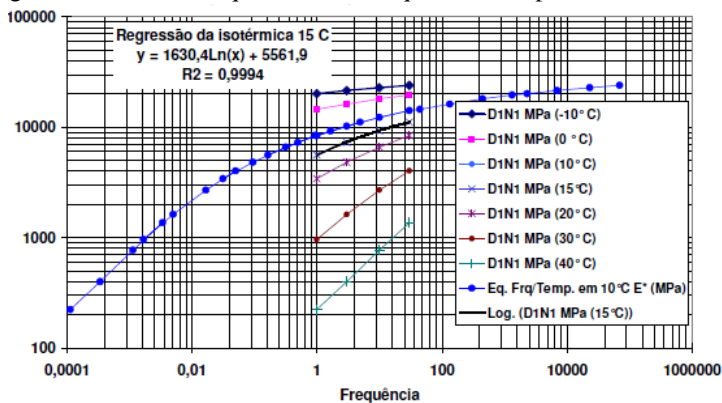
tr1 , tr2 = translações;

(Fi, Ei) = pontos (frequência, módulo);

α_T = fator de translação gráfica;

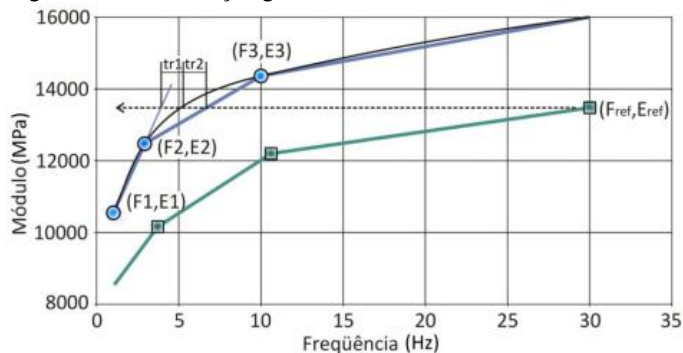
a_T = fator de translação Arrhenius ou Willian-Landel e Ferry

Figura 2.15 – Curvas Equivalência - Frequência-Temperatura.



Fonte: Momm (1998).

Figura 2.16– Translação gráfica das curvas isotérmicas



Fonte: Otto (2009).

2.4 MODELOS DE COMPORTAMENTO MECÂNICO

A viscoelasticidade é linear se a relação de tensão/deformação é linear, o que se obtém no domínio das pequenas deformações. Na viscoelasticidade linear aplica-se o princípio da superposição dos efeitos de Boltzman que somente é aplicável se o comportamento é linear e corresponde à soma das respostas elementares a cada solitação

A suposição de viscoelasticidade linear é válida no domínio das pequenas deformações (MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996; HUET, 1963). Para grandes deformações, a maioria dos materiais apresenta comportamento não linear (AIREY, et al., 2003; AIREY, et al., 2004).

Dois fenômenos que os materiais viscoelásticos experimentam são: a fluência que ocorre quando o material é submetido a carregamento constante e a deformação ocorre em função do tempo, e a relaxação que ocorre quando a tensão é retirada e a deformação reduz-se no tempo.

O comportamento viscoelástico pode ser descrito como a soma do comportamento elástico e do comportamento viscoso. Este comportamento é descrito por diferentes modelos, onde os elementos analógicos simples são colocados em série ou em paralelo.

A magnitude das componentes elásticas e viscosas dos materiais depende das variáveis inerentes ao material e de condições externas a que esteja submetido, tais como velocidade de carregamento e a temperatura e a magnitude da deformação.

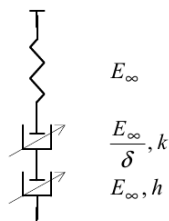
Os concretos asfálticos quanto são solicitados a frequência mais elevada têm sua rigidez é aumentada e o ângulo de fase entre a tensão e a deformação é reduzido, quando é submetido a temperatura menor têm sua rigidez aumentada.

Entre os modelos reológicos de comportamento dos concretos asfálticos destacam-se os seguintes: modelo de Huet, modelo de Huet-Sayegh e modelo geral 2S2D1P.

2.4.1 Modelo de Huet (1963)

Este modelo analógico constitui a união de dois elementos de fluência parabólico $J1(t)=at^h$ e $J2(t)=bt^k$ colocados em série e uma mola de rigidez E_{∞} , que representa o módulo instantâneo do material (figura 2.17).

Figura 2.17 – Representação analógica do modelo de Huet.



Fonte: Huet (1963).

O módulo, expresso pela equação 2.15 (HUET, 1963) mostra o comportamento no domínio da frequência das misturas betuminosas descrito corretamente por um modelo de fluência bi-parabólico associado uma mola em série a este no plano complexo COLE-COLE.

$$E^*(\omega, \tau(\theta)) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega \cdot \tau(\theta))^{-k} + (i\omega \cdot \tau(\theta))^{-h}} \quad (2.15)$$

Onde:

E_∞ =Módulo instantâneo quando $\omega \cdot \tau(\theta)$ tende a infinito;

i = número complexo;

ω = $2\pi f$, f é a frequência da pulsação;

h = expoente tal que $0 < h < 1$;

τ = tempo de retardo característico associado à variação da temperatura.

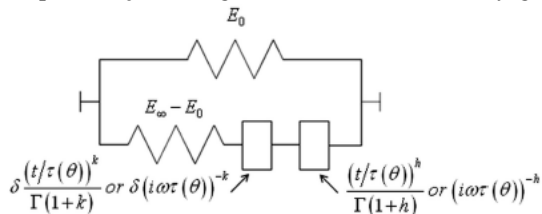
O modelo de Huet é determinado no domínio da frequência, no entanto, tem função a fluência no tempo, a qual pode ser determinada a través da sua transformação pela equação 2.16 (MAILLARD, 2005; OLARD, 2003).

$$J(t, \theta) = \frac{1}{E_\infty} \left[1 + \delta \frac{\left(\frac{t}{\tau(\theta)}\right)^k}{\Gamma(k+1)} + \frac{\left(\frac{t}{\tau(\theta)}\right)^h}{\Gamma(h+1)} \right] \quad (2.16)$$

2.4.2 Modelo de Huet-Sayegh (1965)

O modelo de Huet-Sayegh é formado por dois ramos paralelos dos quais um tem uma mola e dois amortecedores parabólicos e o outro uma mola correspondente ao comportamento estático (figura 2.18).

Figura 2.18 – Representação analógica do modelo de Huet-Sayegh.



Fonte: Chupin *et al.*, (2010).

A equação 2.17 representa o modelo de Huet-Sayegh. A identificação dos parâmetros do modelo é realizada a partir dos ensaios de módulo complexo.

$$E^*(\omega, \tau(\theta)) = \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta (i\omega, \tau(\theta))^{-k} + (i\omega, \tau(\theta))^{-h}} + E_0 \quad (2.17)$$

Onde:

E_∞ = módulo instantâneo, quando $\omega\tau$ tende ao ∞ , obtido nas elevadas frequências e baixas temperaturas;

E_0 = módulo estático, obtido nas baixas frequências e elevadas temperaturas;

k, h = expoentes dos elementos parabólicos do modelo;

δ = função da natureza do ligante e composição granulométrica;

τ = tempo de relaxação dos amortecedores, parâmetro em função da temperatura $\tau(\theta) = e^{(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)}$;

ω = $2\pi f$, pulsação;

f = frequência de solitação.

Para $t > 0$

$$J^1(t, \theta) = \frac{1}{E_\infty - E_0} \left(1 + \delta \frac{(t/\tau(\theta))^k}{\Gamma(k+1)} + \frac{(t/\tau(\theta))^h}{\Gamma(h+1)} \right) \quad (2.18)$$

Onde:

E_{∞} = Módulo elástico instantâneo, quando a frequência tende ao infinito;

E_0 = Módulo elástico estático, a frequência tende a zero.
Módulo elástico estático, quando a frequência tende a zero;

k, h = São os expoentes dos amortecedores parabólicos tal que $1 > h > k > 0$

δ = coeficiente adimensional > 0

Γ = função gamma

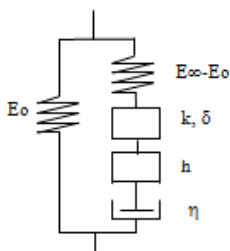
τ = Função decrescente da temperatura, que considera o princípio de equivalência tempo/temperatura. É classicamente relacionado com as leis de Arrhenius.

Atualmente, o modelo Huet-Sayegh é utilizado nos programas de dimensionamento de pavimento que levam em conta a viscoelasticidade.

2.4.3 Modelo 2S2P1D Geral

O modelo geral 2S2P1D, representado pela equação 2.19, adiciona um amortecedor linear junto com os elementos parabólicos e a mola ao modelo Huet-Sayegh. Este modelo permite uma melhor aproximação para as elevadas temperaturas e baixas frequências (figura 2.19).

Figura 2.19 – Representação analógica do modelo 2S2P1D.



Fonte: Olard (2003).

$$E^*(i\omega\tau(\theta)) = E_0 + \frac{E_{\infty} - E_0}{1 + \delta (i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h} + (i\omega\beta\tau(\theta))^{-1}} \quad (2.19)$$

Onde:

β = constante sem dimensão;

η = viscosidade Newtoniana, $\eta = (E_{\infty} - E_0) \beta \tau$.

2.5 FADIGA DOS CONCRETOS ASFÁLICOS

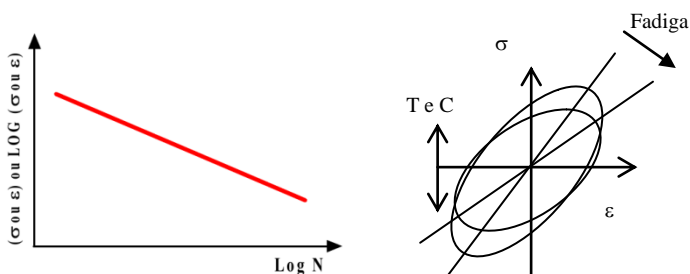
O fenômeno da fadiga de um material se caracteriza por sua ruptura após a repetição de um grande número de solicitações (na prática, número maior que 10 000 repetições) cujas amplitudes sejam inferiores àquela que conduziria à ruptura com uma única aplicação (BAAJ, 2002).

Os primeiros estudos sobre a fadiga foram realizados nos anos de 1852 por Wohler sobre materiais metálicos. Na atualidade a fadiga é estudada sobre grande número de materiais.

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

O ensaio clássico que permite caracterizar a fadiga consiste em submeter corpos de prova do material que se quer estudar a solicitações repetidas e contar o número de ciclos até chegar à ruptura (figura 2.20). Quanto menor é o valor da solicitação maior é o número de ciclos suportado e com o aumento do valor da solicitação o material se rompe com menor número de ciclos. Habitualmente, a curva de fadiga é caracterizada pela relação $N = A.N^{-b}$, que é, então uma reta na escala bilogarítmica.

Figura 2.20 – Curva de Wohler e loop-histerese durante o ensaio de fadiga.



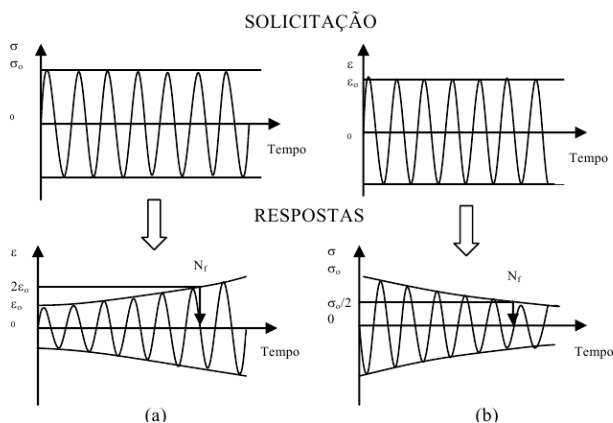
Fonte: Di Benedetto *et al.*, (2004).

Os ensaios de fadiga podem ser realizados a tensão controlada (força) ou deformação controlada (deslocamento) (figura 24). Durante o ensaio de fadiga a tensão controlada, a deformação aumenta com o transcorrer das solicitações. A rigidez descrece. Esta redução se deve

ao dano acumulado pelo efeito da carga repetida. A figura 2.21-a ilustra a curva de fadiga tipo. Esta curva é representada com a solicitação aplicada *versus* número de ciclos que leva a falha do material. Durante o ensaio de fadiga, a capacidade do material em dissipar energia diminui devido à diminuição da tensão. Ao representar esquematicamente a tensão *versus* deformação na figura 2.21-b, observa-se que ao se manter a deformação constante, a tensão desce.

Nos ensaios a tensão controlada, a deformação aumenta. Nos ensaios a deformação controlada a tensão desce.

Figura 2.21 – Sinais de solicitação nos dois modos no domínio da frequência (a) ensaio a tensão controlada (b) ensaio a deformação controlada.



Fonte: Baaj (2002).

Durante o ensaio de fadiga podem ser observadas três fases, que aparecem sucessivamente (Di BENEDETTO *et al.*, 1997; Di BENEDETTO *et al.*, 2004).

Durante a fase I, o módulo complexo desce, rapidamente, havendo um aumento da temperatura, devido à energia liberada durante o ensaio, uma adaptação inicial e variação da tixotropia (De La ROCHE *et al.*, 1996; SHAN *et al.*, 2010; PEREZ JIMÉNEZ *et al.*, 2012).

A fase II caracteriza-se pela diminuição quase linear do módulo complexo com aumento do número de ciclos, nesta fase se dá o início de micro-fissuras e os danos por fadiga (Di BENEDETTO *et al.*, 1997; PEREZ JIMÉNEZ *et al.*, 2012).

Durante a fase III, o módulo complexo cai bruscamente, provocando uma falha completa da amostra. Há propagação de micro

fissuras durante a fase II e sua interligação produz macro-fissuras que produz a ruptura do material (Di BENEDETTO *et al.*, 1997; PEREZ JIMÉNEZ *et al.*, 2012).

A lei de evolução física que rege as duas fases iniciais é muito diferente. Assim, as duas fases são modeladas em diferentes enquadramentos teóricos, mecânica do dano e mecânica de fratura linear, respectivamente (Di BENEDETTO *et al.*, 2004).

2.5.1 Fadiga dos concretos asfálticos

Durante a vida útil dos concretos asfálticos estes são submetidos a diferentes condições de temperatura e de carregamentos, sendo um comportamento complexo, por isto é necessário caracterizar de forma coerente o comportamento mecânico para projetar pavimentos duráveis.

Os resultados do ensaio de fadiga sobre os concretos asfálticos são dispersos devido à heterogeneidade, anisotropia e variabilidade das propriedades mecânicas. Para reduzir as incertezas e obter um coeficiente de variação e desvio padrão dos resíduos aceitáveis é necessário um número considerável de ensaios elementares, para que, ao mesmo tempo, os resultados sejam representativos do fenômeno estudado, com grau de confiança aceitável.

MOUTIER (1990) mostrou que um nível de incerteza “ $\Delta\epsilon$ ” aceitável para um grau 95% de confiança é obtido para um número de corpos de prova igual ou superior a 6 corpos de prova por nível de deformação, em no mínimo 3 níveis de deformação. Alguns dos resultados das análises estão apresentados na tabela 2.3, para uma mistura com ligante 50/70; 5,7% de teor de ligante, granulometria 0/14 e 8% de finos.

Tabela 2.3 – Estudo da incerteza sobre o valor de ϵ_6 em função do número de corpos de prova por nível de deformação.

Nº de corpos de prova por nível de deformação	Origem	Inclinação	Desvio Padrão	ϵ_6 μ_{def}	Incerteza $\alpha= 95\%$
2	-39,87	-6,005	0,54	131	± 13
4	-32,92	-5,204	0,48	126	± 9
6	-33,56	-5,274	0,44	126	± 6
8	-33,82	-5,306	0,41	126	± 5
10	-34,20	-5,346	0,39	126	± 4
12	-34,59	-5,388	0,42	126	± 4

Fonte: Moutier (1990).

A curva de fadiga pode ser representada em escala log-log. A partir da regressão linear na escala log-log determina-se a deformação para um milhão de ciclos e a inclinação da curva.

No critério tradicional de ruptura por fadiga a deformação controlada, considera-se que o material atingiu a ruptura quando a força ou rigidez alcançam o 50% da força ou rigidez inicial.

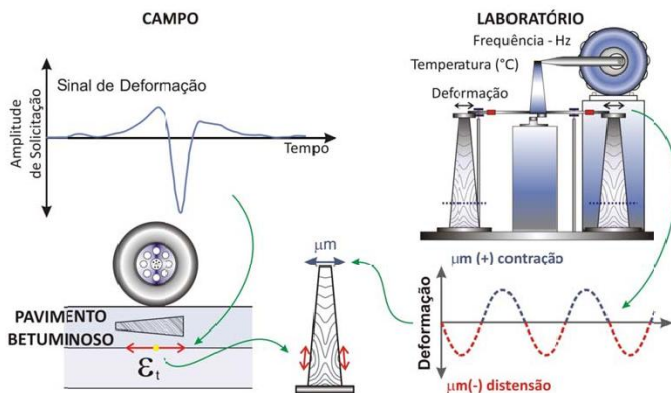
Para a análise das incertezas determina-se o valor de $\Delta\epsilon_6$ para nível de confiança de 95%, assim calculam-se as curvas hipérbolas de confiança, o desvio padrão dos resíduos, que em conjunto com a inclinação da curva e a deformação para um milhão de ciclos são utilizados para estimar a deformação admissível do material.

No campo, as camadas de concreto asfáltico são submetidas a carregamentos de curta duração, com a passagem de cada veículo (figura 2.22). O dano por fadiga é o principal fenômeno de deterioração do pavimento e, entendido corretamente, possibilita dimensionamento adequado (Di BENEDETTO *et al.*, 2004).

Em laboratório, busca-se simular o efeito da carga dinâmica mediante diferentes tipos do sinal de tensão ou deformação, a principal delas é mediante a aplicação do sinal de tipo senoidal.

Na figura 2.22 ilustra-se o sinal característico na camada de maior profundidade, no campo, e o sinal simulado em laboratório no ensaio de fadiga realizado a flexão dois pontos sob carregamento senoidal (OTTO *et al.*, 2011).

Figura 2.22 – (a) Comportamento em flexão de campo (b) corpo de prova.



Fonte: Otto *et al.*, (2011).

2.5.2 Tixotropia

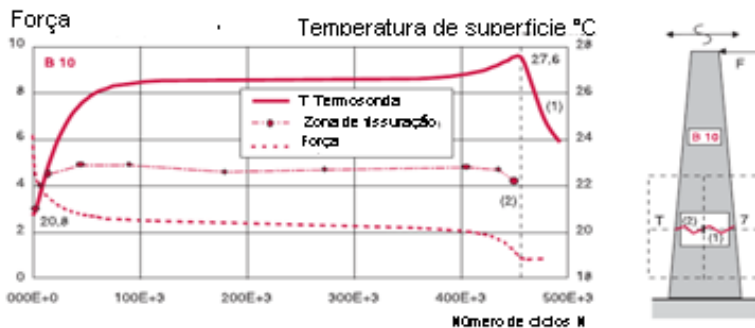
O concreto asfáltico submetido a um sistema repetitivo de solicitações reversíveis tem as suas propriedades reológicas diminuídas em relação ao tempo, observadas pela diminuição de sua rigidez e viscosidade do ligante. Uma vez cessado o sistema de solicitação, em repouso, as propriedades reológicas se recuperam, retornando o aumento da rigidez, quando a solicitação for interrompida (MEWIS, et al., 2009; PEREZ JIMÉNEZ, et al., 2012).

A tixotropia ocorre numa fase não estacionária, que é a primeira do ensaio de fadiga. A influência da tixotropia é observada pela recuperação quando a carga cíclica é interrompida (Di BENEDETTO, et al., 2004).

2.5.3 Aquecimento interno

O aquecimento do corpo de prova pode ser mais ou menos importante, dependendo de dois fatores: a amplitude da solicitação e a temperatura do ensaio. A energia dissipada no corpo de prova é proporcional a fatores como a amplitude da tensão, a frequência da solicitação, a capacidade de condução de calor do material, a temperatura do ensaio (figura 2.23). Como consequência observa-se a diminuição da rigidez, a alteração do ângulo de fase. A dissipação térmica é mais importante nas zonas mecanicamente mais solicitadas, especialmente na área de concentração de tensões onde ocorre a fratura, associada com a dissipação viscosa. (De La ROCHE, et al., 2001).

Figura 2.23 – Resultados da força e temperatura com o número de ciclos.



Fonte: adaptada De La Roche *et al.*, (2001)

Em termos qualitativos há três fases distintas na fadiga do material. Na primeira fase, há uma variação brusca da temperatura que corresponde a uma queda acentuada no módulo. Na segunda fase, redução lenta do módulo correspondente a uma temperatura de estado estacionário. A terceira fase corresponde à propagação de fissuras, deterioração rápida, com concentração de calor na área mais solicitada correspondente fissuração (De La ROCHE *et al.*, 2001).

O comportamento de fissuração é simétrico, que pode ser observado com infravermelha visualizado (De La ROCHE *et al.*, 2001).

2.5.4 Energia de deformação

Um elemento submetido a um carregamento se deforma. O trabalho necessário para deformar o elemento corresponde ao produto da tensão pela deformação que é igual à energia necessária para produzir a deformação do mesmo. O trabalho por unidade de volume é denotado pela equação 2.20. Agora, considerando que a deformação é contínua num tempo finito a equação pode ser reescrita da forma dada pela equação 2.21.

$$\sigma \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cdot dt = dW \cdot A \cdot dx \quad (2.20)$$

$$\int dW = W = \int_0^t \sigma \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cdot dt \quad (2.21)$$

Onde:

$A \cdot dx$ = Volume unitário;

$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ = Variação da deformação em relação ao tempo;

dW = Trabalho por unidade de volume.

Os modos de solicitação a que um corpo pode ser submetido são: solicitação por flexão, solicitação cortante, solicitação por torção, solicitação por força axial (tração-compressão).

A principal solicitação nos pavimentos se dá por flexão alternada com a passagem de cada veículo responsável pela deterioração por fadiga. A solicitação por torção é perpendicular a cada elemento de área à direção do movimento. Devido à carga vertical o pavimento é solicitado por compressão. Há solicitações cortantes em cada elemento de área dentro da estrutura do pavimento.

2.5.5 Energia de deformação na solitação por flexão

A energia armazenada é associada à componente real do módulo do material e a energia dissipada é associada ao módulo imaginário ou de perda do material. A relação entre o módulo imaginário e o módulo real é uma medida da capacidade de amortecimento viscoelástico do material (FINDLEY, 1976). A energia de amortecimento é definida pela relação entre a energia dissipada por ciclo de solitação para uma amplitude específica e a máxima energia que pode ser armazenada.

A tensão pode ser expressa na forma dada na equação 2.22. A deformação, como resposta, com a mesma frequência, é defasada pelo ângulo de fase φ . Desta forma, pode-se escrever a deformação em termos da variável complexa, como a equação (65).

Ao substituir a equação 2.22 e a derivada da equação 2.28 na equação 2.30, realizando a respectiva integral obtêm-se a equação 2.31, que representa a densidade de energia dissipada por ciclo.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos \omega t \quad (2.22)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad (2.23)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{i\varphi} = \varepsilon^* \cdot e^{i\omega t} \quad (2.25)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \cdot e^{i\varphi} = \varepsilon_0 (\cos \varphi - i \sin \varphi) \quad (2.26)$$

$$\Delta W = \int_0^T \sigma \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cdot dt \quad (2.27)$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos \omega t \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad (2.29)$$

$$\Delta W = \int_0^T \varepsilon_0 \cdot \sigma_0 \cdot \sin \omega t \cdot \cos(\omega t - \varphi) dt \quad (2.30)$$

$$\Delta W = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin \varphi \quad (2.31)$$

Onde:

ε_0 = Amplitude da deformação;

σ_0 = Amplitude da tensão;

φ = Ângulo de fase;

ε^* = Amplitude complexa da deformação;

ΔW = Densidade de energia dissipada;

φ = Ângulo de fase;

t = Tempo.

2.5.6 Tipos de ensaios de fadiga

Para avaliar o desempenho das misturas asfálticas diferentes tipos de ensaios são utilizados para descrever o comportamento na fadiga. Entre os ensaios utilizados encontram-se o ensaio a flexão alternada a dois pontos, a três pontos e a quatro pontos, os ensaios de carregamento uniaxial e os ensaios por compressão diametral.

Uma classificação foi proposta por Di BENEDETTO (1990) definindo duas categorias, os ensaios homogêneos e os ensaios não homogêneos (OLARD, 2003; BAAJ, 2002).

Nos ensaios de fadiga homogêneos de tração e compressão uniaxial, o tamanho do corpo de prova não influi significativamente nos resultados do ensaio. No entanto, os ensaios não homogêneos são fortemente influenciados pelo tamanho do corpo de prova, já que a distribuição das tensões e deformações internas é determinada pelas condições de carregamento e dimensão do corpo de prova. No ensaio de tração e compressão, o campo de tensões e deformações é uniforme em relação ao comprimento e à seção transversal. Para os ensaios não homogêneos, o campo de tensão e deformação não é constante em relação ao comprimento e à seção transversal. Neste ensaio, a rigidez não diminui à mesma razão por cada unidade de volume (NING *et al.*, 2013).

2.5.6.1 Flexão 2 pontos

O corpo de prova de forma trapezoidal é engastado na base maior (inferior) e a solicitação é aplicada na base menor (superior). A forma é trapezoidal com o propósito de afastar a seção mais solicitada dos pontos de aplicação da carga evitando efeitos de contorno e concentração de tensões nos apoios. Este ensaio foi proposto por Huet (1963).

Na França o ensaio de fadiga é realizado através da norma AFNOR - NF P 98-261-1 (1993). No Brasil a Universidade Federal de Santa Catarina desenvolveu um protótipo que permite caracterizar a fadiga das misturas asfálticas a diferentes temperaturas e frequências (MOMM, 2005), seguindo a norma Francesa. Na figura 2.24 é ilustrado o princípio do ensaio

Figura 2.24 – Primeiro protótipo de Máquina de Módulo Complexo e Fadiga da Universidade Federal de Santa Catarina.

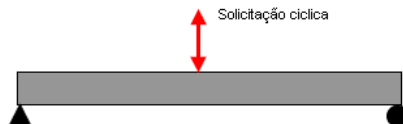


Fonte: Otto (2009).

2.5.6.2 Flexão 3 pontos

O corpo de prova é uma viga que se apóia em vínculos simples (figura 2.25). A solicitação é aplicada no centro da viga em tensão controlada ou em deformação controlada. O momento resultante nos vínculos é nulo e varia linearmente até alcançar o valor máximo no centro do corpo de prova. O plano de ruptura é geralmente localizado no ponto de momento máximo ou muito próximo (BAAJ, 2002).

Figura 2.25 – Tipo de solicitação em ensaio a três pontos



Fonte: Baaj (2002).

2.5.6.3 Flexão 4 pontos

No ensaio de fadiga a flexão quatro pontos, o corpo de prova prismático é submetido à flexão no sentido descendente e ascendente, a carga vertical é aplicada em dois pontos da viga afastados entre si a uma distancia de $2/3$ do comprimento da viga (figura 2.26), onde é registrada a força máxima e o deslocamento máximo, no meio do vão da viga (MELO, 2014).

Figura 2.26– Equipamento para ensaio de Módulo Complexo e Fadiga quatro pontos.



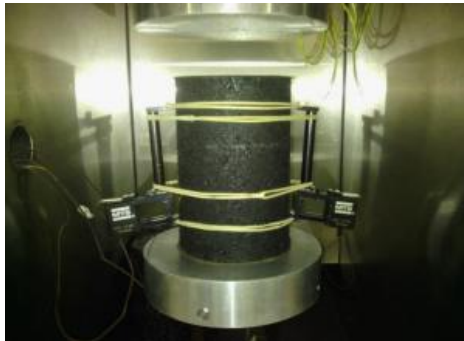
Fonte: Melo (2014).

2.5.6.5 Ensaio de tração-compressão

O ensaio pode ser realizado sobre corpos de prova cilíndricos ou prismáticos. O corpo de prova é submetido a solicitações axiais de tração-compressão alternadas. Para afastar a fissura dos apoios pode-se realizar uma redução de seção no meio do corpo de prova. As tensões homogêneas no centro do corpo de prova permitem determinar o módulo de rigidez e coeficiente de Poisson (BAAJ, 2002).

Nascimento (2015) realizou ensaio de tração direta em corpo de prova cilíndrico para caracterizar o módulo complexo e a fadiga de diferentes misturas asfálticas (figura 2.27).

Figura 2.27 – Equipamento para ensaio de Módulo Complexo e Fadiga tração-compressão.



Fonte: Nascimento (2015).

2.5.6.7 Ensaio de tração indireta

A solicitação é realizada, no modo de força controlada unicamente, na geratriz do corpo de prova cilíndrico, num plano definidor de duas partes iguais, que identifica o plano de ruptura (figura 2.28) (BAAJ, 2002).

Figura 2.28– Equipamento para ensaio de tração indireta.



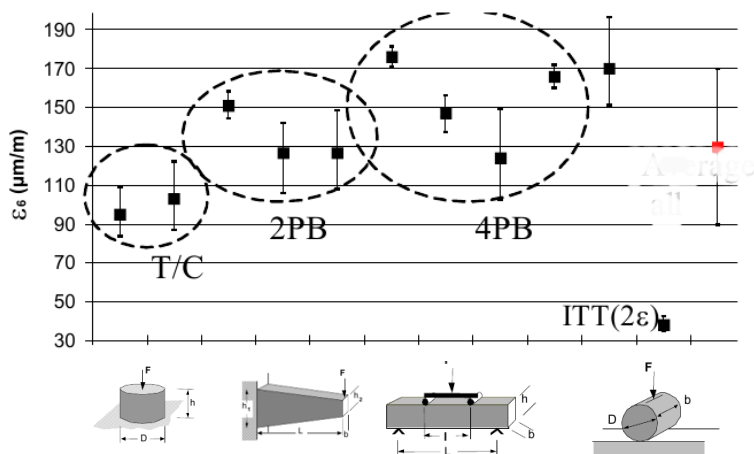
Fonte: Loureiro (2003).

2.5.7 Influência do tipo de ensaio

Vários métodos são aplicados, em laboratório, para caracterizar a fadiga das misturas betuminosas incluindo ensaios homogêneos e não homogêneos (MEDANI *et al.*, 2000; DI BENEDETTO *et al.*, 2001; BODIN *et al.*, 2006; TAPSOBA *et al.*, 2013). Podem ser conduzidos sob dois tipos de carregamentos: a tensão controlada ou deformação controlada (MARTINEZ *et al.*, 2003).

Resultados de ensaios inter-laboratoriais, utilizando corpos de prova com diferentes geometrias apresentados por Di BENEDETTO *et al.*, (2004), (figura 2.29 e tabela 2.4), foram conduzidos pelos países de Bélgica (B), França (F), Holanda (N), Polônia (PL), Portugal (P), Suécia (S) e Reino Unido (UK). O carregamento utilizado foi do tipo sinusoidal, a frequência de 10Hz, a temperatura de 10°C. Os resultados mostram uma diferença notória em relação a deformação para um milhão de ciclos definido segundo cada critério.

Figura 2.29 – Deformação para um milhão de ciclos para 11 ensaios de fadiga.

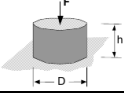
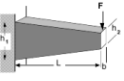
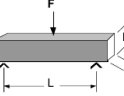
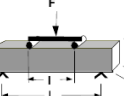
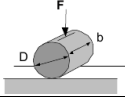


Fonte: Di Benedetto *et al.*, (1997); Bodin (2008).

A figura 2.30 mostra diferenças significativas entre os ensaios de fadiga não parecendo possível transladar os resultados de um ensaio para outro, nem de usar a mesma fórmula para prever a deterioração pelo efeito da fadiga. Nos os ensaios a deformação controlada a vida em fadiga é maior que ensaios a tensão controlada.

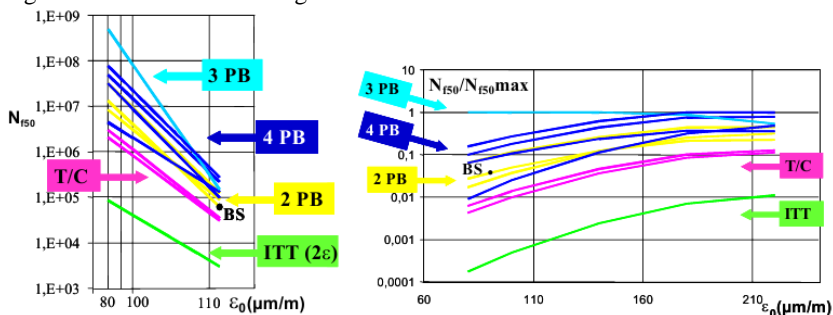
No entanto, cada condição de ensaio está associada a um método de dimensionamento do pavimento que considera a natureza específica do ensaio. A vida em fadiga depende do tipo de ensaio, modo de carregamento e do tamanho do corpo de prova. As diferenças podem ser explicadas a través da homogeneização do campo de tensões e deformações (Di BENEDETTO *et al.*, 2004).

Tabela 2.4 – Características dos tipos de ensaio de fadiga.

Tipo	Geometria	Tipo de carregamento/Pais	Amplitude (10^{-6})
T/C		Tensão/Compressão Homogêneo F_1, S_1	Deformação (80) 100, 140, 180 Tensão: 0,9
2PB		Viga a dois pontos Não Homogêneo F_2, B_1, B_2	Deslocamento; Deformação Max 140, 180, 220 Carga Max Tensão: 1,4
3PB		Viga três pontos Não Homogêneo N_1	Deslocamento; Deformação Max 140, 180, 220 Carga Max Tensão: 1,4
4PB		Viga quatro pontos Não Homogêneo N_2, P, PL, UK	Deslocamento; Deformação Max 140, 180, 220 Carga Max Tensão: 1,4
ITT		Tração indireta Não Homogêneo S_2	Carga Max Deformação primeiro ciclo 25, 40, 65,

Fonte: Di Benedetto *et al.*, (2004).

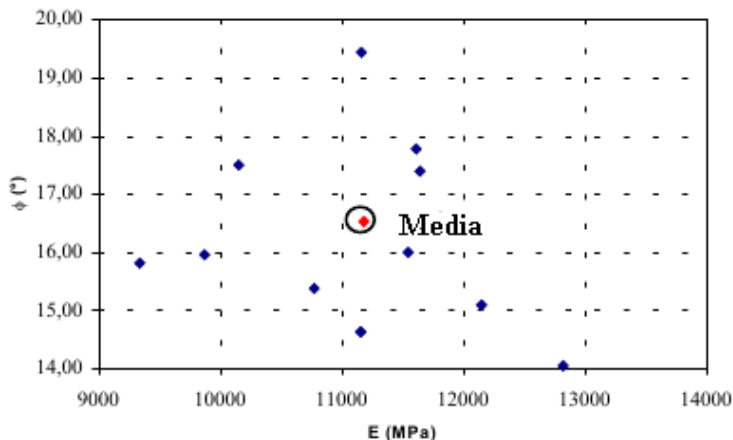
Figura 2.30 – Curvas de fadiga.



Fonte: Di Benedetto *et al.*, (2004).

O módulo complexo indica ser independente do tipo de ensaio. Para os resultados ilustrados na figura 2.31, a dispersão do módulo complexo é relativamente baixa, o que indica alta consistência entre os resultados sem diferença significativa. Qualquer um dos testes dá um valor consistente para o valor do módulo complexo. Qualquer deles pode ser interpretado corretamente (Di BENEDETTO *et al.*, 2004).

Figura 2.31 – Módulo complexo e ângulo de fase para os diferentes ensaios.



Fonte: Di Benedetto *et al.*, (1997).

2.5.8 Variação da fadiga no plano complexo

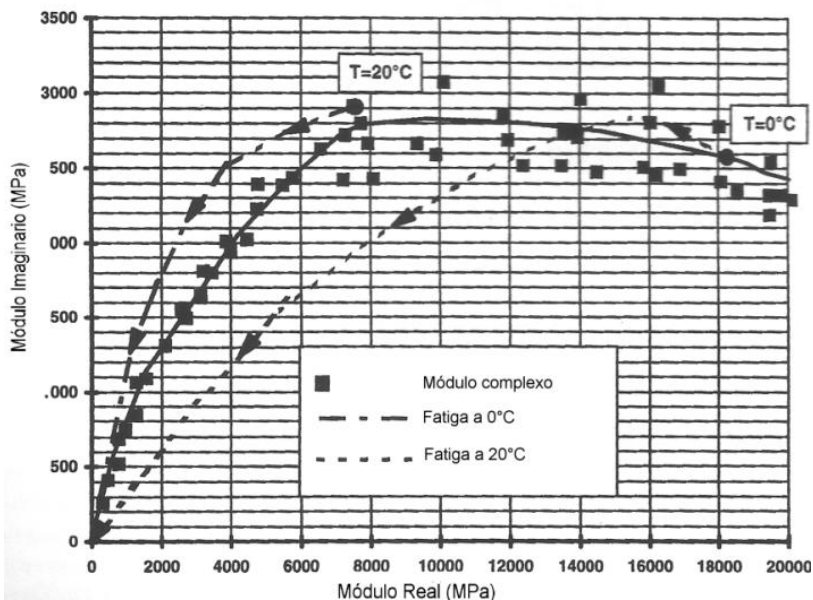
No transcorrer do ensaio de fadiga pode-se representar o módulo complexo no plano Cole-Cole a cada solitação.

Di Benedetto *et al.*, (1997) mostraram a evolução do ensaio de fadiga no plano Cole-Cole com uma trajetória similar à descrita pelo ensaio de módulo complexo (figura 2.32).

No espaço de Black, ao representar o ângulo de fase *versus* a norma do módulo complexo (figura 2.33), observa-se que a variação das curvas no início do ensaio é similar para diferentes tipos de ensaios (Di Benedetto *et al.*, 2003).

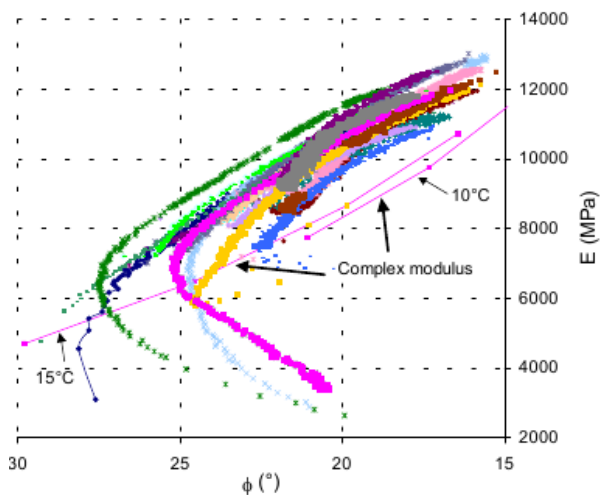
Di BENEDETTO *et al.*, (2003) conclui que, qualquer que seja a condição inicial, a evolução do módulo complexo continua a ser a mesma no início do ensaio de fadiga, sendo esta observação experimental, também, relatada por De La Roche (1996) e Di Benedetto *et al.*, (1997).

Figura 2.32. E1-E2 relação de El material e evolução durante o ensaio de fadiga.



Fonte: adaptada, Di Benedetto *et al.*, (1997).

Figura 2.33 – Resultados de 15 testes de fadiga de F1; amplitudes de deformação iniciais variam de $80 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$ para $170 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$.

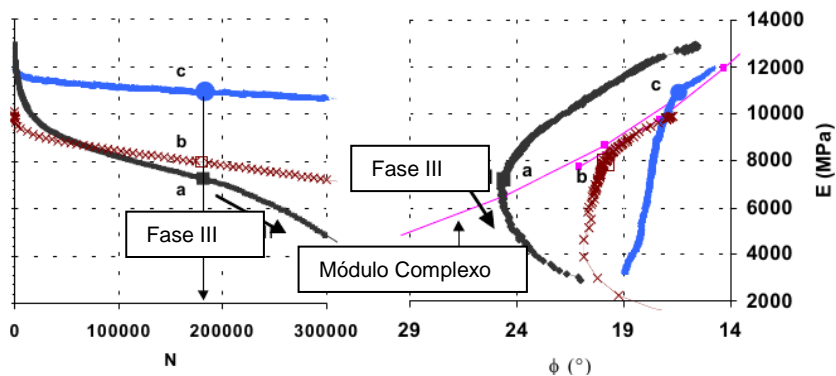


Fonte: Di Benedetto *et al.*, (2003)

Ao analisar os tipos de ensaios correspondente aos modos F1 (T/C), N2 e PL a flexão 4 pontos no espaço de Black, (figura 2.34), observa-se diferenças na forma como a curva do módulo complexo evolui com o número de ciclos, assim como no resultado da vida em fadiga para o mesmo material, sendo 240000 ciclos para F1, 430000 para N2 e 1700000 para PL.

Os pontos a, b, c correspondem aos valores de módulo complexo a 170000 ciclos para os testes F1, N2 e PL. O ponto “a” é o limite entre a fase II e III para os ensaios de T/C F1. Pode se pensar que a partir deste número de ciclos iniciais haja a propagação de fissuras nas fibras externas da viga. Após o ponto b e c nenhuma mudança é observada (Di BENEDETTO *et al.*, 2003).

Figura 2.34 – Resultados de ensaio de fadiga



Fonte: adaptada, Di Benedetto *et al.*, (2003).

As variações do módulo e ângulo de fase da fadiga observadas no espaço Black (figura 2.33) podem ser atribuídas ao tipo de ensaio. No caso do ensaio de tração-compressão uniaxial (T/C) a tensão controlada há maior concentração de tensões, ocasionando uma menor resistência à fadiga.

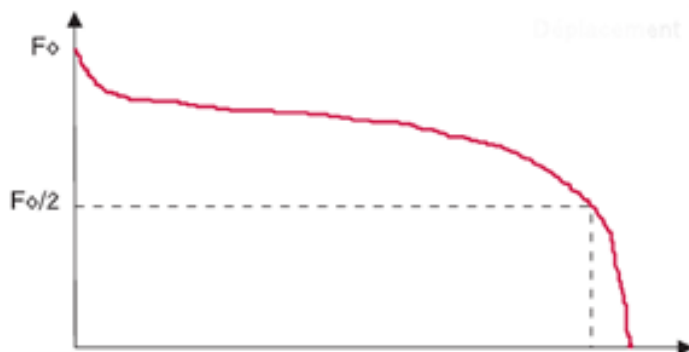
2.5.9 Critérios de avaliação da resistência à fadiga

Diferentes critérios podem ser usados, seja em função da evolução da força, da rigidez, do dano ou a través de princípio de energia dissipada.

2.5.9.1 Critério de fim de vida a fadiga 50% da força

No critério clássico de fadiga, o corpo de prova é considerado em ruptura quando a força ou o módulo atendem 50% do valor inicial. Nesta condição anota-se o número de ciclos (figura 2.35).

Figura 2.35 – Definição Critério de fim de vida a fadiga 50% da força



Fonte: De La Roche (2001).

2.5.9.2 Critério de ruptura total

O critério considera o número de ciclos correspondente à ruptura total do corpo de prova. Este critério é pouco utilizado. Em ensaios a deformação controlada pode não ser possível perceber, fisicamente, a ruptura, como é no caso de ensaios a flexão dois pontos (BAAJ, 2002).

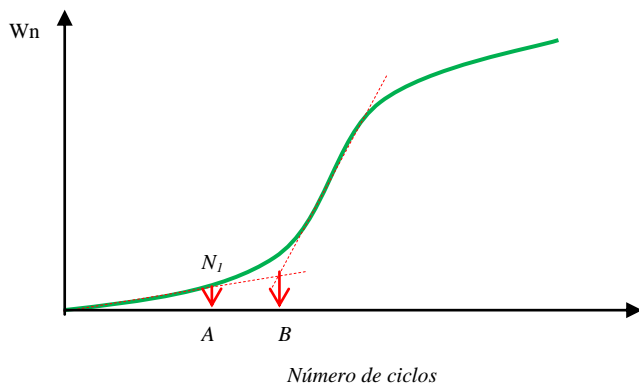
2.5.9.3 Critérios fundamentados em princípios de energia

A análise da fadiga das misturas asfálticas através do critério da energia dissipada foi introduzida por HOPMAN *et al.*, (1989). Atualmente, é utilizada para descrever o dano por fadiga da mistura asfáltica.

Os ensaios de fadiga quase sempre são analisados em termos da evolução da norma do módulo complexo. Uma descrição mais completa das propriedades viscosas pode levar em conta o ângulo de fase, o que pode ser feito a partir da energia dissipada. (DI BENEDETTO *et al.*, 2003).

No gráfico da energia dissipada (figura 52), pode-se definir o número de ciclos “ N_1 ”, que, nos ensaios a deformação controlada, é considerado o nível no qual há passagem da fase de iniciação de fissura para a fase de propagação de fissura. Outro critério poderia ser definido com o intercepto das duas retas resultando o ponto B (figura 2.36) (PRONK, 1995; BAAJ, 2002).

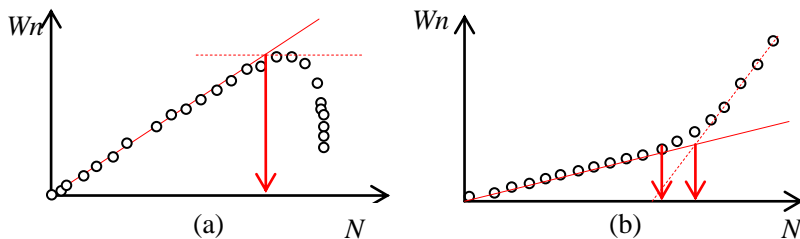
Figura 2.36 – Relação da energia dissipada em função do número de ciclo, ensaio a deformação controlada.



Fonte: adaptada Hopman *et al.*, (1989); Baaj,(2002).

Nos ensaios a tensão controlada, pode-se definir o critério correspondente ao valor máximo da energia dissipada (figura 2.37).

Figura 2.37 – Determinação de N1(a) tensão controlada (b) deformação controlada



Fonte: adaptada Baaj (2002).

A razão de densidade de energia dissipada W_n é definida pela equação 2.32.

$$W_n = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{w_n} \quad (2.32)$$

Onde:

n = é o número de ciclos;

w_i = energia dissipada por ciclo i ;
 W_n = energia dissipada por ciclo n .

O método pode ser simplificado ao escrever a equação 2.32 na forma da equação 2.33 (ROWE *et al.*, 2000).

$$W_n = \frac{n(\pi \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \text{sen} \phi_o)}{\pi \cdot \sigma_n \cdot \varepsilon_n \cdot \text{sen} \phi_n} \quad (2.33)$$

Onde:

n = é o número de ciclos;
 σ_o = Amplitude da tensão no primeiro ciclo de carregamento;
 σ_n = Amplitude da tensão no ciclo n ;
 ε_o = Amplitude da deformação no primeiro ciclo de carregamento;
 ε_n = Amplitude da deformação no ciclo n ;
 ϕ_o = Ângulo de fase no primeiro ciclo de carregamento;
 ϕ_n = Ângulo de fase no primeiro ciclo de carregamento;

Na equação 2.33, pode-se substituir o termo $\varepsilon \cdot E$ e os termos constantes podem ser reduzidos a uma constante e considerando que a variação da relação do ângulo de fase é muito baixa o qual pode ser tomada igual a 1, esta redução pode ser dada pela equação 2.34 em termos da deformação ou equação 2.35 em termos da tensão (ROWE *et al.*, 2000; BAAJ, 2002).

$$R_n^\varepsilon = \frac{n}{E_n} \quad (2.34)$$

$$R_n^\sigma = n \cdot E_n \quad (2.35)$$

Onde:

R_n^ε = Razão de energia em ensaio a deformação controlada;
 R_n^σ = Razão de energia em ensaio a tensão controlada;
 n = Número de ciclos;
 E_n = Módulo do material no ciclo n .

Para ensaios a deformação controlada, a vida em fadiga pode ser tomada como o ponto N_1 onde a curva R_n^ε perde linearidade e em ensaios a tensão controlada o valor N_1 pode ser definido pela ordenada máxima de R_n^σ (ROWE, *et al.*, 2000).

Com este critério o valor do módulo varia entre 35 a 65% do módulo inicial. Em determinados caso obtém-se valores mais baixos na ordem de 20% (BAAJ, 2002).

2.5.9.4 Critérios fundamentados na mecânica da fratura

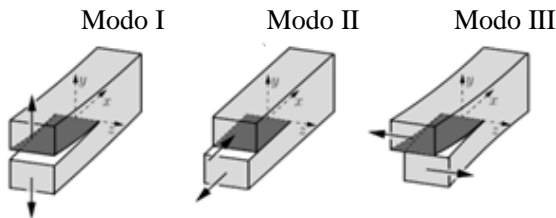
O critério da fratura fundamentações no conceito de que (RODRIGUES, 1987) a fadiga é um fenômeno de propagação de trincas no material.

O fenômeno de propagação de trincas pode ser previsto pela taxa de propagação de trincas. Está taxa é relacionada ao tamanho inicial da fratura e a energia armazenada. Em misturas asfálticas com materiais finos a taxa de propagação é menor que para materiais mais graúdos (PINTO, 1991).

A fratura é a separação total ou parcial de um corpo originalmente intacto. Em alguns casos uma aproximação no nível macroscópico é suficiente, no entanto nos últimos anos o interesse a nível microscópico tem ganhado importância (GROSS *et al.*, 2006).

Esta pode ser classificada como mecânica de fratura linear ou mecânica de fratura não linear. O primeiro descreve processos de fratura usando a elasticidade linear, os modos de ruptura são apresentados na figura 2.38 sendo ruptura por abertura da fissura, por deslizamento e por cisalhamento.

Figura 2.38 – Modos de fratura



Fonte: Gross *et al.*, (2006).

A primeira teoria da mecânica da fratura foi criada em 1920 por AA Griffith (1893-1963), o qual introduz o conceito de energia necessária para o crescimento da fissura no balanço energético a través do conceito de fratura energética. Posteriormente foi introduzida a teoria estatística de fratura formulada, em 1939, por W. Weibull (1887-1979). Mas o avanço real da mecânica da fratura foi em 1951 por GR Irwin

(1907-1998) o qual foi o primeiro em caracterizar o estado de ponta de trinca (GROSS *et al.*, 2006).

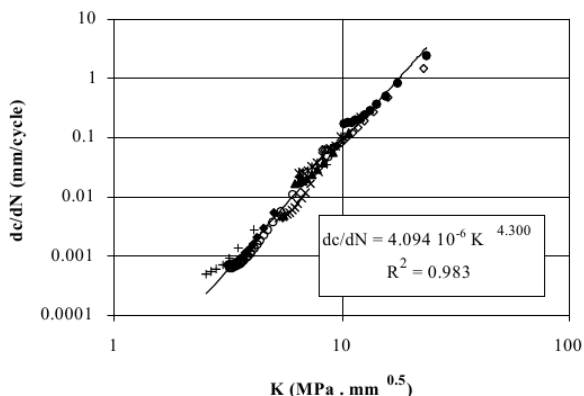
A mais conhecida relação utilizada na mecânica de fratura é a lei Paris (PARIS *et al.*, 1963), a qual é uma lei empírica dada pela equação 2.36, que descreve a relação de propagação da trinca em misturas asfálticas em função do estado de tensão na proximidade da trinca. Seguindo as hipóteses da elasticidade linear, considerando que o concreto asfáltico é homogêneo, isotrópico, estas hipóteses são aproximadamente aplicáveis para misturas asfálticas nas baixas temperaturas, inferiores a 20°C. Também, assume-se que a fratura se propaga conforme o modo I, na direção da tensão máxima (MARTINEZ *et al.*, 2003) (figura 2.39).

$$\frac{da}{dN} = A.K^n \quad (2.36)$$

Onde:

- c = Longitude da trinca;
- N = Número de ciclos de carregamento;
- K = Fator de intensidade de tensão
- A, n = Parâmetros de fratura do material

Figura 2.39 – Razão de Propagação da trinca em função do fator de intensidade de tensão.



Fonte: Martinez *et al.*, (2003).

Parâmetros de fratura da lei de Paris determinado por diversos pesquisadores, (tabela 2.5) foram reunidos por MARTINEZ *et al.*, (2003).

Tabela 2.5 – Parâmetros de fratura de misturas asfálticas diversos pesquisadores.

Tipo de mistura	Tipo de ensaio		A	n	Referencia
mistura grosseira AC	RITT	10°C	$3,82. 10^{-6}$	3,79	Roque et AL (1999)
mistura fina AC			$7,05. 10^{-7}$	3,95	
mistura densa AC	Tensão dinâmica uniaxial	0°C	$1,19. 10^{-9}$	5,49	Jacobs et al (1992)
		10°C	$1,21. 10^{-9}$	6,74	
20°C		$9,65. 10^{-7}$	5,13		
areia asfalto		5°C	$2,55. 10^{-12}$	7,88	
		15°C	$4,04. 10^{-9}$	7,22	
		25°C	$2,72. 10^{-5}$	3,79	
areia asfalto	Tensão- Compressão dinâmica uniaxial	15°C	$3,27. 10^{-8}$	4,66	Jacobs et al (1996)
mistura densa AC			$3,17. 10^{-8}$	4,55	
mistura densa AC			$2,01. 10^{-7}$	3,91	
Mistura densa AC			$1,04. 10^{-7}$	3,72	
SMA			$1,27. 10^{-7}$	4,15	
areia asfalto	Ensaio dinâmico sobre vigota	-5°C	$2,88. 10^{-10}$	4,00	Majidzadeh et al (1971)
		26°C	$4,41. 10^{-13}$	3,05	
AC		5°C	$1,97. 10^{-14}$	3,35	
		26°C	$7,66. 10^{-15}$	2,25	

Fonte: Martinez *et al.*, (2003).

Braz (1997) analisou diferentes tipos de misturas asfálticas caracterizando física e mecanicamente utilizando os critérios da mecânica de ruptura e técnica de tomografia, para as misturas mostradas na tabela 2.6. Mostrando que a técnica de tomografia pode ser utilizada para avaliar o mecanismo de fratura e propagação da trinca no interior do corpo de prova durante o ensaio de fadiga.

Esta técnica pode ser utilizada para detectar e acompanhar a trajetória da trinca, a qual é influenciada pelos vazios (BRAZ, 1997).

Tabela 2.6 – Exemplo de características físicas e mecânicas das misturas tipo CBUQ Analisadas por Braz (1997)

Asfalto	PEN	K	n
Rasf + Polimero	63,2	6000000	3,44
20	65	774316	3,012
40	37	208217	2,507

Fonte: Braz (1997).

2.5.9.5 Critério da curva de Weibull

A deterioração da rigidez em termos de proporção de rigidez é utilizada como um índice de danos por fadiga (BAAJ, 2002). A função de Weibull dada pela equação 2.37, representada na figura 2.40 mostra a variação de $\ln(-\ln(SR))$ em função de $\ln(n)$. SR é definido como a relação entre o módulo de rigidez E_n para um determinado número de ciclos e o módulo inicial E_0 (TSAI, 2001).

$$\ln(-\ln(SR)) = \ln(\lambda) + \gamma \ln(n) \quad (2.37)$$

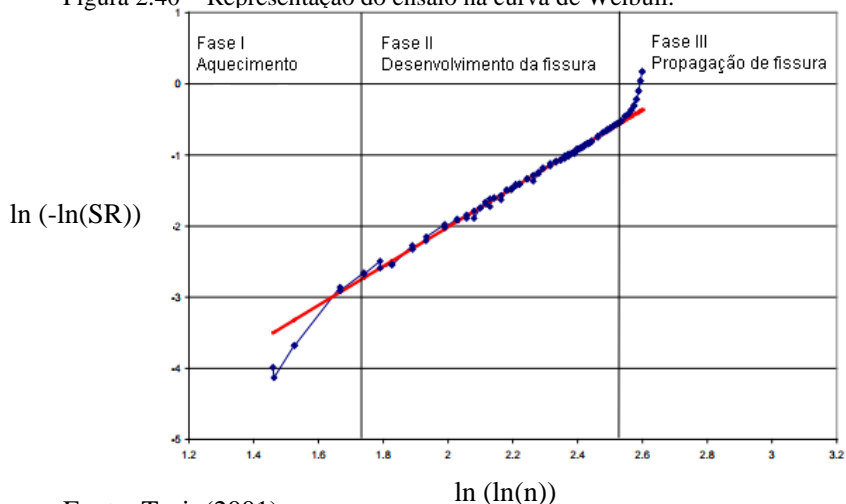
Onde:

γ = Parâmetro de forma;

λ = Parâmetro de escala;

SR = Relação entre o módulo para n ciclos e o módulo inicial.

Figura 2.40 – Representação do ensaio na curva de Weibull.



Fonte: Tsai, (2001).

2.5.9.6 Critérios fundamentados na mecânica do dano

O critério fundamentado na mecânica do dano tem sido abordado por (PIAU *et al.*, 1983; ALIMANI, 1988; PIAU, 1989; Di BENEDETTO *et al.*, 1997; BODIN, 2002; BAAJ, 2002; Di

BENEDETTO, 2003; NOUFFOU TAPSOBA *et al.*, 2003; BODIN, 2008; NASCIMENTO, 2015).

Utiliza-se para descrever a fadiga das misturas asfálticas, no qual caracteriza-se pela perda de rigidez relativa entre o módulo inicial e o módulo para um determinado tempo dado pela equação 2.38 (figura 2.41).

$$D = 1 - \frac{|E^*|}{|E^*_o|} \quad (2.38)$$

Onde:

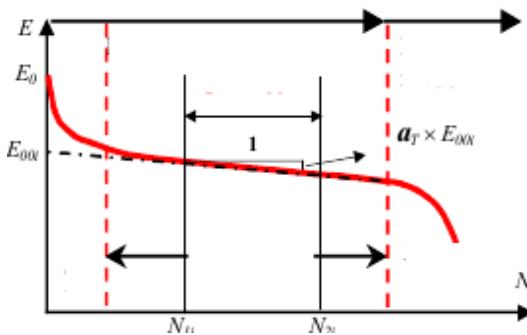
D = Dano;

$|E^*_o|$ = Módulo inicial;

$|E^*|$ = Módulo para número de ciclos n ;

O método proposto inicialmente considera a variação linear do módulo durante a fase II (figura 2.41), onde o comportamento é quase estacionário. Um aprimoramento realizado por BAAJ (2002) considera o comportamento não linear para determinar o dano durante a fase II.

Figura 2.41 – Variação linear do módulo durante a fase II



Fonte: Di Benedetto (2003).

Na figura 2.41, o valor de a_T representa variação (inclinação) do dano experimental, este pode ser representado pela equação 2.39.

$$D_{exp} = \frac{(E_0 - E_n)}{E_0} \quad (2.39)$$

$$a_T = \frac{D_{exp} \cdot E_0}{E_{00i}} \quad (2.40)$$

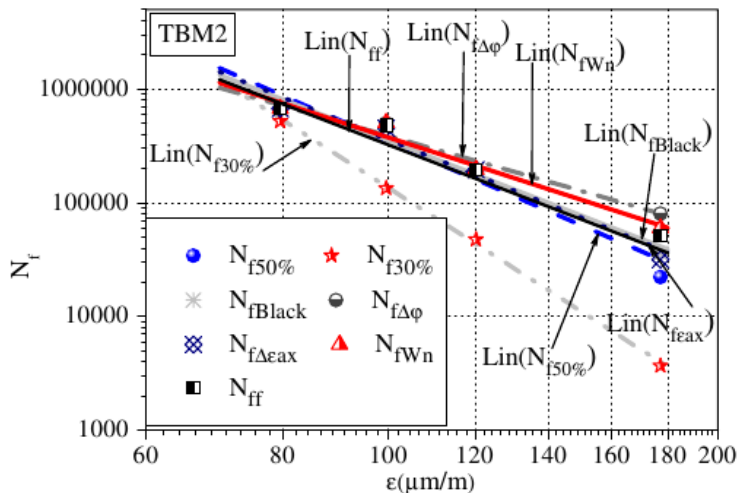
Onde:

- D_{exp} = Dano experimental;
- E_0 = Módulo inicial;
- E_n = Módulo para número de ciclos n ;
- a_T = Inclinação da curva de dano.

O método desenvolvido pelo laboratório ENTPE (SOLTANI 1998; Di BENEDETTO *et al.*, 2004; BAAJ 2002; BAAj *et al.* 2005) procura eliminar os efeitos durante a fase I. A falha do material ocorre ao final da fase II (TAPSOBA *et al.*, 2003).

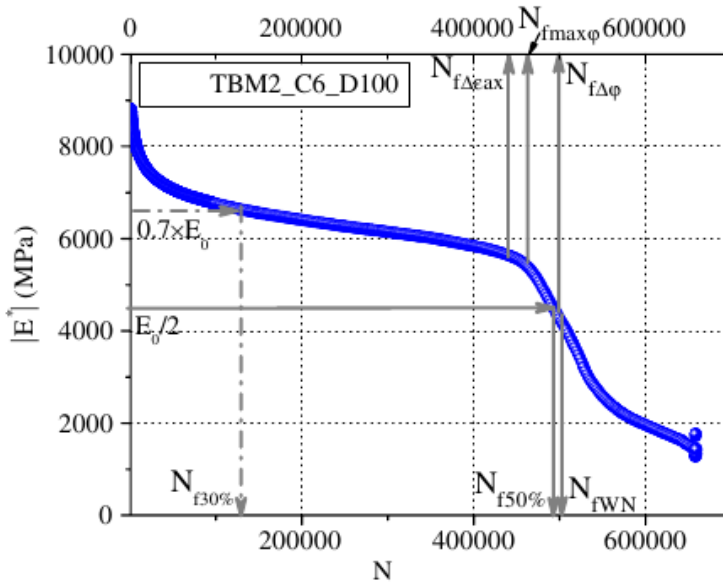
TAPSOBA *et al.*, (2003) determinou por critérios diferentes a curva de fadiga do material, figura 2.42 e figura 2.43. Os critérios utilizados foram $N_{f50\%}$, $N_{f30\%}$, N_{fblack} , $N_{fmax\phi}$, $N_{f\Delta\epsilon_{ax}}$, $N_{f\Delta\phi}$, e N_{fWN} . Mostrou que estes dão resultados próximos e curvas de fadiga semelhantes menos o correspondente a $N_{f30\%}$.

Figura 2.42 – Curvas de fadiga definida por diferentes critérios



Fonte: Tapsoba *et al.*, (2003)

Figura 2.43 – Determinação do número de ciclos por diferentes critérios



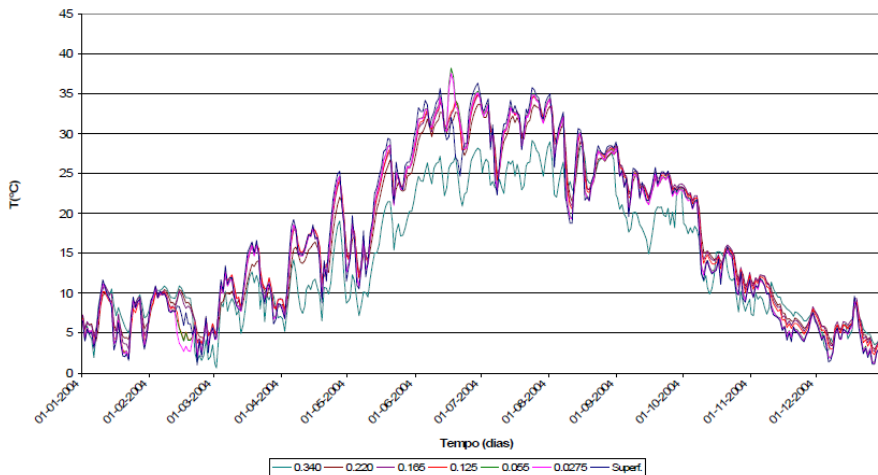
Fonte: Tapsoba *et al.*, (2003).

2.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA CONSISTÊNCIA DO LIGANTE ASFÁLTICO

A temperatura influencia, fortemente, o comportamento mecânico das camadas asfálticas, notadamente na fadiga e na rigidez da mistura asfáltica.

Como exemplo, (figura 2.44) uma estrutura de pavimento tem diferentes temperaturas durante diferentes épocas do ano (Minhoto, 2005).

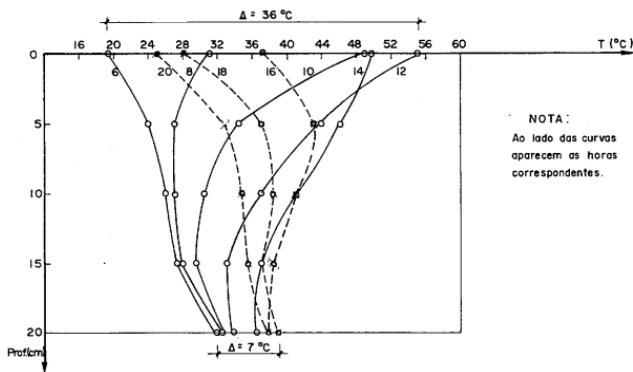
Figura 2.44– Exemplo de evolução da temperatura media diária anual a varias profundidades.



Fonte: Minhoto (2005).

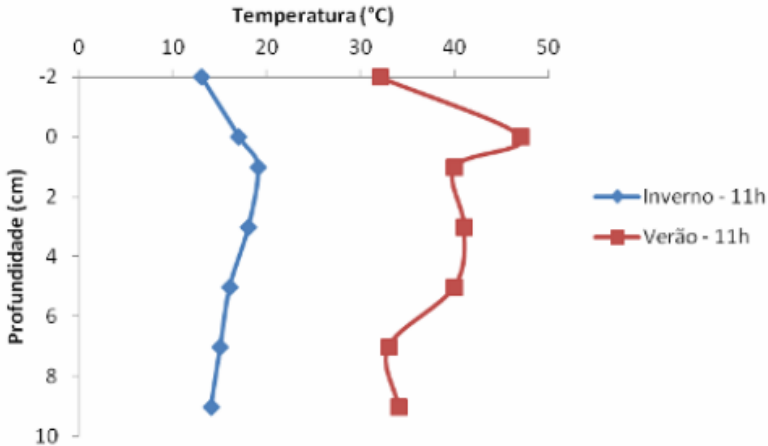
A temperatura, também, varia com a profundidade na estrutura do pavimento, (figura 2.45) como mostrado por Motta (1979), para intervalos de duas horas durante o dia ou pode ser observado (figura 2.46) no perfil de temperatura apresentado por Nuñez *et al.*(2003) para um dia de verão e inverno às 11hs.

Figura 2.45– Exemplo de variação da temperatura com a profundidade a cada 2 horas.



Fonte: Motta (1979).

Figura 2.46– Exemplo de evolução da temperatura média diária anual a varias profundidades.



Fonte: Nuñez *et al* (2003 *apud* Mattos 2014).

Estudos recentes realizados no IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux*) mostram que a deformação para um milhão de ciclos do ensaio de fadiga é fortemente influenciada pela temperatura, e que a evolução da deformação para um milhão de ciclos não é sempre crescente com a temperatura (HORNYCH *et al.*, 2013).

Na metodologia francesa, geralmente as propriedades na fadiga são determinadas para um nível de temperatura a 10°C e para uma frequência de 25 Hz, no entanto, vários estudos experimentais indicam que o módulo e as propriedades em fadiga das misturas asfálticas dependem da temperatura e da frequência (DOMEK, 2005; LUNSTROM *et al.*, 2003; BODIN, 2010).

O desempenho na fadiga varia com a temperatura. No método de dimensionamento Frances considera-se que o aumento da temperatura conduz a uma variação na curva de fadiga (DOMEK, 2005).

Nas baixas temperaturas e frequência elevada, o comportamento dos concretos pode estar no domínio elástico, isto é, o ângulo de fase se aproxima de 0° (SAUNIER, 1968; MOMM, 1998).

Com temperaturas nas proximidades de 20°C e frequências entre 30hz e 50hz, o ângulo de fase pode estar acima de 22°, o que indica comportamento viscoelástico. Nas temperaturas mais elevadas, os

valores de ângulo de fase podem ser elevados, o que conduz a uma forte dissipação de energia, resultando em um comportamento predominantemente viscoelástico (RIVIERE, 1996; SAUNIER, 1968; HUET, 1963; MOMM, 1998).

Tayebali *et al.*, (1994), em ensaios a flexão quatro pontos realizados às temperaturas de 5°C, 10°C, 25°C, mostraram a influência da temperatura na fadiga, com variação da inclinação da curva e do intercepto da curva de fadiga. Neste trabalho pode-se observar (figura 2.47) que a inclinação da curva de fadiga aumenta com o aumento da temperatura, acentuado a susceptibilidade à temperatura. De igual modo, um aumento na temperatura aumenta a vida em fadiga.

A partir dos resultados obtidos Tayebali *et al.* (1994) propõem a equação 2.41 de fadiga em função da temperatura e constantes experimentais.

$$N_f = 10^{(k_1 * k_2 * T)} \cdot \varepsilon^{(k_3 * k_4 * T)} \quad (2.41)$$

Onde:

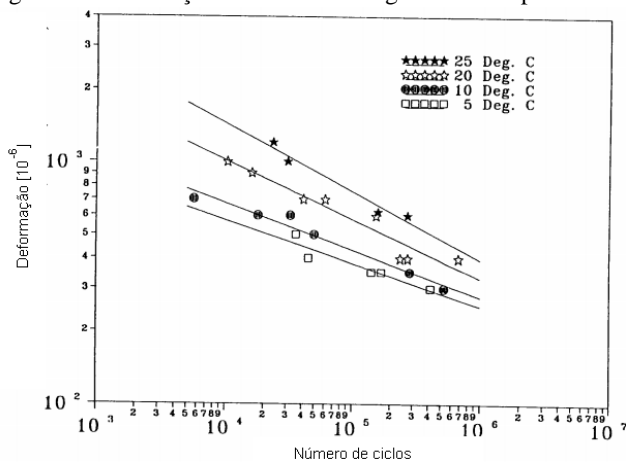
Nf = Número de ciclos;

ε = Deformação;

T = Temperatura;

k_1, k_2, k_3, k_4 = constantes.

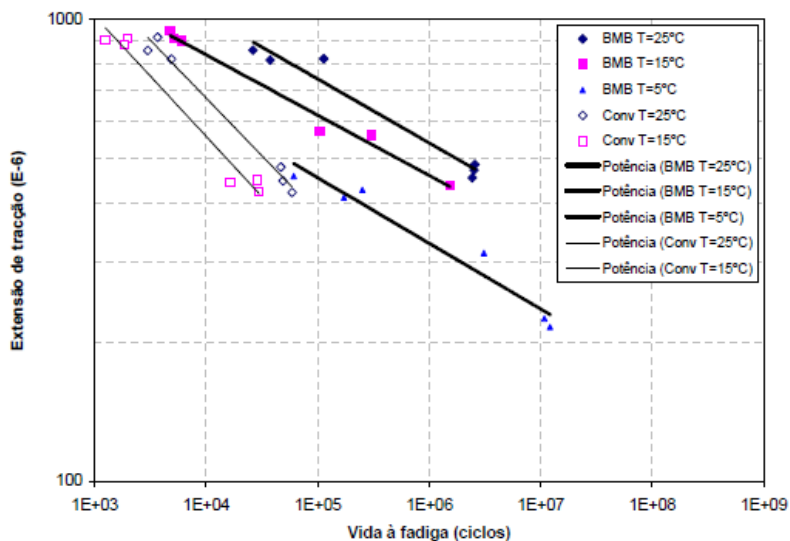
Figura 2.47– Variação da curva de fadiga com a temperatura



Fonte: Tayebali *et al.*, (1994)

Ensaio de fadiga a flexão quatro pontos realizados por Minhoto (2005) revelam que, para misturas com ligantes modificados BMB (modificados por borracha) a declividade é aproximadamente constante com o aumento da temperatura, com valores de 6,682; 7,54; e 6,906, para a mistura preparada com ligante convencional a inclinação é, também, praticamente a mesma, porem, com valores da inclinação da curva com valores menores, de 3,724 e 3,941. Para os ensaios realizados por Minhoto (2005) o aumento da temperatura conduz a aumento na resistência a fadiga (figura 2.48).

Figura 2.48– Curvas de fadiga a diferentes temperaturas e materiais.



Fonte: Minhoto (2005).

Moutier, (1991) mostra que a variação da deformação para um milhão de ciclos não é sempre crescente. Esta variação é representada pela equação 2.42, onde o valor mínimo da deformação para um milhão de ciclos é alcançada na temperatura de 3°C.

$$\varepsilon_6 = 10^{-4}(1,21 - 0,0088\theta + 0,00148\theta^2) \quad (2.42)$$

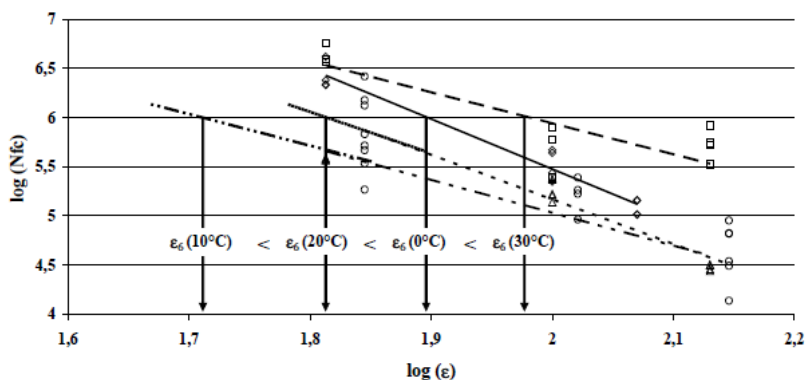
Onde:

ε_6 = Deformação para um milhão de ciclos;

θ = Temperatura.

Domec (2005) realizou ensaios de fadiga a flexão dois pontos sob flexão alternada na frequência de 40Hz, nas temperaturas de 0°C, 10°C, 20°C e 30°C. Não se evidenciou, claramente, a tendência da declividade da curva de fadiga como relatado por Tayebali *et al.*, (1994), porem, o comportamento obtido foi próximo ao observado por Moutier (1991) onde a resistência a fadiga não é sempre crescente com o aumento da temperatura (figura 2.49).

Figura 2.49– Variação da curva de fadiga com a temperatura



Fonte: Domec (2005)

Domec (2005) obteve a equação 2.43 que relaciona o número de ciclos com a temperatura e a deformação.

$$\text{Log}(Nf) = 13,61 - 0,08\theta + 0,003\theta^2 - 4,05 \log(\varepsilon) \quad (2.43)$$

ε = Deformação;

θ = Temperatura.

A variação não linear do parâmetro ε_6 com a temperatura θ , é expressada pela equação 2.44, que corresponde a um polinômio de segundo grau. Na medida em que a temperatura aumenta a deformação correspondente para um milhão de ciclos descrese até um mínimo e logo começa a crescer novamente (figura 2.50).

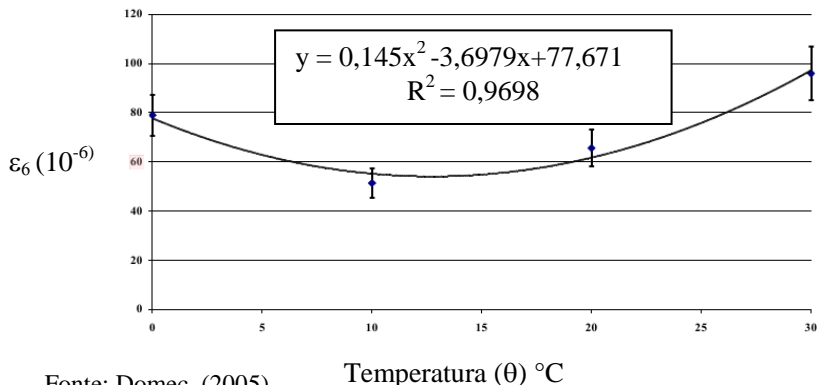
$$\varepsilon_6 = 0,145.\theta^2 - 3,698.\theta + 77,671 \quad (2.44)$$

Onde:

ϵ_6 = Deformação para um milhão de ciclos;

θ = Temperatura.

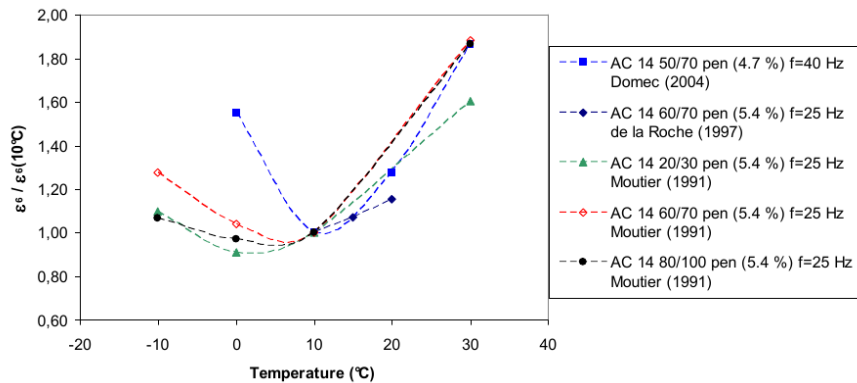
Figura 2.50–Variação de ϵ_6 em função da temperatura.



Fonte: Domec, (2005).

Hornych *et al.*, (2013), representou as experiências relatadas por Moutier (1991); De La Roche *et al.*, (1997); Domec (2005) com o propósito de avaliar o efeito da temperatura no dimensionamento do pavimento e sua incidência na determinação da temperatura equivalente (figura 2.51).

Figura 2.51– Variação da deformação para um milhão de ciclos com a temperatura.



Fonte: Hornych P *et al.*, (2013)

Observa-se para diferentes materiais um comportamento semelhante, onde a deformação para um milhão de ciclos diminui quando o aumento da temperatura até atingir um valor mínimo entre 0°C e 15°C e na medida em que a temperatura continua aumentando a deformação para um milhão de ciclos cresce novamente.

Doan (1977) relata, que em ensaios sobre corpos de prova trapezoidais a tensão, quando a temperatura aumenta há uma diminuição da vida em fadiga.

Goddard *et al.*, (1977) relata que para ensaios a tração-compressão o valor de deformação maior é obtido para as temperaturas mais elevadas.

Quando a temperatura aumenta há uma variação do módulo, para os ensaios a tensão controlada a deformação aumenta durante o ensaio com um maior aquecimento interno, e para os ensaios a deformação controlada a tensão diminui havendo um menor aquecimento interno (MOMM, 1998).

Quintero (2011) estudou dois tipos de misturas asfálticas; uma mistura de módulo elevado com ligante asfáltico de penetração 10/20 e uma mistura asfáltica *grave-bitume* com ligante de penetração 30/45, e observou que, na medida em que a consistência aumenta há um deslocamento da temperatura na qual acontece a menor deformação para um milhão de ciclos no ensaio de fadiga.

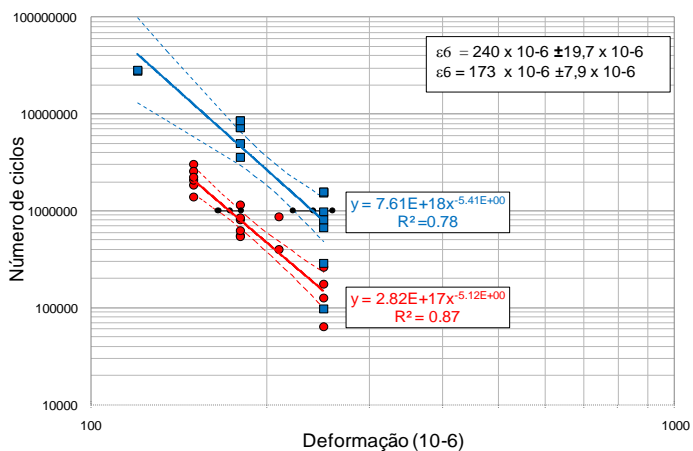
O deslocamento da temperatura crítica é maior quanto maior é a consistência do ligante asfáltico. Este deslocamento pode ser visualizado no plano Cole-Cole, sendo que a temperatura crítica corresponde à temperatura onde ocorre a maior componente viscosa (imaginária) do módulo complexo e, conseqüentemente, a temperatura onde ocorre a menor deformação de um milhão de ciclos no ensaio de fadiga.

A consistência mais elevada de ligante aumenta a deformação para um milhão de ciclos do ensaio de fadiga (figura 2.52). Neste exemplo, os ensaios de fadiga realizados (QUINTERO, 2011) no protótipo I de máquina de módulo complexo e fadiga desenvolvida por MOMM (2005), mostraram valores elevados de deformação de um milhão de ciclos, igual a $240 \pm 19 \mu\text{def}$ em condições de temperatura 10°C a 25 Hz, cujo valor do expoente da curva (-)5,41 e valor de $173 \pm 7,9 \mu\text{def}$, em condições de temperatura de 30°C a 25 Hz, cujo expoente curva de fadiga é (-)5,12.

Embora a normatização do ensaio de fadiga seja na temperatura de 10°C, o protótipo de máquina de fadiga desenvolvido por MOMM

(2005) possibilita realizar ensaios de fadiga em outras temperaturas, como se vê no presente exemplo. Verifica-se que a deformação para um milhão de ciclos na fadiga nas baixas temperaturas é maior que nas temperaturas altas, o que se pode relacionar com a menor energia dissipada com a ocorrência de valores menores da componente imaginária (figura 2.52). Nas temperaturas mais baixas o comportamento é, predominantemente, elástico o que indica menor dissipação de energia por ciclo de carga.

Figura 2.52– Exemplo de curva de fadiga EME 2 a 10°C e 30°C a 25Hz.

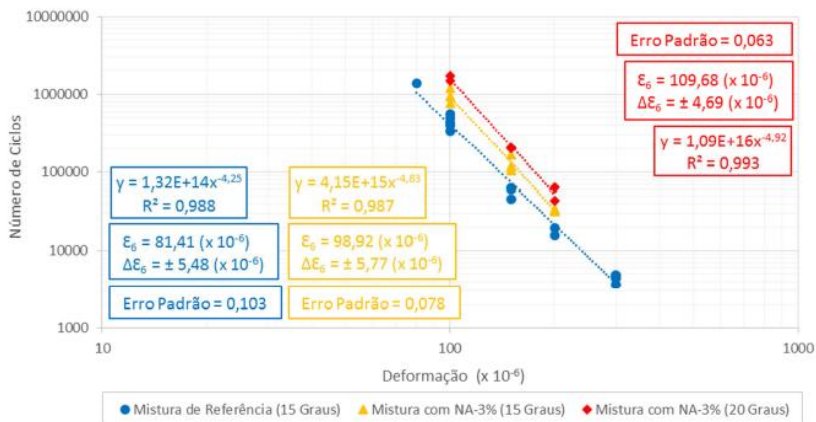


Fonte: Quintero (2011).

Melo (2014) realizou ensaios de fadiga a flexão quatro pontos para duas condições de temperatura 15°C e 20°C, correspondente à temperatura crítica determinada a partir da representação do plano Cole-Cole.

Para a mistura asfáltica, a partir dos resultados mostrados na figura 2.53 pode se observar que para a temperatura de 20°C ocorreu a maior deformação para um milhão de ciclos igual a 109,68 μ def e na temperatura de 15°C igual a 81,41 μ def.

Figura 2.53 – Curvas de fadiga com ligante convencional e modificadas



Fonte: Melo (2014).

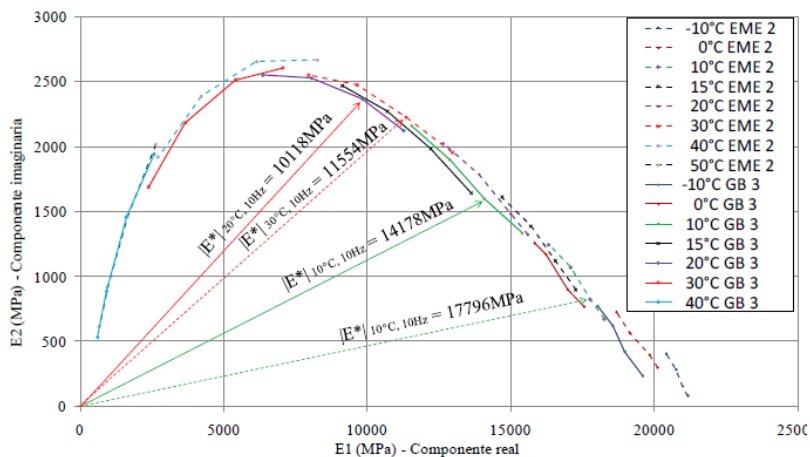
O ligante asfáltico é térmica e cineticamente susceptível o que faz que seja um fator fortemente influente no comportamento à fadiga dos concretos asfálticos. Concretos asfálticos preparados com ligantes asfálticos de maior consistência são menos susceptíveis às variações de temperatura. Os concretos asfálticos preparados com ligantes asfálticos de menor consistência são mais susceptíveis, termicamente (SOLIMAN, 1976; RIVIERE, 1996; MOMM, 1998, De La ROCHE, 1996).

A consistência do ligante asfáltico afeta o comportamento reológico da mistura asfáltica.

Na medida em que a consistência do ligante aumenta, a temperatura na qual onde acontece a maior componente imaginária também, aumenta. Esta situação é relevante para a realização do ensaio de fadiga.

Quintero (2011) realizou ensaios de módulo complexo sob corpos de prova trapezoidais em flexão dois pontos, utilizando ligantes asfálticos CAP 30/45 e ligante CAP 10/20. Encontrou que a temperatura na qual acontece a máxima densidade de energia dissipada, associada à componente imaginária, estava próxima da temperatura de 20°C e 30° respectivamente (figura 2.54).

Figura 2.54–Misturas asfálticas no plano Cole-Cole.



- > Módulo elevado a 10°C e 10Hz ($|E^*| = 17796 \text{MPa}$, $\phi = 2,63^\circ$)
- > Módulo elevado a 30°C e 10Hz ($|E^*| = 11554 \text{MPa}$, $\phi = 11,06^\circ$)
- > Grave-bitume a 10°C e 10Hz ($|E^*| = 14178 \text{MPa}$, $\phi = 6,44^\circ$)
- > Grave-bitume a 20°C e 10Hz ($|E^*| = 10118 \text{MPa}$, $\phi = 13,50^\circ$)

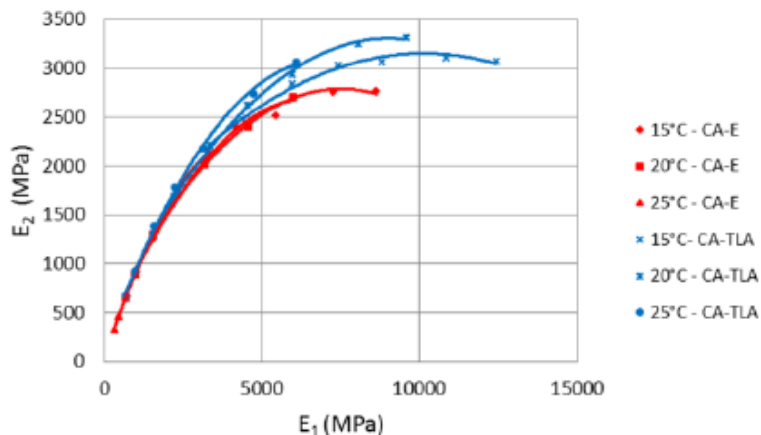
Fonte: Quintero (2011).

As modificações do ligante podem aumentar a consistência do ligante asfáltico, o que permite preparar misturas asfálticas mais duráveis e resistentes.

Estas modificações no ligante asfáltico, análogo ao que acontece com ligantes sem modificação de consistência variada, fazem com que o temperatura crítica seja modificada, situação que é identificada no plano Cole-Cole, a partir da máxima componente imaginária.

Bordin (2014) realizou ensaios a flexão quatro pontos, com ligantes modificados denominados CA-TLA e CA-E com penetrações 39 décimos de milímetros e 50 décimos de milímetros, nas quais o máximo para as temperaturas críticas foram nas temperaturas de 20°C e 15°C (figura 2.55). O autor, ainda, realizou ensaio de fadiga, porém, na temperatura de 25°C, por ser esta próxima da temperatura ambiente.

Figura 2.55– Representação no plano Cole-Cole mistura CA-TLA e CA-E



Fonte: Bordin (2014).

NOGUERA *et al.*, (2011) analisou cinco tipos de misturas asfálticas com ligantes de diferente consistência, sendo dois ligantes asfálticos sem modificação e três ligantes asfálticos modificados. A penetração determinada a 25°C para os asfaltos sem modificação foi igual a 63 e 20, e para os asfaltos modificados por borracha foi de 56, 60, 65. Na tabela 2.7, NOGUERA *et al.*, (2011) indica os valores dos parâmetros da curva de fadiga.

Tabela 2.7–Parâmetros das curvas de fadiga.

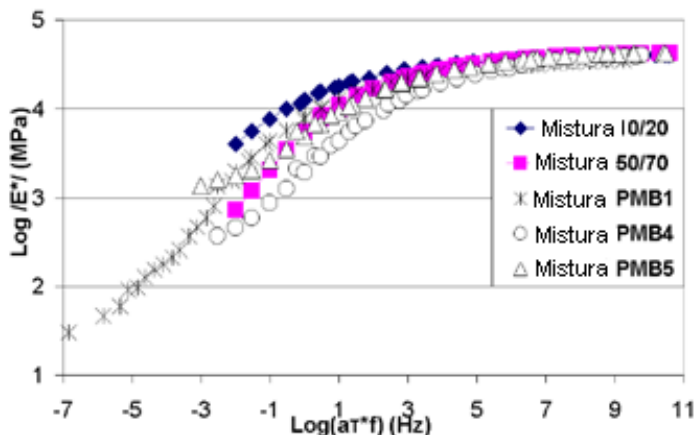
Tipo de ligante asfáltico	Módulo (MPa)	Equação da curva de fadiga	R ²
B-60/70	4000	$\varepsilon = 0,0018N^{-0,181}$	0,90
B-13/22	7500	$\varepsilon = 0,0015N^{-0,199}$	0,74
BM-3c	2100	$\varepsilon = 0,0022N^{-0,134}$	0,88
BM-3b	2900	$\varepsilon = 0,0023N^{-0,140}$	0,84
BM-PN	5900	$\varepsilon = 0,002N^{-0,190}$	0,84

Fonte: NOGUERA *et al.*, (2011).

Olard (2003) mostrou que misturas com ligantes asfálticos diferentes podem ter valores de módulo similar a temperaturas

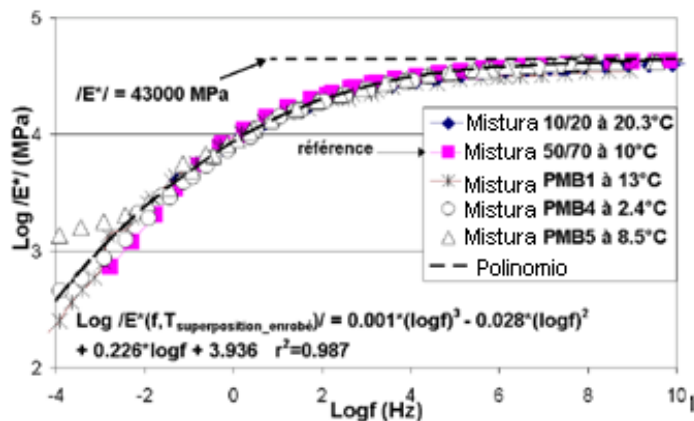
diferentes. É possível transladar as curvas equivalência frequência-temperatura (figura 2.56) para misturas asfálticas diferentes encontrando uma temperatura de transladação em função do tipo de ligante asfáltico para uma mistura de referência CAP 50/70 (figura 2.57 e tabela 2.8).

Figura 2.56– Curvas matrizes na temperatura de Ts 15°C.



Fonte: Olard (2003).

Figura 2.57– Superposição das curvas matrizes das misturas.



Fonte: Olard (2003).

Tabela 2.8 – Temperatura de superposição do ligante e da mistura.

Ligante	0/10	10/20	20/30	35/50	50/70	PMB1	PMB2	PMB3	PMB4	PMB5
T _{superposição ligante} °C	36,5	22,3	20,8	12,2	10	11,3	10	10,6	-0,6	8,5
T _{superposição mistura} °C		20,3			10	13			2,4	8,5

PMB: ligantes modificado por polímero.

Fonte: Olard (2003).

Ao analisar as curvas da figura 2.57 observa-se que, para misturas com ligantes diferentes, podem ter o mesmo valor de módulo a temperaturas diferentes.

Assim, para uma mistura asfáltica preparada com ligante CAP 50/70, a curva equivalência frequência-temperatura superpõe a curva equivalência frequência-temperatura de uma mistura asfáltica CAP 10/20 na temperatura de 20,3°C.

As curvas de equivalência frequência-temperatura para cada mistura podem ser superpostas, encontrando a temperatura de transladação para cada tipo de ligante asfáltico, assim todas as curvas podem ser superpostas com a curva do ligante 50/70 na temperatura e referencia igual a $T_s = 10^\circ\text{C}$.

Estas verificações confirmam a análise realizada por Quintero (2011), onde mostra que a consistência do ligante asfáltico influencia, notoriamente, no comportamento mecânico dos concretos asfálticos, especialmente, no que diz respeito à deformação para um milhão de ciclos do ensaio de fadiga, trasladando a temperatura onde acontece a maior componente viscosa do ensaio de módulo complexo das misturas, e, conseqüentemente, a temperatura crítica para o ensaio de fadiga.

2.7 O DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

De acordo com Manual Francês para Projeto de Estruturas de Pavimentos (SETRA-LCPC, 1994), adicionalmente às informações coletadas sobre as fundações do pavimento por estudos geotécnicos, o projeto de estruturas de pavimentos requer dados de tráfego, do clima e ambiente hidro-geológico e das propriedades mecânicas dos materiais,

De modo geral, para pavimentos com camadas asfálticas, o projeto deve cumprir critérios de deformabilidade em relação à deformação vertical máxima no topo das camadas granulares ou do

subleito e em relação à deformação de tração na base inferior das camadas betuminosas (HORNYCH, et al., 2013).

Na prática, o procedimento de dimensionamento da estrutura do pavimento transcorre em três etapas:

Na primeira etapa, definem-se as camadas da estrutura do pavimento, as quais são escolhidas de acordo com uma hierarquia de materiais, a modelização da estrutura com as respectivas espessuras, os respectivos parâmetros estruturais de cada camada, a modelização da matemática empregada tendo em conta as propriedades particulares de todos os materiais.

Na segunda, realiza-se o cálculo das tensões e deformações devido à carga externa, utilizando-se de modelos elásticos ou viscoelásticos (Huet-Sayegh), considerando a carga solicitante como estática, ou ainda, considerando a carga em movimento (programas CVCR e Viscoroute).

Na terceira etapa, realiza-se a confrontação das deformações calculadas com as deformações admissíveis em pontos críticos na estrutura do pavimento, geralmente, a deformação de tração (ε_{xx}), no sentido de circulação, na camada asfáltica, também, a deformação vertical (ε_{zz}) no topo do subleito ou solo de fundação seja inferior a deformação admissível. Nesta etapa, confronta-se a deformação calculada com a deformação admissível

O ensaio de fadiga do concreto asfálticos é um ensaio padronizado que permite determinar a lei constitutiva do comportamento à fadiga do material, a qual é usada para determinar a deformação admissível (equação 2.45) (DOMEC, 2005). Neste ensaio procura-se simular a alternância do sinal através da aplicação de um sinal sinusoidal levando o material até a falha. O critério de falha clássico é quando o material atinge o 50% da força inicial.

Os parâmetros requeridos da curva de fadiga são: a deformação referente um milhão de ciclos, o expoente da equação da fadiga (a inclinação da curva de fadiga em escala log-log) e o desvio padrão dos resíduos. Assim, a deformação admissível da camada de concreto asfáltica é determinada considerando as variáveis mostradas na equação 2.45.

$$\varepsilon_{t,adm} = f(\varepsilon_6, \theta, NE, k_r, k_c, k_s) \quad (2.45)$$

Onde:

$\varepsilon_{t, adm}$ = Deformação admissível na base da camada de concreto asfáltico de maior profundidade;

ε_6 = é a deformação correspondente a um milhão de ciclos determinada no ensaio de fadiga a 10°C e 25Hz;

θ = Temperatura;

NE = número de passagem do eixo de carga de 130kN;

k_r = é o coeficiente de ajuste de risco em função da dispersão do espessura da camada e desvio padrão dos resíduos no ensaio de fadiga;

k_c = é o coeficiente de ajuste da deformação conforme ao comportamento observado em campo num pavimento do mesmo tipo.

k_s = é o coeficiente devido à heterogeneidade da capacidade de suporte;

A deformação para um milhão de ciclos é determinada na temperatura de 10°C e na freqüência de 25Hz, a qual é transladada para a temperatura desejada pela relação modular mostrada na equação 2.46.

$$\varepsilon_{t,adm}(NE, T_{eq}, f) = \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{-b} \cdot \left(\frac{E(10^\circ C)}{E(T_{eq})}\right)^{0.5} \cdot k_s \cdot k_r \cdot k_c \quad (2.46)$$

Onde:

$\varepsilon_{t,adm}(NE, T_{eq}, f)$ = Deformação admissível na base da camada de concreto asfáltico de maior profundidade, função do número de eixos, da temperatura equivalente e da freqüência;

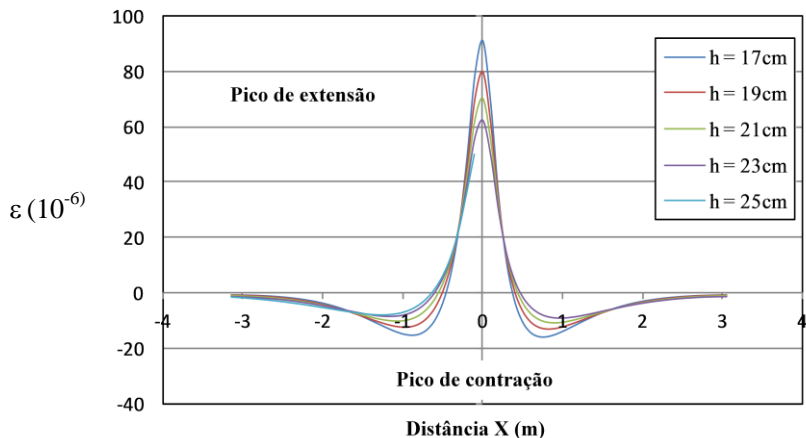
E (10°C) = é o módulo medido a 10°C e 10Hz;

E (15°C) = é o módulo medido a 15°C e 10Hz;

B = é a inclinação da curva de fadiga;

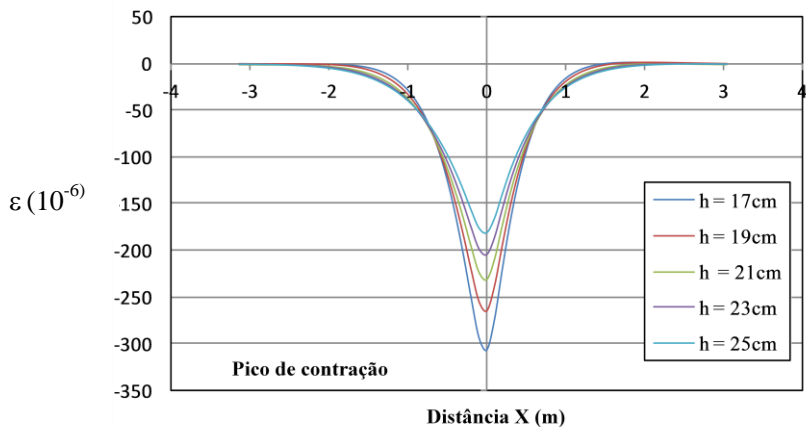
Utilizando o programa *Viscoroute*, que tem em conta os parâmetros de viscoelasticidade das camadas de concreto asfálticos, as deformações de tração (ε_{xx}) da fibra inferior da mistura de concreto asfálticos e vertical (ε_{zz}) no topo superior do subleito são, precisamente, definidas em função de diferentes espessuras (figura 2.58 e 2.59).

Figura 2.58 – Deformações horizontais calculadas com o programa *ViscoRoute* .



Fonte: Quintero (2012).

Figura 2.59 Deformações verticais calculadas com o programa *ViscoRoute*.

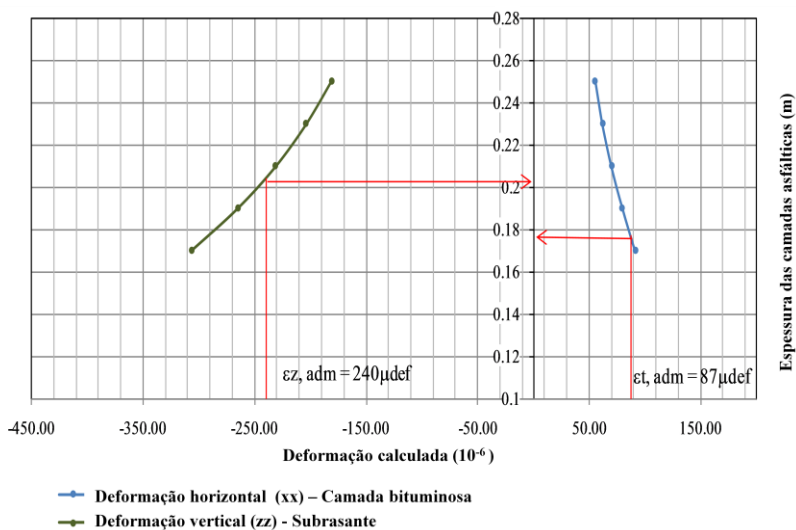


Fonte: Quintero (2012).

As deformações horizontais na camada inferior de concreto asfálticos e as deformações verticais no topo da camada de fundação

podem ser confrontadas com as deformações admissíveis em função das espessuras das camadas (figura 2.60).

Figura 2.60 – Confrontação das deformações calculadas com as admissíveis para o dimensionamento do pavimento.



Fonte: Quintero (2012).

Para o exemplo acima, a deformação admissível da camada de concreto asfáltico foi calculada para um tipo de *Grave betume* (tabela 2.9).

Tabela 2.9 – Deformação admissível da mistura da camada de sub-base.

Material	$\epsilon_0, \mu def$ (10°C e 25Hz)	Desvio padrão SN	$ E^* $, (MPa) (15°C e 10Hz)	$ E^* $, (MPa) (10°C e 10Hz)	b	ϵ_{adm} μdef
GB 3	143,6	0,17	12365	14178	-0,164	87

Fonte: Quintero (2012).

2.7 RESUMO DA REVISÃO DE INTERESSE PARA A TESE

O presente capítulo pode indicar alguns ensinamentos sobre o comportamento dos concretos asfálticos e sua aplicação na estrutura do pavimento rodoviário:

A abordagem da viscoelasticidade das misturas asfálticas, representada no plano Cole-Cole possibilita visualizar e definir as temperaturas críticas a serem consideradas para o ensaio de fadiga.

Para os concretos asfálticos, cujas temperaturas crítica são superiores a 10°C, os ensaios de fadiga realizados nestas temperaturas indicaram deformações de um milhão de ciclos com valores menores que os valores dos ensaios padronizados a 10°C.

O ensaio de módulo complexo determinado em ensaios a flexão alternada possibilita a determinação precisa dos parâmetros de viscoelasticidade requisitados para o dimensionamento.

O modelo Huet-Sayegh oferece com precisão os parâmetros de viscoelasticidade para o dimensionamento.

O ensaio de fadiga a flexão alternada em modo contínuo oferece os parâmetros de fadiga requeridos para a determinação da deformação admissível das misturas asfálticas utilizadas nas camadas da estrutura dos pavimentos.

A modelização de pavimentos que tem em conta a viscoelasticidade dos concretos asfálticos e utiliza os parâmetros do ensaio de fadiga a flexão alternada em modo contínuo apoiando-se em programas adequados como o *Viscoroute* simula, de forma adequada, as deformações de campo e possibilitam o dimensionamento da estrutura do pavimento com eficácia.

CAPITULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODO DA PESQUISA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A pesquisa investiga, basicamente, duas variáveis: o comportamento mecânico dos concretos asfálticos em temperaturas diversas e concretos asfálticos preparados com ligantes de consistências diversas.

Os materiais utilizados são: três ligantes asfálticos, sem modificação, variando sua consistência, misturas de concreto asfáltico com uma única curva granulométrica contínua, e agregados provenientes de uma suíte intrusiva de granito.

A dosagem de misturas asfálticas com ligantes de consistência diferente conduz a teores de ligantes de projeto diferentes.

Nas misturas com ligantes asfálticos menos consistentes, como é o ligante CAP 30/45 e o ligante CAP 50/70, o teor de ligante é menor que nas misturas asfálticas com ligantes asfálticos mais consistentes CAP 10/20. No entanto, optou-se por manter o teor de ligante asfáltico constante em 5,7%, correspondente ao teor de projeto para a mistura formulada com ligante asfáltico 10/20, já estudada por Quintero, (2011).

Com o propósito de manter os volumes de vazios, ou compactidade, das misturas asfálticas próximos, e com o mesmo teor de ligante, busca-se variar um pouco a temperatura de compactação no ensaio de compactação por cisalhamento giratório, em função da curva de viscosidade do ligante asfáltico.

Os ensaios de módulo complexo e de fadiga são realizados com o intuito de investigar um padrão de comportamento dos concretos asfálticos, com um grau de confiança aceitável, com vistas a ser utilizado para o dimensionamento do pavimento.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico CAP 10/20 utilizado é proveniente da refinaria REPAR, localizada no município de Araucária no Paraná e os ligantes CAP 30/45 e CAP 50/70 da refinaria REDUC localizada na Baixada Fluminense. Os ligantes são caracterizados pelos ensaios de penetração

ABNT NBR 6576/05, ponto de amolecimento ABNT NBR 6560/05 e viscosidade.

3.2.2 Agregados

Os granulares utilizados são provenientes de uma suíte intrusiva de granito localizada no Município de Palhoça – SC. São caracterizados nos ensaios de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), de durabilidade (DNER-ME 089/94), de Absorção (DNER-ME 081/94) e massa volumétrica real (AFNOR NF P 18-559).

Os agregados foram coletados em três frações separadas por peneiramento para compor a curva granulométrica. A série de peneiras utilizadas foram 15,9mm; 12,7mm; 9,5mm; 4,76mm; 2,36mm; 1,19mm; 0,59mm; 0,29mm; 0,149mm; 0,075mm segundo a norma DNER-ME 083/94.

3.3 MÉTODOS DA PESQUISA

3.3.1 Preparação das Misturas

As temperaturas de usinagem e compactação são definidas de forma que as três misturas asfálticas apresentem grau de compacidade similar; para isto, determina-se a temperatura do ligante asfáltico CAP 10/20 para a viscosidade de trabalho e, a seguir determina-se a temperatura correspondente para o ligante 30/45 e 50/70.

As temperaturas de mistura e compactação são avaliadas no ensaio de compactação a cisalhamento giratório, para o teor de ligante do estudo igual a 5,7%.

Os parâmetros volumétricos das misturas são calculados pelas relações volumétricas a partir das medidas geométricas dos corpos de prova e da massa volumétrica real.

A massa volumétrica real da mistura asfáltica é calculada pelo ensaio massa volumétrica real AFNOR NF P 18-559. São preparadas três amostras para cada mistura asfáltica, que permanecem em repouso por dois dias, e, em seguida, são colocadas no vácuo para retirar o ar. O cálculo da massa volumétrica é realizado pela equação 3.1.

$$MVR = \frac{m_2 - m_1}{V_{pic} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{agua}}} \quad (3.1)$$

Onde:

MVR = massa específica volumétrica real da mistura asfáltica [g/cm³];

m₁ = massa do conjunto picnômetro + água [g];

m₂ = massa do conjunto picnômetro + água + amostra [g];

m₃ = massa do conjunto picnômetro + água + amostra, após a bomba de vácuo [g];

V_{pic} = volume do picnômetro calibrado [cm³];

ρ_{água} = massa específica da água a uma determinada temperatura [g/cm³].

A densidade máxima teórica é calculada pela equação 3.2

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%G_1}{\rho G_1} + \frac{\%G_2}{\rho G_2} + \frac{\%G_3}{\rho G_3} + \frac{TL_{int}}{\rho_{lig}}} \quad (3.2)$$

Onde:

%G_i = porcentagem das frações granulares;

ρG_i = massas volumétricas;

ρ_{lig} = massa volumétrica do ligante.

As massas volumétricas aparentes são determinadas em função das dimensões do corpo de prova. A compactidade e volume de vazios são calculados pela equação 3.3 e equação 3.4.

$$C\% = \frac{MVA}{MVR} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

$$v\% = \left(1 - \frac{MVA}{MVR}\right) \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Onde:

C = Compactidade;

v% = Volume de vazios;

MVA = massa volumétrica aparente;

MVR = massa volumétrica real

3.3.2 Ensaio de compactação por cisalhamento giratório (NF P 98-252)

A compactidade depende da granulométrica adotada, do teor de ligante, da distribuição espacial dos granulares em conjunto com o

conteúdo de ligante e do tipo de ligante, que rege o comportamento mecânico da mistura.

Este ensaio é realizado com o propósito de avaliar a compactidade das misturas estudadas nas temperaturas de compactação, verificando que as misturas tenham a mesma compactidade sendo elas formuladas com ligantes de consistência diferente. Nas misturas, restam apenas as duas únicas variáveis: a consistência do ligante asfáltico e a temperatura nos ensaios de módulo complexo e de fadiga.

A consistência do ligante parece não ter influência na compactidade da mistura, desde que esteja na temperatura necessária conforme cada tipo de ligante asfáltico conforme a curva viscosidade.

O ensaio de compactação por cisalhamento giratório consiste na aplicação de uma carga estática e mediante cisalhamento obtido com o movimento giratório do molde cujas faces inferior e superior são mantidas com pequeno ângulo em relação à normal do eixo do cilindro. O volume de vazios é calculado em função da evolução da altura do corpo de prova a cada giro do molde.

3.3.3 Corpos de prova para o ensaio de módulo complexo e de fadiga NF P 98-250-3.

3.3.3.1 Compactação e serragem das placas

As placas para o ensaio de módulo complexo e de fadiga são compactadas com dimensões 40cmx60cmx12cm conforme a norma NF P 98-250-2 (*Préparation des mélanges hydrocarbonés – Compactage des plaques*) em mesa compactador tipo LPC (figura 3.1).

Figura 3.1–Mesa compactador tipo LPC



Fonte: Autor (2016).

Após a compactação as placas permanecem em repouso por duas semanas e são serradas conforme a norma NF P 98-250-3 (*Preparation des mélanges hydrocarbonés – Confection d'éprouvettes dans un bloc de mélange hydrocarboné*), em corpos de prova em formato trapezoidal.

A partir das dimensões dos corpos de prova, determinam-se os fatores K_σ , que relaciona a tensão máxima na região de ruptura e a força aplicada no topo do corpo de prova, e o fator K_ε que relaciona a deformação máxima na região de ruptura à flecha no topo do corpo de prova (equações 3.5 a 3.8).

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{F} \quad (3.5)$$

$$K_\sigma = \frac{3L}{2bh_2(h_1-h_2)} \quad (3.6)$$

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{m\acute{a}x}}{z} \quad (3.7)$$

$$K_\varepsilon = \frac{(h_1-h_2)^2}{8h_2L^2 \cdot \left(\frac{(h_2-h_1)(3h_1-h_2)}{2h_1^2} + \ln \frac{h_1}{h_2} \right)} \quad (3.8)$$

Onde:

K_σ = fator que depende das dimensões do corpo de prova para a tensão;

K_ε = fator que depende das dimensões do corpo de prova para a deformação;

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Amplitude de tensão máxima [μm];

$\varepsilon_{m\acute{a}x}$ = Amplitude de deformação máxima [μm];

L = Altura do corpo de prova [mm];

h_1 = base maior do corpo de prova [mm];

h_2 = base menor do corpo de prova [mm];

b = espessura do corpo de prova [mm]

3.3.3.2. Dimensões dos corpos de prova

Na triagem experimental, dois fatores são considerados para selecionar os corpos de prova de cada ensaio de fadiga:

- O coeficiente de variação do fator de forma K_ε inferior a 1% e;
- O desvio padrão do volume de vazios, inferior a 0,5%.

Na presente pesquisa, além do critério em função do fator de forma e do volume de vazios para cada nível de deformação, busca-se

que os corpos de prova sejam de placas diferentes. O número de amostras mínimo para cada curva de fadiga foi de 18 corpos de prova. Esta quantidade faz-se necessária devido à heterogeneidade própria do material e variabilidade dos resultados de fadiga, para que se alcance grau de confiança de 95%.

O formato de cada corpo de prova é trapezoidal, com dimensões padronizadas ilustradas na tabela 3.1. De cada placa, com dimensões 40cmx60cmx12cm são obtidos 24 corpos de prova. Para a obtenção das curvas de fadiga de cada mistura são necessárias 4 placas para se obter o total de 96 corpos de prova por mistura asfáltica, dos quais são selecionados 72 corpos de prova após a triagem em função das dimensões e do volume de vazios, sendo separados em grupo de no mínimo 18 corpos de prova por temperatura.

Tabela 3.1 – Dimensões dos corpos de prova trapezoidais.

Dimensões [mm]	D ≤ 14mm	D ≤ 22mm	D >22mm
h ₁ = base maior	56	70	75
h ₂ = base menor	25	25	30
b = espessura	25	25	35
L = altura	250	250	250

Fonte: NF EN 12697-26:2004-12.

3.3.4 Aferição dos Excêntricos da Máquina de Módulo e Fadiga

Para assegurar que os valores das deformações, em razão da viscoelasticidade do concreto asfáltico, sejam, efetivamente, obtidos nos procedimentos de regulagem da máquina, a aferição da deformação no excêntrico a cada ensaio é realizada com corpos de prova padrão de aço de dimensões (13,5 ± 1)mm x (30 ± 1)mm x (250 ± 1)mm de acordo a norma francesa NF P 98-260-2 (tabela 3.2 e figura 3.2).

Tabela 3.2 – Massa dos corpos de prova de aço.

Corpo de prova	Massa [gr]
CP-1	2984
CP-2	2978
CP-3	2974
CP-4	2980

Fonte: Autor (2016).

A rigidez do sistema de medição deve ser tal que garanta que a deformação aplicada seja transmitida na sua totalidade no ponto de

concentração de deformação máxima. A impedância mecânica é verificada com os corpos de prova de aço estando entre $350 \pm 50 \text{ N/mm}$ (tabela 3.3, Apêndice D).

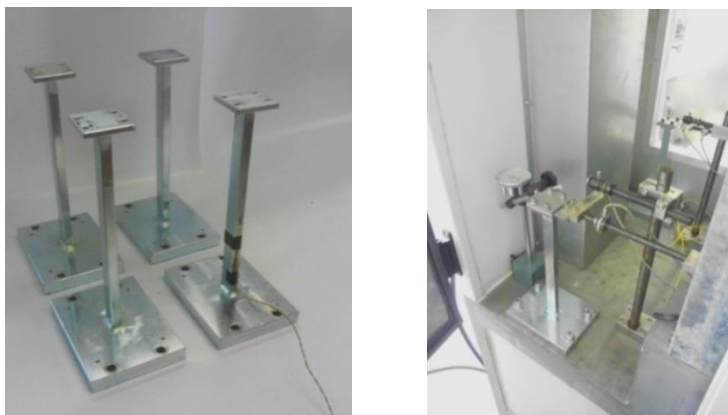
Tabela 3.3 – Impedância dos corpos de prova de aço.

Frequência	Impedância Máxima	Impedância mínima	Impedância media
Hz	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
25	395.19	313.99	336.97

Fonte: Autor (2016).

A aferição da amplitude do deslocamento imposto é realizada através do excêntrico. O valor da flecha aferida no topo do corpo de prova é a necessária para produzir a deformação correspondente no corpo de prova calculada em função da deformação máxima fixada. A figura 3.2 ilustra os corpos de prova de aferição e exemplo de aferição com relógio comparador colocado no topo do corpo de prova.

Figura 3.2 – Corpos de prova de aço e aferição do ensaio de módulo complexo.



Fonte: Autor (2016).

3.3.5 Ensaio de Módulo Complexo NF P 98-260-2

O ensaio de módulo complexo é realizado conforme a norma francesa NF P 98-260-2, 1992, na máquina de módulo complexo e fadiga projetada por Momm, (2005) protótipo III (figura 3.3). Neste ensaio o módulo complexo corresponde a um número complexo definido como a relação entre a amplitude complexa da tensão

sinusoidal $\sigma = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega\tau)$ e a amplitude complexa da deformação sinusoidal $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sigma\varepsilon(\omega\tau - \phi)$ que resulta em regime estacionário.

Figura 3.3 – Máquina de módulo complexo e fadiga utilizada nesta tese.



Fonte: Autor (2016).

3.3.5.1. Condições de ensaio de módulo complexo

Uma vez selecionados, os corpos de prova são colados em chapas metálicas que são fixadas na máquina.

Quatro corpos de prova são ensaiados simultaneamente. A deformação do ensaio é de $40\mu\text{def}$, aferida no topo do corpo de prova de aço com relógio comparador.

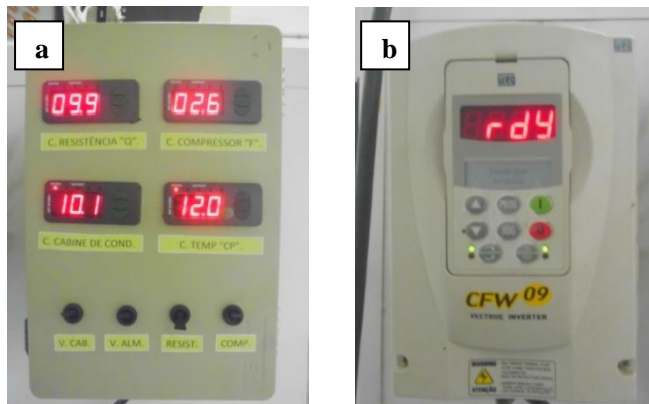
Após prévio condicionamento na temperatura de ensaio, realiza-se o ensaio de determinação do módulo complexo com uma varredura de temperaturas e de frequências, registrando a força e o deslocamento nas temperaturas de -10°C , -5°C , 0°C , 5°C , 10°C , 15°C , 20°C , 25°C , -30°C , 35°C , 40°C , 45°C e as frequências de 1.5Hz, 3Hz, 10Hz, 15Hz, 25Hz, 30Hz.

A câmara da máquina do ensaio de módulo complexo e de fadiga permite realizar o ensaio a diferentes temperaturas e frequências.

O sistema de climatização, localizado na parte inferior e superior da máquina, permite ajustar a temperatura do ensaio requerido através de controles manuais (figura 3.4a). A frequência do ensaio pode ser regulada com o inversor de frequência (figura 3.4.b).

O sistema de aquisição de dados é múltiplosequencial onde 10 amostras de duração de 10s são registradas tanto para a força como para o deslocamento, em cada condição de ensaio.

Figura 3.4 – Sistema de climatização com controles manuais para (a) temperatura e (b) frequência



Fonte: Autor (2016).

3.3.5.2. Cálculo do módulo complexo

O cálculo das componentes do módulo complexo é determinado pelas equações 3.9 – 3.11. O fator de forma " γ " é a razão entre o fator K_σ e K_ϵ e é utilizado para determinar as componentes do módulo complexo em função das tensões e deformações máximas e o μ é um fator de massa que leva em conta os efeitos inerciais e é função da massa do corpo de prova (g) e a massa das partes móveis (g).

$$\gamma = \frac{K_\sigma}{K_\epsilon} = \frac{12L^3}{b(h_1-h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right] \quad (3.9)$$

$$E_1 = \gamma \left(\frac{F_0}{z} \cos(\varphi) + \frac{\mu}{10^3} \omega^2 \right) \quad (3.10)$$

$$E_2 = \gamma \left(\frac{F_0}{z} \text{sen}(\varphi) \right) \quad (3.11)$$

Onde:

E_1 = Parte real do módulo (MPa);

E_2 = Parte imaginária do módulo (MPa);

- z = Amplitude do deslocamento senoidal imposto no corpo de prova (mm);
 F_0 = Amplitude da força aplicada no topo do corpo-de-prova (N);
 φ = Ângulo de defasagem entre a força e a deformação ($^\circ$);
 γ = fator de forma, mm-1;
 μ = fator de massa influência na força pelos efeitos inerciais;
 M = Massa do corpo de prova (kg);
 m = Massa das partes móveis da máquina (kg);
 ω = Pulsação (rad/s), $\omega = 2\pi\phi$.

Para o cálculo do efeito da inércia no módulo complexo é considerada a massa das partes móveis do equipamento (tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Massa das partes móveis da máquina.

Corpo de Prova	Equipamento móvel [g]	Chapa metálica [g]	Porca [g]	Aruela [g]
CP-1	306.9	56.7	22.5	3.8
CP-2	304.8	56.5	22.3	3.8
CP-3	307.1	56.4	21.2	3.1
CP-4	303.5	53.6	22.1	3.2

Fonte: Autor (2016).

3.3.6 Ensaio de fadiga NF P 98-261-1.

O ensaio de fadiga é realizado conforme NF P 98-261-1, em três níveis de deformação. O modo de solicitação é à deformação controlada e flexão alternada em modo contínuo sobre os corpos-de-prova trapezoidais.

O critério de fim de vida de fadiga utilizado é o de 50% do valor da força inicial, adicionalmente, determina-se, também, o fim de vida pelo critério de densidade de energia dissipada.

Para o critério de fim de vida pelo critério de 50% da força inicial obtêm-se as curvas de fadiga conforme a equação 3.12, com a determinação da deformação correspondente para um milhão de ciclos tanto para o critério de 50% da força inicial e para o critério de densidade de energia dissipada foi determinada pela equação 3.14.

$$N(\varepsilon) = A \cdot \varepsilon^b \quad (3.12)$$

$$\lg(N) = A + \left(\frac{1}{b}\right) \cdot \log(\varepsilon) \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_6 = 10^{b \cdot (6-A)} \quad (3.14)$$

Onde:

- N(ε) = Número de ciclos correspondente à ruptura em função do nível de deformação;
 ε = Nível de deformação;
 A = Constante da curva ou intersepto da recta com as ordenadas em escala logaritmica;
 b = Inclinação da curva de fadiga;

Em razão da dispersão de resultados dos ensaios, calculam-se as hipérbolas de confiança do ensaio, $\Delta\varepsilon_6$, que indicam o risco (probabilidade) do valor esperado.

A partir da variância se pode construir a zona de confiança para $p = (1-\alpha) \cdot 100\%$ da curva de regressão equação 3.15.

$$A + \left(\frac{1}{b}\right) \cdot \log(\varepsilon) - t_{\frac{\alpha}{2}} \cdot (n-2) \cdot s_e \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \leq \varepsilon \leq A + \left(\frac{1}{b}\right) \cdot \log(\varepsilon) + t_{\frac{\alpha}{2}} \cdot (n-2) \cdot s_e \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (3.15)$$

Os valores de A e b variam conforme varia o erro da variável correspondente ao número de ciclos (N). O desvio padrão dos resíduos é dado pela equação 3.16 e o valor de $\Delta\varepsilon_6$, pela equação 3.17.

$$S_N = S_{\log(N)} \cdot \sqrt{\frac{(1-r^2) \cdot (n-1)}{(n-2)}} \quad (3.16)$$

$$\Delta\varepsilon_6 = 0,5 \cdot \varepsilon_6 \cdot (10^{-2 \cdot b \cdot S_o} - 10^{2 \cdot b \cdot S_o}) \quad (3.17)$$

$$S_o = S_N \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\lg(\varepsilon_6) - \lg(\varepsilon))^2}{(n-1) \cdot S_{\lg(\varepsilon)}^2}} \quad (3.18)$$

O erro da estimação da constante A é determinado pela equação 3.19

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \cdot \sum(x_i - \bar{x})^2}} \cdot SN \quad (3.19)$$

O erro da estimação da constante b é determinado pela equação 3.20

$$\sigma_b = \frac{SN}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (3.20)$$

3.3.6.1 Deformações do ensaio

As deformações são selecionadas de modo a que 1/3 dos corpos de prova tenham número de ciclos correspondentes a fim de vida à fadiga superior a um milhão de ciclos. As deformações são selecionadas em três níveis e seis corpos de prova são ensaiados por nível de deformação para cada curva de fadiga.

O deslocamento é aferido no topo do corpo de prova metálico padrão. Todas as misturas são aferidas com o mesmo corpo metálico com impedância $350 \pm 50 \text{ N/mm}$ conforme a norma NF P 98-261-1.

O sistema de aquisição de dados utilizando é o ADS2000 Lynx. A força é registrada e medida com célula de carga de 1200N, O sinal amostrado tem duração de 1s a intervalos de cada minuto e a taxa de amostragem foi de 3000Hz.

3.3.6.2 Temperaturas do ensaio

As temperaturas do ensaio foram selecionadas em função da representação do módulo complexo no plano Cole-Cole, conforme é ilustrado, esquematicamente (figura 3.5).

As temperaturas de ensaio são selecionadas de modo a temperatura intermediária seja a temperatura crítica, e uma temperatura abaixo da temperatura crítica e outra acima da temperatura crítica.

No mínimo três temperaturas são escolhidas por mistura asfáltica, de modo que o intervalo entre as temperaturas fosse 10°C . Antes da realização de cada ensaio o corpo de prova foi condicionado durante 6 horas na temperatura de ensaio (tabela 3.5).

Figura 3.5 – Seleção da temperatura para o ensaio de fadiga a partir da representação no plano complexo.

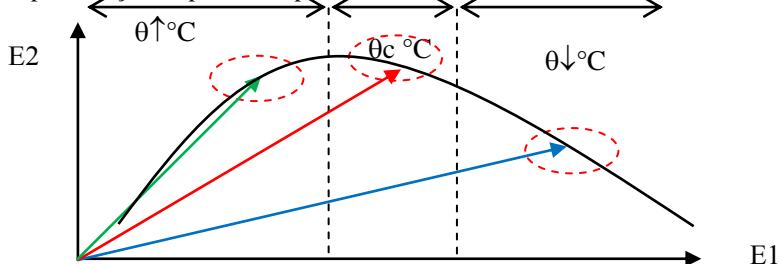


Tabela 3.5 –temperaturas do ensaio de fadiga e frequência de ensaio.

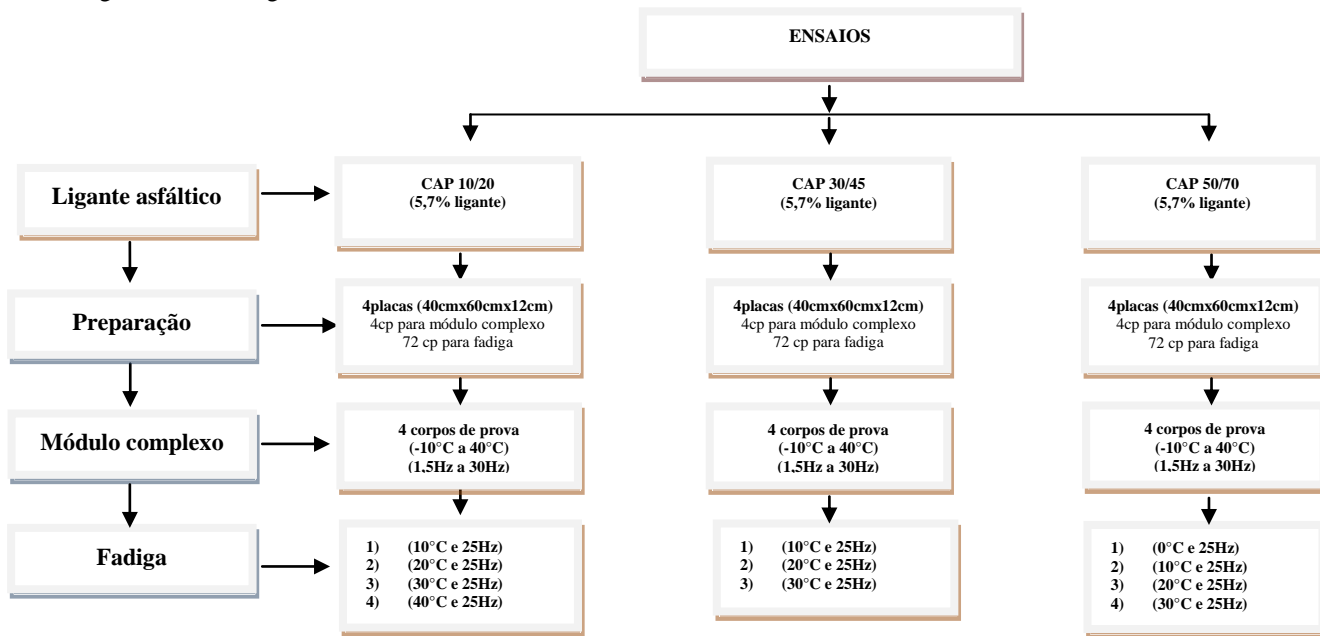
Ligante asfáltico	Temperaturas °C	Frequência Hz
CAP 10/20	10, 20, 30, 40	25
CAP 30/45	10, 20, 30	25
CAP 50/70	0, 10, 20, 30	25

Fonte: Autor (2016).

Nesta abordagem experimental, dois ensaios são analisados o ensaio de módulo complexo e o ensaio de fadiga com o intuito de relacioná-los, analiticamente, a diferentes temperaturas e aplicá-los ao dimensionamento do pavimento. Esta análise realizada a partir da densidade de energia dissipada dos dois ensaios.

O resumo da abordagem experimental em relação ao ensaio de módulo complexo e de fadiga é ilustrado na figura 3.6.

Figura 3.6 – Fluxograma da matriz de ensaios.



Fonte: Autor (2016).

3.3.7 Análise do módulo complexo e da fadiga a partir do princípio de energia

A análise do comportamento entre o módulo complexo e a resistência à fadiga é realizadas, também, a partir do princípio de energia.

Para isto, são determinados os valores de energia para o ensaio de módulo complexo mostrados no Apêndice C.

A energia dissipada por ciclo do ensaio do módulo complexo e de fadiga é calculada pela equação 3.21, onde ΔW representa a energia dissipada por ciclos em $[J/m^3]$

$$\Delta W = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \text{sen}\varphi \quad (3.21)$$

Onde:

ε_0 = Amplitude da deformação;

σ_0 = Amplitude da tensão;

φ = Ângulo de fase;

ΔW = Densidade de energia dissipada.

Na metodologia adotada para relacionar os dois ensaios duas análises são realizadas, uma relacionada às variações das componentes do módulo complexo e densidade de energia com a frequência, temperatura e consistência do ligante asfáltico e sua incidência no comportamento na fadiga e outra relacionada às condições iniciais dos dois ensaios.

Assim, a abordagem de análise faz ênfase principalmente em:

Análise do comportamento em relação às componentes do ensaio de módulo complexo e densidade de energia dissipada

Avaliam-se as variações da componente imaginária do ensaio de módulo complexo e a variação da densidade de energia dissipada com a frequência e a temperatura. A variação da componente imaginária e da densidade de energia dissipada é relacionada ao comportamento observado no ensaio de fadiga.

Avaliam as variações das componentes do ensaio de módulo complexo no plano complexo e sua relação ao comportamento na fadiga.

As variáveis de análise relacionaram as condições iniciais para os dois ensaios:

- Força inicial do ensaio de módulo complexo e de fadiga;
- Fase inicial do ensaio de módulo complexo e de fadiga;
- A deformação dos ensaios
- A densidade de energia dissipada do ensaio de módulo complexo.
- A densidade de energia dissipada do ensaio de fadiga

3.3.8 Modelo para a previsão da deformação a partir do princípio de energia dissipada

O comportamento do concreto asfáltico na fadiga é, fortemente, afetado pela temperatura de ensaio, com foi mostrado no item 2.6 do capítulo 2. Levando em conta o efeito da temperatura no dimensionamento resulta uma tarefa bastante difícil, primeiramente, pela variabilidade das temperaturas no campo e muitas vezes pela impossibilidade de realizar o ensaio de fadiga a diferentes temperaturas.

Adicionalmente, a natureza e o comportamento reológico do material influencia, notadamente, no desempenho em relação à fadiga das misturas asfálticas.

Assim, propõe-se um modelo analítico para prever a resistência a fadiga nas diferentes temperaturas uma vez conhecido o comportamento reológico, especificamente, a densidade de energia do ensaio de módulo complexo e os parâmetros de fadiga numa condição de temperatura específica.

O modelo de previsão desenvolvido propõe estimar a resistência a fadiga em função da temperatura conhecidas as seguintes variáveis:

- Densidade de energia dissipada do ensaio de módulo complexo, denominada ΔW_{mod}
- Deformação para um milhão de ciclos no ensaio de fadiga.

3.3.9 Modelização e dimensionamento do pavimento.

A avaliação do comportamento na fadiga e no módulo complexo é necessária para obter parâmetros fundamentais para o dimensionamento do pavimento.

Estes dois ensaios devem ser analisados em conjunto no dimensionamento para determinar as espessuras das camadas.

O dimensionamento da estrutura do pavimento é realizado em três etapas:

3.3.9.1 Definição da estrutura do pavimento

Assim duas estruturas de pavimento são projetadas: uma estrutura de pavimento tipo utilizada na França com camadas betuminosas espessas onde nas camadas de base e sub-base é utilizada misturas asfálticas avaliando o efeito da temperatura, e uma segunda estrutura de pavimento simples onde nas camadas de base e sub-base são utilizados materiais granulares bastante utilizadas no Brasil. Dois tipos de estrutura de pavimento são analisadas:

- *Estrutura de pavimento com camadas betuminosas espessas*
- *Estrutura de pavimento simples camada de base e sub-base com materiais granulares.*

3.3.9.2 Cálculo das tensões e deformações das camadas asfálticas

O calculo das tensões e deformações devido à carga externa é realizada utilizando o programa ViscoRoute 2.0 desenvolvido pelo LCPC (*Laboratoire Central desPonts et Chaussées*) atual IFSTTAR (*Institutfrançaisdessciences et technologiesdestransports, de l'aménagement et desréseaux*).

Este programa leva em conta o comportamento elástico ou viscoelástico das camadas.

O comportamento viscoelástico é levado em conta através do modelo reológico de Huet-Sayegh.

Os dados de entrada no programa necessário para considerar o comportamento viscoelástico são cinco constantes viscoelásticas (E_0 , E_∞ , k , h , δ) e três constantes térmicas (A_0 , A_1 , A_2).

3.3.9.3 Confrontações das tensões e deformações das camadas asfálticas

O calculo das tensões e deformações são realizadas para as condições dos ensaios de fadiga e com os parâmetros determinados em cada condição de temperatura e segundo a estrutura de pavimento utilizada, tabela 3.6 e tabela 3.7.

Tabela 3.6 – Temperaturas para o dimensionamento da estrutura tipo I com camadas betuminosas espessas.

Ligante asfáltico	Temperaturas °C	Frequência Hz
CAP 10/20	10, 20, 30, 40	25
CAP 30/45	10, 20, 30	25
CAP 50/70	0, 10, 20, 30	25

Fonte: Autor (2016).

Tabela 3.7– Temperaturas para o dimensionamento da estrutura tipo II, estrutura de pavimento simples.

Ligante asfáltico	Temperaturas °C	Frequência Hz
CAP 10/20	10, 20, 30, 40	25
CAP 30/45	10, 20, 30	25
CAP 50/70	0, 10, 20, 30	25

Fonte: Autor (2016).

A determinação da espessura do pavimento consistiu, na confrontação das deformações calculadas com as deformações admissíveis, nos pontos críticos do pavimento, ou seja, na profundidade onde as deformações sejam máximas para as camadas asfálticas e para a deformação de tração longitudinal (ϵ_{xx}), também se verifica que a deformação no topo do subleito ou no solo de fundação seja inferior à deformação admissível.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo é destinado a apresentar as características físicas das misturas asfálticas, dos agregados e do ligante asfáltico e os resultados do ensaio de módulo complexo e do ensaio de fadiga.

O módulo complexo das misturas é apresentado nas curvas isócronas, isotermas, no espaço de Black, e no plano Cole-Cole, por seus componentes reais e imaginários.

O ensaio de fadiga dos concretos asfálticos é apresentado em escala logarítmica, correspondente ao número de ciclos de fim de vida em fadiga pelo critério de 50% da força inicial. A partir desta curva é determinada a deformação correspondente para um milhão de ciclos.

Também, é apresentada a deformação para um milhão de ciclos determinada pelo critério de fim de vida em fadiga de densidade de energia dissipada e comparada com a obtida pelo critério de 50% da força inicial, confrontando os resultados obtidos pelos dois critérios.

4.2 MATERIAIS E CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.2.1 Caracterização do ligante asfáltico

A caracterização dos ligantes asfálticos faz-se pelo ensaio de penetração medido em décimos de milímetros (ABNT NBR 6576/05) e pelo ensaio de ponto de amolecimento (PA)(ABNT NBR 6560/05), cujos valores estão na tabela 4.1, correspondentes à media de três medições para o ensaio de penetração e à media de duas medições para o ensaio de ponto de amolecimento.

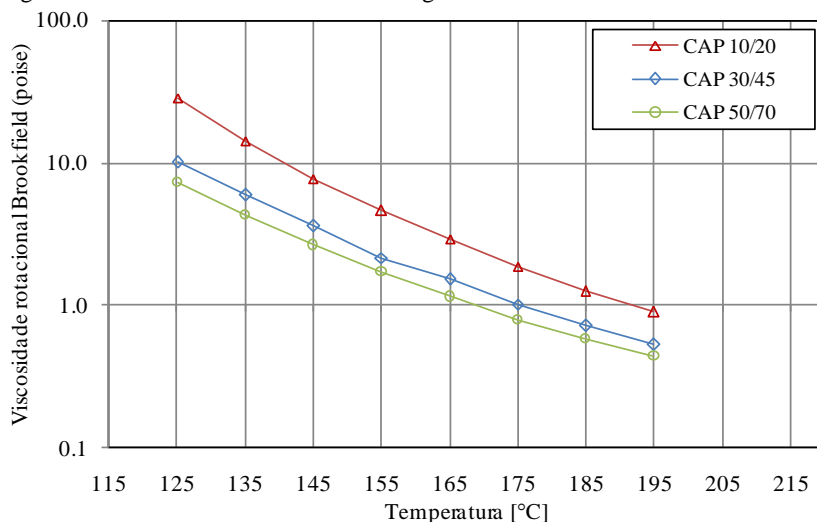
Tabela 4.1.– Características dos ligantes asfálticos.

	Unidade	CAP 10/20	CAP 30/45	CAP 50/70
Densidade [gr/cm ³]		1,019	1,018	1,013
Penetração (100g, 5s, 25°C)	[0,1mm]	10	33	53
Ponto de amolecimento	[°C]	66	56	50

Fonte: Autor (2016).

A viscosidade do ligante asfáltico, determinada conforme o método descrito na ASTM D 4402/02, utilizando o viscosímetro rotacional Brookfield, com spindle 21, no intervalo de temperaturas de 125°C até 195°C com incrementos de 10°C (figura 4.1). Observa-se que o ligante CAP 10-20 requer temperaturas muito superiores ao ligante CAP 30/45 e 50/70 para ter um mesmo valor de viscosidade.

Figura 4.1– Curvas de viscosidades dos ligantes asfálticos.



Fonte: Autor (2016).

A partir das viscosidades determinadas, definem-se as temperaturas de usinagem e de compactação das misturas asfálticas elaboradas com os cimentos asfálticos CAP 10/20, CAP 30/45 e CAP 50/70 (tabela 4.2).

Tabela 4.2– Temperaturas de usinagem e compactação [°C].

Temperaturas	Usinagem	Compactação
CAP 10/20	175	165
CAP 30/45	165	155
CAP 50/70	150	140

Fonte: Autor (2016).

4.2.2 Caracterização dos agregados e curva granulométrica

Os agregados utilizados são de origem de uma suíte intrusiva de granito originário de uma pedreira do Município de Palhoça-SC.

Os agregados, ensaiados pelo ensaio de abrasão, pelo ensaio de durabilidade e densidade e absorção, tem seus resultados indicados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Caracterização dos agregados de esta tese.

Propriedades dos agregados	Resultado	Unidade	Norma
Abrasão os Angeles	19,2	%	DNER-ME 035/98
Sanidade	1,04	%	DNER-ME 089/94
Absorção	0,3	%	DNER-ME 081/94
Massa específica real agregados graúdo 15,9mm-4,76mm (42,50%)	2,747	(gr/cm ³)	AFNOR NF P 18-559
Massa específica real agregados miúdo (gr/cm ³) 4,76mm-p200 (51,80%)	2,748	(gr/cm ³)	AFNOR NF P 18-559

Fonte: Autor.

A curva granulométrica adotada foi definida utilizando a equação 4.1 de Fuller e Tompshon.

Para obter-se uma curva granulométrica contínua que forme um esqueleto mineral de elevado desempenho, usa-se a equação 4.1 (Talbot-Fuller-Tompson), fixando o valor da percentagem de material passa na peneira 0,075mm em 7% e o tamanho máximo em 15,9mm. Assim, determina-se o expoente da curva igual a 0,5.

Definido o expoente da curva, determina-se o material passante em cada peneira para compor a curva granulométrica (tabela 4.4 e figura 4.2).

$$\%p = a. \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (4.1)$$

Onde:

% p = percentagem em peso que passa na peneira d;

A = é uma constante igual a 100;

d = é o tamanho da peneira;

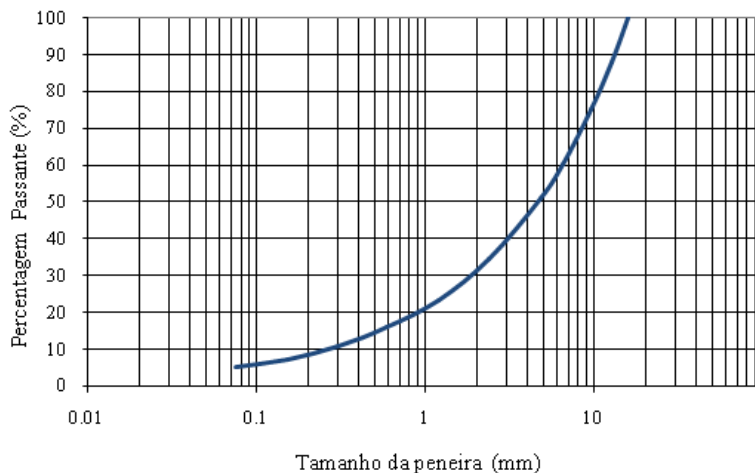
D = tamanho da peneira onde passa o 100% do material.

Tabela 4.4–Curva granulométrica, expoente da curva $n=0,5$.

Peneira	Curva	Frações Retidas
Mm	%	%
15,9	100,0	
12,7	89,4	10,6
9,5	77,4	12,0
6,45	63,9	13,5
4,76	54,9	8,9
2,38	39,0	16,0
1,19	27,6	11,3
0,59	19,5	8,1
0,3	13,9	5,6
0,15	9,9	4,1
0,075	7,0	2,9

Fonte: Quintero (2011).

Figura 4.2 – Curva granulométrica das misturas asfálticas ensaiadas.



Fonte: Quintero (2011).

4.2.3 Características físicas das misturas

As propriedades volumétricas da mistura asfáltica são avaliadas no ensaio de compactação por cisalhamento giratório. Com o propósito de assegurar que estas tenham a mesma compactidade (ou volume de vazios), varia-se a temperatura de usinagem e compactação.

O teor de ligante selecionado para todas as misturas é de 5,7%, obtido como teor de ligante ótimo para a mistura preparada com ligante asfáltico CAP 10/20. A adoção de teor de ligante único de 5,7% para todas as misturas justifica-se com o propósito de avaliar a influência da consistência, sem ter variáveis adicionais.

Os parâmetros volumétricos das misturas estudadas são apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros volumétricos das misturas

	CAP 10/20	CAP 30/45	CAP 50/70
Densidade ligante [gr/cm ³]	1,019	1,018	1,013
Porcentagem de ligante [%]	5,7	5,7	5,7
Massa específica real [gr/cm ³]	2,747	2,747	2,747
DMT [gr/cm ³]	2,505	2,504	2,503
Gmm [gr/cm ³]	2,496	2,492	2,491

Fonte: Autor (2016).

As misturas asfálticas com função estrutural, a serem usadas nas camadas de base e sub-base do pavimento, podem ser avaliadas na compactidade nos níveis dos 80 giros, 100 giros ou 120 giros, dependendo da classe de mistura asfáltica e da espessura a ser adotada na aplicação em campo.

No caso particular, em razão de estar-se trabalhando com ligante CAP 10/20 para mistura a ser classificada como de Módulo Elevado, a compactidade pode ser avaliada no nível dos 80 giros, com percentagem de vazios inferior a 6%. Por consequência, todas as misturas asfálticas são, também, avaliadas no mesmo nível de energia de compactação, ou seja, para um nível de giros igual a 80.

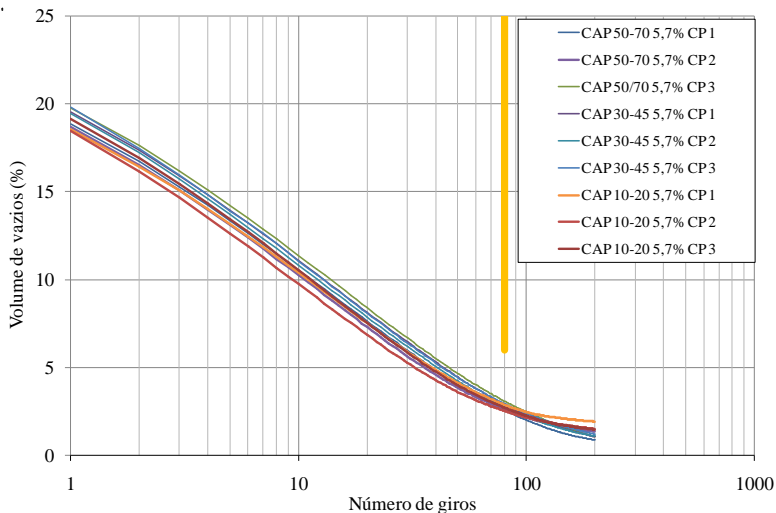
Desta forma, os valores de compactidade das misturas no nível dos 80 giros têm os seguintes valores: A mistura preparada com ligante asfáltico CAP 10/20 o volume de vazios tem de 2,7%; a mistura preparada com ligante asfáltico CAP 30/45 tem o volume de vazios 2,84% e a mistura preparada com ligante asfáltico CAP 50/70 tem o volume de vazios de 2,74% (tabela 4.6).

A proximidade das curvas de compactação é obtida variando a temperatura de compactação em função da viscosidade de cada ligante asfáltico (figura 4.3). Definem-se, assim, as temperaturas nas quais devem ser preparadas as placas de concreto asfáltico para os ensaios de módulo complexo e de fadiga.

Assim, as misturas com mesmo teor de ligante e mesma compactidade indicam ter propriedades físicas similares, restando

somente a variável de formulação consistência do ligante asfáltico com objeto do presente estudo para a avaliação do comportamento mecânico no módulo complexo e na fadiga.

Figura 4.3 – Aptidão à compactação das misturas asfálticas com teor de ligante asfáltico igual a 5,7%.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 4.6 – Volume de vazios no ensaio de compactação a cisalhamento giratório no nível dos 80 giros

Mistura asfáltica	Vv [%]	Desvio Padrão
CAP 10/20	2,70	0,17
CAP 30/45	2,84	0,10
CAP 50/70	2,74	0,28
Valor médio	2,76	-

Fonte: Autor (2016).

4.2.4 Compactação e serragem dos corpos de prova do ensaio de módulo complexo e fadiga

As placas para os ensaios de módulo complexo e de fadiga são compactadas utilizando a mesa compactadora tipo LPC (figura 4.4), nas dimensões 120mmx400mmx600mm.

Figura 4.4 – Compactação das placas e par de placas após a compactação.



Fonte: Autor (2016).

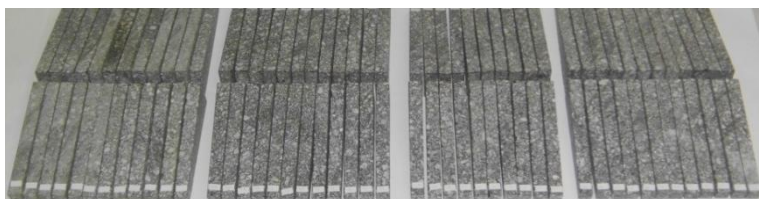
As placas permanecem em repouso por um período de 15 dias e são serradas em corpos de prova com formato trapezoidal (figura 4.5 e 4.6).

Figura 4.5 – Exemplo de serragem das placas para obtenção dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.6 – Exemplo de corpos de prova desta tese após a serragem para uma mistura asfáltica.



Placa 1

Placa 2

Placa 3

Placa 4

Fonte: Autor (2016).

Os corpos de prova possuem as dimensões padrões (figura 4.7)

Figura 4.7–Geometria dos corpos de prova



Fonte: Autor (2016).

Os corpos de prova permanecem em repouso por um período de 15 dias, e são, então, medidos e pesados para realização da triagem de seleção. suas dimensões e peso para determinação do volume de vazios a partir da sua geometria.

O volume de vazios dos corpos de prova selecionados, estão reunidos no Apêndice G, identificando os corpos de prova destinados a cada um dos procedimentos dos ensaios.

4.3 MÓDULO COMPLEXO

O ensaio de Módulo Complexo é realizado a flexão alternada em corpos de prova trapezoidais, com a deformação de 40 μ def e temperaturas de (-)10°C a 45°C e frequências de 1,5Hz a 30Hz.

Os resultados dos ensaios de módulo complexo estão reunidos no Apêndice B, separados por cada uma das misturas.

As representações clássicas do módulo complexo são, a seguir, apresentadas: no plano cole-cole, as curvas isócronas, as curvas isotérmicas, no espaço Black e as curvas de equivalência frequência temperaturas.

4.3.1 Plano Cole–Cole

As figuras 4.8 a 4.10 ilustram as representações dos resultados do módulo complexo no plano Cole-Cole das três misturas asfálticas. Nos gráficos das figuras 4.8 a 4.10 estão adicionados os vetores de módulo indicativos para os ensaios de fadiga na frequência de 25hz e temperatura de 10°C (linha em cor azul) e o vetor de módulo complexo indicativo (cor vermelha) indicativo para os ensaios de fadiga na frequência de 25Hz e na temperatura considerada crítica.

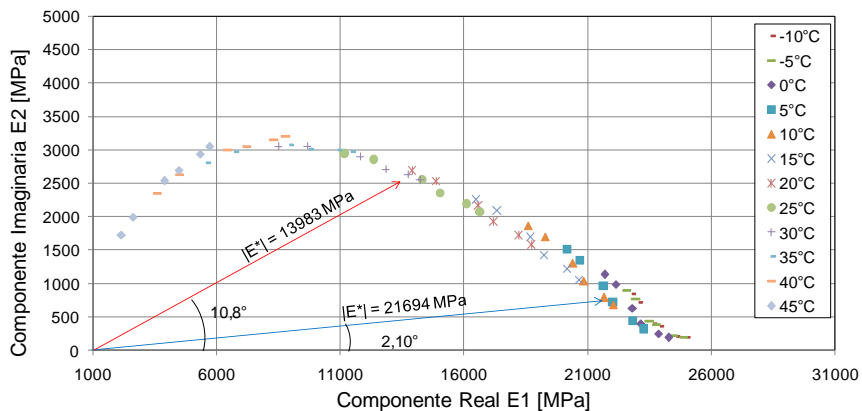
Observa-se, no gráfico da mistura asfáltica elaborada com o CAP 10/20, que, com o aumento da temperatura em 20°C (de 10°C a 30°C), o módulo complexo diminui em um 35%; e o ângulo de fase entre a tensão e a deformação aumenta de 2,10° para 10,8° (figura 4.8). O ângulo de fase próximo de zero indica que o material se comporta como elástico e com elevada rigidez; isto se deve, predominantemente, à consistência elevada do ligante. Observa-se, no plano Cole-Cole, que, com o aumento da temperatura, a componente imaginária aumenta até um valor máximo e logo descesse novamente, e, em contrapartida, a componente real diminui com o aumento da temperatura.

Para a mistura asfáltica preparada com ligante asfáltico CAP 30/45, nas condições de frequência de 25hz e temperaturas de 10°C e 20°C, com aumento da temperatura em 10°C (de 10°C a 20°C), o módulo complexo diminui em um 26% e o ângulo de fase entre a tensão e a deformação aumenta de 4,7° para 12,2°, (figura 4.9 e tabela 4.11).

Para a mistura preparada com ligante asfáltico CAP 50/70, nas condições de frequência de 25Hz e temperaturas de 10°C e de 15°C, com o aumento da temperatura em 5°C, há redução de 17% da rigidez, com um aumento do ângulo de fase entre a tensão e a deformação de 8,3° para 13.1 (figura 4.10 e tabela 4.11).

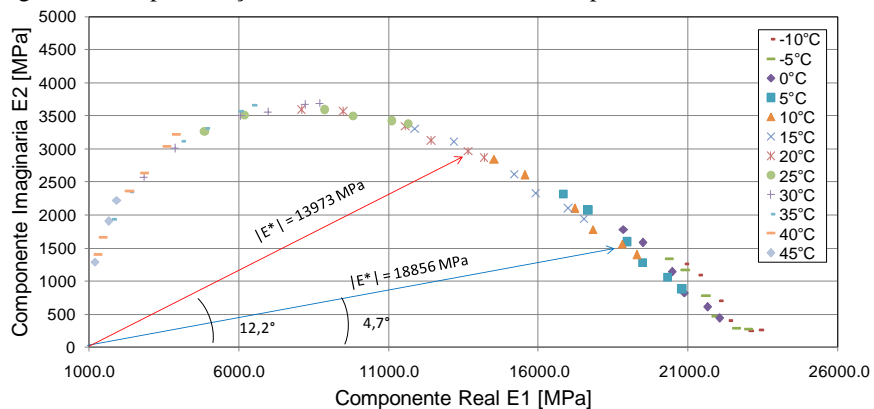
Ao comparar as misturas na temperatura de 10°C observa-se que na medida em que a consistência do ligante asfáltico o módulo complexo aumenta, e o ângulo de fase diminui

Figura 4.8 – Representação da mistura com CAP 10/20 no plano Cole-Cole.



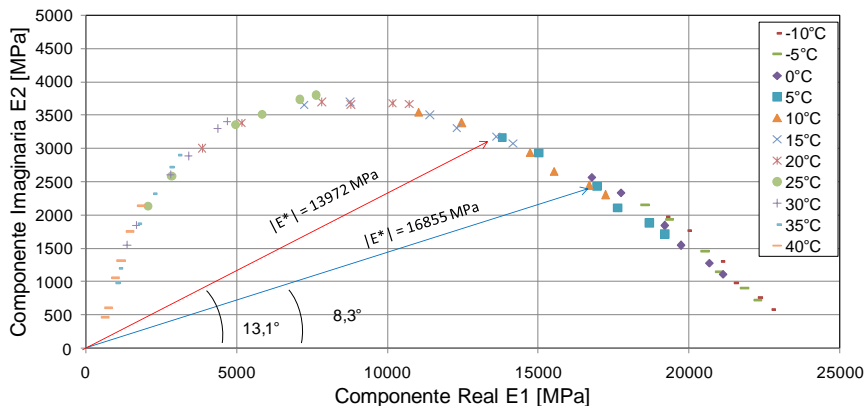
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.9 – Representação da mistura com CAP 30/45 no plano Cole-Cole.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.10 – Representação da mistura com CAP 50/70 no plano Cole-Cole.



Fonte: Autor (2016).

Outra constatação que pode ser realizada é que ligantes asfálticos diferentes podem conduzir a valores de módulo complexo similares, porém em condições de temperaturas diferentes.

Em relação à influência da consistência do ligante asfáltico, pode-se observar que se confirmam as observações relatadas por LUNSTROM *et al.*, (2003).

Na tabela 4.7 são apresentados os valores de módulo, na condição de temperatura de 10°C, estabelecida pela norma para o ensaio de fadiga e na temperatura crítica para cada misturas asfálticas .

Tabela 4.7–Módulo complexo na temperatura em que é realizado o ensaio de fadiga por norma e na temperatura crítica definida no plano Cole-Cole.

Mistura	Temperatura °C	Condição Para fadiga	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E* [MPa]	ϕ [°]
CAP 10/20	10	NF P 98-261-1	21679,8	788,9	21694,7	2,1
	30	Crítica Cole-Cole	13733,5	2627,8	13985,3	10,8
CAP 30/45	10	NF P 98-261-1	18791,2	1556,5	18856,4	4,7
	20	Crítica Cole-Cole	13656,9	2956,4	13974	12,2
CAP 50/70	10	NF P 98-261-1	16676,9	2441,5	16855,5	8,3
	15	Crítica Cole-Cole	13608,5	3165,4	13972,8	13,1

Fonte: Autor (2016).

Estas observações, também, são relatadas por OLARD (2003), que utilizou diferentes tipos de ligantes asfáltico, com e sem modificação, mostrando que é possível superar as curvas dos diferentes ligantes asfálticos para uma temperatura fixa.

4.3.2 Curvas isócronas

O módulo complexo, representado por curvas de igual frequência, (figuras 4.11 a figura 4.13) permite visualizar a susceptibilidade térmica do concreto asfáltico.

Dois situações podem ser verificadas uma em relação ao decaimento das curvas, na medida em que a temperatura aumenta e a consistência do ligante diminui há uma maior declividade das curvas.

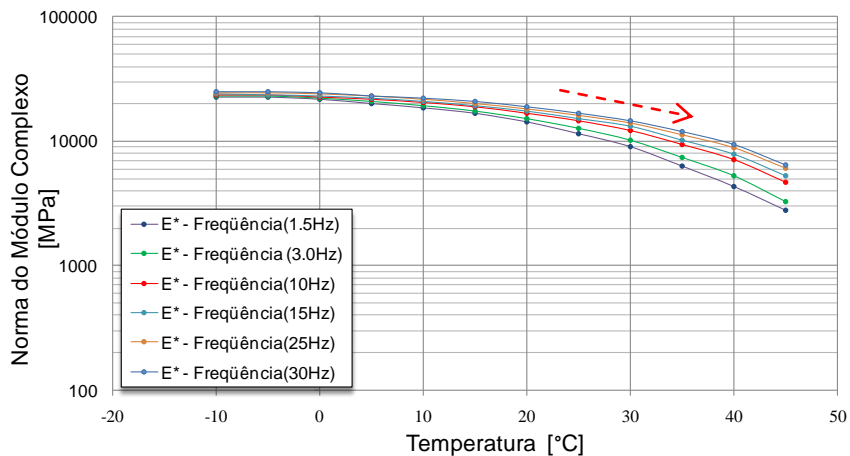
Ou seja, mostra que para ligantes asfálticos de menor consistência são mais susceptíveis termicamente.

Observa-se uma deflexão (escala logarítmica) das curvas, na mistura com CAP 10/20 nas proximidades da temperatura de 30°C, na mistura com CAP 30/45 nas proximidades de 20°C e na mistura com CAP 50/70 nas proximidades da temperatura de 10°C.

Ao analisar a variação das curvas e tomando como referência um valor de módulo próximo a 10000MPa, pode ser constatado, a partir das figuras 4.11 à figura 4.13.

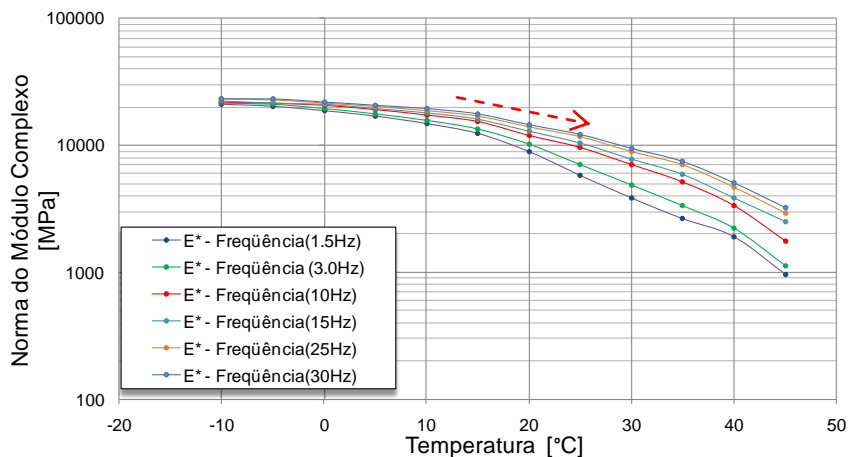
Observa-se, também, que para a mistura com ligante de maior consistência, as curvas são mais próximas entre si, o que indica que na medida em que a consistência diminui haverá uma maior redução no valor do módulo complexo.

Figura 4.11 – Curva isócronas para a mistura preparada com ligante CAP 10/20.



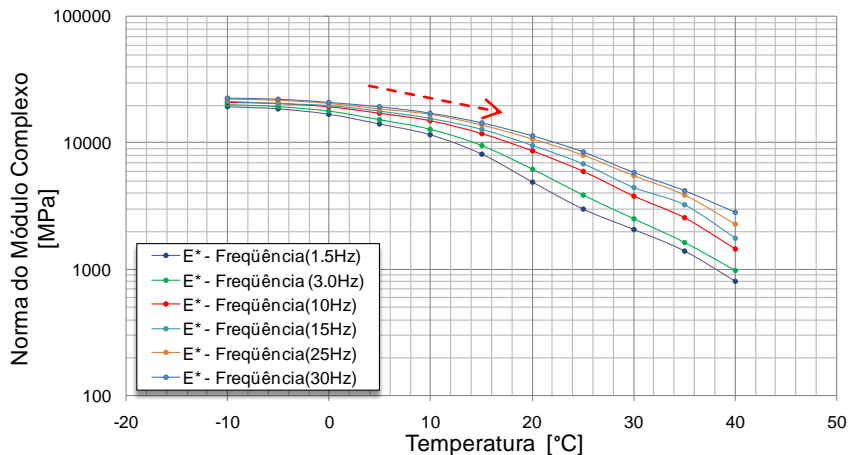
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.12 – Curva isócronas para a mistura preparada com ligante CAP 30/45.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.13 – Curva isócronas para a mistura preparada com ligante CAP 50/70.



Fonte: Autor (2016).

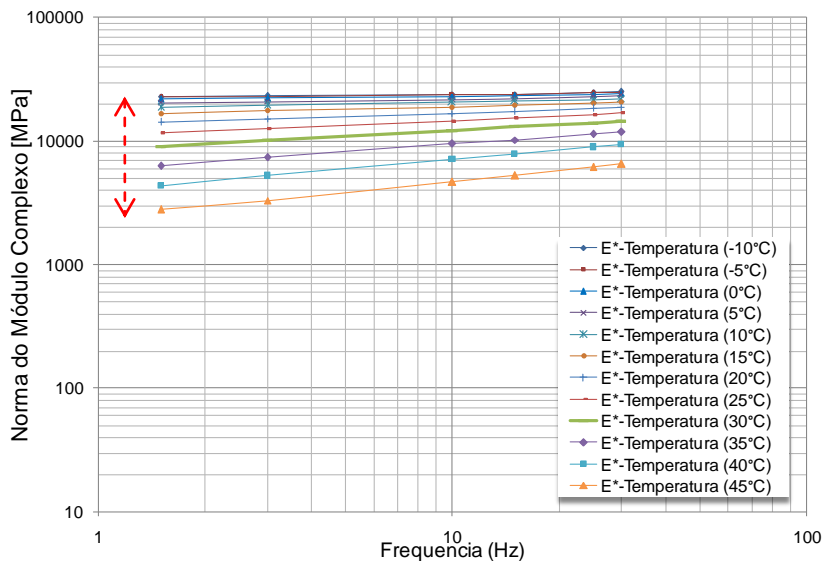
4.3.3 Curvas isotérmicas

A representação do módulo complexo em isotermas permite visualizar a susceptibilidade cinética das misturas asfálticas (figuras 4.14 a 4.16).

De modo análogo às isócronas, observam-se as variações das declividades das curvas, que aumentam com a redução da consistência do ligante, e o afastamento das curvas entre si, que aumenta com a redução da consistência do ligante.

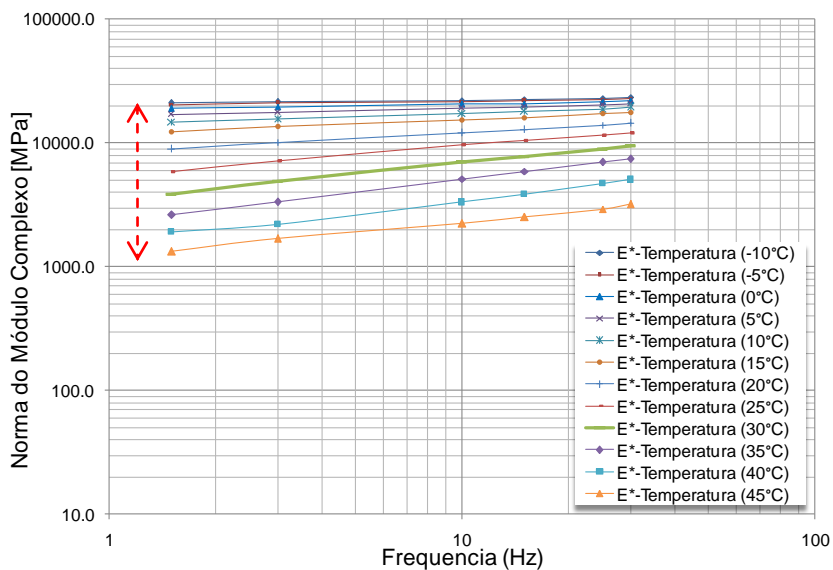
Observa-se que na condição de baixa frequência (1,5Hz) e temperatura elevada (40°C) o valor de módulo complexo é inferior a 1000MPa para a mistura com CAP 50/70, enquanto que para mistura com CAP 10/20, o valor do módulo é superior a 3000MPa (figura 4.14 a figura 4.16 e Apêndice B).

Figura 4.14 – Curva isócronas para a mistura CAP 10/20.



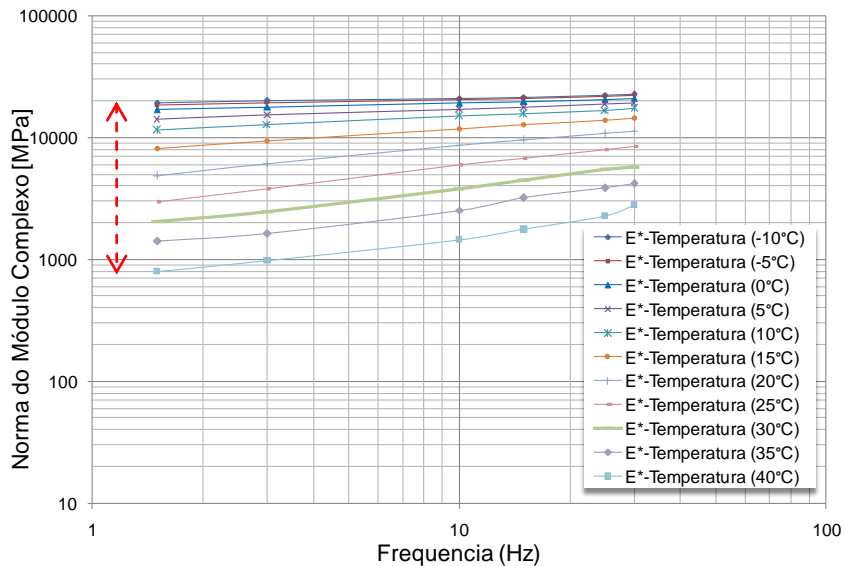
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.15 – Curva isócronas para a mistura CAP 30/45.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.16 – Curvas isotermas para a mistura CAP 50/70.



Fonte: Autor (2016).

4.3.4 Espaço de Black

A representação do módulo complexo no espaço de Black é uma forma interessante de representar os resultados do módulo complexo pelo que mostra a relação com o ângulo de fase (figuras 4.17 a 4.19).

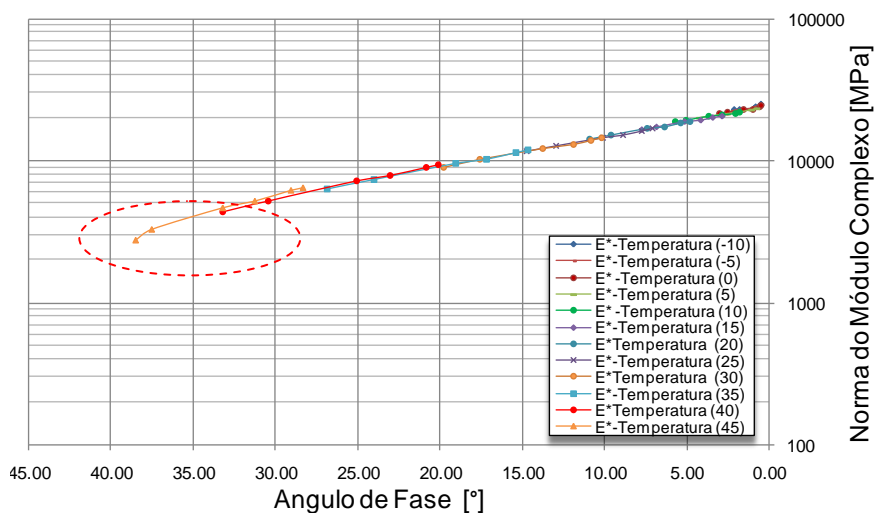
Esta representação permite estimar o valor para o módulo denominado “ E_∞ ” (Módulo para elevada frequência e baixa temperatura), situação em que o material é solicitado a elevadas frequências e baixas temperaturas, ou seja, para situação em que o ângulo de fase tende a zero e o produto da frequência pelo tempo de relação tende a infinito ($\omega\tau \rightarrow \infty$). Este valor de módulo é necessário para a calibração do módulo de Huet-Sayegh.

Não foram observadas diferenças significativas no valor do módulo “ E_∞ ”, isto pode ser explicado pela semelhança entre as misturas em relação a sua composição proporção dos constituintes e formulação semelhante.

Nas elevadas frequências e baixas temperaturas o material tem um comportamento predominantemente elástico. Observa-se que as misturas, nesta condição de temperatura e frequência, convergem a um valor muito próximo, ou com diferenças muito pequenas (CAP 10/20 igual a 24701MPa, CAP 30/45 igual a 24274MPa, CAP 50/70 igual a 24102MPa).

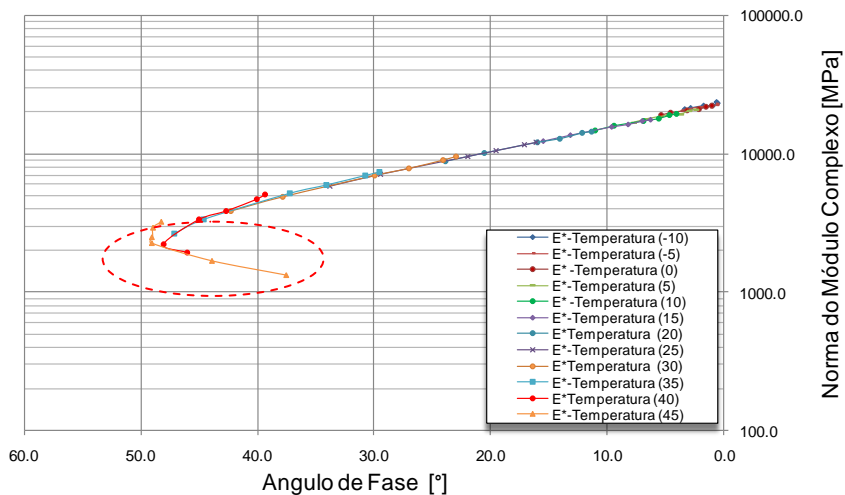
A maior diferença entre as misturas é observada nas elevadas temperaturas. Na mistura asfáltica preparada com ligante asfáltico CAP 10/20 (figura 4.17) o ângulo de fase máximo não alcança os valores de ângulo de fase das misturas com CAP 30/45 e CAP 50/70. Para as misturas preparadas com ligante asfáltico CAP 30/45 e CAP 50/70 o limite do ângulo de fase se verifica a partir da temperatura de 40°C (figura 4.18 e 4.19).

Figura 4.17 – Variação do Módulo complexo com ângulo de fase CAP 10/20.



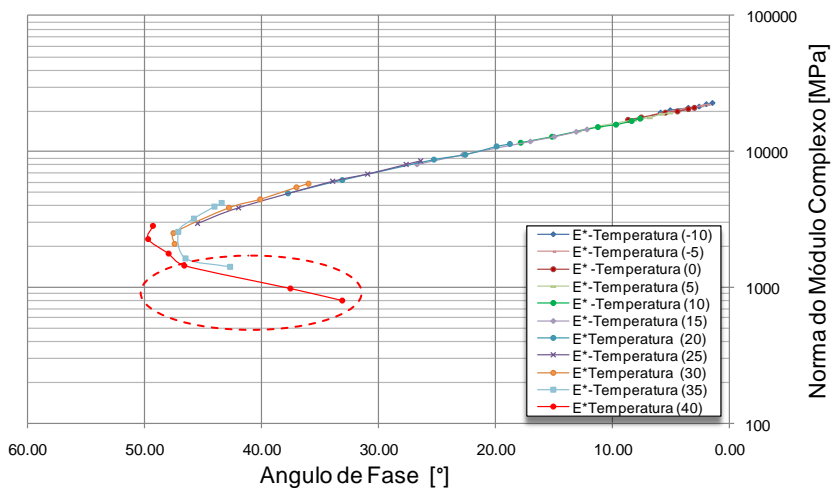
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.18 – Variação do Módulo complexo com ângulo de fase CAP 30/45.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.19 – Variação do Módulo complexo com ângulo de fase CAP 50/70.



Fonte: Autor (2016).

4.3.5 Curvas Equivalência frequência – temperatura

A representação do módulo complexo pelas curvas de equivalência frequência-temperatura faz-se com a transladação das curvas isotérmicas de modo a se ter uma curva contínua e única (figuras 4.20 a 4.22), que permite observar a susceptibilidade das misturas.

Curva com ligante asfáltico de consistência elevada tem menor inclinação (são curvas mais horizontal) ou seja, a variação da frequência tem menor influência em relação as outras duas misturas asfálticas.

As constantes do método de transladação de Willian-Landel e Ferry (equação 4.2) para o cálculo do coeficiente de translação das curvas à temperatura de 15°C é mostrada na tabela 4.8.

$$\text{Log}(a_T) = \frac{-C_1(T-T_R)}{(T-T_R)+C_2} \quad (4.2)$$

Onde:

TR = temperatura de referência em °K;

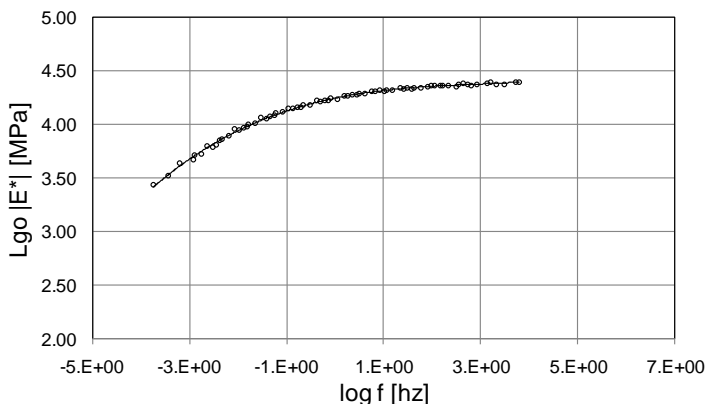
C1 e C2 = constantes dependentes do material.

Tabela 4.8 – Constantes de Willian-Landel e Ferry

Mistura	C1	C2
Asfalto CAP 10/20	222,1	1942,8
Asfalto CAP 30/45	50,2	491,0
Asfalto CAP 50/70	90,5	990,9

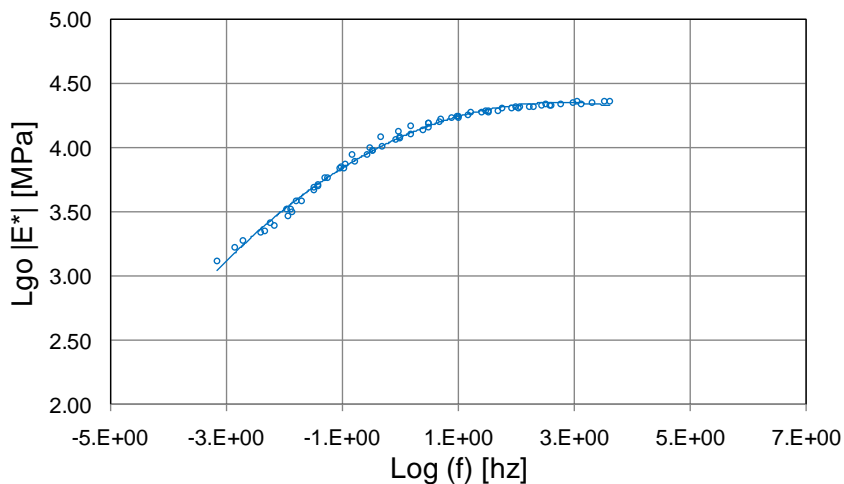
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.20 – Curva mestra C1 = 222,07 C2=1942,825 TR = 15°C, CAP 10/20.



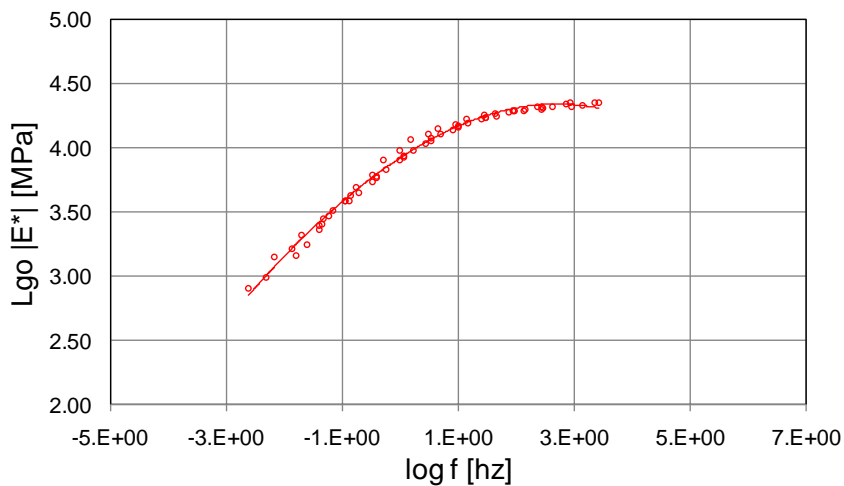
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.21– Curva mestra C1 = 50,243 C2=491 TR = 15°C, CAP 30/45.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.22– Curva mestra C1 = 90,45 C2=990.95 TR = 15°C, CAP 50/70.



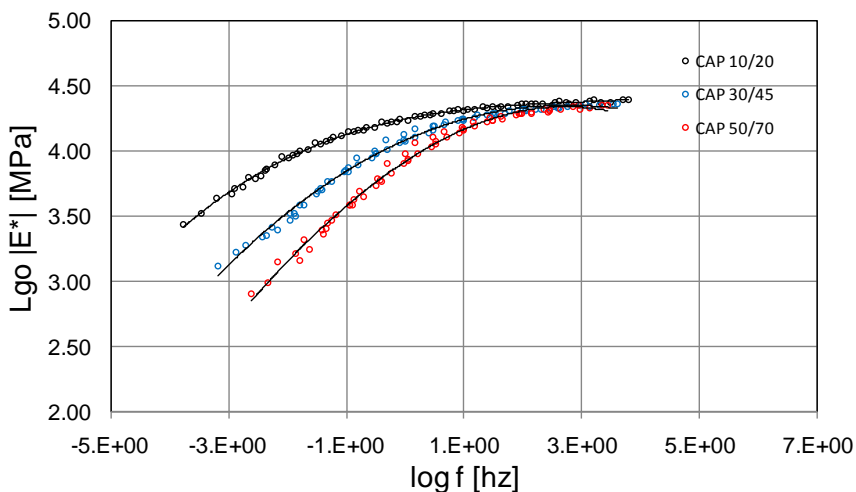
Fonte: Autor (2016).

As curvas da figura 4.23 correspondem às curvas equivalência frequência temperatura para as três misturas asfálticas na temperatura de

15°C. Observa-se que na medida em que a consistência do ligante asfáltico aumenta, o módulo complexo é menos susceptível a variação da frequência.

Também, observa-se uma variação do ponto de inflexão das três curvas, para a mistura preparada com ligante CAP 10/20 é próximo de 1hz e para a mistura com ligante CAP 50/70 mais próximo de 10hz. Para a mistura preparada com ligante CAP 30/45 encontra se em um valor intermediário entre estas duas frequências.

Figura 4.23 – Comparação das curvas equivalência frequência para a temperatura de referencia 15°C.



Fonte: Autor (2016).

4.4 MODELO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO

Os resultados numéricos do módulo complexo são dificilmente aplicáveis diretamente. O modelo de Huet-Sayegh proporciona uma forma analítica do módulo complexo em função da frequência e da temperatura de forma mais simples para sua aplicação (HUET, 1963).

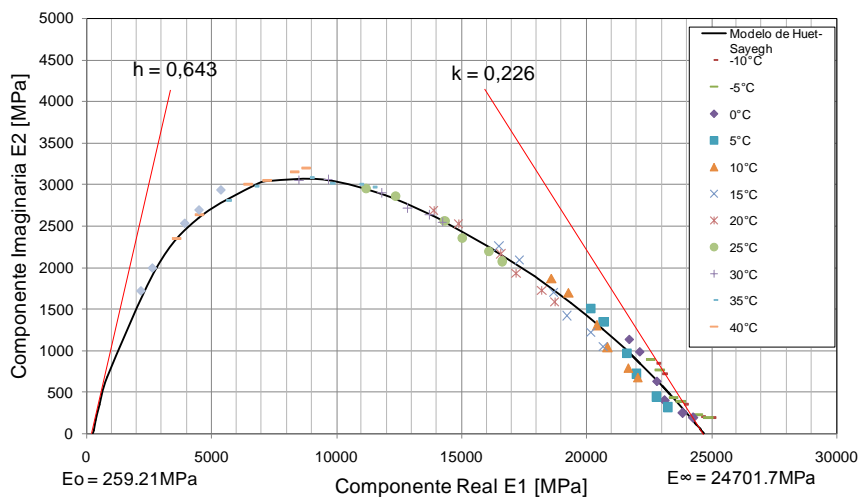
O modelo de Huet-Sayegh requer a calibração de cinco constantes viscoelásticas (E_{∞} , E_0 , k , h , δ) e três constantes térmicas (A_0 , A_1 , A_2), (tabela 4.9, figura 4.24 a 4.29).

Tabela 4.9 – Constantes do módulo de Huet-Sayegh

Parâmetro	CAP 10/20	CAP 30/45	CAP 50/70
E_0 [MPa]	259,21	261,3	311,48
E_∞ [MPa]	24701	24274	24102,4
K	0,2264	0,2625	0,2791
H	0,6436	0,7616	0,7623
δ	1,678	1,556	1,54
A0	6.36105	3.03941	1.05398
A1	-0.267578	-0.250321	-0.227946
A2	0.0001351	0.000474	0.0002233
τ (15°C)	10.7801	0.5434	0.0987

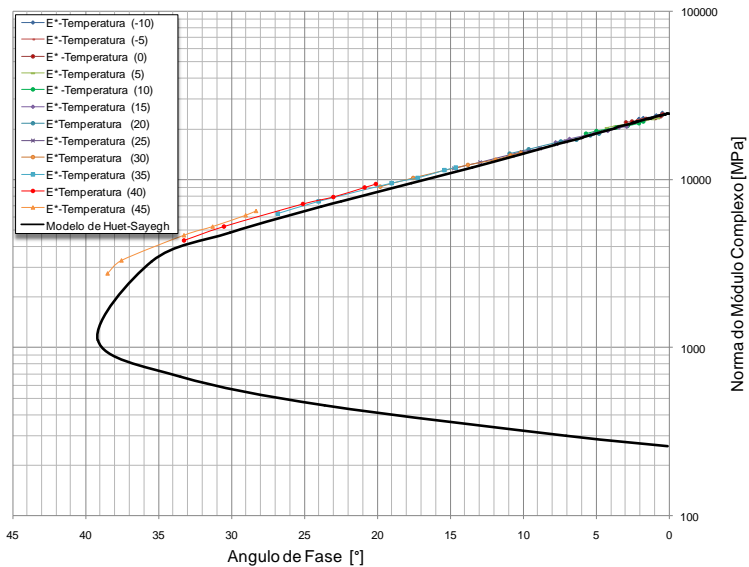
Fonte: Quintero (2016).

Figura 4.24 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo CAP 10/20.



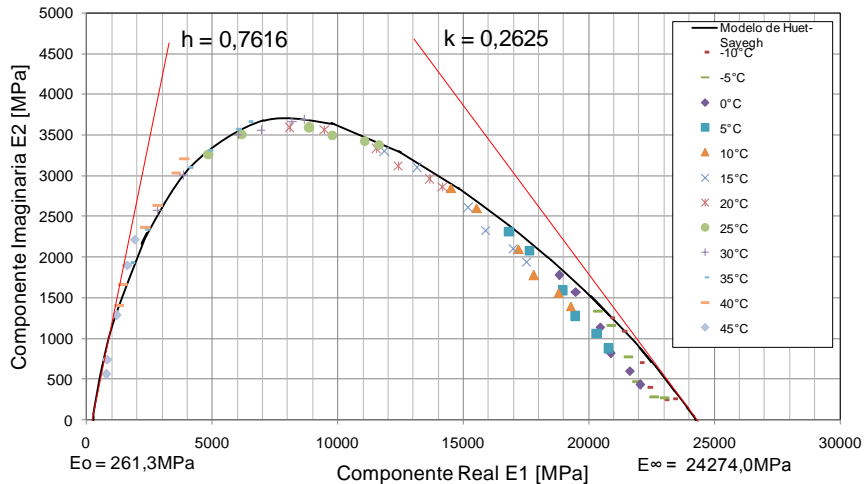
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.25 – Modelo de Huet-Sayegh no espaço Black CAP 10/20.



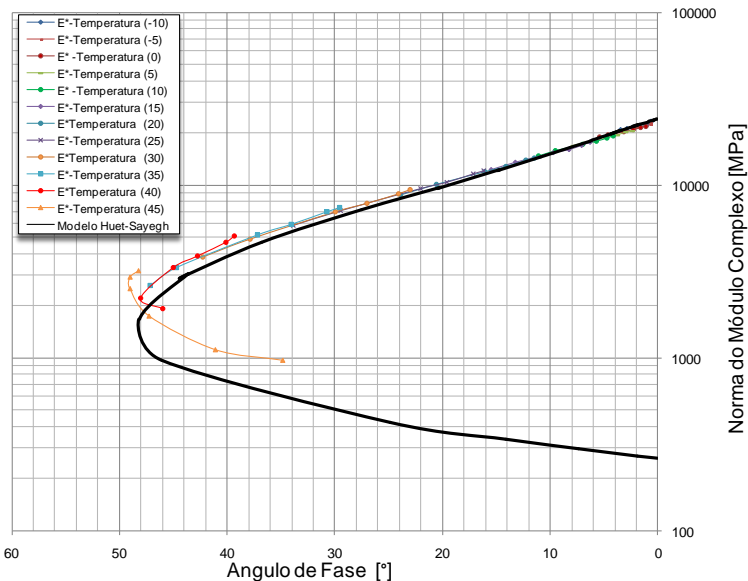
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.26 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo CAP 30/45.



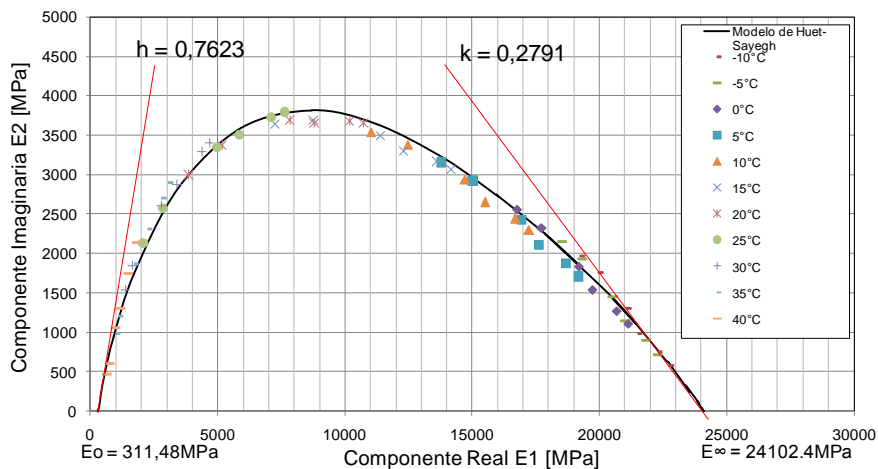
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.27– Modelo de Huet-Sayegh no espaço Black CAP 30/45.



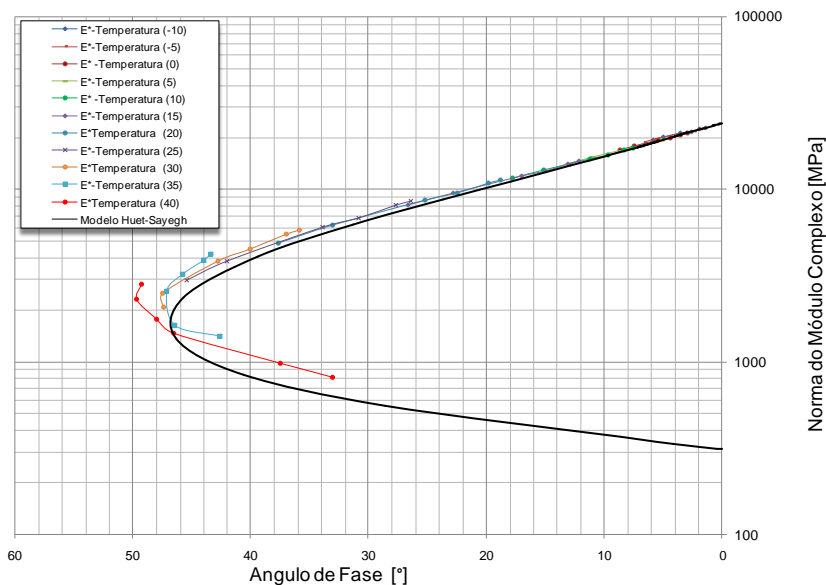
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.28 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo CAP 50/70.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.29 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo CAP 50/70.



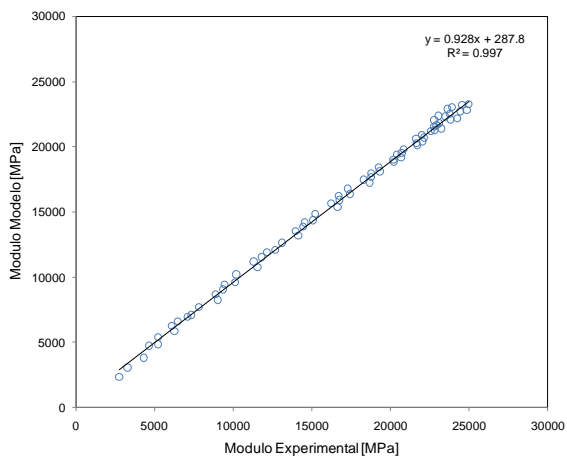
Fonte: Autor (2016).

A representatividade do modelo Huet-Sayegh é muito precisa. As correlações entre os resultados modelados com o modelo de Huet-Sayegh e os valores experimentais são muito próximos da unidade (figuras 4.30 a 4.31), com valores de R^2 para a mistura preparada com ligante CAP 10/20 igual de 0,997; para a mistura preparada com ligante CAP 30/45 igual de 0,996; para a mistura preparada com ligante CAP 50/70, igual de 0,993.

Nas representações no espaço de Black (figuras 4.25, 4.27 e 4.29) pode se observar um ajuste muito refinado dos dados experimentais nas temperaturas baixas e intermediárias.

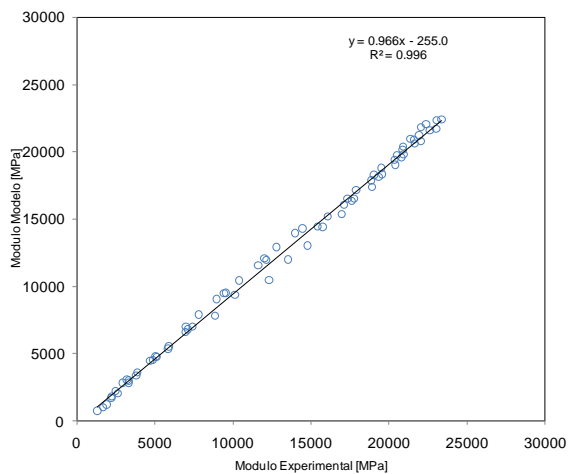
Nas temperaturas elevadas há uma pequena variação dos dados calculados pelo modelo de Huet-Sayegh e os dados experimentais.

Figura 4.30 – Módulo experimental versus Modelo Huet-Sayegh CAP 10/20.



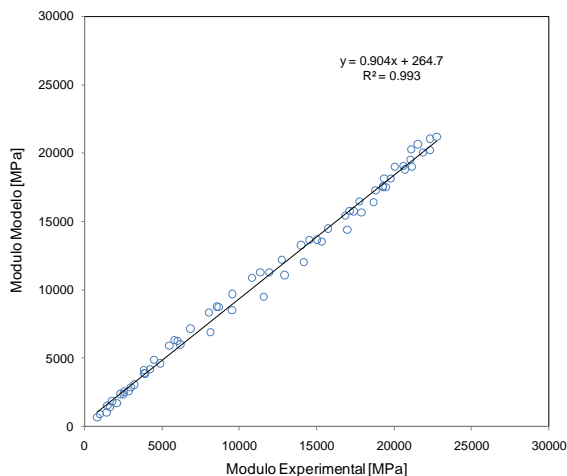
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.31 – Módulo experimental versus Modelo Huet-Sayegh CAP 30/45.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.32 – Módulo experimental versus Modelo Huet-Sayegh CAP 50/70.



Fonte: Autor (2016).

O modelo reológico de comportamento de Huet-Sayegh permite comparar as misturas asfálticas em função da consistência do ligante asfáltico e da temperatura, com parâmetro “ τ ”.

O parâmetro “ τ ” rege o tempo de relaxação e é função da temperatura. Este parâmetro é fortemente influenciado pela consistência do ligante asfáltico.

Com o aumento da consistência do ligante asfáltico há aumento o valor de “ τ ”, conseqüentemente faz com que no plano Cole–Cole exista uma transladação das curvas do módulo entre si, ou seja, ligantes com consistência diferentes podem ter valores de módulo muito próximos a temperaturas diferentes.

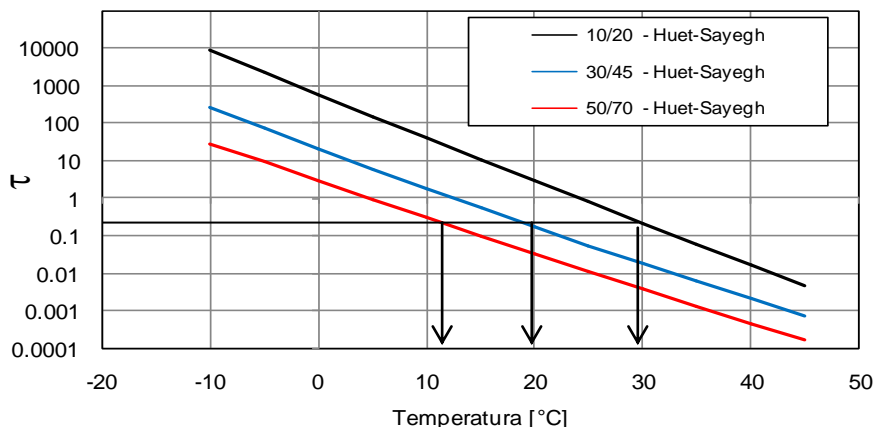
A componente imaginária máxima do modelo de Huet-Sayegh corresponde à transição que é regida pela variável “ δ ” entre as elevadas temperaturas e as baixas temperaturas.

Com o aumento da consistência do ligante asfáltico há aumento no parâmetro “ δ ”. Pequenas diferenças no valor de “ δ ” provocam considerável variação no valor da componente imaginária máxima.

O valor de “ δ ” para a mistura asfáltica com ligante CAP 30/45 e CAP 50/70 são 1,556 e 1,54, respectivamente, já para o ligante CAP 10/20 a diferença é maior, em relação aos outros dois ligantes com valor de 1,678.

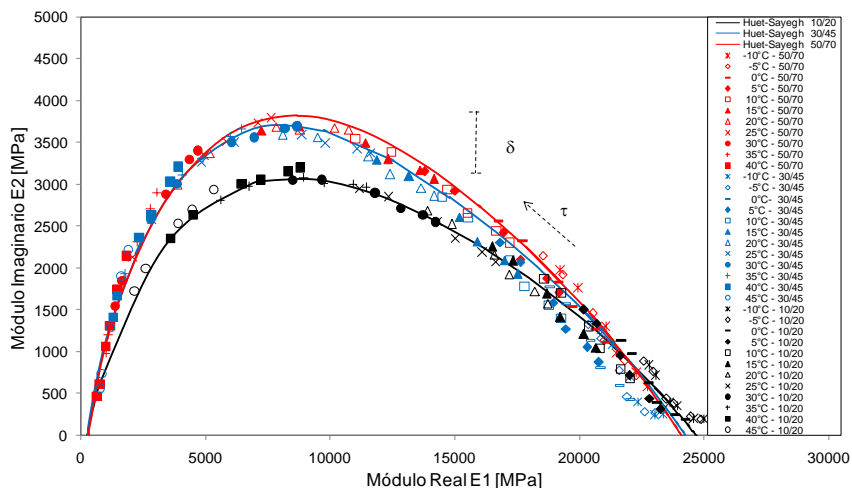
A diferenciadas componentes imaginárias, associadas à parcela viscosas, tem influência direta no ensaio de fadiga, já que faz com que a resistência a fadiga seja superior para o ligante CAP 10/20 que para o ligante 30/45 e ligante 50/70 nas temperaturas baixas e intermediárias.

Figura 4.33 – Variação do parâmetro τ do Modelo de Huet-Sayegh



Fonte: Quintero (2016).

Figura 4.34 – Modelo de Huet-Sayegh no plano complexo das misturas asfálticas.



Fonte: Quintero (2016).

4.5 FADIGA

Os ensaios de fadiga são realizados a flexão alternada em modo contínuo, a deformação controlada, dois pontos, a frequência de 25Hz, em três temperaturas para cada mistura e com critério de fim de vida com a redução da força inicial em 50%, na máquina de fadiga desenvolvido na UFSC, protótipo III.

A curva de fadiga é do tipo potencial, representada em escala normal, determinada pela equação 4.3.

$$N(\varepsilon) = A \cdot \varepsilon^b \quad (4.3)$$

$$\lg(N) = A + \left(\frac{1}{b}\right) \cdot \log(\varepsilon) \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_6 = 10^{b \cdot (6-A)} \quad (4.5)$$

Onde:

$N(\varepsilon)$ = Número de ciclos correspondente à ruptura em função do nível de deformação;

ε = Nível de deformação;

A = Constante da curva ou intersepto da recta com as ordenadas em escala logaritmica;

b = Inclinação da curva de fadiga;

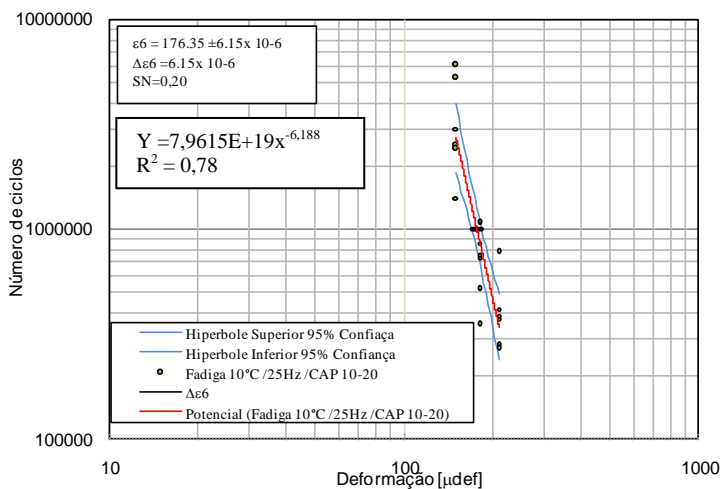
As hipérbolas de confiança são determinadas para 95% de confiança, assim a região de confiança para $p = (1-\alpha)$ é dado pela equação 4.6 para a hipérbole superior e pela equação 4.7 para a hipérbole inferior.

$$A + \left(\frac{1}{b}\right) \cdot \log(\varepsilon) - t_{\frac{\alpha}{2}} \cdot (n-2) \cdot s_e \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \leq \varepsilon \quad (4.6)$$

$$A + \left(\frac{1}{b}\right) \cdot \log(\varepsilon) + t_{\frac{\alpha}{2}} \cdot (n-2) \cdot s_e \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \geq \varepsilon \quad (4.7)$$

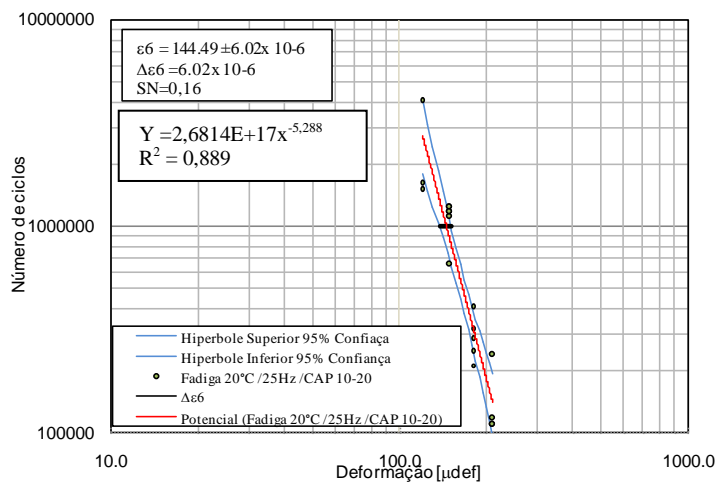
Os dados de laboratório estão resumidos no Apêndice G e as representações gráficas das curvas da mistura com ligante CAP 10/20 estão nas figuras 4.35 a 4.38, da mistura com ligante com CAP 30/45 estão nas figuras 4.39 a 4.41 e da mistura com CAP 50/70 estão nas figuras 4.42 a 4.45.

Figura 4.35 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 10/20 a 10°C e 25Hz.



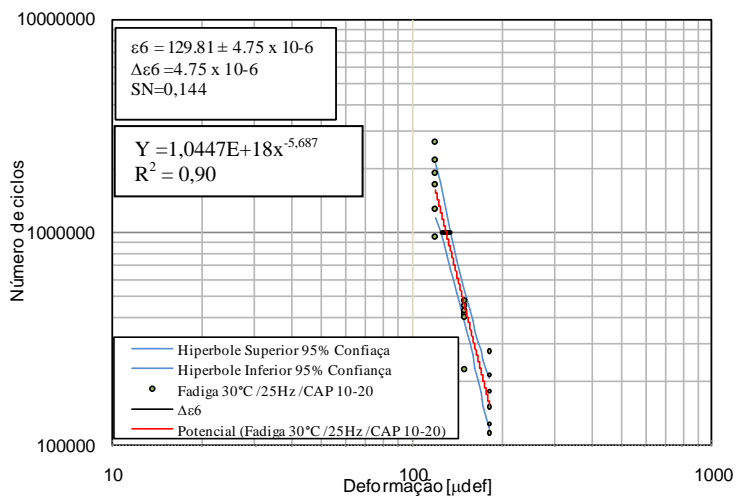
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.36 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 10/20 a 20°C e 25Hz.



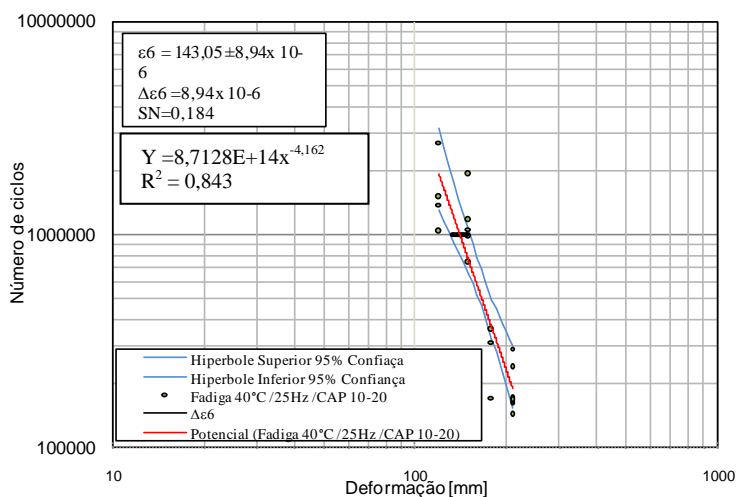
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.37 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 10/20 -30°C e 25Hz.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.38 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 10/20 a40°C e 25Hz.



Fonte: Autor (2016).

Na mistura com ligante CAP 10/20, observa-se aumento da temperatura induz a redução do expoente “b”, respectivamente, para as

temperaturas de 10°C, 20°C, 30°C e 40°C há a redução dos valores de -6,18, -5,29, -5,69, -4,16, respectivamente.

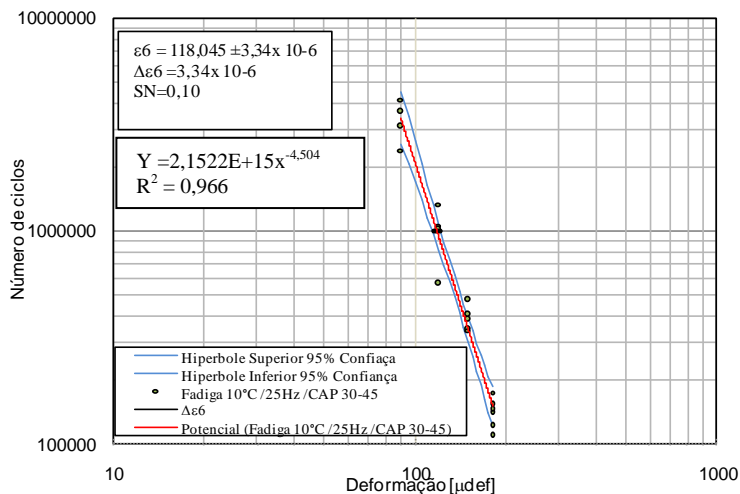
Observa-se, também, que nas temperaturas mais altas os resultados são mais dispersos.

A deformação correspondente para um milhão de ciclos da mistura com CAP 10/20 destaca um ponto de mínimo no intervalo das temperaturas ensaiadas, com valores de 176,35µm, 144,5 µm, 129,81µm, 143,05µm para as temperaturas de 10°C, 20°C, 30°C e 40°C respectivamente. O mínimo da deformação localiza-se próxima à temperatura de 30°C. Isto indica a evidência encontrada no plano Cole-Cole da mistura com ligante asfáltico CAP 10/20.

Dimensionamento do pavimento tendo em conta temperaturas abaixo ou acima desta temperatura poder-se-ia estar subestimando o comportamento do material.

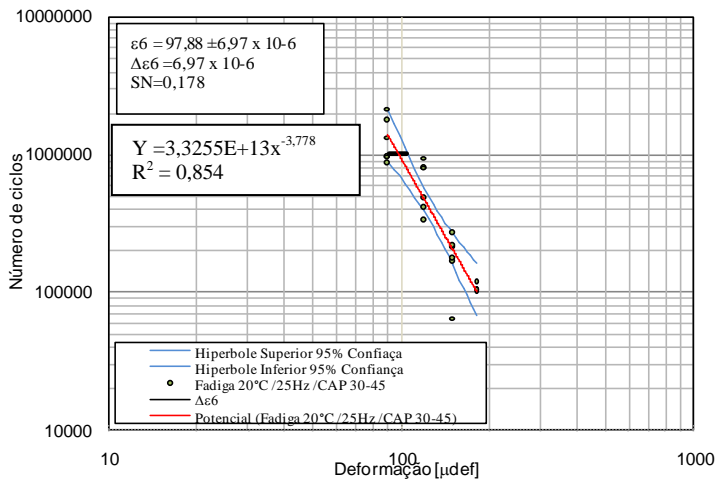
A mistura asfáltica preparada com ligante asfáltico CAP 30/45 tem expoente “b” com valores absolutos menores que os expoentes da mistura com CAP 10/20, cujos valores de expoentes são -4,50, -3,78, -3,77 para as temperaturas de 10°C, 20°C, 30°C, respectivamente. Isto indica que a mistura com CAP 10/20 é menos suscetível à variação da deformação em todas as temperaturas ensaiadas (figuras 4.39 a 4.41).

Figura 4.39 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 30/45a 10°C e 25Hz.



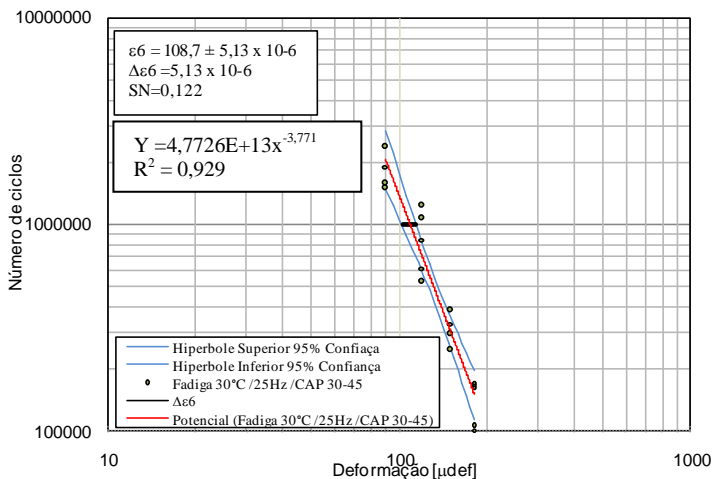
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.40 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 30/45 a 20°C e 25Hz.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.41 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 30/45a30°C e 25Hz.



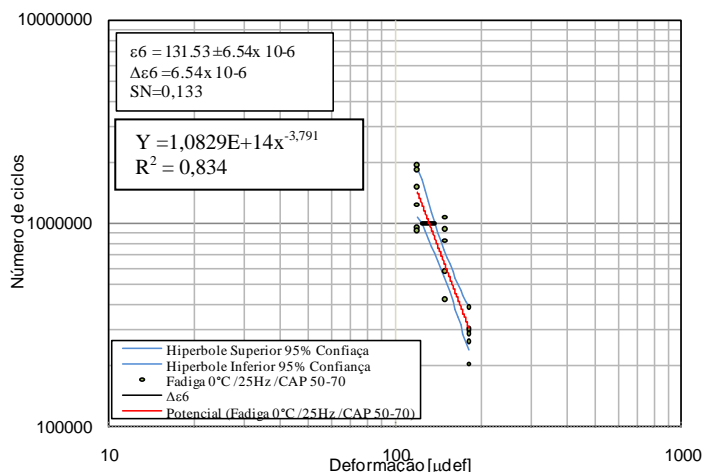
Fonte: Autor (2016).

De modo análogo ao que ocorre com a mistura CAP 10/20, a deformação correspondente para um milhão de ciclos da mistura com ligante CAP 30/45 tem um ponto de valor mínimo na temperatura intermediária, ou seja, os valores da deformação são 118.0 μ m, 97.88 μ m, 108.7 μ m para as temperaturas de 10°C, 20°C e 30°C, respectivamente.

A menor deformação para um milhão de ciclos acontece na proximidade da temperatura de 20°C. Isto indica que, na condição de temperatura de 20°C, o material tem a condição mais desvantajosa e o ensaio de fadiga deveria ser realizada na temperatura de 20°C.

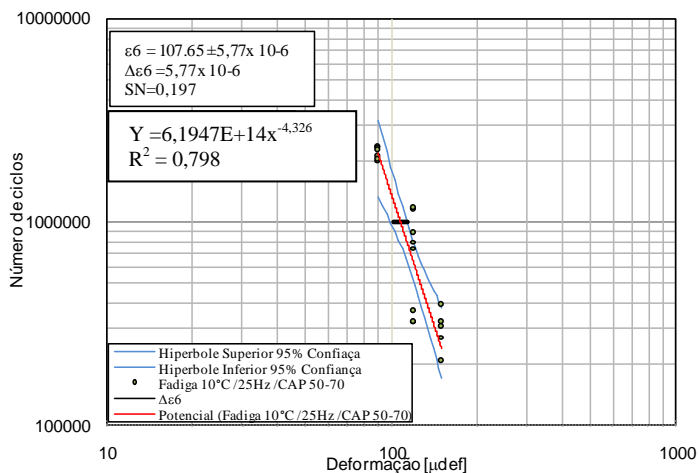
Para a mistura preparada com ligante 50/70 observa-se que o expoente “b” aumenta com o aumento da temperatura, cujos valores de expoente são -3.79, -4.33, -4.45 e -5.39 para as temperaturas de 0°C, 10°C, 20°C, 30°C, respectivamente. Verifica-se comportamento diverso do que ocorre com a mistura com ligante CAP 10/20 (figuras 4.42 a 4.44).

Figura 4.42 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 50/70a 0°C e 25Hz.



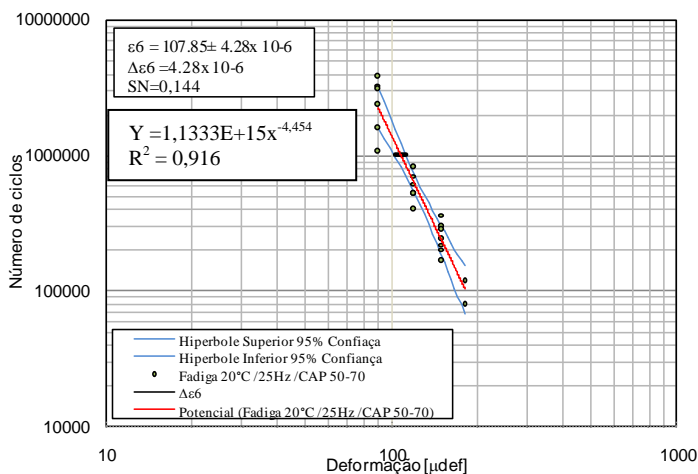
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.43 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 50/70a 10°C e 25Hz.



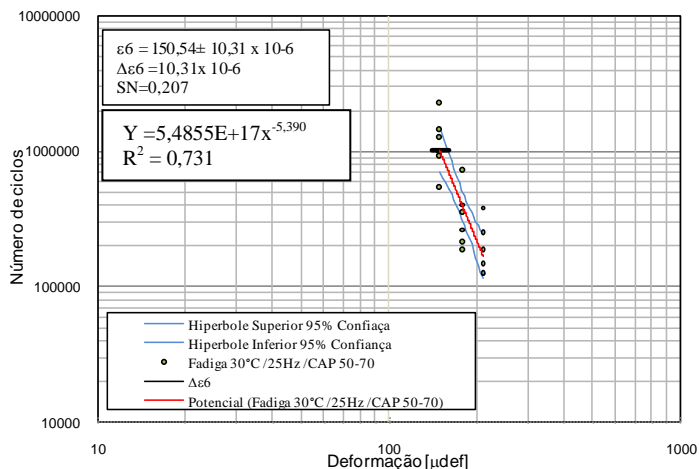
Fonte: Autor (2016)..

Figura 4.44 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 50/70a 20°C e 25Hz.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.45 – Curva de fadiga para a mistura com CAP 50/70a 30°C e 25Hz.



Fonte: Autor (2016).

De modo análogo ao que ocorre com as misturas asfálticas anteriores, a deformação para um milhão de ciclos apresente um ponto de mínimo, cujas deformações são 131,53 μm , 107,65 μm , 107,85 μm , e 150,54 μm para as temperaturas de 0°C, 10°C, 20°C e 30°C respectivamente. O ponto de mínimo fica entre a temperatura de 10°C e 20°C próxima da temperatura de 15°C. Assim, para misturas asfálticas preparadas com ligantes asfálticos CAP 50/70 o ensaio de fadiga deve ser realizado na temperatura de 15°C.

4.5.1 Critério de fim de vida na fadiga fundamentada em princípios de energia

Para realizar comparação com o critério tradicional de fim de vida de 50% da força inicial, faz a avaliação de fim de vida pelo critério de densidade de energia dissipada para a mistura preparada com ligante asfáltico 10/20.

O critério de fim de vida utilizado foi o proposto por Hopman, et al., (1989) e reformulado por Pronk, (1995) (equação 4.8) estabelece com momento de ruptura o ponto de inflexão da evolução da densidade de energia dissipada. Existe coerência para definir a ruptura por fadiga do material o ponto “a” ou “b” da figura 4.47.

$$W_n = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{w_n} \quad (4.8)$$

Onde:

WR = Razão de energia em relação a energia inicial

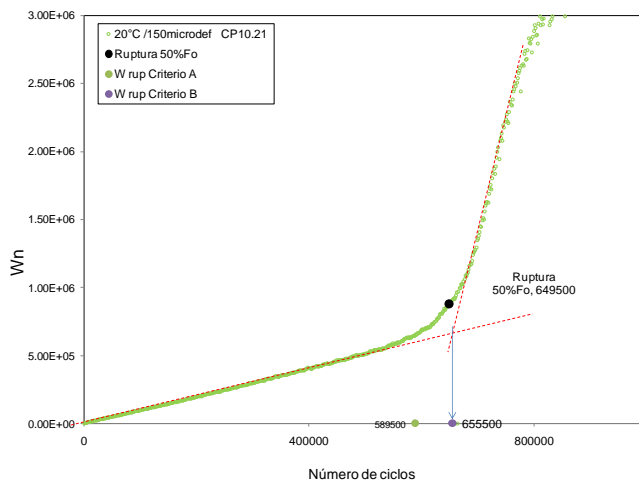
W_n = Densidade de energia dissipada no ciclo n

W_0 = Densidade de energia dissipada inicial;

n = número de ciclos.

Como exemplo, ilustrado na figura 4.46, o fim de vida em fadiga pelo critério de densidade de energia dissipada corresponde ao número de 589500 ciclos pelo critério “A” e de 655500 ciclos pelo critério “B”.

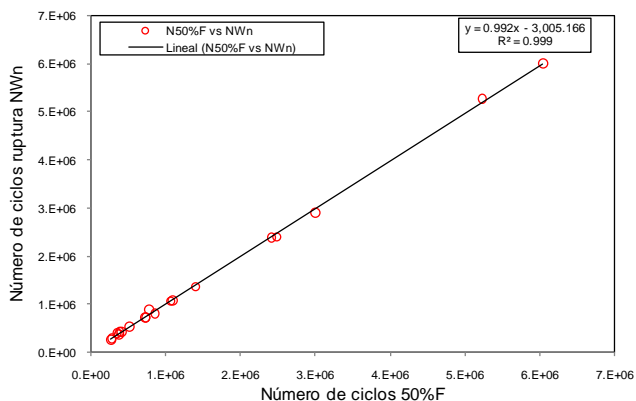
Figura 4.46 – Definição do número de ciclos da ruptura pelo critério de energia dissipada, ensaio de fadiga a 20°C e 150µm mistura ligante 10/20.



Fonte: Autor (2016).

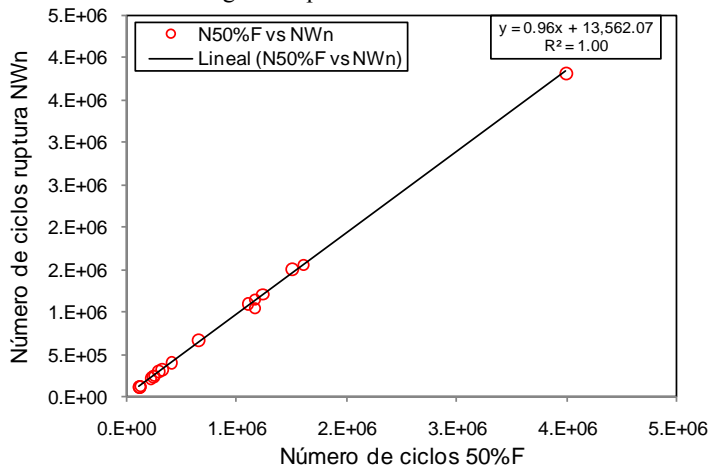
O número de ciclos correspondente ao fim de vida em fadiga determinado pelo critério método B (Pronk, 1995) foram muito próximos aos obtidos pelo critério de fim de vida em fadiga pelo critério de 50% da força inicial, apresentando boa correlação dos resultados. As diferenças do número de ciclos correspondentes à ruptura pelo critério da energia dissipada são mínimas (figuras 4.47 a 4.50).

Figura 4.47– Correlação entre o número de ciclos de ruptura por fadiga critério 50%F e W_n “razão de energia dissipada” mistura CAP 10/20 a 10°C.



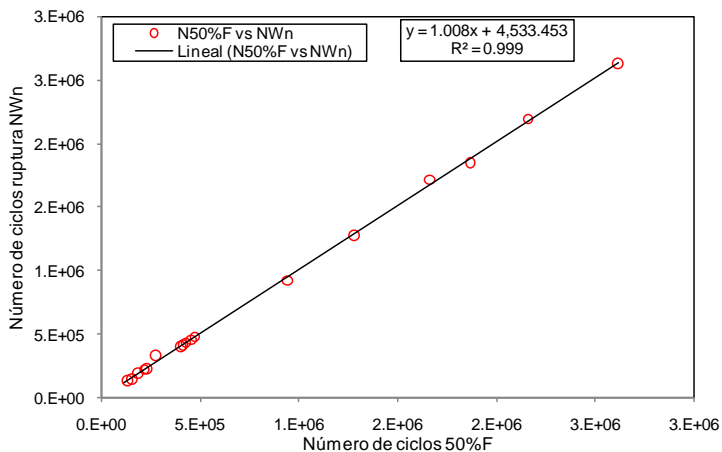
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.48– Correlação entre o número de ciclos de ruptura por fadiga critério 50%F e W_n “razão de energia dissipada” mistura CAP 10/20 a 20°C.



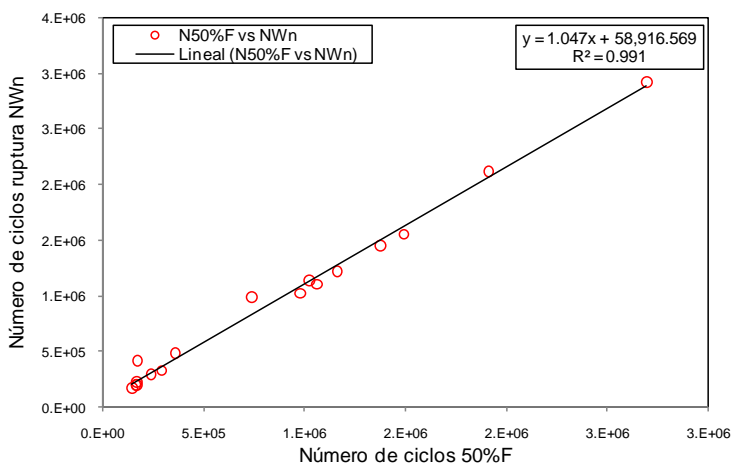
Fonte: Autor (2016).

Figura 4.49 – Correlação entre o número de ciclos de ruptura por fadiga critério 50%F e W_n “razão de energia dissipada” mistura CAP 10/20 a 30°C.



Fonte: Autor (2016).

Figura 4.50 – Correlação entre o número de ciclos de ruptura por fadiga critério 50%F e W_n “razão de energia dissipada” mistura CAP 10/20 a 40°C.



Fonte: Autor (2016).

O critério de ruptura fundamentado na diminuição de 50% da força inicial ou da rigidez inicial é muito próximo ao critério fundamentado na densidade de energia dissipada pelo critério de (Pronk,

1995); nas temperaturas baixas e intermediárias temperaturas é praticamente igual.

Nas condições de temperaturas elevadas, o fim de vida na fadiga pelo critério de razão de energia dissipada tem número de ciclos ligeiramente maior que o determinado pelo critério de 50% da força inicial, como pode ser observado nas percentagens apresentadas na tabela 4.10.

Isto conduz a um aumento na deformação para um milhão de ciclos nas elevadas temperaturas de aproximadamente de 11.8% em relação ao critério de 50% da força.

Evidencia-se a conclusão que a temperatura não afeita de modo significativo a determinação de fim de vida pelo critério de 50% da força inicial, já que este critério estabelece que o fim de vida se dá no final da fase II, com resultados bastante coerentes e boa correlação dos resultados entre os dois critérios.

Tabela 4.10 – Comparação da deformação de um milhão de ciclos pelo critério de 50%F e pelo critério de razão de energia dissipada mistura CAP 10/20.

T°C	ϵ_6 Critério Wn	ϵ_6 50%Fo	[%]
10	176,17	176,35	0.10%
20	146,38	144,50	1.30%
30	130,05	129,81	0.18%
40	162,78	143,50	11.8%

Fonte: Autor (2016).

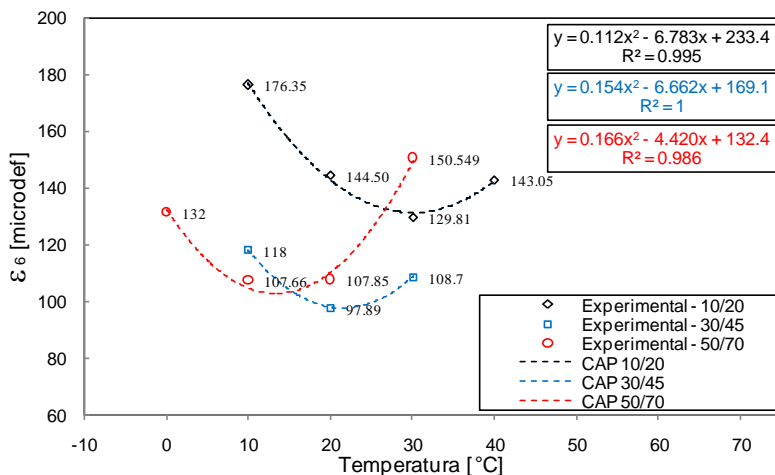
4.5.2 Comparações entre as misturas asfálticas em relação à fadiga

A comparação dos resultados da fadiga das misturas preparadas com ligantes CAP 10/20, CAP 30/45 e CAP 50/70 e diferentes temperaturas pode ser visualizada na representação gráfica dos valores da deformação para um milhão de ciclos e a temperatura (figura 4.50)

Observa-se a deformação para um milhão de ciclos das misturas asfálticas preparada com ligante asfáltico CAP 30/45 tem o menor valor de deformação na temperatura de 20°C. E o maior valor de deformação para um milhão de ciclos ocorre com a mistura preparada com CAP 10/20 na temperatura de 10°C.

Observa-se que a mistura preparada com ligante CAP 50/70 apresenta o maior valor de deformação para um milhão de ciclos na temperatura igual a 30°C, situação em que o material apresenta baixa rigidez (figura 4.51).

Figura 4.51–Deformação para um milhão de ciclos a diferentes temperaturas e na frequência de 25hz das misturas asfálticas



Fonte: Quintero(2016).

As equações de linha de tendência (4.9 a 4.11) das deformações para um milhão de ciclos podem auxiliar na determinação das temperaturas críticas das misturas.

$$\varepsilon_{6,CAP(10/20)} = 0,112\theta^2 - 6,783\theta + 233,4 \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_{6,CAP(30/45)} = 0,154\theta^2 - 6,662\theta + 169,1 \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_{6,CAP(50/70)} = 0,166\theta^2 - 4,420\theta + 132,4 \quad (4.11)$$

Onde:

θ = temperatura;

Os pontos de mínimo podem ser encontrados ao derivar as equações e igualar zero (equações 4.12 a 4.14). Assim,determina-se à temperatura crítica correspondente a temperatura onde acontece a menor deformação para um milhão de ciclos (tabela 4.11).

$$\frac{\partial \varepsilon_{6,CAP(10/20)}}{\partial \theta} = 0,224\theta_{CR} - 6,783 = 0 \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{6,CAP(30/45)}}{\partial \theta} = 0,308\theta_{CR} - 6,662 = 0 \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{6,CAP(50/70)}}{\partial \theta} = 0,332\theta_{CR} - 4,420 = 0 \quad (4.14)$$

Onde:

$\varepsilon_{6,CAP(10/20)}$ = Deformação, misturas asfalto 10/20,

$\varepsilon_{6,CAP(30/45)}$ = Deformação, misturas asfalto 30/45,

$\varepsilon_{6,CAP(50/70)}$ = Deformação, misturas asfalto 50/70,

θ = Temperatura.

Tabela 4.11– Temperaturas críticas calculadas das misturas asfálticas

Mistura	θ_{CR} (equações 140,141,142)	θ_{CR} Aproximada
CAP 10/20	30,28°C	~30°C
CAP 30/45	21,63°C	~20°C
CAP 50/70	13,31°C	10°C~15°C

Fonte: Autor.

4.5.3 Variação da deformação em função da temperatura e consistência do ligante

Os resultados do ensaio de fadiga em função da consistência do ligante e da temperatura de ensaio de fadiga podem ser aglutinados por um modelo por regressão (equação 4.15).

$$\varepsilon_6(\theta, PEN) = 297,216 - 8,4433 \cdot \theta - 5,8961 \cdot PEN + 0,1185 \cdot \theta^2 + 0,096 \cdot \theta \cdot PEN + 0,0512 \cdot PEN^2 \quad (4.15)$$

Onde:

$\varepsilon_6(\theta, PEN)$ = Deformação para um milhão de ciclos em função da temperatura e penetração;

θ = Temperatura;

PEN = Penetração do ligante asfáltico

A confrontação dos resultados experimentais com os obtidos pelo modelo por regressão revelam-se muito próximos (tabela 4.12).

O gráfico obtido com a representação da equação do modelo por regressão revela uma superfície de mínimo na região das temperaturas intermediárias (figura 4.51).

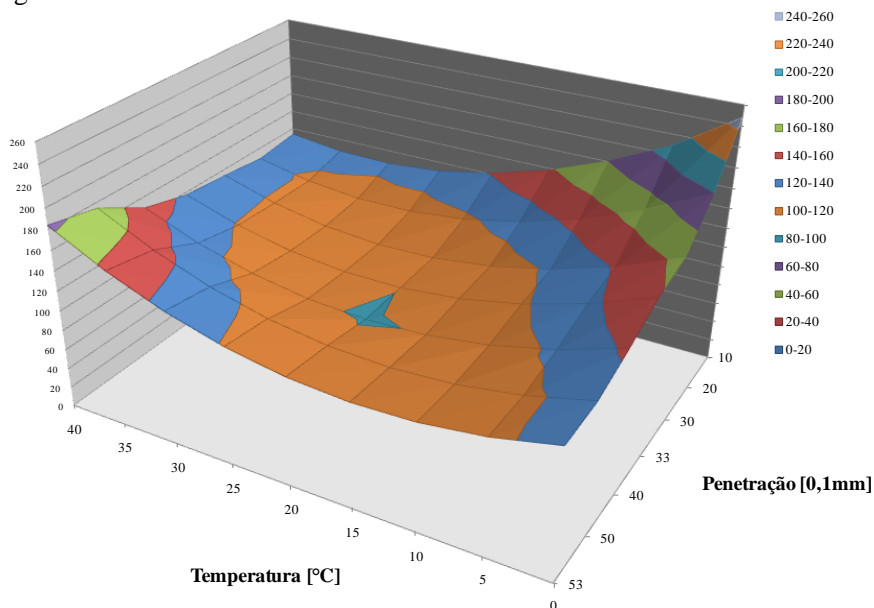
Tabela 4.12 – Análise dos resíduos para os valores modelados e experimentais

ε_6 equação [mm]	ε_6 experimental [mm]	RESÍDUOS	Diferenças [%]	θ [°C]	PEN [0.1mm]
127.49	131.53	4.05	3.08%	0	53
180.39	176.35	-4.04	2.29%*	10	10
117.50	118.04	0.55	0.46%	10	33
109.62	107.66	-1.97	1.83%*	10	53
141.11	144.50	3.39	2.34%	20	10
100.30	97.89	-2.41	2.46%*	20	33
115.46	107.85	-7.61	7.05%*	20	53
125.53	129.81	4.29	3.30%	30	10
106.79	108.71	1.91	1.76%	30	33
145.00	150.55	5.55	3.69%	30	53
146.59	143.05	-3.54	2.47%*	40	10

* Porcentagem em relação ao experimental

Fonte: Autor

Figura 4.52– Deformação para um milhão de ciclos modelado por regressão.



Fonte: Autor (2016).

4.6 COMENTARIOS SOBRE OS RESULTADOS

4.6.1 Módulo complexo

4.6.1.1 Efeito da Temperatura

As variações de temperatura alteram a rigidez das misturas asfálticas que têm comportamento viscoelástico. Nas condições de temperaturas baixas (nas proximidades de -10°C) as misturas têm comportamento praticamente elástico (com ângulo de defasagem próximo de 0°). Nas condições de temperaturas altas (nas proximidades de 40°C a 50°C) as misturas asfálticas têm o comportamento mais viscoso que o esqueleto mineral permite (com ângulo de defasagem próximo dos 50°).

No âmbito destas variações de temperaturas, a componente real do módulo complexo é decrescente com o aumento da temperatura e a componente imaginária do módulo complexo é crescente com o aumento da temperatura, alcança um ponto de máximo e é, então decrescente com a temperatura. Esta situação indica que a componente imaginária, relacionada à dissipação de energia, revela uma região de temperatura a ser considerada crítica para a fadiga.

As variações do comportamento das misturas asfálticas em relação à temperatura tornam-se muito relevante a serem consideradas no dimensionamento das estruturas dos pavimentos.

4.6.1.2 Efeito da Consistência do ligante

A consistência do ligante asfáltico faz com que as misturas asfálticas tenham comportamento à rigidez diferente. A mistura asfáltica preparada com ligante de maior consistência apresenta comportamento com valores de módulo complexo maiores praticamente em todo âmbito das temperaturas ensaiadas. Destaque-se que o comportamento é mais próximo do comportamento elástico para as baixas temperaturas, e, se aproximam da igualdade de comportamento para as temperaturas altas.

A mistura asfáltica preparada com ligante de maior consistência apresenta maiores valores de componente real em todo âmbito de temperaturas, e apresenta menores valores de componente imaginária em todo âmbito de temperaturas ensaiadas. Destaque-se que a mistura preparada com ligante de maior consistência tem o máximo de sua componente imaginária em temperatura muito mais elevada que as

misturas de menor consistência. Revela-se um deslocamento da temperatura crítica para temperaturas mais elevadas.

4.6.2 Fadiga

4.6.2.1 Efeito da Temperatura

O efeito da temperatura no comportamento das misturas asfálticas revela-se, basicamente, sobre os valores da deformação para um milhão de ciclos. Em todas as misturas estudadas, os resultados dos ensaios de fadiga indicaram a existência de uma temperatura de mínimo, na qual o valor da deformação para um milhão de ciclos é ponto de mínimo.

Esta constatação pode auxiliar os projetistas de pavimento a escolherem os materiais com comportamento mais adequado ao ambiente de aplicação em campo, auxiliar os laboratoristas a definirem as temperaturas de ensaios da fadiga e adotarem a modelação mais refinada para a determinação das dimensões dos pavimentos.

4.6.2.2 Efeito da Consistência do ligante

A mistura asfáltica preparada com ligante de maior consistência apresenta o maior valor de deformação para um milhão de ciclos dentre os valores de deformação mínimos (temperatura crítica) e este ponto de mínimo ocorre nas proximidades temperatura de 30°C.

Esta particularidade da mistura asfáltica com ligante de maior consistência (CAP 10/20) pode indicar maior vantagem do ligante de maior consistência para a preparação de misturas asfálticas para países de temperaturas elevados, como os países tropicais. Contudo, resta a confrontação entre as vantagens de comportamento mecânico destas misturas asfálticas na fadiga com as vantagens do comportamento mecânico no módulo, o que só pode ser verificado no dimensionamento das estruturas de pavimento em casos concretos. Destaque-se, ainda, os estudos dos efeitos da água no comportamento das misturas para as situações de países de altas temperaturas e elevada condição hídrica.

CAPITULO 5

ANÁLISE E EXPLORAÇÃO DE RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A exploração dos resultados enfoca a relação entre o ensaio de módulo complexo e o ensaio de fadiga das misturas testadas, com abordagem em função da componente imaginária do ensaio de módulo complexo e a densidade de energia dissipada, e a comparação entre o módulo a partir do princípio da densidade de energia dissipada, calculada para os primeiros 100 ciclos, e a fadiga, com a proposição de um modelo de previsão da deformação de um milhão de ciclos na fadiga. Os resultados experimentais e modelados são aplicados em dimensionamento de estruturas de pavimentos.

5.2. ANÁLISES DO COMPORTAMENTO NA FADIGA EM RELAÇÃO AO MÓDULO COMPLEXO

Dois enfoques orientam as análises:

Primeiro: Análise em relação ao comportamento das misturas no plano Cole-Cole, que abrange as análises da componente imaginária e energia dissipada do Ensaio de Módulo Complexo; a variação do módulo complexo em função da temperatura e da consistência do ligante asfáltico e a variação do ensaio de fadiga no plano Cole–Cole.

Segundo: Análise em relação às condições iniciais dos dois Ensaios (Módulo Complexo e Fadiga), que abrange a variação da força inicial com a deformação, temperatura e consistência; a variação do ângulo de fase com a deformação, temperatura e consistência; e a variação da densidade de energia dissipada com a deformação, temperatura e consistência.

5.2.1 Componente imaginária e energia dissipada do Ensaio de Módulo Complexo

As formas de representação do ensaio do módulo complexo, apresentadas na seção 4.3, permitem interpretar os resultados do ensaio de módulo complexo em função da temperatura e da frequência, e da consistência do ligante asfáltico.

Uma análise adicional pode ser feita em função da variação da componente imaginária e da densidade de energia dissipada com a frequência e a temperatura.

Na seção 4.5 verificou-se que, para misturas asfálticas preparadas com ligante CAP10/20, a temperatura na qual acontece a menor deformação para um milhão de ciclos corresponde a 30°C, a temperatura crítica correspondente à mistura preparada com ligante CAP30/45 é 20°C e para o ligante CAP50/70 a temperatura crítica corresponde a 15°C.

Verificou-se, também no capítulo anterior, que a deformação para um milhão de ciclos tem um comportamento não linear e parabólico.

A representação da componente imaginária do módulo (figuras 5.1, 5.3 e 5.5) e da variação da densidade de energia dissipada no ensaio do módulo complexo com a frequência e a temperatura, indica melhor entendimento das variações dos resultados do ensaio de fadiga apresentados na seção 4.5 (figura 5.1).

A deformação para um milhão de ciclos obtida no ensaio a 25Hz, em função da temperatura apresenta um valor de mínimo. No caso particular da mistura asfáltica com CAP10/20, este valor de mínimo ocorre na temperatura aproximada de 30°C, no caso partícula da mistura asfáltica com CAP30/45, este valor ocorre na temperatura aproximada de 20°C e da mistura com CAP50/70 entre a temperatura de 10°C e 15°C.

Contudo, observa-se na figura 5.2, que o valor de máximo da energia dissipa dano ensaio de módulo complexo na frequência de 25Hz ocorre nas proximidades da temperatura de 40°C para a mistura com CAP10/20, nas proximidades de 32°C (figura 5.4) para a mistura com CAP30/45 e nas proximidades da 24°C (figura 5.6) para a mistura com CAP50/70.

Por outro lado, os valores da máxima energia dissipada correspondente à temperatura crítica de cada mistura ocorre em condições de frequência bem inferiores à frequência do ensaio de fadiga em 25Hz, na proximidade da frequência de 3Hz para as três misturas.

Este comportamento das misturas asfálticas pode ser explicado pela energia dissipada, nas diferentes condições de temperatura sob solicitações dinâmicas de valores diferentes (deformações diferentes), posto que o princípio da equivalência frequência–temperatura não tem em conta o valor da solicitação imposta ao material.

A energia por ciclo de carga é determinada pela equação 5.1

$$\Delta W = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \text{sen}\varphi \quad (5.1)$$

Onde:

ε_0 = Amplitude da deformação;

σ_0 = Amplitude da tensão;

φ = Ângulo de fase;

ΔW = Densidade de energia dissipada.

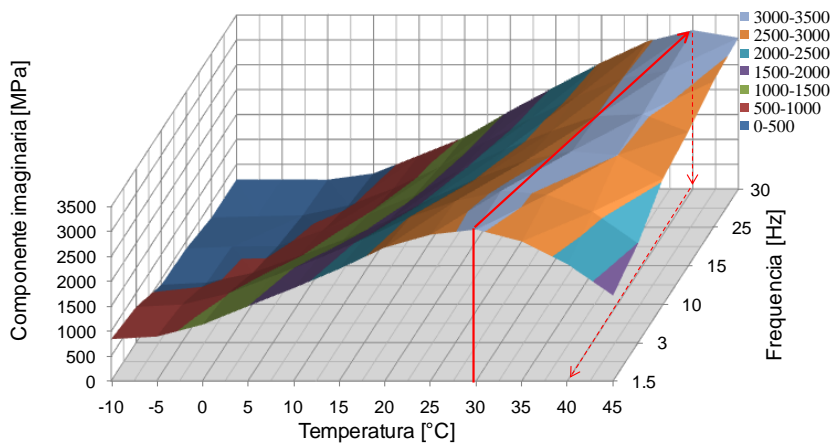
A energia dissipada ΔW é diretamente proporcional à componente imaginária E_2 e ao produto da tensão e a deformação e seno do ângulo de fase.

Nas figuras 5.1, 5.3 e 5.5 observa que, nas temperaturas baixas, a componente imaginária decresce com o aumento na frequência e nas temperaturas altas a componente imaginária cresce com o aumento da frequência, entre estas duas condições ocorre uma inversão em relação à frequência; ocorre um divisor, um cume.

Este comportamento é análogo ao comportamento da densidade de energia dissipada (figuras 5.2, 5.4 e 5.6) no qual a energia dissipada nas baixas temperaturas é decrescente com o aumento da frequência e nas altas temperaturas é crescente com o aumento da frequência.

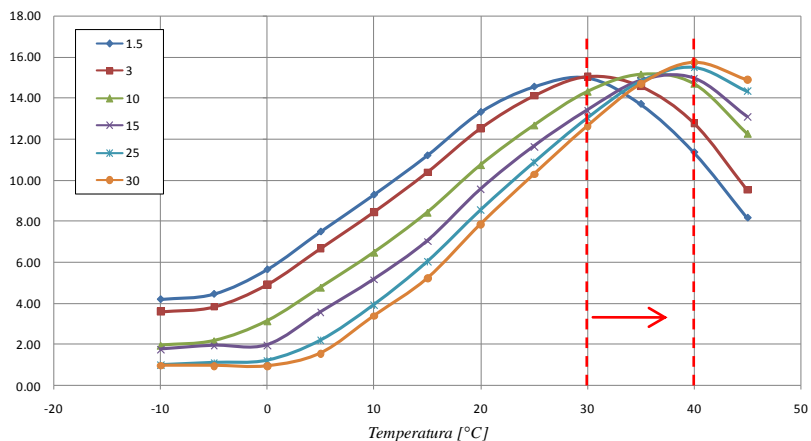
Evidencia-se, na região de inversão da dissipação de energia em relação à frequência, que os pontos de máximo das curvas de densidade de energia de cada frequência deslocam-se em relação à temperatura. Veja-se, nas curvas de densidade energia dissipada da mistura com CAP10/20, que o ponto de máxima energia dissipada para a frequência de 25Hz ocorre na temperatura de 40°C e o ponto de máxima energia dissipada para a frequência de 3Hz ocorre na temperatura de 30°C. Igualmente para as outras duas misturas ocorre o mesmo fenômeno.

Figura 5.1– Variação da componente E_2 do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP10/20.



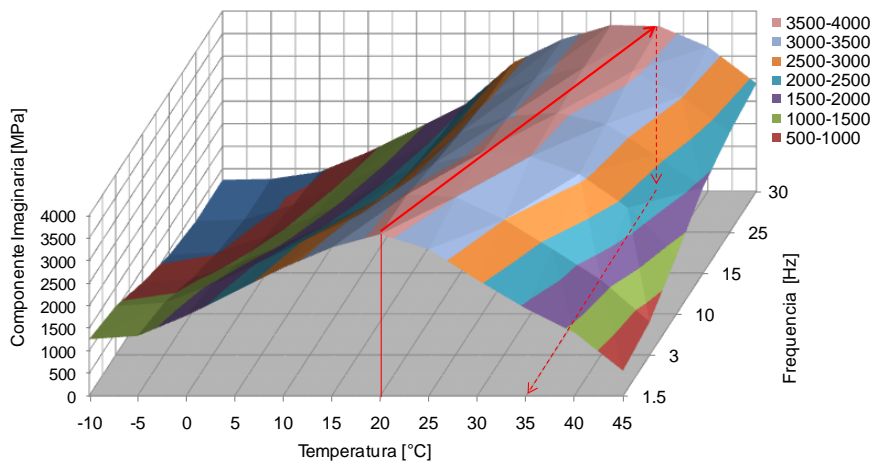
Fonte: Autor (2016).

Figura 5.2– Variação da energia do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP10/20.



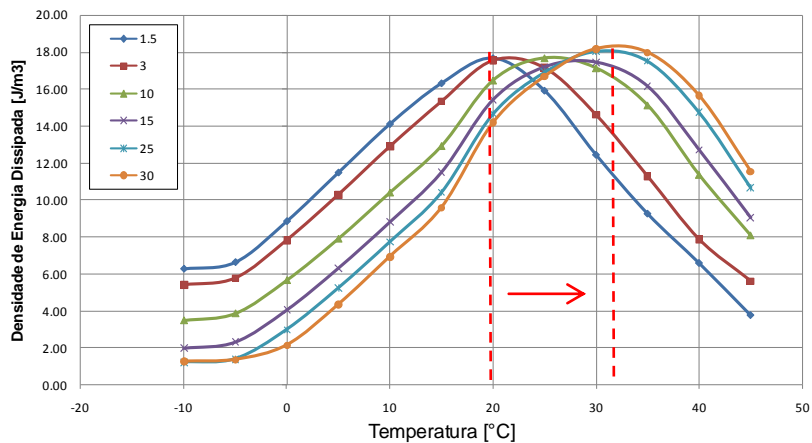
Fonte: Autor (2016).

Figura 5.3 – Variação da componente E_2 do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP30/45.



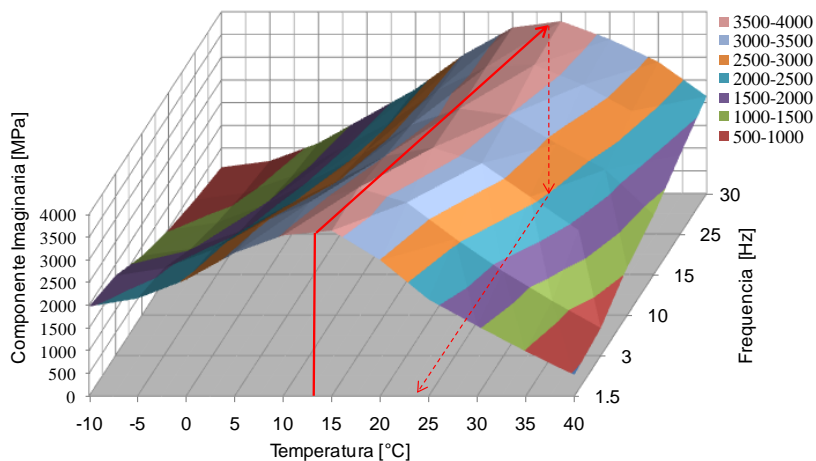
Fonte: Autor (2016).

Figura 5.4 – Variação da energia do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP30/45.



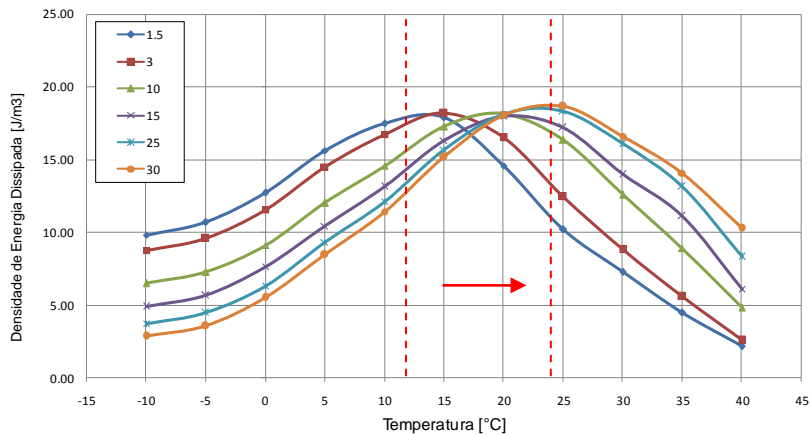
Fonte: Autor (2016).

Figura 5.5 – Variação da componente E_2 do ensaio de módulo complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP50/70.



Fonte: Autor (2016).

Figura 5.6 – Variação da Energia do Ensaio de Módulo Complexo com a frequência e a temperatura para mistura com CAP50/70.



Fonte: Autor (2016).

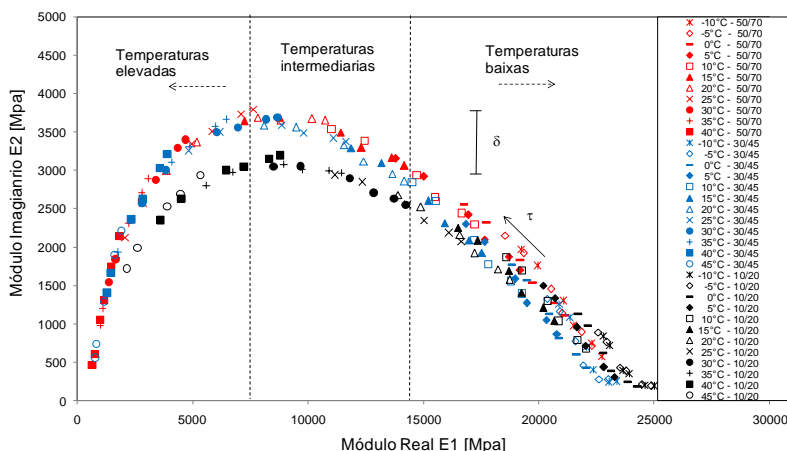
5.2.2 Análise em função da variação do Módulo Complexo em função da temperatura e da consistência do ligante asfáltico.

No plano Cole-Cole, observam-se três regiões relacionadas à rigidez do material, em função da temperatura, da frequência, e consistência do ligante asfáltico (figura 5.7), quais sejam: temperaturas elevadas (Região I), temperaturas intermediárias – transição (Região II) e baixas temperaturas (Região III) (Figura 5.7).

As temperaturas em cada região podem variar dependendo do tipo de ligante asfáltico e das misturas asfálticas. Cada tipo de ligante asfáltico tem uma temperatura que define o limiar entre as regiões I e II, e III.

Analisando a componente imaginária máxima (figuras 5.1, 5.3 e 5.5), na frequência de 1.5 hz, para a mistura com ligante CAP10/20 corresponde a 30°C, para a mistura com ligante CAP30/45 corresponde a 20°C, para a mistura com ligante asfáltico CAP50/70 corresponde a 10°C, sendo que todas as temperaturas são correspondentes à região II (tabela 5.1).

Figura 5.7–Plano Cole-Cole dos ensaios de módulo complexo.



Fonte: Quintero (2016).

Tabela 5.1 – Definição da temperatura do ensaio de fadiga conforme cada região no plano Cole-Cole.

Mistura asfáltica	Região I	Região II	Região III
CAP10/20	40°C	30	20-10
CAP30/45	30°C	20	10
CAP50/70	30°C	10-20	0

Fonte: Autor (2016).

Região I:

Correspondem às elevadas temperaturas definidas, desde a ordenada de módulo para baixas frequências e elevadas temperaturas (E_0), até a ordenada com maior valor de módulo imaginário (E_2).

As misturas asfálticas ensaiadas nesta região apresentaram maior valor de deformação para 1 milhão de ciclos, porém, baixo módulo de rigidez e elevado ângulo de fase.

Com o aumento da temperatura a componente imaginária do módulo complexo decresce, e o ângulo de fase é elevado, devido ao aumento da viscosidade do material.

Região II:

A região II corresponde às temperaturas de transição entre as temperaturas elevadas e temperaturas baixas. É definida desde a maior componente imaginária (maior densidade de energia dissipada) do ensaio de módulo complexo até a componente (E_1 , E_2) correspondente à maior frequência na que é realizado o ensaio de fadiga sobre a curva de temperatura crítica.

Esta região corresponde à temperatura crítica para o ensaio de fadiga, ou seja, na qual acontece a menor deformação para um milhão de ciclos em função da frequência do ensaio.

A partir dos resultados experimentais de módulo complexo e fadiga encontrados, pode-se definir a temperatura crítica como aquela onde o efeito da frequência é baixo, definida nas baixas frequências, de 1 a 3Hz, e que corresponde a temperatura onde acontece a maior componente imaginária do ensaio de módulo complexo.

Durante os ensaios experimentais, observou-se um deslocamento das componentes do módulo para a menor deformação para um milhão de ciclos no plano Cole-Cole.

Este deslocamento deve-se ao efeito da frequência numa temperatura específica. Na medida em que a frequência aumenta, o vetor correspondente ao par (θ, ω) desloca-se para a direita no plano Cole-Cole, porque que o vetor Módulo (E^*) é dependente tanto da temperatura (θ) como da frequência (ω).

A partir da descrição anterior, a região II é definida como as ordenadas de E_2 e abscissas E_1 que, para diferentes pares de frequência e temperatura, se enquadram sobre a curva de temperatura crítica. Nesta região, a deformação para um milhão de ciclos do ensaio de fadiga alcança o valor mínimo.

Região III:

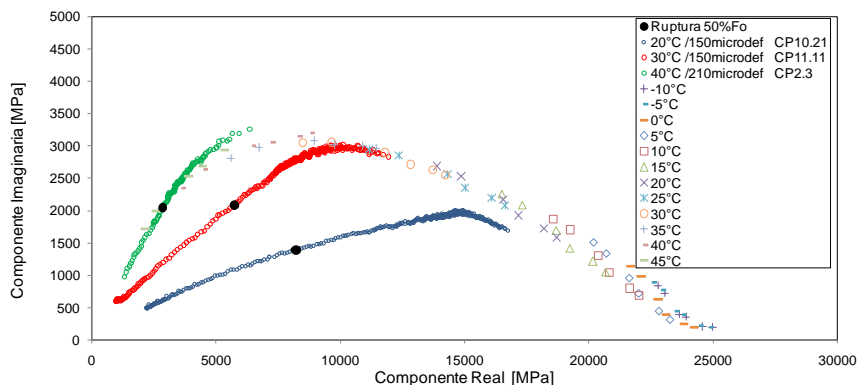
A região III corresponde às baixas temperaturas. É definida a partir da ordenada na qual a deformação para um milhão de ciclos começa aumentar até as temperaturas baixas (E_c). Na medida em que a componente imaginária diminui, a deformação para um milhão de ciclos na fadiga aumenta.

Nesta região a densidade de energia dissipada e o ângulo de fase são menores e o seu comportamento é predominantemente elástico.

5.2.3 Variação do ensaio de fadiga no plano Cole–Cole

A análise da variação do ensaio de fadiga no plano Cole-Cole durante o ensaio de fadiga (figura 5.8) se faz com a inserção dos dados de módulo complexo de três corpos de prova no gráfico. Para cada corpo de prova, observa-se a evolução do módulo em três etapas: A primeira etapa ocorre do aumento da componente imaginária até um ponto de máximo e a redução da componente real. Na segunda etapa, ocorre do ponto de máximo da componente imaginária até o ponto de ruptura do corpo de prova, em que tanto a componente imaginária como a real apresentam redução de seus valores. A partir do ponto de ruptura não cabe mais análise dos parâmetros complexo. Observa-se, ainda, que durante todo o desenvolver do ensaio de fadiga ocorre o aumento do ângulo de fase.

Figura 5. 8– Evolução do ensaio de fadiga no plano complexo nas temperaturas de 20°C, 30°C e 40°C.



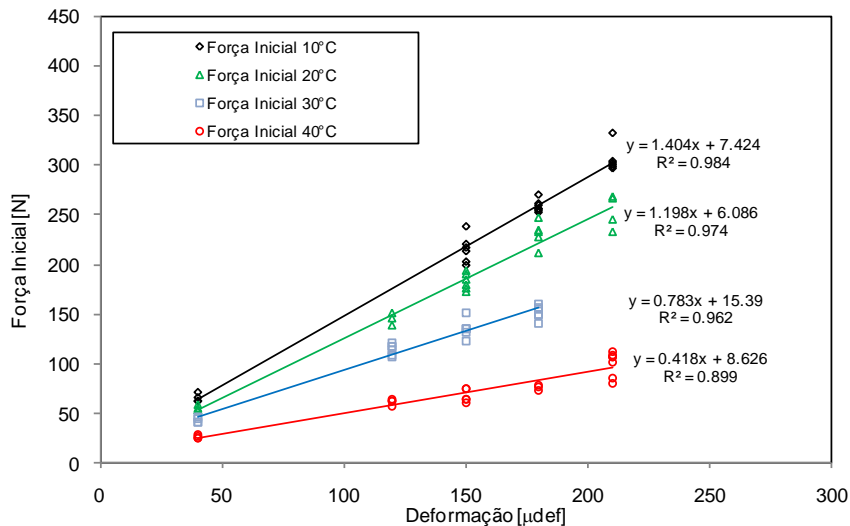
Fonte: Autor (2016).

Como os corpos de prova da mistura com ligante CAP10/20 foram realizados a temperaturas diferentes (20°C, 30°C e 40°C), a evolução do módulo complexo se inicia em pontos diferentes no plano Cole-Cole. (Veja-se termografia dos corpos de prova no Apêndice F).

5.2.4 Variação da força inicial com a deformação, temperatura e consistência

Na confrontação da força do módulo com a força inicial do ensaio de fadiga observa-se que ocorre linearidade muito acentuada (figura 5.9). Observa-se que o fator de correlação, para as situações das quatro temperaturas, para a mistura com ligante CAP10/20 são muito próximos de 1.

Figura 5.9 – Variação da força inicial com a deformação para as diferentes condições de temperatura, CAP10/20.

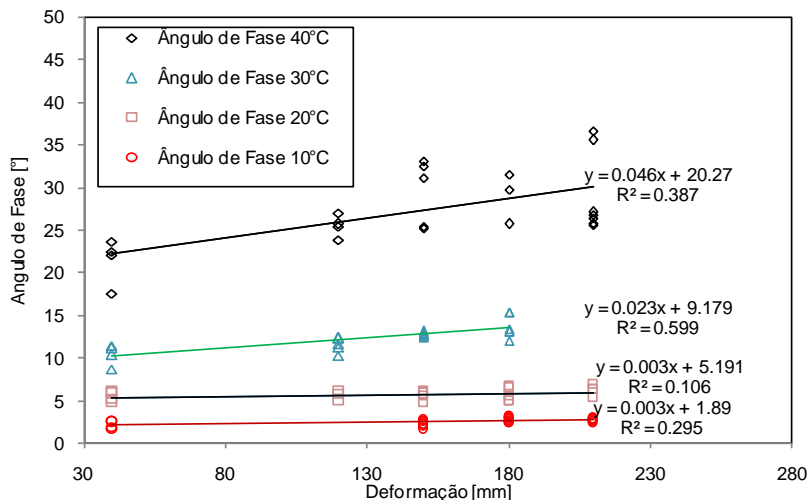


Fonte: Autor (2016).

5.2.5 Variação do ângulo de fase com a deformação, temperatura e consistência;

A confrontação do ângulo de fase nos ensaios de módulo e de fadiga (figura 5.10) indica que a deformação tem pouca influência sobre o ângulo de fase, que a correlação é baixa.

Figura 5.10 – Variação do ângulo de fase inicial com a deformação para mistura com ligante CAPI0/20

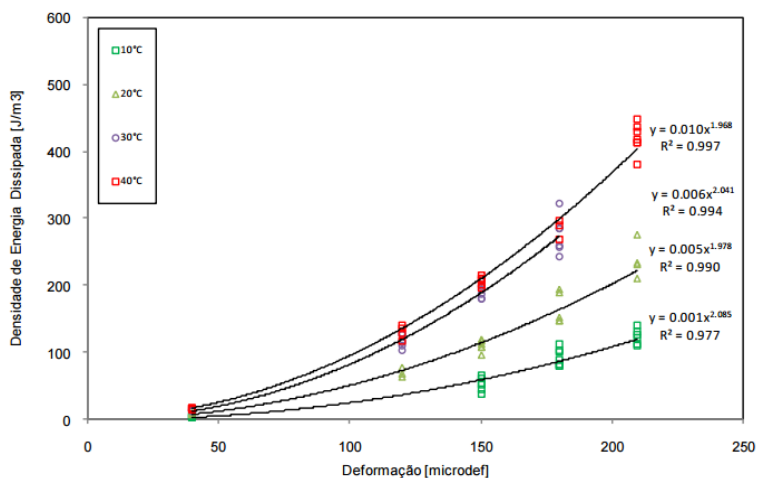


Fonte: Autor (2016).

5.2.6 Variação da densidade de energia dissipada com a deformação, temperatura e consistência.

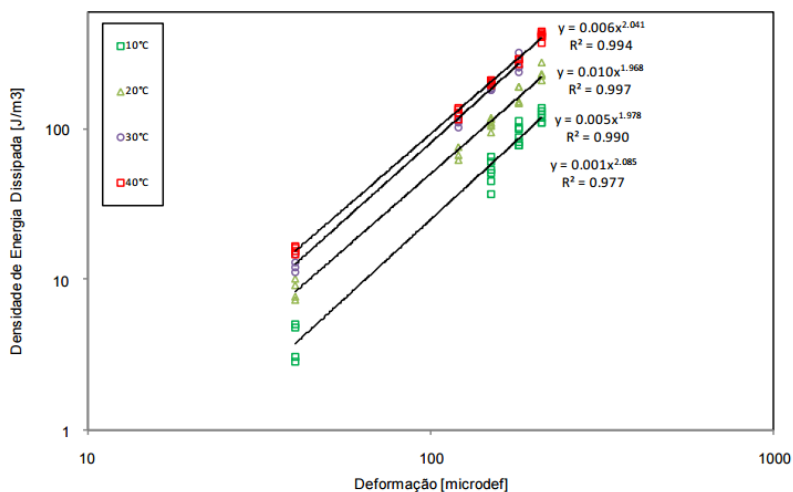
Na confrontação da energia dissipada com a deformação a diferentes temperaturas, para a mistura com ligante CAPI0/20, observa-se que há relação não linear, mas potencial entre as deformações no ensaio de módulo complexo e na fadiga a diferentes temperaturas e com coeficientes de correlação elevados (figura 5.11). Em escala logarítmica, é possível observar que as curvas apresentam certo paralelismo com declividade aproximadamente constante (figura 5.12).

Figura 5.11 – Variação da densidade de energia inicial com a deformação para mistura com ligante CAP10/20.



Fonte: Autor (2016).

Figura 5.12 – Variação da densidade de energia inicial com a deformação para mistura com ligante CAP10/20 em escala logarítmica.



Fonte: Autor (2016).

5.3 MODELO ANALÍTICO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA FADIGA

Estima-se a resistência na fadiga nas diferentes temperaturas a partir da densidade de energia dissipada no ensaio de módulo complexo, conhecendo a deformação na temperatura crítica.

O ensaio de fadiga, geralmente, é realizado só numa condição de temperatura, que pode ser a temperatura normatizada ou a temperatura na qual acontece a maior componente imaginária no ensaio de módulo complexo, associada com a temperatura de maior dissipação de energia no ensaio de módulo complexo.

O modelo proposto procura estimar a deformação para 1 milhão de ciclos do material nas diferentes temperaturas a partir do conceito de energia dissipada do ensaio de módulo complexo.

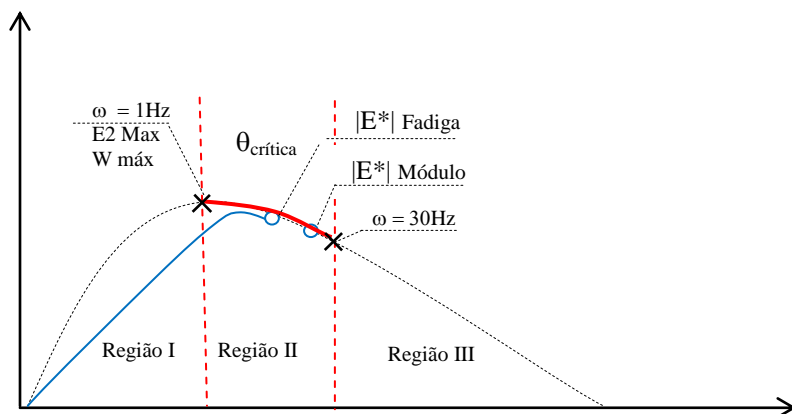
O aumento da frequência diminui a energia dissipada nas temperaturas intermediárias e baixas para uma temperatura dada, ou seja, numa mesma temperatura, um aumentado da frequência desloca o módulo, deslocando, também, a energia dissipada e reduzindo o valor de energia.

Por exemplo, na frequência de 1,5Hz a maior energia dissipada acontece na temperatura de 30°C e na frequência de 25Hz a maior energia dissipada acontece na temperatura de 40°C, podendo presumir que nesta temperatura ocorreria a menor deformação correspondente a 1 milhão de ciclos, mas na realidade o que ocorre é um deslocamento da energia devido ao efeito da frequência fazendo com que, na temperatura de 30°C, aconteça a menor deformação de 1 milhão de ciclos do material.

Verifica-se, no plano complexo, para todas as misturas estudadas, que há uma variação da densidade de energia dissipada e da componente imaginária do Módulo Complexo como efeito da frequência no plano Cole-Cole (figura 5.13).

A temperatura crítica, a ser determinada a partir da representação do módulo no plano complexo, como aquela temperatura máxima que tem pouca influência da frequência, tendo somente influência da temperatura, ou seja, baixas frequências de 1Hz a 3Hz, ou a partir da representação da densidade de energia dissipada para cada frequência em função da temperatura (figuras 5.2, 5.4 e 5.5).

Figura 5.13 – Definição da Região II no Plano Cole-Cole (esquemático).



Fonte: Autor (2016).

A partir das análises realizadas, o modelo permite estimar a a deformação para 1 milhão de ciclos na fadiga em diferentes condições de temperatura, conhecendo a temperatura crítica, determinada nas baixas frequências, a densidade de energia de deformação e a deformação de 1 milhão de ciclos numa condição de temperatura pelas equações 5.2 a 5.6.

$$\varepsilon [\theta, W] = f\theta \cdot \varepsilon_6(\theta_f, 25Hz) \quad (5.2)$$

$$\varepsilon [\theta, W] = \frac{\log(W_{\theta c})}{\log(W_{\theta})} \cdot \varepsilon_6(\theta_f, 25Hz) \quad (5.3)$$

$$\varepsilon [\theta, W, NE] = f\theta \cdot \varepsilon_6(\theta_f, 25Hz) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{-b} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon [\theta, W, NE] = \frac{\log(W_{\theta c})}{\log(W_{\theta})} \cdot \varepsilon_6(\theta_f, 25Hz) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{-b} \quad (5.5)$$

$$\varepsilon [\theta, W, NE] = \frac{\log(\pi \cdot \varepsilon_{mod} \cdot \sigma_{\theta c} \cdot \text{sen } \varphi_{\theta c})}{\log(\pi \cdot \varepsilon_{mod} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \text{sen } \varphi_{\theta})} \cdot \varepsilon_6(\theta_f, 25Hz) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{-b} \quad (5.6)$$

Onde:

W = Densidade de energia dissipada;

NE = Número de eixos;

$f\theta$ = Fator de conversão por temperatura a partir da energia;

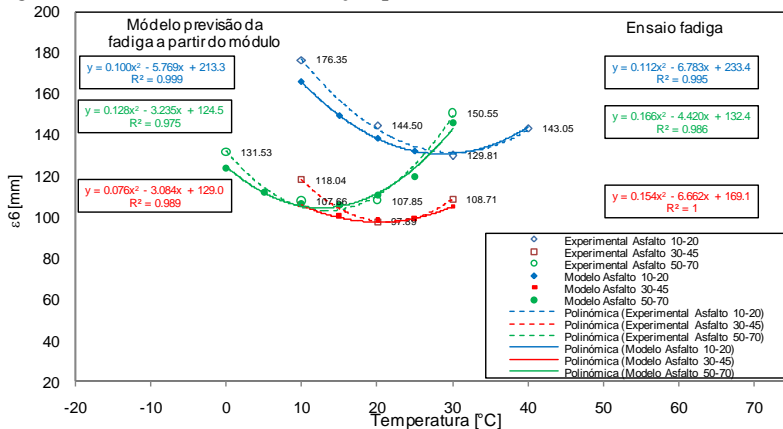
θ_f = Temperatura do ensaio de fadiga;

θ_c = Temperatura crítica determinada no plano complexo para baixa frequência;

- θ = Temperatura na qual se quer encontra a deformação de 1 milhão de ciclos;
- ε_{mod} = Deformação do ensaio de módulo complexo [μm];
- $W_{\theta c}$ = Densidade de Energia correspondente na temperatura θc nas baixas frequências; ou na frequência de 25hz e temperatura θ considerando o deslocamento da energia pelo efeito da frequência;
- W_{θ} = Densidade de Energia correspondente na temperatura θ nas baixas frequências; ou na frequência de 25hz e temperatura θ considerando o deslocamento da energia pelo efeito da frequência;
- $\sigma_{\theta c}(\theta, f)$ = Tensão na frequência correspondente na temperatura crítica θc ;
- $\sigma_{\theta}(\theta, f)$ = Tensão na frequência correspondente na temperatura requerida θ ;
- $\varphi_{\theta c}$ = Angulo de fase na temperatura crítica θc ;
- φ_{θ} = Angulo de fase na temperatura requerida θ ;
- ε_6 = deformação de 1 milhão de ciclos no ensaios de fadiga de referência;
- b = expoente da curva de fadiga de referência.

A aplicação deste modelo às misturas estudadas revela boa aproximação de valores com os dados experimentais. (figura 5.14).

Figura 5.14– Previsão da deformação para um milhão de ciclos com o modelo.



Fonte: Autor (2016).

É possível determinar, com boa aproximação, as deformação nas diferentes temperaturas a partir da densidade de energia do ensaio de módulo complexo e da deformação na temperatura crítica do ensaio de fadiga, a menor deformação para cada material (figura 5.14).

5.4 EFEITO NO DIMENSIONAMENTO

Duas estruturas de pavimento hipotéticas são modeladas para a análise de confrontação entre as propriedades do concreto asfálticos do módulo e da fadiga.

A primeira estrutura de pavimento corresponde a uma estrutura de camadas betuminosas espessas (concepção francesa), que adota as camadas da estrutura do pavimento com misturas asfálticas nas camadas de base e sub-base (figura 5.15).

A segunda estrutura corresponde a um pavimento simples correspondente à concepção tradicional no Brasil (figura 5.16), onde as camadas de base e sub-base são com materiais granulares, dimensionada. Para o cálculo das deformações consideram-se a velocidade de 72km/h e o eixo padrão de 130kN.

Os parâmetros relativos ao tráfego e condição da deformabilidade da plataforma do pavimento (subleito) equação 5.7, conforme manual dimensionamento Frances (SETRA-LCPC), para o dimensionamento das estruturas de pavimento tipo I e tipo II estão colocados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Número de eixos de projeto calculado segundo o tipo de estrutura.

Estrutura de Pavimento	VMDA	τ (taxa crescimento do tráfego) %	Período Anos	C (constante)	NE	ε_{zz} admissível μm
Tipo I	1200	2	20	24,3	$1,07 \times 10^7$	331
Tipo II	1200	2	10	10,9	$4,80 \times 10^6$	394

Fonte: Autor (2016).

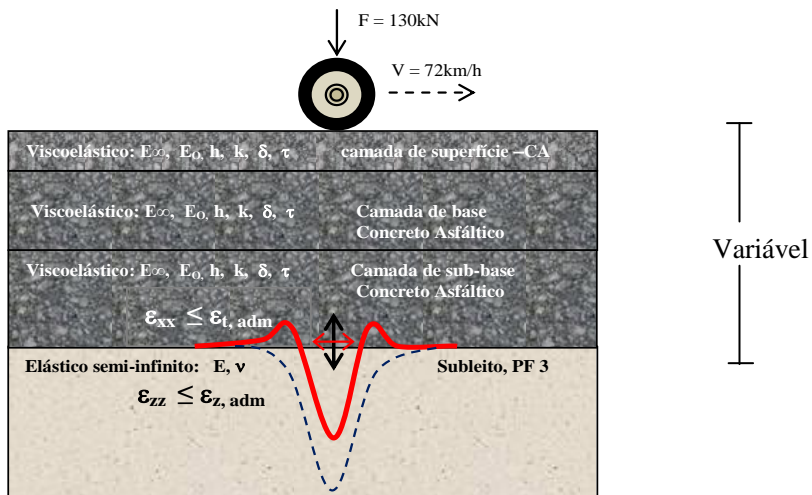
$$\varepsilon_{zz} = 0,012 \text{ NE}^{-0,222} \quad (5.7)$$

Onde:

NE = Número de eixos;

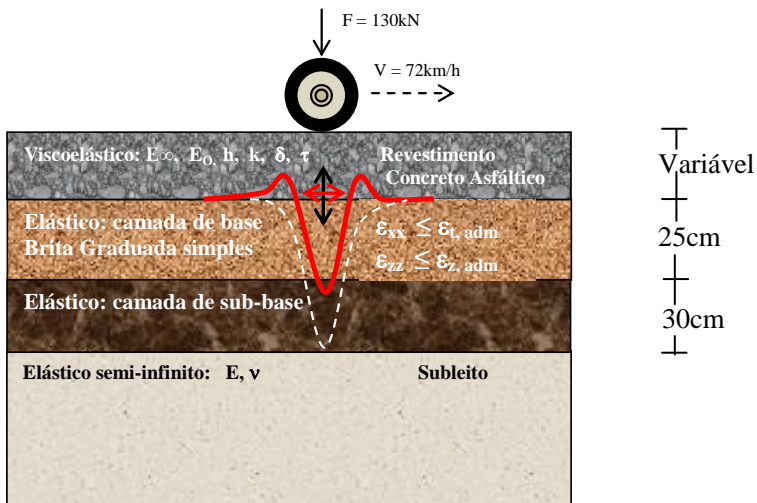
ε_{zz} = Deformação vertical admissível.

Figura 5.15– Estrutura de pavimento hipotética – tipo I – pavimento espesso



Fonte: Autor (2016).

Figura 5.16– Estrutura de pavimento, hipotética –tipo II – pavimento flexível



Fonte: Autor (2016).

5.4.1 Propriedades dos materiais

Os módulos das misturas de concreto asfálticos estudadas são introduzidos no dimensionamento das estruturas com os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh, que são os parâmetros de entrada no programa *ViscoRoute* (tabela 5.3), que permite considerar a temperatura e a frequência do pavimento.

Tabela 5.3– Constantes do modelo de Huet-Sayegh

Parâmetro	CAP 10/20	CAP 30/45	CAP 50/70
E ₀ [MPa]	259,21	261,3	311,48
E _∞ [MPa]	24701	24274	24102.4
k	0.2264	0.2625	0.2791
h	0.6436	0.7616	0.7623
δ	1.678	1.556	1.54
A ₀	6.36105	3.03941	1.05398
A ₁	-0.267578	-0.250321	-0.227946
A ₂	0.0001351	0.000474	0.0002233
τ (15°C)	10.7801	0.5434	0.0987

Fonte: Quintero (2016).

5.4.2. Estrutura de pavimento tipo I – pavimento espesso

Os valores das deformações admissíveis das misturas asfálticas são determinados, para o tráfego escolhido correspondente a cada uma das estruturas escolhidas, pavimento tipo I (tabela 5.4) pela equação 5.8 para os resultados experimentais e pela equação 5.9 para os valores modelados:

$$\varepsilon [\theta, W] = \frac{\log(W_{\theta c})}{\log(W_{\theta})} \cdot \varepsilon_6(\theta_f, 25\text{Hz}) \quad (5.7)$$

$$\varepsilon [\theta, NE] = \varepsilon_6(\theta_f, 25\text{Hz}) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{-b} \quad (5.8)$$

$$\varepsilon [\theta, W, NE] = \frac{\log(W_{\theta c})}{\log(W_{\theta})} \cdot \varepsilon_6(\theta_f, 25\text{Hz}) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{-b} \quad (5.9)$$

Onde:

W =Densidade de energia dissipada;

NE =Número de eixos;

θ_f = Temperatura do ensaio de fadiga;

θ_c = Temperatura crítica determinada no plano complexo para baixa frequência;

θ = Temperatura na qual se quer encontra a deformação de 1 milhão de ciclos;

ε_{mod} =Deformação do ensaio de módulo complexo [μm];

$W_{\theta c}$ = Densidade de Energia correspondente na temperatura θ_c nas baixas frequências; ou na frequência de 25hz e temperatura θ considerando o deslocamento da energia pelo efeito da frequência;

W_{θ} = Densidade de Energia correspondente na temperatura θ nas baixas frequências; ou na frequência de 25hz e temperatura θ considerando o deslocamento da energia pelo efeito da frequência;

ε_6 = deformação de 1 milhão de ciclos no ensaios de fadiga de referência;

b = expoente da curva de fadiga de referência.

Os parâmetros de fatores de relação laboratório/campo não foram considerados tendo em vista que os fatores laboratório/campo da metodologia francesa estão calibrados para a situação tradicional de dimensionamento em que o ensaio de fadiga é sempre realizado a 10°C e 25Hz e o módulo considerado é o correspondente à frequência de 10Hz e à temperatura equivalente.

Tabela 5.4– Deformações admissíveis pavimento tipo I – espesso ($NE = 1,07 \times 10^7$)

A) Deformação admissível da mistura com ligante asfáltico CAP10/20.						
Material	Experimental			Modelo		
	$\epsilon_6, \mu\text{def}$	b	$\epsilon_{adm}, \mu\text{def}$ $\epsilon [\theta, NE]$ Eq. 5.8	$\epsilon_6, \mu\text{def}$ Eq. 5.7	b Referência	$\epsilon_{adm}, \mu\text{def}$ $\epsilon [\theta, W, NE]$ Eq. 5.9
10°C	176,35	-6,18	120,34	165,58	-5,69	109,27
20°C	144,50	-5,29	92,41	138,98	-5,69	91,72
30°C	129,80	-5,69	85,67	129,80	-5,69	85,67
40°C	143,05	-4,16	81,02	141,00	-5,69	93,05
B) Deformação admissível da mistura com ligante asfáltico CAP30/45.						
Material	Experimental			Modelo		
	$\epsilon_6, \mu\text{def}$	b	$\epsilon_{adm}, \mu\text{def}$ $\epsilon [\theta, NE]$ Eq. 5.8	$\epsilon_6, \mu\text{def}$ Eq. 5.7	b Referência	$\epsilon_{adm}, \mu\text{def}$ $\epsilon [\theta, W, NE]$ Eq. 5.9
10°C	118,04	-4,50	69,79	105,48	-3,78	56,42
20°C	97,88	-3,78	52,36	97,88	-3,78	52,36
30°C	108,70	-3,77	58,05	105,29	-3,78	56,32
C) Deformação admissível da mistura com ligante asfáltico CAP50/70.						
Material	Experimental			Modelo		
	$\epsilon_6, \mu\text{def}$	b	$\epsilon_{adm}, \mu\text{def}$ $\epsilon [\theta, NE]$ Eq. 5.8	$\epsilon_6, \mu\text{def}$ Eq. 5.7	b Referência	$\epsilon_{adm}, \mu\text{def}$ $\epsilon [\theta, W, NE]$ Eq. 5.9
0°C	131,53	-3,79	70,48	125,01	-4,33	72,40
10°C	107,65	-4,33	62,35	107,65	-4,33	62,35
20°C	107,85	-4,45	63,39	112,37	-4,33	65,08
30°C	150,54	-5,39	97,08	147,42	-4,33	85,38

Fonte: Autor (2016).

Os dimensionamentos são realizados com as misturas preparadas com os três ligantes e para diversas temperaturas. As espessuras das camadas de base e sub-base resultantes indicaram que, em diversas situações, a espessura estrutural de concreto asfálticos pode ser executada em uma só camada (base) ou em duas camadas (base e sub-base) (tabelas 5.5, 5.6 e 5.7).

O perfil de temperatura varia com a profundidade, no entanto, o dimensionamento foi realizado considerando a temperatura constante nas camadas asfálticas para fins de comparação.

Tabela 5.5. Espessura do pavimento espesso com CAPI0/20.

A) Dimensionamento 10°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3	3
Base – CA	-	-	-	-
Sub-base – CA	92,84 < 120,34	92,84 < 109,27	9,5	9,5
PF, E = 180 MPa	319,74 < 331	319,74 < 331		
Espessura total – CA			12,5	12,5
B) Dimensionamento 20°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3	3
Base – CA	-	-	5,0	5,0
Sub-base – CA	90,46 < 92,41	90,46 < 91,71	6,0	6,0
PF, E = 180 MPa	302,91 < 331	302,91 < 331		
Espessura total – CA			14,0	14,0
C) Dimensionamento 30°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3	3
Base – CA	-	-	8,0	8,0
Sub-base – CA	82,83 < 85,67	82,83 < 85,67	6,5	6,5
PF, E = 180 MPa	266,76 < 331	266,76 < 331		
Espessura total – CA			17,5	17,5
D) Dimensionamento 40°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3	3
Base – CA	-	-	10,0	8,0
Sub-base – CA	80,30 < 81,02	92,21 < 93,05	10,0	9,5
PF, E = 180 MPa	249,19 < 331	285,12 < 331		
Espessura total – CA			23,0	20,5

Fonte: Autor (2016).

Tabela 5.6. Espessura pavimento tipo I, espesso com CAP30/45.

A) Dimensionamento 10°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3	3
Base – CA	-	-	7,0	8,0
Sub-base – CA	67,39 < 69,79	55,0 < 56,42	7,5	9,5
PF, E = 180MPa	223,96 < 331	180,77 < 331		
Espessura total – CA			17,5	20,5
B) Dimensionamento 20°C				
Camada	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3	3
Base – CA	-	-		
Sub-base – CA	51,41 < 52,36	51,41 < 52,36	11,0	11,0
PF, E = 180MPa	168,38 < 331	168,38 < 331	10,5	10,5
Espessura total – CA			24,5	24,5
Dimensionamento 30°C				
Camada	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3	3
Base – CA	-	-	13,0	13,0
Sub-base – CA	56,78 < 58,05	55,47 < 56,32	12,5	13,0
PF, E = 180MPa	185,92 < 331	181,82 < 331		
Espessura total – CA			28,5	29,0

Fonte: Autor (2016).

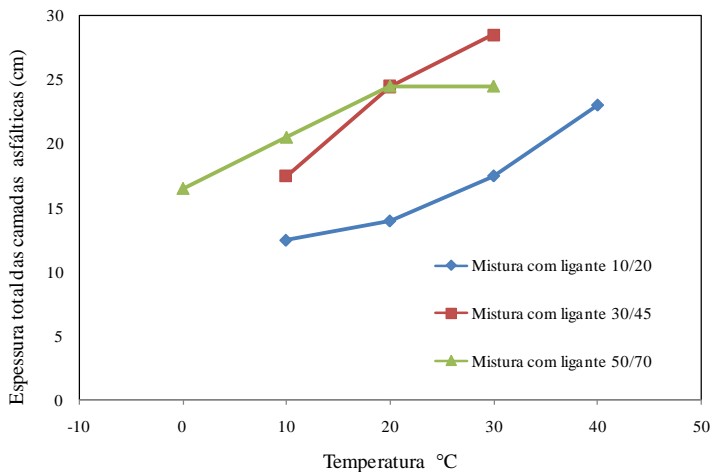
Tabela 5.7 – Espessuras do pavimento tipo I, pavimento espesso com CAP 50/70.

Dimensionamento 0°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3,0	3,0
Base – CA	-	-	7,0	7,0
Sub-base – CA	69,78 < 70,48	69,78 < 72,40	6,5	6,5
PF, E = 180MPa	234,28 < 331	234,28 < 331		
Espessura total – CA			16,5	16,5
A) Dimensionamento 10°C				
Camada	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3,0	3,0
Base, CA	-	-	7,5	7,5
Sub-base, CA	61,31 < 62,35	61,31 < 62,35	10,0	10,0
PF, E = 180MPa	201,27 < 331	201,27 < 331		
Espessura total – CA			20,5	20,5
B) Dimensionamento 20°C				
Camada	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3,0	3,0
Base – CA	-	-	10,0	10,0
Sub-base – CA	62,15 < 63,39	64,38 < 65,08	11,5	11,0
PF, E = 180MPa	203,64 < 331	208,97 < 331		
Espessura total – CA			24,5	24,0
C) Dimensionamento 30°C				
Camada	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal} (\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Superfície – CA	-	-	3,0	3,0
Base – CA	-	-	10,0	12,0
Sub-base – CA	95,70 < 97,08	85,27 < 85,38	11,5	12,0
PF, E = 180MPa	296,15 < 331	266,45 < 331		
Espessura total – CA			24,5	27,0

Fonte: Autor (2016).

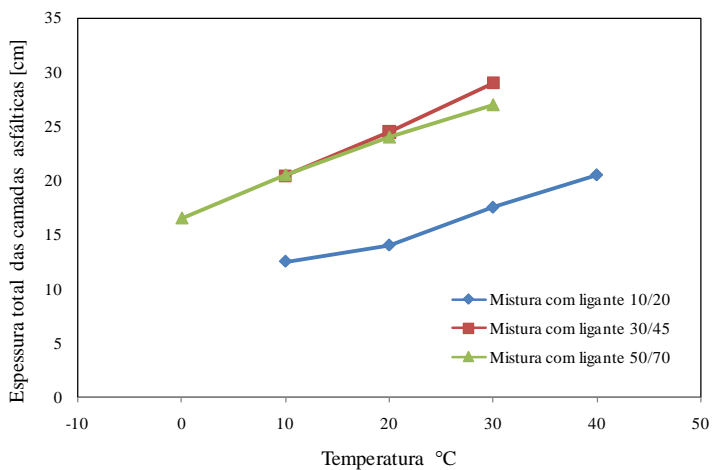
As espessuras totais das estruturas dos pavimentos das misturas preparadas os três ligantes, tanto para as deformações calculadas dos dados experimentais como as calculadas a partir do modelo indicam valores crescentes com a temperatura (figuras 5.17 e 5.18).

Figura 5.17 - Variação da espessura das camadas asfálticas do pavimento tipo I com a temperatura, para deformação ϵ_6 experimental.



Fonte: Autor (2016).

Figura 5.18 –Variação da espessura das camadas asfálticas do pavimento tipo I com a temperatura, para deformação ϵ_6 modelada.



Fonte: Autor (2016).

5.4.3. Estrutura de pavimento hipotética tipo II – pavimento simples

Os valores das deformações admissíveis das misturas asfálticas são determinados, para o tráfego escolhido correspondente à estrutura escolhida, pavimento tipo II – simples (tabela 5.8). pela equação 5.8 para os resultados experimentais e pela equação 5.9 para os valores modelados.

Tabela 5.8 –Deformações admissíveis para pavimento tipo II, pavimento simples ($4,80 \times 10^6$).

A) Deformação admissível da mistura com ligante asfáltico CAP10/20.						
	Experimental			Modelo		
Material	$\varepsilon_6, \mu\text{def}$	b	$\varepsilon_{\text{adm}, \mu\text{def}}$ ε [θ, NE] Eq. 5.8	$\varepsilon_6, \mu\text{def}$ Eq. 5.7	b Referência	$\varepsilon_{\text{adm}, \mu\text{def}}$ ε [θ, W, NE] Eq. 5.9
10°C	176,35	-6,18	136,84	165,58	-5,69	125,70
20°C	144,50	-5,29	107,44	138,98	-5,69	105,51
30°C	129,81	-5,69	98,55	129,81	-5,69	98,55
40°C	143,05	-4,16	98,13	141,00	-5,69	107,04
B) Deformação admissível da mistura com ligante asfáltico CAP30/45.						
	Experimental			Modelo		
Material	$\varepsilon_6, \mu\text{def}$	b	$\varepsilon_{\text{adm}, \mu\text{def}}$ ε [θ, NE] Eq. 5.8	$\varepsilon_6, \mu\text{def}$ Eq. 5.7	b Referência	$\varepsilon_{\text{adm}, \mu\text{def}}$ ε [θ, W, NE] Eq. 5.9
10°C	118,04	-4,50	83,31	105,48	-3,78	69,67
20°C	97,88	-3,78	64,65	97,88	-3,78	64,65
30°C	108,70	-3,77	71,72	105,29	-3,78	69,54
C) Deformação admissível da mistura com ligante asfáltico CAP50/70.						
	Experimental			Modelo		
Material	$\varepsilon_6, \mu\text{def}$	b	$\varepsilon_{\text{adm}, \mu\text{def}}$ ε [θ, NE] Eq. 5.8	$\varepsilon_6, \mu\text{def}$ Eq. 5.7	b Referência	$\varepsilon_{\text{adm}, \mu\text{def}}$ ε [θ, W, NE] Eq. 5.9
0°C	131,53	-3,79	86,97	125,01	-4,33	87,04
10°C	107,65	-4,33	74,95	107,65	-4,33	74,95
20°C	107,85	-4,45	75,83	112,37	-4,33	78,24
30°C	150,54	-5,39	112,55	147,42	-4,33	102,64

Fonte: Autor (2016)

Os dimensionamentos são realizados com as misturas preparadas com os três ligantes e para diversas temperaturas. A espessura da camada de rolamento resultante, assente sobre camadas de base e sub-base em brita graduada, indicam espessura crescente com o aumento da temperatura (tabelas 5.9, 5.10 e 5.11).

Tabela 5.9 – Espessuras do pavimento tipo II – pavimento simples com CAP10/20.

A) Dimensionamento 10°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	120,49 < 136,84	120,49 < 125,70	5,0	5,0
Base E = 480MPa	264,20 < 394	264,20 < 394	25,0	25,0
Sub-base E = 160MPa	318,89 < 394	318,89 < 394	30,0	30,0
Subleito, E = 120MPa	268,49 < 394	268,49 < 394	-	-
A) Dimensionamento 20°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	106,12 < 107,44	102,76 < 105,51	9,0	9,5
Base E = 480MPa	234,34 < 394	226,62 < 394	25,0	25,0
Sub-base E = 160MPa	381,57 < 394	219,86 < 394	30,0	30,0
Subleito, E = 120MPa	248,88 < 394	240,89 < 394	-	-
B) Dimensionamento 30°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	95,34 < 98,55	97,95 < 98,55	12,5	12,0
Base E = 480MPa	200,19 < 394	206,47 < 394	25,0	25,0
Sub-base E = 160MPa	308,83 < 394	193,69 < 394	30,0	30,0
Subleito, E = 120MPa	212,50 < 394	218,75 < 394	-	-
C) Dimensionamento 40°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\varepsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \varepsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	95,82 < 98,13	105,94 < 107,04	16,0	14
Base E = 480MPa	191,82 < 394	210,32 < 394	25,0	25,0
Sub-base E = 160MPa	172,32 < 394	321,07 < 394	30,0	30,0
Subleito, E = 120MPa	169,47 < 394	186,27 < 394	-	-

Fonte: Autor (2016)

Tabela 5.10 –Espessuras do pavimento tipo II – simples com CAP 30/45.

Dimensionamento 10°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	82,41 < 83,31	67,54 < 69,67	12,5	15,5
Base E = 480MPa	179,85 < 394	144,91 < 394	25	25
Sub-base E = 160MPa	167,99 < 394	219,09 < 394	30	30
Subleito, E = 120MPa	196,82 < 394	138,49 < 394	-	-
Dimensionamento 20°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	62,95 < 64,65	62,95 < 64,65	19	19
Base E = 480MPa	131,92 < 394	131,92 < 394	25	25
Sub-base E = 160MPa	117,47 < 394	117,47 < 394	30	30
Subleito, E = 120MPa	125,16 < 394	125,16 < 394	-	-
Dimensionamento 30°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	$\epsilon_{cal}(\mu\text{def}) \leq \epsilon_{adm}(\mu\text{def})$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	69,42 < 71,72	69,42 < 69,54	21,5	21,5
Base E = 480MPa	144,67 < 394	144,67 < 394	25	25
Sub-base E = 160MPa	206,81 < 394	206,81 < 394	30	30
Subleito, E = 120MPa	154,84 < 394	154,84 < 394	-	-

Fonte: Autor (2016)

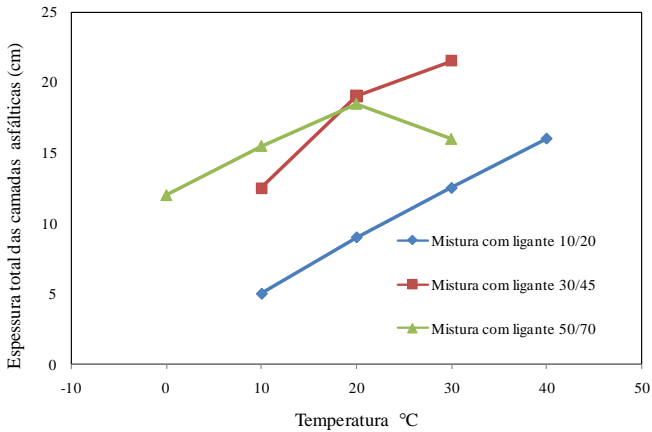
Tabela 5.11–Espessuras do pavimento tipo II – simples com CAP 50/70.

Dimensionamento 0°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal}(\mu def) \leq \epsilon_{adm}(\mu def)$	$\epsilon_{cal}(\mu def) \leq \epsilon_{adm}(\mu def)$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	83<86,97	83<87,04	12	12
Base E = 480MPa	182,86 <394	182,86 <394	25	25
Sub-base E = 160MPa	171,76 < 394	171,76 < 394	30	30
Subleito, E = 120MPa	200,39 < 394	200,39 < 394	-	-
Dimensionamento 10°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal}(\mu def) \leq \epsilon_{adm}(\mu def)$	$\epsilon_{cal}(\mu def) \leq \epsilon_{adm}(\mu def)$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	73,25 <74,95	73,25 <74,95	15,5	15,5
Base E = 480MPa	156,29 <394	156,29 <394	25	25
Sub-base E = 160MPa	235,5 < 394	235,5 < 394	30	30
Subleito, E = 120MPa	146,92 < 394	146,92 < 394	-	-
Dimensionamento 20°C				
	Experimental	Modelo	Experimental	Modelo
Camada	$\epsilon_{cal}(\mu def) \leq \epsilon_{adm}(\mu def)$	$\epsilon_{cal}(\mu def) \leq \epsilon_{adm}(\mu def)$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	74,66 <75,83	76,62 <78,24	18,5	18
Base E = 480MPa	59,31 <394	159,54 <394	25	25
Sub-base E = 160MPa	138,17 < 394	142,22 < 394	30	30
Subleito, E = 120MPa	142,84 < 394	146,27 < 394	-	-
Dimensionamento 30°C				
	Experimental	Modelo	Experimental Modelo	
Camada	$\epsilon_{cal}(\mu def) \leq \epsilon_{adm}(\mu def)$	$\epsilon_{cal}(\mu def) \leq \epsilon_{adm}(\mu def)$	Espessura (cm)	Espessura (cm)
Revestimento – CA	111,89 <112,55	100,75 <102,64	16 cm	18.5 cm
Base E = 480MPa	213,3 <394	196,55 < 394	25	25
Sub-base E = 160MPa	196,77 < 394	174,66 < 394	30	30
Subleito, E = 120MPa	189,06 < 394	171,63 < 394	-	-

Fonte: Autor (2016).

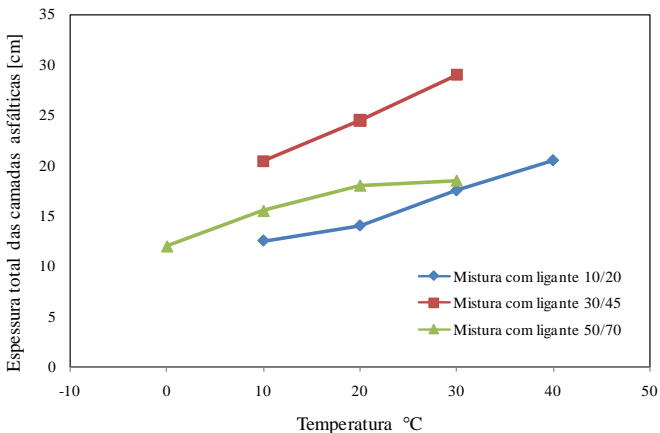
As espessuras da camada de rolamento dos pavimentos das misturas preparadas os três ligantes, tanto para as deformações calculadas dos dados experimentais como as calculadas a partir do modelo indicam valores crescentes com a temperatura (figuras 5.19 e 5.20).

Figura 5.19 – Variação da espessura das camadas asfálticas do pavimento tipo II com a temperatura, para deformação ϵ_6 experimental.



Fonte: Autor (2016).

Figura 5.20 – Variação da espessura das camadas asfálticas do pavimento tipo II com a temperatura, para deformação ϵ_6 modelada.



Fonte: Autor (2016).

5.5. COMENTARIOS SOBRE OS RESULTADOS

A análise do gráfico da componente imaginária em relação à temperatura e frequência evidencia que há uma linha de máximos valores (linha de cume) para temperaturas diferentes e frequências diferentes, que nas altas temperaturas os valores da componente imaginária são crescentes com a frequência e nas baixas temperaturas os valores são decrescentes com a frequência para todas as misturas estudadas (figura 5.1, 5.3 e 5.5).

O gráfico da energia dissipada revela comportamento análogo ao da componente imaginária do módulo complexo.

Embora os gráficos da componente imaginária e da energia dissipada sejam análogos, tanto em sua forma como quanto à consistência dos ligantes, o estudo evidencia que os pontos da linha de cume situam-se em temperaturas diferentes, tais como: CAP10/20 entre as temperaturas de 30°C a 40°C, CAP30/45 entre as temperaturas de 20°C a 30°C e CAP50/70 entre as temperaturas de 12°C a 24°C.

As espessuras das camadas estruturais de pavimento, obtidas em situação de dimensionamento hipotético, revelam que as espessuras são crescentes com a temperatura do pavimento. De certo modo, seria intuitivo que houvesse um ponto de espessura máxima com a temperatura, contudo isto não ficou evidenciado no estudo.

O estudo evidencia, ainda, que ligantes com maior consistência indicam espessuras menores para a estrutura do pavimento em todas as temperaturas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A preparação de três misturas asfálticas com constituição granulométrica contínua e única de granulares originários de mesma rocha, com teor de ligante único e com ligantes de três consistências distintas e a realização de testes de módulo complexo e fadiga, segundo a metodologia francesa, em corpos de prova trapezoidais com ensaios em flexão alternada em modo contínuo no protótipo III da máquina de módulo complexo e fadiga desenvolvida na Universidade Federal de Santa Catarina tornou possível a análise dos efeitos da consistência do ligante, da temperatura e da frequência no comportamento mecânico das misturas asfálticas no módulo complexo, na fadiga, na energia dissipada com reflexo no dimensionamento de estruturas de pavimentos.

5.1. Módulo complexo

A representação do módulo complexo no plano Cole-Cole revela que as três misturas têm comportamento habitual das misturas asfálticas em que a componente real é decrescente com o aumento da temperatura e a componente imaginária apresenta um ponto de valor máximo, no qual se considera a temperatura crítica. Contudo, esta temperatura crítica é crescente com a consistência do ligante. Estas temperaturas críticas afastam-se da temperatura de ensaio de fadiga de modo muito forte com o aumento da temperatura.

Os valores do módulo dinâmico das misturas são maiores com o aumento da consistência no domínio de todas as temperaturas e frequências, alcançando valores muito altos para as misturas de maior consistência.

Observa-se, ainda, nos gráficos das isotérmicas e isócronas, que as misturas asfálticas com ligante de maior consistência são menos susceptíveis à temperatura e à frequência e o ângulo de fase máximo é menor na mistura com ligante de maior consistência.

O modelo de Huet-Sayegh representa com muita precisão o comportamento viscoelástico das misturas estudadas para as três consistências de ligantes.

A análise do gráfico da componente imaginária em relação à temperatura e à frequência evidencia que há uma linha de máximos valores (linha de cume) para temperaturas diferentes e frequências diferentes, que nas altas temperaturas os valores da componente imaginária são crescentes com a frequência e nas baixas temperaturas os valores são decrescentes com a frequência para todas as misturas estudadas (figura 5.1, 5.3 e 5,5). Evidencia-se, também, que as componentes imaginárias máximas têm valores, essencialmente, idênticos na linha de cume.

Os gráficos das componentes imaginárias de módulo complexo das misturas asfálticas revelam que, seus valores são decrescentes com o aumento da frequência nas situações de baixa temperatura e crescentes com a frequência nas situações de alta temperatura, ocorrendo inversão de comportamento na linha de cume de seus valores.

Os valores de temperatura dos pontos da linha de cume (valores de máximos) da componente imaginária do módulo são crescentes com a frequência, isto é, para situações de frequências mais altas os pontos de máximos ocorrem em temperaturas mais altas.

5.2. Fadiga

Os ensaios de fadiga são realizados normalmente pelo critério de fim de vida de perda de 50% da força inicial. A análise feita, também, com o critério da energia dissipada revela que os valores de ambos os critérios são essencialmente idênticos, contudo, com algum incremento de afastamento para a temperatura mais alta de ensaio.

O parâmetro deformação de um milhão de ciclos dos ensaios de fadiga revela que, nas três misturas estudadas, ocorre um comportamento com ponto de mínimo, que é considerado como a temperatura crítica da mistura asfáltica. Esta temperatura de ponto de mínimo corresponde à situação em que ocorrem os maiores valores de energia dissipada.

Os valores da deformação de um milhão de ciclos dos ensaios de fadiga indicam uma reflexão sobre as temperaturas nas quais realizar os ensaios de fadiga das misturas asfálticas, particularmente para os países com temperaturas de campo mais elevadas que as temperaturas ocorrentes no continente europeu. As misturas asfálticas com ligantes

asfálticos de maior consistência têm temperaturas críticas mais elevadas, atingido até o valor de 30°C.

Os ensaios de fadiga são realizados na frequência de 25Hz e a diferentes temperaturas revelam um temperatura crítica, contudo, esta temperatura crítica não é coincidente com a temperatura de valor máximo da componente imaginária do módulo complexo para esta frequência. Na temperatura crítica revelada pela fadiga, o valor de ponto de máximo tanto da componente imaginária como da energia dissipada ocorre a frequência inferior à frequência de 25Hz; ocorre nas proximidades da frequência de 3Hz.

Os valores da deformação de um milhão de ciclos dos ensaios de fadiga a diferentes temperaturas e a diferentes consistências de ligantes revelam que parece ser viável a substituição do conceito de temperatura equivalente, tal com vem sendo adotado na metodologia de concepção de pavimentos da metodologia francesa, pelo conceito de temperatura crítica para o dimensionamento das estruturas do pavimento.

5.3. Energia dissipada

O comportamento da energia dissipada no ensaio de módulo complexo é basicamente de comportamento idêntico ao comportamento da componente imaginária do módulo. Nas situações de baixa temperatura, os valores de energia dissipada são decrescentes com o aumento da frequência e nas temperaturas altas são decrescentes com o aumento da temperatura. Na linha de cume de valores, ocorre a inversão de comportamento.

De modo análogo ao comportamento da componente imaginária do módulo complexo, na linha de cume, os valores de máximos ocorrem em temperaturas maiores nas situações de maior frequência.

O modelo de previsão de valor da deformação de um milhão de ciclos com base na energia dissipada mostrou-se viável para a determinação da deformação para um milhão de ciclos em temperaturas diferentes que a temperatura crítica. Os valores de deformação de um milhão de ciclos obtidos são muito próximos dos valores experimentais. Os valores da deformação para um milhão de ciclos têm maiores afastamentos dos valores experimentais para as situações de

temperaturas mais baixas e mais altas e são, praticamente, idênticos para as temperaturas críticas.

5.4. Espessuras das estruturas dos pavimentos

Em dimensionamento de estruturas de pavimento hipotético em que as deformações admissíveis foram determinadas tendo em conta o fato obtido pela relação de energia dissipada, observa-se que as espessuras das camadas de estrutura do pavimento são decrescentes com a consistência do ligante utilizado. Pavimentos dimensionados com misturas preparadas com ligantes de menores consistências resultaram em espessuras de camadas de misturas asfálticas maiores.

As espessuras das camadas de misturas asfálticas nas condições de temperaturas mais altas são maiores, isto é, as condições ambientais de maiores temperaturas impõem espessuras maiores das estruturas de misturas asfálticas para resistir o mesmo tráfego.

Observa-se que as espessuras das camadas da estrutura aumentam continuamente com o aumento da temperatura, não ocorrendo um ponto de máximo, tal como é observado para a componente imaginária e para a energia dissipada.

Os valores de espessuras das camadas de misturas asfálticas calculadas com as deformações de um milhão de ciclos experimentais e modeladas são praticamente idênticos, exceto para as condições de temperaturas baixas em que há um decréscimo de valor de espessura de pouco significado.

5.5. Considerações e Recomendações

Por derradeiro, algumas reflexões para continuidade dos estudos de compreensão do comportamento das misturas asfálticas:

A revelação de que as espessuras das camadas asfálticas aumentam com o aumento da temperatura indica caminhos para novos estudos sobre o conceito de temperatura crítica das misturas asfálticas tendo em conta a sensibilidade do teor de ligante em função da temperatura do ambiente, em função da frequência de ensaios, e de outros parâmetros de preparação de misturas asfálticas.

A evidência de que o conceito de temperatura equivalente, tal como é usado atualmente, e o conceito de temperatura crítica não estão, ainda, exaustivamente estudados e definidos abre a expectativa de que novos estudos destes conceitos, em conjunto ou separadamente, podem levar ao aperfeiçoamento do dimensionamento das estruturas dos pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6576: Materiais Betuminosos - Determinação da Penetração**. 2005.

_____. ABNT NBR 6560: Materiais Betuminosos - **Determinação do Ponto de Amolecimento: Método do Anel e Bola**. (2005).

AFNOR – Association Française de Normalisation. AFNOR NF P 98-250-2: Essais relatifs aux Chaussées - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, partie 2: **Compactage des plaques**. 1991.

_____. AFNOR NF P 18-559. **Mode Opérateur de la mesure de masse volumique de granulats**. 2005.

_____.AFNOR NF EN 12697-5. Mélanges Bitumineux, Méthodes d'Essai por Mélange Hydrocarboné à Chaud - Partie 5: **Masse Volumique Maximale (Masse Volumique Réelle) des Matériaux Bitumineux**. 2003.

_____. AFNOR NF P 98-252. Essais Relatifs aux Chaussées: **Essai à la presse à cisaillement giratoire PCG**. 1999.

_____.AFNOR NF P 98-251-1. Essais Relatifs aux Chaussées - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés: **Essai de Duriez**. 1995.

_____.AFNOR NF P 98-253-1. Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 1: **Essai d'Orniérage**. 1993.

_____.AFNOR NF P 98-261-1 (1993). Essais Relatifs aux Chaussées: Détermination de la Résistance en Fatigue des Mélanges Hydrocarbonés - Partie 1: **Essai par Flexion à Flèche Constante**. 1993

_____.AFNOR NF P 98-250-3 (1993), Essais Relatifs aux Chaussées - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés – **Confection d'éprouvettes dans un bloc d'enrobé**.1993.

_____.AFNOR NF P 98-260-2 (1992), Essais Relatifs aux Chaussées, Mesure des Caractéristiques Rhéologiques des Mélanges Hydrocarbonés

- Partie 2 : **Détermination du Module Complexe par Flexion Sinusoïdale**. 1992.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM D 4402: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer**. USA. 2013.

AIREY G.; RAHIMZADEH B.; COLLOPA **Viscoelastic linearity limits for bituminous materials** Materials and Structures. pp. 643-647. 2003.

AIREY G.; RAHIMZADEH B.; COLLOP A. C **Linear Rheological Behavior of Bituminous Paving Materials**. Journal of Materials in Civil Engineering. pp. 212-220. 2004.

ALIMANI M. **Contribution à l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobé bitumineux**. Rapport de recherche N° 151. INSA Lyon: LPC. 1988.

ALMEIDA, Adosindro Joaquim. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Aplicação dos Aditivos PR PLAST S E PR FLEX 20 No Módulo Complexo e na Fadiga**. Dissertação (Mestrado). 2013.

BAAJ H. **Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés**. Tese (Doutorado) L'institut national des sciences appliquees de Lyon. 2002.

BODIN D. **Essais de Fatigue sur Matériaux bitumineux Modèle d'endommagement**. LCPC – Struct. et Mat. pour les Infra. de Transp. (SMIT). - S Séminaire Durabilit minaire Durabilité é structurelle des chauss structurelle des chaussé ées: pathologies et entretien. 2008.

BODIN D. **Modèle d Endommagement par Fatigue: Application aux Enrobés bitumineux**. Diplôme délivré conjointement par L'École Centrale de Nantes et L'Université de Nantes. 2002.

BORDIN G. C. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Rio Grande do Sul, p. 155. 2014.

BRAZ D. Tomografia computadorizada no estudo da mecânica da fratura em misturas asfálticas. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. - 1997.

CHUPIN, O; PIAU, J.M; CHABOT A. Effect of Bituminous Pavement Structures on the Rolling Resistance. 11th International Conference On Asphalt Pavements. France. 2010.

DE LA ROCHE C.;CHARRIER J.; MARSAC, P.; MOLIAXD, JM, Évaluation de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux Apports de la thermographie infrarouge.Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées. p. 19-40, 2001.

DE LA ROCHE C.; MARSAC P. Caractérisation expérimentale de la disipation thermique dans un enrobé bitumineux sollicité en fatigue. . First international Eurobitume and Euroasphalt congress. 1996.

DE LA ROCHE C.; RIVIERE N. Fatigue behaviour of asphalt mixes: Influence of laboratory test procedures on fatigue performance. Conference on Asphalt Pavements. - Seattle, USA. p 899-917. 1997.

DE LA ROCHE C. Module de rigidite et comportement en fatigue des enrobes bitumineux. Expérimentation et nouvelles perspective d'analyse. Tese de Doutorado, p. 186. 1996.

DE MOURA E. Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório. Tese (Doutorado). Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, Departamento deEngenharia de Transportes. p. 299. 2010.

DELORME J. L.; DE LA ROCHE C.; WENDLING L. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés, Groupe de travail RST Formulation des enrobés. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris. 2007.

DI BENEDETTO H.; BAAJ, H.; PRONK, A. LUNDSTROM, R. Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and Rilem Group Contribution. Proceedings of the International RILEM Symposium; p 15-38. 2003.

DI BENEDETTO H.; DE LA ROCHE C., BAAJ H.; PRONK A.; LUNDSTROM R. **Fatigue of bituminous Mixtures**. Materials and Structures, v 37., 267, p. 202-216, 2004.

DI BENEDETTO H., “**Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique**”, **Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control**. Proceedings of the Fourth RILEM Symposium. 1990.

DI BENEDETTO H.; ASHAYER SOLTANI M.A.; CHAVEROT P. **Fatigue damage for bituminous mixtures: a pertinent approach**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 65, p. 15, 1996.

DI BENEDETTO H.; FRANCKEN L. E.; DE LA ROCHE C. **Fatigue of Bituminous Mixtures Different approaches and RILEM interlaboratory test**. Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium MTBM LYON. p. 15-26. 1997.

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE B. **Linear viscoelastic behavior of bituminous materials: from binders to mixes**. Road Materials Pavement Designs. v 5, p.163–202. 2004.

DOAN T.H. **Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC**. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. p 215-228. 1977.

DOMEC V. **Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux en condition de trafic simulé et de température**. Thèse de doctorat, L' Université Bordeaux I. 2005.

DUHAMEL, D.; CHABOT, A.; TAMAGNY, P.; HARFOUCHE, L. **ViscoRoute: Viscoelastic modeling for asphalt pavements**. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, p. 258–259, 89–103. 2005

FERRY J.D **Viscoelastic properties of polymers**. 3rd Ed. J. WILEY&SONS, p. 672, 1980.

FINDLEY W.N.; LAI J.S.; K ONARAN. **Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials**. Northon- Holland Publishing Company. 1976

GODDARD, R.; POWELL, W. D. **Résistance à la Fatigue des Enrobés Denses – Influence des Facteurs –Formulation et Température**. In Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, Spécial V, LCPC. 1977

GROSS D.; SEELIG T. **Fracture Mechanics - With an Introduction to Micromechanics**. Springer - Verlag Berlin Heidelberg. 2006.

GUERRREIRO, M. J. R. **Monitoreamento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS A implantação do projeto de rede tematica do asfalto no Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre. 2014.

HECK J. V. **Modelisation des Deformations Reversibles et Permanentes des Enrobes Bitumineux - Application a L'ornierage des Chaussees**. Universite de Nantes Ecole Doctorale Mecanique, thermique et genie civil de Nantes. – Nantes. . p. 228. 2001.

HOPMAN, P.C.; KUNST, P.A.; PRONK A.C. **A renewed interpretation method for fatigue measurements-verification of Miner's rule**. 4th Eurobitume Symposium, Madrid. v.1 p. 557-561. 1989.

HORNYCH, P.; BALAY, J.M.; MAUDUIT, C.; BODIN, D. **Evaluation of the concept of equivalent temperature for pavement design**. In the 9th international conference on the bearing capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRRA. p. 319-329. 2013.

HORNYCH, P. **Effets de la temperature sur le Dimensionnement des chaussees**. Séminaire de restitution CCLEAR - Impact des conditions climatiques sur les infrastructures routières. 2015.

HUANG, B.; LI G.; SHU X. **Investigation into three-layered HMA mixtures**. Composites: Part B. v. 37 p. 679–690. 2006.

HUET C. **Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés.** Tese (Doutorado). Faculté des Sciences de L'Université de Paris. p. 69. 1963.

IRWIN, L.H.; GALLAWAY, B.M. **Influence of laboratory test method on fatigue test results for asphaltic concrete.** ASTM Special Technical Publication 561, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1974.

KENNEDY T.W. **Characterization of asphalt pavement materials using the indirect tensile test.** Association of Asphalt Paving Technologists. v. 46. 1977.

LAVEISSIERE D. **Modélisation de la remontée de fissure en fatigue dans les structures routières par endommagement et macro-fissuration.** Tese (Doutorado). L'université de Limoges faculté des sciences école doctorale. 2002.

LEITE, L. F. M; NASCIMENTO, L. A; CHACUR, M; MARTINS, A. T. ROCHA, S. M; FIGUEIREDO, U. **Empregos de Asfaltos Duros em Rodovias de Alto Volume de Tráfego,** 2011.

LUNSTROM, R.; ISACSSON, U.; EKBLAD, J. **Investigations of Stiffness and Fatigue Properties Asphalt Mixtures.** Journal of Materials Science. v 38, p 4941– 4949. 2003.

MANUEL LPC. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés.** Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France. 2007

MAGALHÃES Sidelei Teixeira. **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. - Rio de Janeiro. 2004.

MAILLARD S. **Fissuration et Autoreparation des Liants Bitumineux - Apport de L'essai de Rupture Locale Repetee sur Bitume.** Tese (Doutorado). L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes. 2005.

MARTINEZ F.; ANGELONE, S. **Determination of Fracture Parameters of Asphalt Mixes by the Repeated Indirect Tensile Test.** Sixth RILEM Symposium. Zúrique, p. 387- 393. 2003.

MATTOS João Rodrigo Guerreiro. **Monitoramento e Análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS – A implantação do projeto rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em engenharia civil. Universidade Federal de Rio Grande do Sul. 2014

MELO J.V.S. 2014. **Desenvolvimento e Estudo do Comportamento Reológico e Desempenho Mecânico de Concretos Asfálticos Modificados com Nanocompósitos.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p. 414. 2014.

MEDANI T.O.; MOLENAAR, A.A.A. **Estimation of fatigue characteristics of asphaltic mixes using simple tests.** Delft University of Technology, the Netherlands. 2000

MEWIS, J.; WAGNER, N.J. **Thixotropy: colloids, polymers and surfactants. Special issue in honour of Brian Vincent.** Adv Colloid Interf Sci. 2009.

MINHOTO, Manuel Joaquim da Costa. **Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2005

MOMM L Maquina de ensaio de fadiga a deformação controlada em modo contínuo. XIII CILA - Congreso Ibero - Latinoamericano del asfalto. - San José de Costa Rica : [s.n.], 2005.

MOMM L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1998.

MOTTA, L. M. G. **O estudo da temperatura em revestimentos betuminosos.** Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 1979.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 1991.

MOUTIER, F. **Etude statistique de l'effet de la composition des enrobes bitumineux sur leur comportement en fatigue complexe.** Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées. v. 172. 1991.

NASCIMENTO. L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil.** Tese (Doutorado). North Carolina State University. 2015.

NGUYEN V. H. **Comportement dynamique de structures non-linéaires soumises à des charges mobiles.** Tese (Doutorado). Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris. 2002.

NING L.; MOLENAAR, A.A.A.; VAN DE VEM, M.F.C.; SHAOPENG, W. **Characterization of fatigue performance of asphalt mixture using a new fatigue analysis approach.** Construction and Building Materials. v. 45, 45-52. 2013.

NUÑEZ W.P. **Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997

LOUREIRO Thiago Grangeiro. **Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas.** Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. 2003.

OLARD François. **Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics.** 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials. - Zurich. 2003.

OLARD F.; DI BENEDETTO H. **General 2S2P1D model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binder and mixes.** Road Materials and Pavement Design. v. 4,2; p. 185-224. 2003.

OLARD F. **Etude et modélisation de comportement thermo-mécanique des enrobés bitumineux.** Tese (Doutorado) Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Lyon. 2000.

OTTO, Gustavo Garcia. **Misturas asfálticas mornas – verificação da fadiga e do módulo complexo.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

OTTO G G, MOMM, L, VALENTE A M. **Estudo do Dano ao Pavimento Devido a Carga Dinâmica.** In 1st International Seminar of Weigh in Motion. Florianopolis. 2011.

PARIS. P; ERDOGAN, F. **A Critical Analysis of Crack Propagation Laws.** J. Basic Eng. 528-533. 1963.

PEYBERNARD J. **Méthodes statistiques pour l'exploitation des mesures - module 3.** LCPC Formation Continue, MARS. 1996.

PEREIRA M.M.L **Estudo de Mistura Asfáltica de Módulo Elevado para camadas de base de Pavimento.** Escola Politécnica Da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.

PEREZ JIMÉNEZ, F.E; BOTELLA, R; MIRÓ R. **Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests.** Construction and Building Materials. p. 212–219. 2012.

PERRET, J. **Deformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic.** Tese (Doutorado). École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Suíça. 2003.

PIAU J. M **Thermomechanical modelling of the behaviour of bituminous mixes.** Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées 163. - 1989. - pp. 41-55.

PIAU, J.M; ROUSSET, G. **Modélisation thermomécanique du comportement des enrobés bitumineux.** Mémoire de DEA, Laboratoire de Mécanique des Solides. Ecole Polytechnique. Paris. 1983.

PINTO S. Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos // Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio Janeiro. 1991.

PRONK A.C Evaluation of the dissipated energy concept for the interpretation of fatigue measurements in the crack initiation phase Report n° P-DWW-95-501, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1995.

QUINTERO C.F.Q. Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada – formulação e comportamento mecânico. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. – Florianópolis. p219. 2011.

QUINTERO Q C F., MOMM L, LEITE, L. F. M, BERNUCCI L L B., Effect of asphalt binder hardness and temperature on fatigue life and complex modulus of hot mixes, Construction and Building Materials v.114, p.755–762. 2016

QUINTERO Q C F., MOMM L, LEITE, L. F. M, BERNUCCI L L B., Formulación y Aplicación de mezclas Grava-Bitumen para Capas Bituminosas espesas. Asfaltos y Pavimentos, v. 13, p. 29-39, 2012.

RIANDE, E.; DIAZ-CALLEJA, R.; PROLONGO, M.G.; MASEGOSA, R.M.; SALOM, C. Polymer Viscoelasticity - In Stress and Strain practice. New York. 2000.

RIVIERE N. Comportement en fatigue des enrobés bitumineux. Tese (Doutorado). Université de Bordeaux I- Bordeaux. p. 116. 1996.

ROHDE, Luciana, Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos, Tese de doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

RODRIGUES, R.M. Projeto de reforço de pavimentos rodoviários e aeroportuários pelo método da resiliência: Uma nova versão do programa TECNAPAV. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1987

ROWE, G.M.; BOULDIN, M.G. **Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures.** Proceedings of Eurobitme & Euroasphalt congress. Barcelona. p 754-763. 2000.

SAUNIER, J. **Contribution à l'étude des propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux.** Thèse de Docteur. Faculté des Sciences de L'Université de Paris. 1968

SETRA-LCPC. **French Design Manual for Pavement Structures - Guide Technique.** Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA); Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). 1997.

SETRA-LCPC. **Conception et dimensionnement des structures de chaussée, guide-technique,** paris, décembre. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA); Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 1994

SHAN, L.; TAN, Y.; UNDERWOOD, S.; KIM, Y.R. **Application of thixotropy to analyze fatigue and healing characteristics of asphalt binder.** Annual Meeting of the Transportation Research Board. . p. 85-92. 2010.

SOLTANI A. **Comportement en fatigue des enrobés bitumineux.** Tese (Doutorado). l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Lyon. 1998.

SOUZA V. F. **Modelo Multi-Escala para Análise Estrutural de Compósitos Viscoelásticos Suscetíveis ao Dano.** Universidade Federal do Ceará Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. p. 210. 2005

TAPSOBA, N.; SAUZEAT, C.; DI BENEDETTO, H. **Analysis of fatigue test for bituminous mixtures.** Journal of Materials in Civil Enginmeering, v. 25,6. 2012

TAYEBALI A.A J. DEACON, J. COPLANTZ, J. HARVEY, AND C. MONISMITH.; **Fatigue Response of Aggregate Mixtures.** University of California. - 1994.

TSAI, B.W.; HARVEY, J.T.E.; MONISMITH, C.L. The Application of Weibull Theory in Asphalt Concrete Fatigue Performance Prediction.In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1832, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., p. 121-130. 2003,

VILLELA A.R.A Estudo de camada de base asfáltica de módulo elevado para restauração de rodovias de tráfego muito pesado. Tese de Doutorado. 2012.

VAN ROMPU; H. DI BENEDETTO; M. BUANNIC; T. GALLET; C. RUOT. New fatigue test on bituminous binders: Experimental results and modeling. Construction and Building Materials. v.37, p.197–208. 2012.

WANG L. Mechanics of Asphalt Microstructure and Micromechanics. McGraw-Hill. United States. 2011.

WEIBULL W A statistical distribution function of wide applicability. Journal of Applied Mechanics. p. 293–299. 1951

APÊNDICE A

APÊNDICE A – Modelo para a previsão da deformação para um milhão de ciclos em relação à temperatura e à frequência.

O comportamento na fadiga, assim como o módulo complexo varia tanto da temperatura como da frequência.

No que diz respeito ao efeito da frequência observa-se que no plano Cole-Cole o ensaio de módulo complexo, nas baixas temperaturas, nas temperaturas intermediárias e nas elevadas temperaturas:

- Nas baixas temperaturas: para uma temperatura fixa, quando a frequência aumenta, há um aumento do módulo complexo e uma diminuição na componente imaginária, teoricamente a resistência à fadiga aumenta por ter menor energia dissipada.
- Nas temperaturas intermediária: para uma temperatura fixa, quando a frequência aumenta, tanto o módulo complexo como a componente imaginária permanece aproximadamente constante, teoricamente a resistência à fadiga permaneceria variaria pouco constante.
- Nas temperaturas elevadas: para uma temperatura fixa, um aumento da frequência, aumenta tanto o módulo complexo como a componente imaginária e a resistência a fadiga teoricamente diminuiria diminui.

Para uma temperatura constante poderia ser possível determinar a resistência à fadiga a frequências diferentes a partir da densidade de energia dissipada do ensaio de módulo complexo.

$$\varepsilon [\theta, f, W] = \varepsilon_6(\theta_f, 25\text{Hz}) \cdot f \theta \cdot fw$$

$$\varepsilon [\theta, f, W] = \varepsilon_6(\theta_f, 25\text{Hz}) \cdot \frac{\log(W_{\theta c})}{\log(W_{\theta})} \cdot fw$$

$$\varepsilon [\theta, f, W] = \varepsilon_6(\theta_f, 25\text{Hz}) \cdot \frac{\log(\pi \cdot \varepsilon_{mod} \cdot \sigma_{\theta c} \cdot \text{sen} \varphi_{\theta c})}{\log(\pi \cdot \varepsilon_{mod} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \text{sen} \varphi_{\theta})} \cdot fw$$

$$\varepsilon [\theta, f, W, N] = \varepsilon_6(\theta, 25\text{Hz}) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{-b} \frac{\log(\pi \cdot \varepsilon_{mod} \cdot \sigma_{\theta c} \cdot \text{sen} \varphi_{\theta c})}{\log(\pi \cdot \varepsilon_{mod} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \text{sen} \varphi_{\theta})} \cdot fw$$

Onde:

W = Densidade de energia dissipada;

NE = Número de eixos;

$f\theta$ = Fator de conversão por temperatura a partir da energia;

fw = fator de conversão por frequência a partir da energia.

θ_f = Temperatura do ensaio de fadiga;

θ_c = Temperatura crítica determinada no plano complexo para baixa frequência;

θ = Temperatura na qual se quer encontra a deformação de 1 milhão de ciclos;

ε_{mod} = Deformação do ensaio de módulo complexo [μm];

$W_{\theta c}$ = Densidade de Energia correspondente na temperatura θ_c nas baixas frequências; ou na frequência de 25hz e temperatura θ considerando o deslocamento da energia pelo efeito da frequência;

W_{θ} = Densidade de Energia correspondente na temperatura θ nas baixas frequências; ou na frequência de 25hz e temperatura θ considerando o deslocamento da energia pelo efeito da frequência;

$\sigma_{\theta c}(\theta, f)$ = Tensão na frequência correspondente na temperatura crítica θ_c ;

$\sigma_{\theta}(\theta, f)$ = Tensão na frequência correspondente na temperatura requerida θ ;

$\varphi_{\theta c}$ = Ângulo de fase na temperatura crítica θ_c ;

φ_{θ} = Ângulo de fase na temperatura requerida θ ;

ε_6 = deformação de 1 milhão de ciclos no ensaios de fadiga de referência;

b = expoente da curva de fadiga de referência.

APÊNDICE B

APÊNDICE B.1 – Resultados do ensaio de módulo complexo para a mistura asfáltica preparada com CAP 10/20.

Temperatura	Frequencia	E1	E2	E*	ϕ
°C	Hz	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
-10	1.5	22801	841	22817	2,09
-10	3	23064	718	23075	1,76
-10	10	23647	391	23650	0,93
-10	15	23928	352	23930	0,85
-10	25	24595	200	24596	0,48
-10	30	25002	194	25003	0,45
-5	1.5	22578	892	22596	2,24
-5	3	22948	766	22961	1,89
-5	10	23501	435	23505	1,04
-5	15	23789	389	23792	0,94
-5	25	24470	223	24471	0,52
-5	30	24884	194	24885	0,46
0	1.5	21700	1132	21730	2,97
0	3	22133	984	22155	2,53
0	10	22811	629	22820	1,56
0	15	23134	394	23138	0,95
0	25	23858	244	23860	0,58
0	30	24273	189	24274	0,45
5	1.5	20190	1503	20246	4,24
5	3	20704	1338	20748	3,68
5	10	21641	958	21662	2,52
5	15	22024	716	22036	1,84
5	25	22821	441	22826	1,09
5	30	23268	314	23271	0,76
10	1.5	18598	1866	18692	5,71
10	3	19286	1696	19361	5,01
10	10	20406	1301	20447	3,63
10	15	20846	1037	20873	2,83
10	25	21680	789	21695	2,07
10	30	22047	679	22058	1,74
15	1.5	16504	2253	16658	7,76
15	3	17337	2088	17463	6,85
15	10	18709	1693	18786	5,15
15	15	19239	1414	19291	4,18
15	25	20182	1211	20219	3,41
15	30	20670	1046	20698	2,88

Continuação APÊNDICE B.1 – Resultados do ensaio de módulo complexo para a mistura asfáltica preparada com CAP 10/20.

Temperatura	Frequencia	E1	E2	E*	ϕ
°C	Hz	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
20	1.5	13906	2684	14164	10,92
20	3	14888	2524	15101	9,61
20	10	16586	2162	16727	7,41
20	15	17198	1923	17307	6,36
20	25	18226	1718	18308	5,37
20	30	18737	1578	18805	4,80
25	1.5	11185	2942	11569	14,76
25	3	12365	2850	12692	12,98
25	10	14332	2555	14560	10,10
25	15	15045	2348	15229	8,86
25	25	16112	2187	16261	7,72
25	30	16654	2070	16784	7,08
30	1.5	8514	3045	9049	19,78
30	3	9681	3052	10157	17,55
30	10	11817	2894	12170	13,77
30	15	12852	2708	13137	11,91
30	25	13733	2628	13985	10,84
30	30	14244	2547	14473	10,16
35	1.5	5608	2806	6282	26,84
35	3	6739	2974	7376	24,00
35	10	8954	3077	9475	19,05
35	15	9766	3012	10225	17,21
35	25	10924	2998	11333	15,42
35	30	11453	2969	11837	14,62
40	1.5	3626	2350	4330	33,26
40	3	4518	2632	5239	30,49
40	10	6463	3002	7134	25,08
40	15	7231	3050	7856	23,02
40	25	8325	3151	8909	20,86
40	30	8807	3196	9376	20,09
45	1.5	2165	1720	2771	38,50
45	3	2616	1991	3295	37,53
45	10	3910	2532	4668	33,25
45	15	4486	2694	5243	31,30
45	25	5357	2936	6119	29,05
45	30	5731	3044	6500	28,31

APÊNDICE B.2 – Resultados do ensaio de módulo complexo para a mistura asfáltica preparada com CAP 30/45.

Temperatura	Frequencia	E1	E2	E*	ϕ
°C	Hz	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
-10	1.5	20881	1258	20920	3,4
-10	3	21346	1085	21374	2,9
-10	10	22047	699	22059	1,8
-10	15	22364	400	22368	1,0
-10	25	23037	246	23039	0,6
-10	30	23374	255	23376	0,6
-5	1.5	20366	1330	20410	3,7
-5	3	20900	1159	20932	3,1
-5	10	21591	775	21606	2,0
-5	15	21927	467	21933	1,2
-5	25	22618	282	22620	0,7
-5	30	23022	275	23024	0,7
0	1.5	18833	1777	18917	5,4
0	3	19486	1575	19550	4,6
0	10	20462	1137	20494	3,2
0	15	20867	816	20884	2,2
0	25	21630	602	21640	1,6
0	30	22048	433	22054	1,1
5	1.5	16832	2309	16990	7,8
5	3	17652	2071	17774	6,7
5	10	18971	1590	19038	4,8
5	15	19475	1272	19517	3,7
5	25	20320	1053	20348	2,9
5	30	20789	875	20809	2,4
10	1.5	14518	2842	14794	11,0
10	3	15543	2600	15760	9,5
10	10	17215	2094	17343	6,9
10	15	17813	1775	17901	5,7
10	25	18791	1557	18856	4,7
10	30	19281	1396	19333	4,1
15	1.5	11870	3295	12320	15,5
15	3	13172	3097	13532	13,2
15	10	15200	2605	15422	9,7
15	15	15916	2319	16085	8,3
15	25	16993	2095	17123	7,0
15	30	17530	1930	17638	6,3

Continuação: APÊNDICE B.2 – Resultados do ensaio de módulo complexo para a mistura asfáltica preparada com CAP 30/45.

20	1.5	8090	3588	8851	23,9
20	3	9487	3560	10133	20,5
20	10	11555	3332	12026	16,1
20	15	12414	3119	12800	14,1
20	25	13657	2956	13974	12,2
20	30	14179	2861	14466	11,4
25	1.5	4852	3257	5844	33,8
25	3	6188	3500	7109	29,5
25	10	8870	3590	9570	22,0
25	15	9811	3488	10413	19,5
25	25	11102	3420	11617	17,1
25	30	11654	3373	12134	16,1
30	1.5	2820	2572	3817	42,3
30	3	3856	3004	4888	37,9
30	10	6062	3498	6999	30,0
30	15	6970	3557	7826	27,0
30	25	8194	3664	8976	24,1
30	30	8691	3690	9442	23,0
35	1.5	1772	1937	2627	47,2
35	3	2360	2344	3327	44,7
35	10	4087	3107	5134	37,2
35	15	4887	3309	5902	34,1
35	25	5998	3570	6981	30,8
35	30	6462	3663	7429	29,6
40	1.5	1302	1404	1918	46,0
40	3	1466	1662	2218	48,1
40	10	2352	2361	3333	45,0
40	15	2843	2631	3874	42,7
40	25	3594	3028	4700	40,1
40	30	3912	3210	5061	39,4
45	1.5	787	560	1327	37,6
45	3	840	737	1690	43,9
45	10	1190	1286	2241	49,1
45	15	1635	1899	2507	49,0
45	25	1921	2217	2934	49,0
45	30	2133	2395	3207	48,3

APÊNDICE B.3 – Resultados do ensaio de módulo complexo para a mistura asfáltica preparada com CAP 50/70.

Temperatura	Frequencia	E1	E2	E*	ϕ
°C	Hz	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
-10	1.5	19243	1972	19344	5,8
-10	3	19963	1761	20041	5,0
-10	10	21064	1302	21105	3,5
-10	15	21502	980	21524	2,6
-10	25	22299	752	22313	1,9
-10	30	22739	576	22748	1,4
-5	1.5	18552	2150	18676	6,6
-5	3	19349	1926	19445	5,7
-5	10	20535	1457	20587	4,0
-5	15	21005	1140	21036	3,1
-5	25	21844	896	21863	2,3
-5	30	22290	716	22303	1,8
0	1.5	16767	2560	16962	8,7
0	3	17731	2329	17884	7,5
0	10	19192	1835	19280	5,4
0	15	19730	1539	19790	4,4
0	25	20661	1273	20701	3,5
0	30	21123	1110	21154	3,0
5	1.5	13806	3153	14163	12,8
5	3	15026	2922	15309	11,0
5	10	16953	2424	17127	8,1
5	15	17641	2102	17767	6,8
5	25	18692	1875	18787	5,7
5	30	19197	1705	19274	5,1
10	1.5	11021	3539	11577	17,8
10	3	12463	3382	12915	15,2
10	10	14723	2936	15013	11,3
10	15	15518	2651	15744	9,7
10	25	16677	2441	16856	8,3
10	30	17227	2298	17381	7,6
15	1.5	7255	3642	8120	26,6
15	3	8767	3691	9514	22,8
15	10	11413	3495	11937	17,0
15	15	12313	3297	12748	15,0
15	25	13609	3165	13973	13,1
15	30	14174	3062	14502	12,2

Continuação: APÊNDICE B.3 – Resultados do ensaio de módulo complexo para a mistura asfáltica preparada com CAP 50/70.

Temperatura	Frequencia	E1	E2	E*	ϕ
°C	Hz	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
20	1.5	3874	2995	4899	37,7
20	3	5181	3370	6183	33,1
20	10	7833	3688	8660	25,2
20	15	8803	3653	9533	22,5
20	25	10182	3673	10827	19,8
20	30	10736	3653	11342	18,8
25	1.5	2085	2125	2978	45,4
25	3	2857	2574	3847	42,0
25	10	4978	3344	5999	33,9
25	15	5862	3505	6832	30,9
25	25	7116	3729	8036	27,7
25	30	7641	3794	8532	26,4
30	1.5	1380	1544	2073	47,4
30	3	1673	1844	2491	47,5
30	10	2812	2604	3834	42,8
30	15	3420	2878	4471	40,1
30	25	4370	3290	5472	37,0
30	30	4697	3398	5799	35,9
35	1.5	1008	983	1412	42,6
35	3	1109	1201	1637	46,5
35	10	1728	1868	2546	47,1
35	15	2244	2311	3223	45,8
35	25	2806	2710	3902	44,0
35	30	3071	2899	4225	43,4
40	1.5	653	466	808	33,1
40	3	773	608	984	37,5
40	10	1003	1057	1457	46,6
40	15	1185	1310	1767	48,0
40	25	1488	1746	2294	49,7
40	30	1845	2142	2827	49,3

APÊNDICE C

APÊNDICE C.1– Densidade de energia dissipada do ensaio de módulo complexo, mistura CAP 10/20 (J/m^3).

	1.5Hz	3Hz	10Hz	15Hz	25Hz	30Hz
(-) 10°C	4,19	3,58	1,95	1,76	1,00	0,97
(-) 5°C	4,45	3,81	2,17	1,94	1,11	0,97
0°C	5,64	4,90	3,14	1,96	1,22	0,94
5°C	7,48	6,66	4,77	3,56	2,19	1,57
10°C	9,28	8,44	6,47	5,16	3,93	3,38
15°C	11,19	10,37	8,42	7,03	6,02	5,21
20°C	13,30	12,52	10,73	9,55	8,54	7,85
25°C	14,53	14,10	12,66	11,64	10,86	10,28
30°C	14,98	15,04	14,30	13,40	13,02	12,62
35°C	13,69	14,57	15,15	14,84	14,80	14,67
40°C	11,34	12,78	14,69	14,96	15,49	15,73
45°C	8,15	9,52	12,26	13,08	14,32	14,87

APÊNDICE C.2–Densidade de energia dissipada do ensaio de módulo complexo, mistura CAP 30/45 (J/m^3).

	1.5Hz	3Hz	10Hz	15Hz	25Hz	30Hz
(-) 10°C	6,26	5,40	3,48	1,99	1,22	1,27
(-) 5°C	6,62	5,77	3,86	2,33	1,41	1,37
0°C	8,84	7,83	5,66	4,06	3,00	2,15
5°C	11,47	10,29	7,91	6,33	5,24	4,35
10°C	14,09	12,90	10,40	8,82	7,74	6,95
15°C	16,30	15,34	12,92	11,51	10,41	9,59
20°C	17,66	17,56	16,48	15,43	14,65	14,18
25°C	15,90	17,15	17,69	17,21	16,90	16,68
30°C	12,43	14,61	17,14	17,46	18,04	18,18
35°C	9,24	11,28	15,13	16,16	17,50	17,97
40°C	6,57	7,87	11,36	12,72	14,72	15,63
45°C	3,75	5,61	8,09	9,06	10,65	11,54

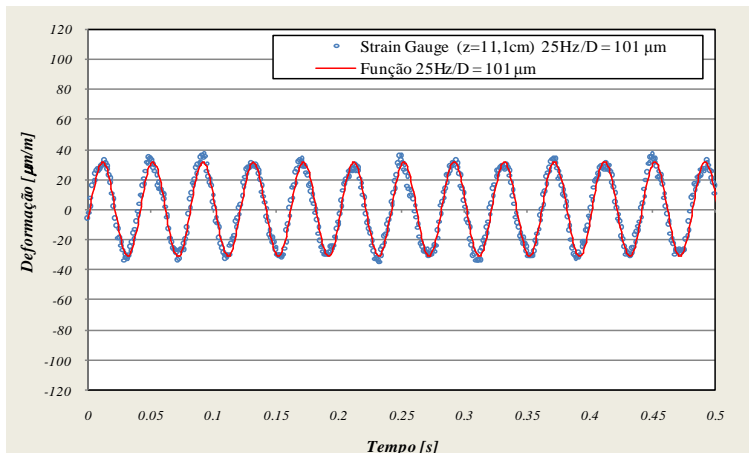
APÊNDICE C.3–Densidade de energia dissipada do ensaio de módulo complexo, mistura CAP 50/70 (J/m³).

	1.5Hz	3Hz	10Hz	15Hz	25Hz	30Hz
(-) 10°C	9,81	8,76	6,49	4,88	3,75	2,87
(-) 5°C	10,69	9,58	7,25	5,67	4,46	3,57
0°C	12,72	11,58	9,13	7,66	6,34	5,53
5°C	15,63	14,50	12,04	10,45	9,33	8,48
10°C	17,50	16,74	14,57	13,16	12,13	11,42
15°C	17,91	18,20	17,29	16,32	15,69	15,18
20°C	14,57	16,48	18,15	18,01	18,14	18,06
25°C	10,19	12,45	16,35	17,18	18,33	18,67
30°C	7,29	8,79	12,60	13,98	16,06	16,61
35°C	4,48	5,57	8,91	11,13	13,13	14,08
40°C	2,16	2,61	4,84	6,11	8,30	10,29

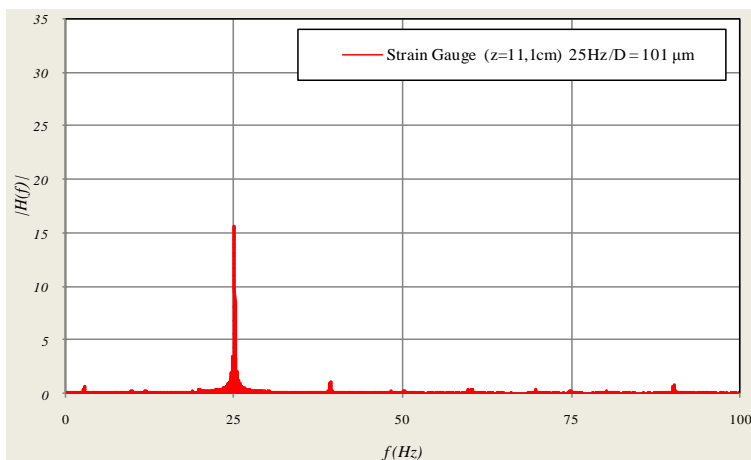
APÊNDICE D

Deformação dos corpos de prova padrão para aferição

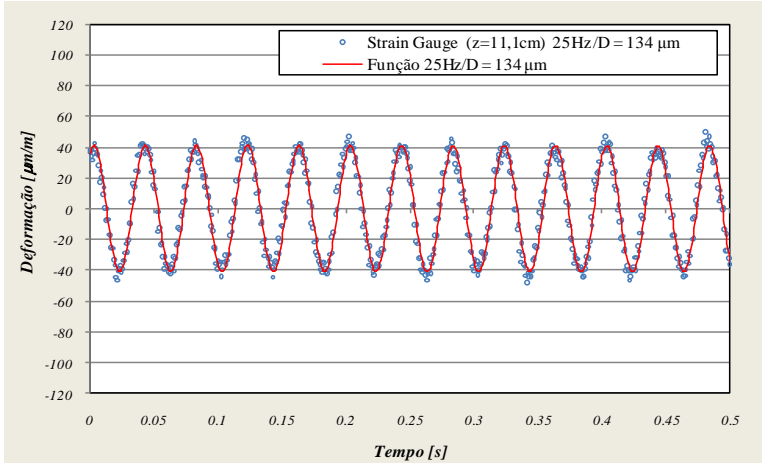
APÊNDICE D.1– Sinal de deformação no tempo medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ e deslocamento no topo de $101\mu\text{m}$ e na frequência de 25Hz (a) Sinal de deformação no tempo (b) espectro de frequências.



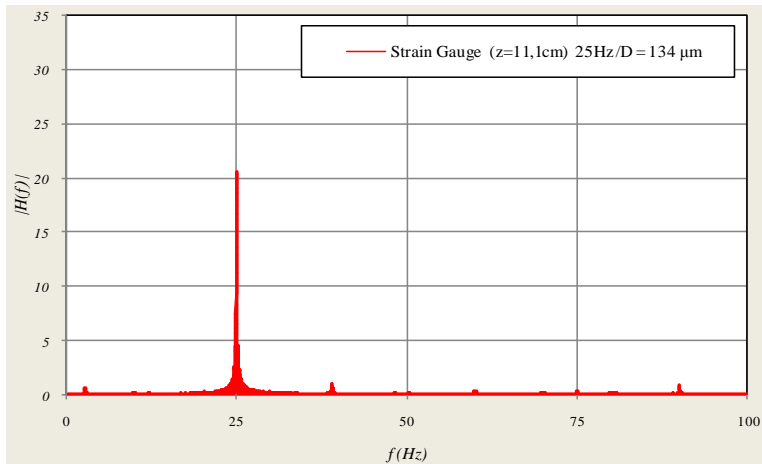
APÊNDICE D.2–espectro de frequência medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ e deslocamento no topo de $101\mu\text{m}$ e na frequência de 25Hz .



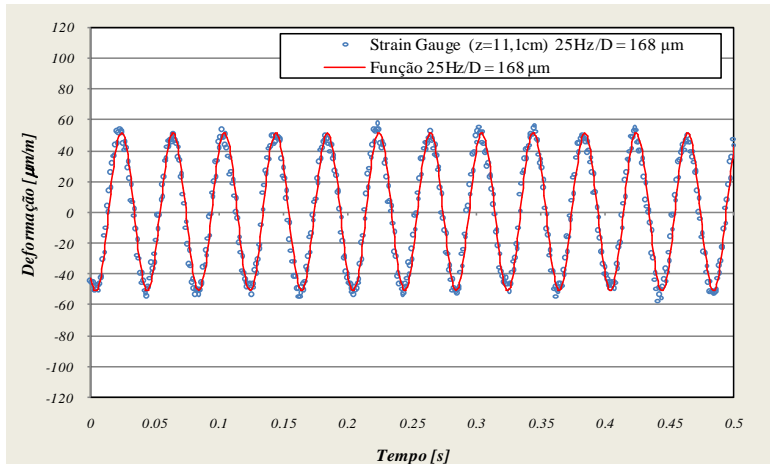
APÊNDICE D.3 Sinal de deformação no tempo medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ para um deslocamento no topo de $134\mu\text{m}$ e 25Hz



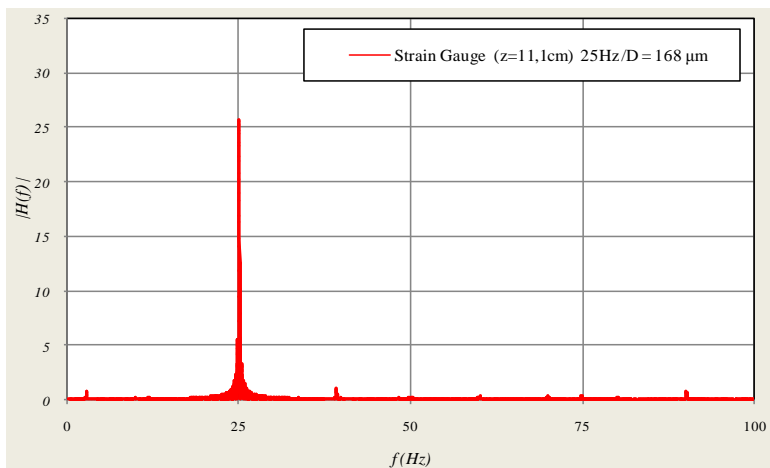
APÊNDICE D.4—Espectro de frequência medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ para um deslocamento no topo de $134\mu\text{m}$ e 25Hz



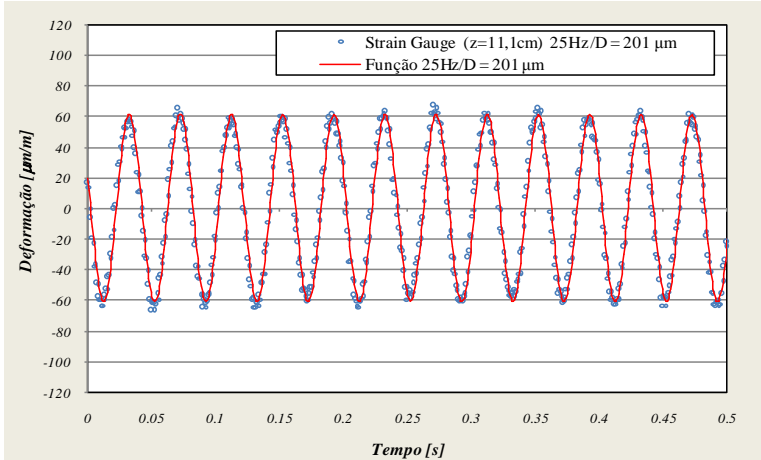
APÊNDICE D.5– Sinal de deformação no tempo medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ para um deslocamento no topo de $168\mu\text{m}$ e 25Hz .



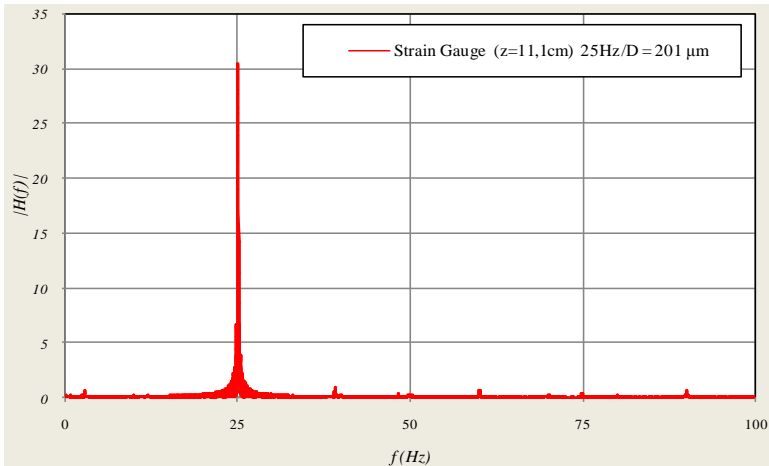
APÊNDICE D.6–Espectro de frequência medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ para um deslocamento no topo de $168\mu\text{m}$ e 25Hz .



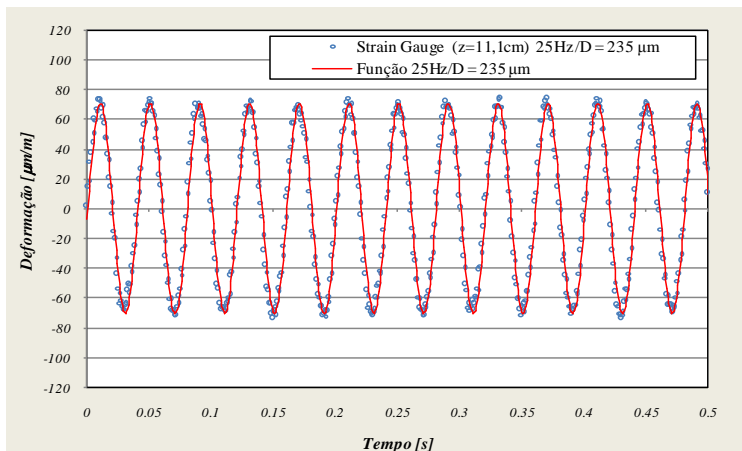
APÊNDICE D.6– Sinal de deformação no tempo medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ para um deslocamento no topo de $201\ \mu\text{m}$ e 25Hz .



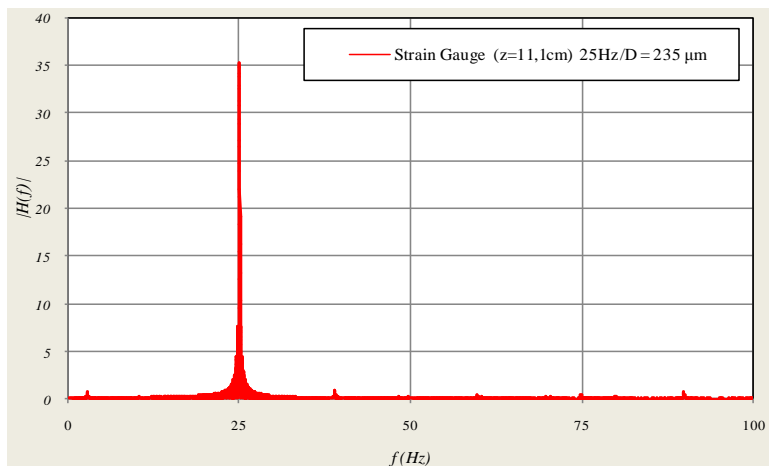
APÊNDICE D.7–Espectro de frequência medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ para um deslocamento no topo de $201\ \mu\text{m}$ e 25Hz .



APÊNDICE D.8— Sinal de deformação no tempo medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ para um deslocamento no topo de $235\mu\text{m}$ e 25Hz .



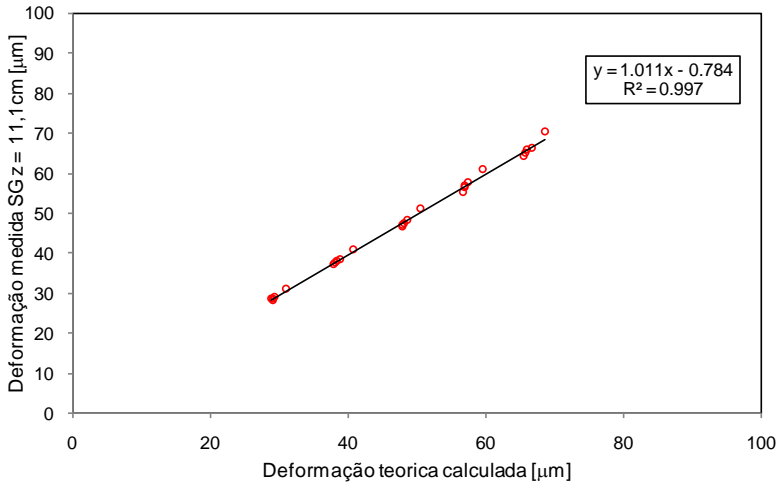
APÊNDICE D.9—Espectro de frequência medida sobre corpos de prova de aço a uma altura $z = 11,1\text{cm}$ para um deslocamento no topo de $235\mu\text{m}$ e 25Hz .



APÊNDICE D.9 – Deformação teórica calculada e medida Strain Gage (SG).

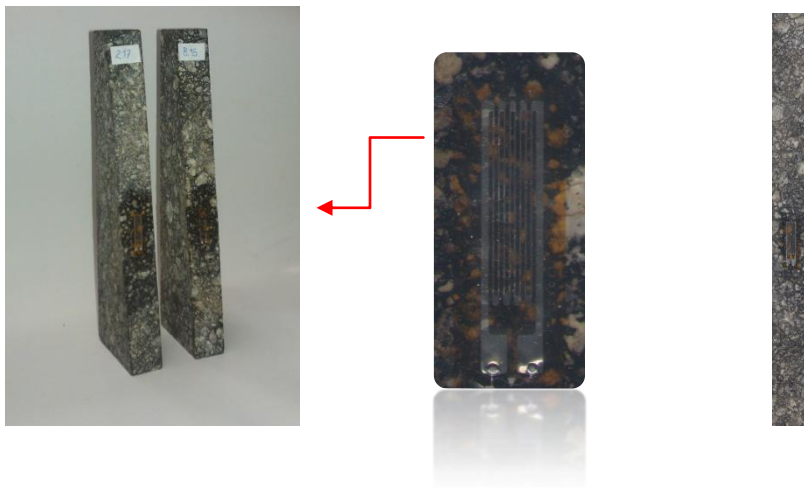
D	F medida	Frequência	ϵ (z = 11,1cm) calculada	ϵ (z = 11,1cm) medida SG	M (z = 11,1cm) calculado
[μm]	[N]	[Hz]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[N.m]
101	37.5	25	30.99	31.27	5.47
133	49.1	25	40.64	41.09	7.17
168	61.1	25	50.57	51.24	8.92
201	72.0	25	59.58	61.01	10.51
235	83.0	25	68.63	70.54	12.11

APÊNDICE D.10 – Correlação entre a deformação medida e deformação calculada

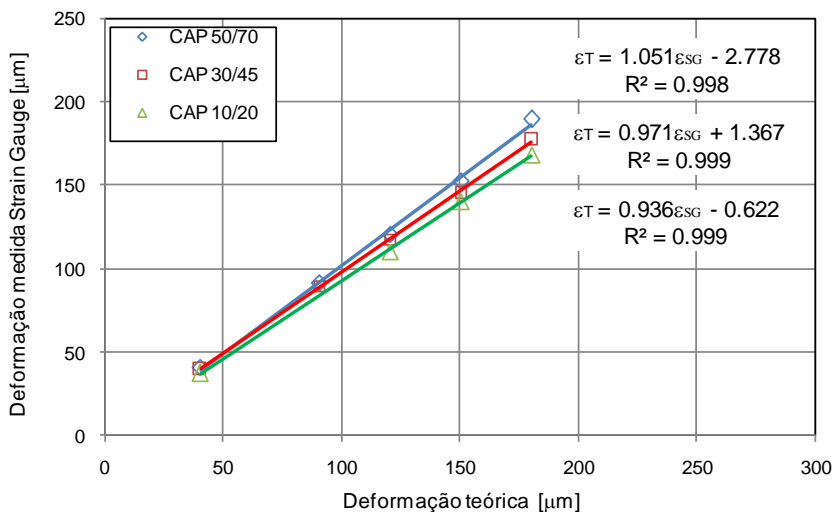


APÊNDICE E

Medida da deformação corpos de prova de concreto asfáltico
 APÊNDICE E.1 – Instrumentação dos corpos de prova de concreto asfáltico



APÊNDICE E.2– Correlação entre a deformação teórica e a deformação medida com Strain Gage na temperatura de 20°C CAP10/20, CAP30/45 CAP50/70.



APÊNDICE F

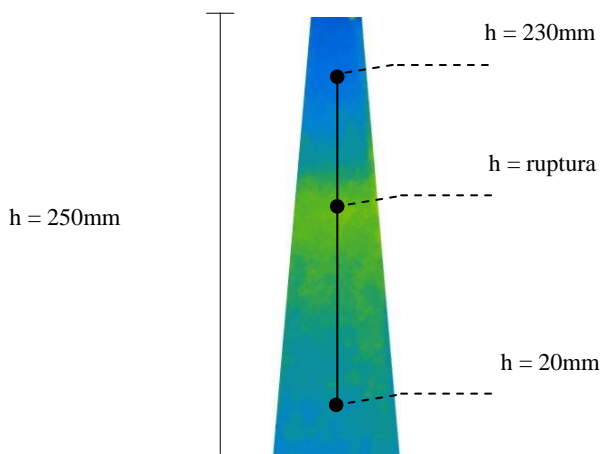
Análise a partir do aquecimento por Termografia e energia dissipada

O auto-aquecimento do corpo de prova se produz devido ao calor gerado pela energia dissipada, este aumento de temperatura da-se durante a fase I do ensaio de fadiga e é maior na zona de maior concentração de tensões e momento máximo e menor nas extremidades do corpo de prova.

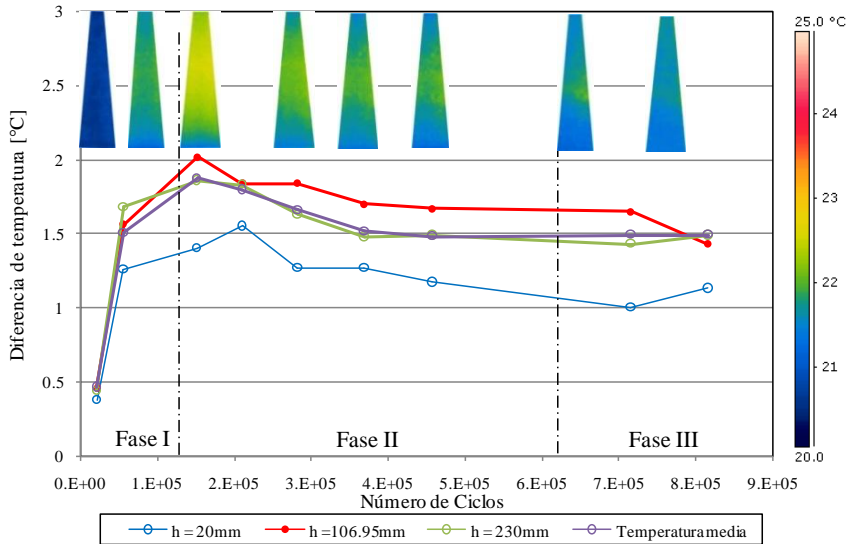
Para as dimensões dos corpos de prova ensaiados a altura de ruptura teórica deve ocorrer a 111,11mm a qual pode variar devido à heterogeneidade do corpo de prova e à geometria.

As Imagens foram registradas com câmara infravermelha (*Infrared Camera FLIR B400*). Apêndice F1 é ilustrado temperatura do ensaio de fadiga realizado a 20°C.

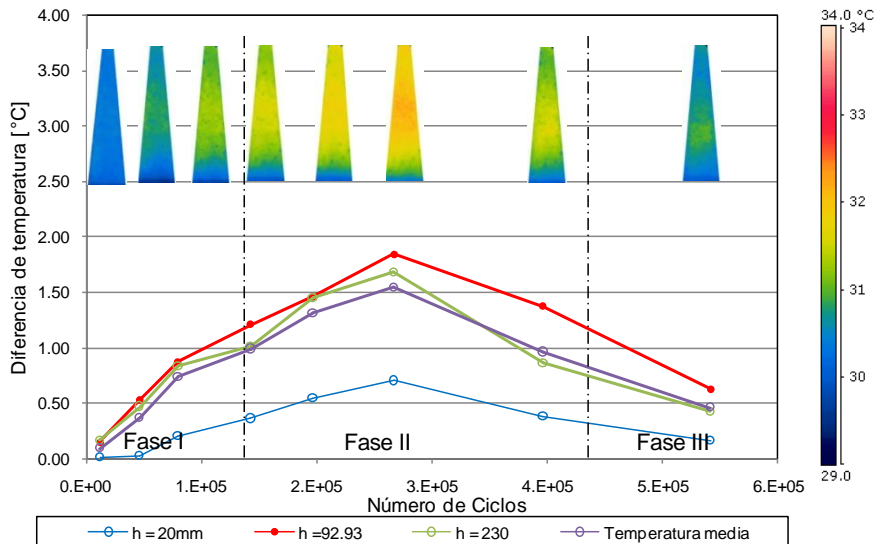
APÊNDICE F.1 – Alturas de medidas com câmara infravermelha.



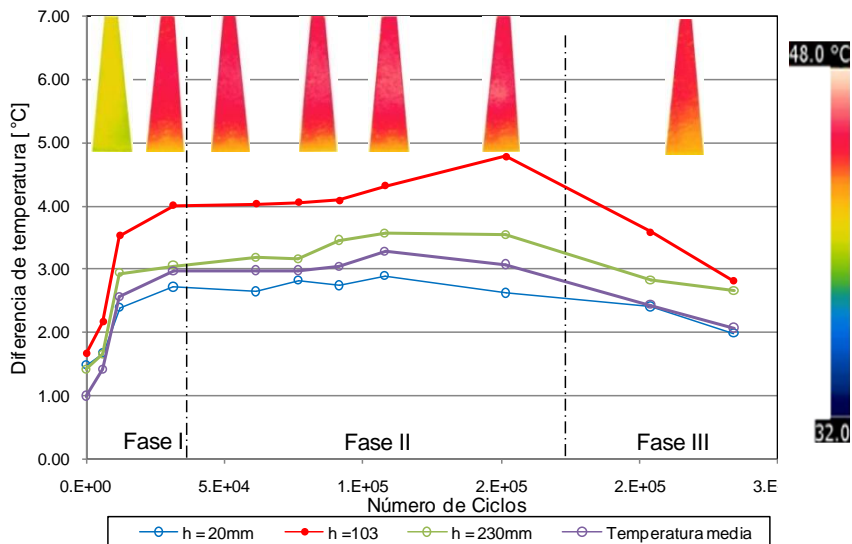
APÊNDICE F.2 – Incremento da temperatura como número de ciclos a 20°C e 180µm, mistura com ligante asfáltico CAP 10/20.



APÊNDICE F.2– Incremento da temperatura com o número de ciclos a 30°C e 150µm, mistura EME, – 2 CAP 10/20.



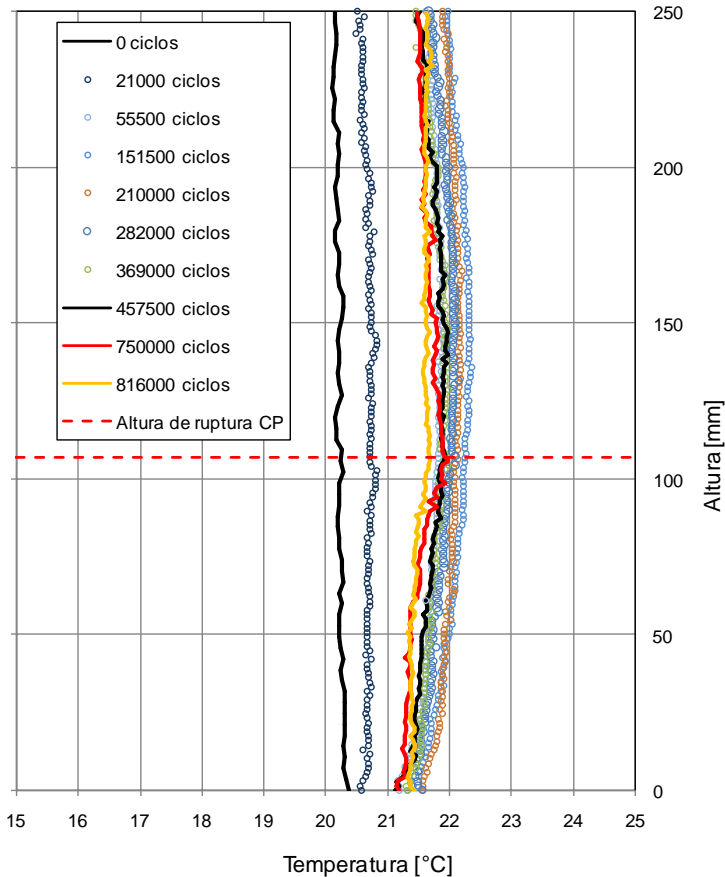
APÊNDICE F.3– Incremento da temperatura com o número de ciclos a 40°C e 210µm, mistura EME, – 2 CAP 10/20.



Fonte: Autor.

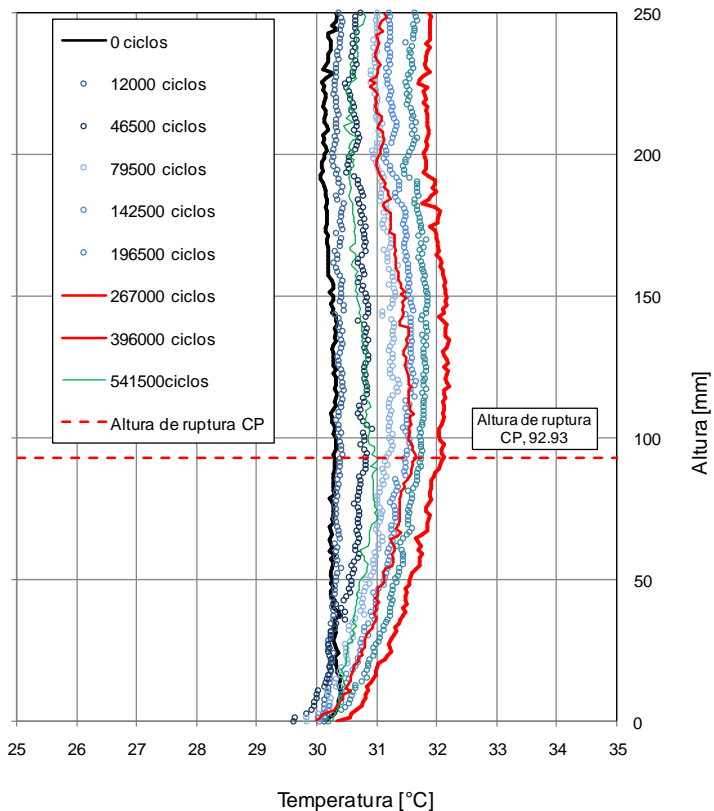
No Apêndice F.4 é ilustrado o aumento da temperatura no perfil vertical do corpo de prova para a temperatura de 20°C, no início do ensaio de fadiga a temperatura média é igual a 20,22°C, na medida em que o número de ciclos aumenta a temperatura também aumenta em todo o corpo de prova concentrando o calor na região de ruptura. Observa-se que próximo dos 151500 ciclos a temperatura é máxima com um valor de 22,10°C e aumento de temperatura de 1,88°C.

APÊNDICE F.4–Perfil de temperatura do corpo de prova no eixo central medido por termografia infravermelha a 150µm e 20°C, mistura com CAP 10/20.



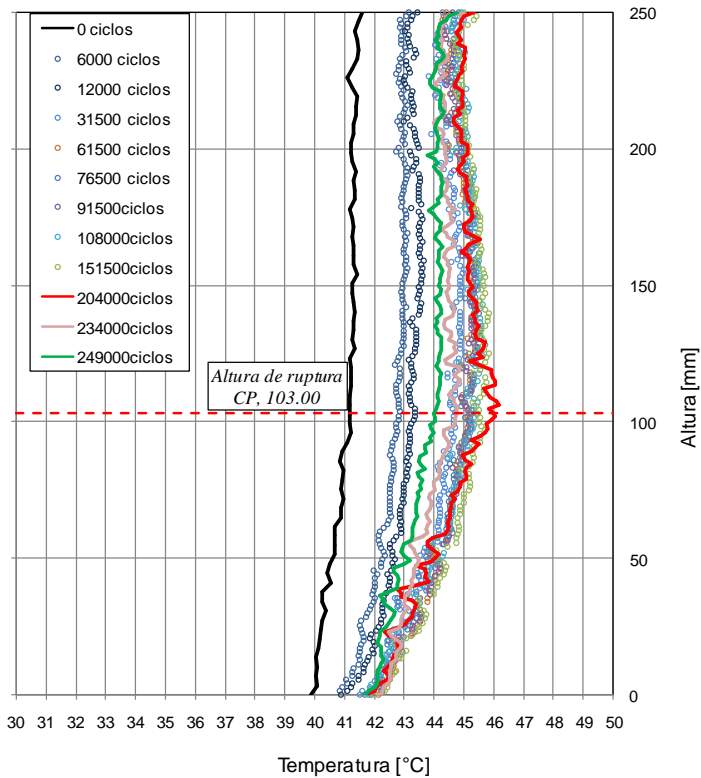
No Apêndice F.5 é ilustrado o perfil vertical de temperaturas no eixo do corpo de prova para a temperatura de 30°C, observa-se que na base do corpo de prova o incremento de temperatura é menor, na medida em que se aproxima à zona de ruptura a temperatura vai aumentando até alcançar o valor máximo, depois da linha de ruptura, observa-se também diferenças na distribuição da temperatura provavelmente pela convecção do calor.

APÊNDICE F.5–Perfil de temperatura do corpo de prova no eixo central medido por termografia infravermelha a 150 μ m e 30°C, mistura CAP 10/20



No Apêndice F.6, é ilustrado o perfil do aumento da temperatura nas elevadas temperaturas 40°C, observa-se que fica mais acentuada a variação da temperatura até chegar à zona de ruptura. Na base a temperatura aumenta, e na medida em que se aproxima a zona de ruptura à temperatura vai aumentando até a região de máxima concentração de tensões, a ruptura para o corpo de prova analisado aconteceu aproximadamente a 103 mm de altura.

APÊNDICE F.6–Perfil de temperatura do corpo de prova no eixo central medido por termografia infravermelha a 210µm e 40°C, mistura CAP 10/20



APÊNDICE G

APÊNDICE G.1 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 10/20– 10°C.

CP	Deformação	Vv	N ciclos
N°	(mm)	%	(50% F)
9.5	150	2,60	3001500
9.23	150	2,85	1396500
2.24	150	2,71	6048000
13.12	150	2,,58	5233500
12.14	150	2,28	2482500
12.16	150	2,21	2413500
12.21	180	2,49	351000
11.15	180	2,79	514500
9.19	180	2,66	732000
2.9	180	2,81	1066500
13.19	180	2,68	855000
14.1	180	2,95	1095000
11.1	180	2,04	726000
9.13	210	2,11	384000
9.2	210	3,13	370500
12.8	210	2,43	414000
14.23	210	2,06	772500
9.24	210	2,68	277500
12.13	210	2,27	267000

APÊNDICE G.2 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 10/20– 20°C.

CP	Deformação	Vv	N ciclos
Nº	(µm)	(%)	(50% F)
12.9	120	2,83	3990000
9.11	120	2,80	1599000
10.16	120	2,53	1497000
11.17	150	2,30	1098000
12.2	150	2,68	1230000
13.17	150	2,86	1227000
9.6	150	2,58	1159500
12.19	150	2,33	1161000
10.21	150	2,28	649500
12.12	180	2,64	282000
14.6	180	2,73	400500
13.15	180	2,49	246000
11.5	180	2,89	313500
9.14	180	2,30	211500
2.11	210	2,59	237000
12.10	210	2,77	108000
9.3	210	2,63	117000
11.7	210	2,47	108000

APÊNDICE G.3 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 10/20– 30°C.

CP	Deformação (μm)	Vv (%)	N ciclos (50% F)
11.14	120	2,83	1275000
10.10	120	2,92	1662000
13.1	120	2,45	2160000
14.17	120	3,02	2616000
13.11	120	2,67	1866000
13.23	120	2,81	939000
10.17	150	2,57	408000
10.6	150	2,45	396000
11.11	150	2,85	424500
11.16	150	2,21	469500
9.8	150	2,21	223500
11.13	150	2,23	448500
11.8	180	2,25	214500
9.21	180	2,67	150000
14.12	180	2,05	271500
14.4	180	2,28	180000
13.7	180	2,34	112500
13.6	180	2,48	126000

APÊNDICE G.4 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 10/20– 40°C.

CP	Deformação	Vv	N ciclos
Nº	(µm)	(%)	(50% F)
11.24	120	2,49	2698500
9.1	120	2,57	1377000
12.4	120	2,31	1491000
12.15	120	2,87	1023000
13.5	150	2,46	1911000
13.14	150	2,28	1057500
14.5	150	2,95	1159500
11.10	150	2,68	736500
10.11	150	2,07	978000
10.15	180	2,83	310500
10.19	180	2,19	171000
10.1	180	2,58	357000
14.8	210	2,08	141000
14.7	210	2,74	169500
14.20	210	3,12	289500
14.22	210	2,07	162000
11.21	210	2,59	237000
13.3	210	2,86	165000
10.22	210	2,14	166500

APÊNDICE G.5 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 30/45– 10°C.

CP	Deformação (μm)	Vv (%)	N ciclos (50% F)
2.1	90	2,83	2374500
1.1	90	2,79	3075000
1.11	90	2,35	3613500
2.15	90	2,12	4123500
4.8	120	2,21	562500
1.17	120	2,49	1054500
1.5	120	3,02	1324500
2.3	120	2,33	1009500
3.14	150	2,10	469500
1.14	150	2,98	342000
3.2	150	2,91	379500
2.5	150	2,14	402000
4.23	150	2,80	340500
1.23	180	2,66	151500
4.16	180	2,45	108000
1.15	180	2,58	139500
2.8	180	2,70	174000
2.4	180	2,10	121500
2.10	180	2,50	144000

APÊNDICE G.6 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 30/45– 20°C.

CP	Deformação (μm)	V _v (%)	N ciclos (50% F)
4.12	90	2,86	1764000
3.12	90	2,77	960000
3.7	90	2,81	966000
4.24	90	2,58	1323000
4.9	90	2,98	862500
4.3	90	2,62	2133000
4.17	120	2,48	405000
1.12	120	2,41	792000
2.23	120	2,54	799500
4.14	120	2,15	328500
2.13	120	2,74	936000
3.20	120	2,69	481500
4.20	150	2,71	210000
3.16	150	2,28	64500
2.21	150	2,78	268500
3.21	150	2,45	166500
3.15	150	2,47	175500
2.7	150	2,39	216000
1.24	180	2,80	99000
2.20	180	2,76	102000
1.22	180	2,56	102000
2.14	180	2,35	117000

APÊNDICE G.7 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 30/45– 30°C.

CP	Deformação	Vv	N ciclos
Nº	(μm)	(%)	(50% F)
4.19	90	2,52	2358000
3.8	90	3,13	1483500
1.10	90	3,24	1887000
1.21	90	2,40	1570500
1.6	120	2,56	1222500
4.4	120	2,33	838500
3.4	120	2,29	1065000
3.18	120	2,99	522000
4.5	120	2,78	610500
1.8	150	2,23	291000
1.7	150	3,10	381000
3.13	150	2,42	246000
1.9	150	2,05	328500
3.24	180	2,64	100500
1.19	180	2,45	163500
2.19	180	3,04	162000
4.6	180	2,05	105000
2.12	180	2,82	171000

APÊNDICE G.8 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 50/70– 0°C.

CP	Deformação (μm)	V _v (%)	N ciclos (50% F)
8.21	120	2,41	1240500
8.11	120	2,24	1903500
7.14	120	2,61	1495500
7.24	120	2,07	1819500
8.3	120	2,46	943500
8.13	120	2,91	909000
8.12	150	2,75	927000
8.22	150	2,69	415500
8.18	150	2,39	822000
8.19	150	2,94	1071000
8.1	150	2,93	570000
7.16	180	2,09	294000
8.6	180	2,45	258000
8.24	180	2,13	283500
8.23	180	3,01	306000
8.10	180	2,76	381000
8.9	180	2,66	297000
8.20	180	2,90	204000

APÊNDICE G.9 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 50/70– 10°C..

CP	Deformação	Vv	N ciclos
Nº	(μm)	(%)	(50% F)
5.11	90	2,62	1999500
5.12	90	2,45	2314500
5.13	90	2,82	2346000
7.1	90	2,28	2073000
7.2	90	2,98	2001000
6.20	90	2,50	2230500
5.3	120	2,92	361500
5.20	120	2,38	322500
7.3	120	2,69	1138500
5.4	120	2,39	739500
6.11	120	3,28	796500
6.23	120	2,45	319500
6.9	120	3,10	880500
6.3	120	3,01	1165500
7.8	150	2,65	303000
6.7	150	2,26	390000
6.22	150	2,60	319500
6.16	150	2,62	270000
5.1	150	2,55	82500
5.6	150	2,74	205500

APÊNDICE G.10 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 50/70– 20°C.

CP	Deformação	Vv	N ciclos
Nº	(µm)	(%)	(50% F)
5.8	90	2,66	1056000
7.19	90	2,65	1563000
8.2	90	2,68	3276000
8.5	90	2,28	3082500
6.14	90	2,46	3754500
6.13	90	2,01	2332500
5.7	120	2,77	700500
5.23	120	2,93	811500
6.19	120	2,74	612000
7.9	120	2,59	513000
5.19	120	2,16	399000
7.12	120	2,66	519000
5.5	150	2,36	238500
6.17	150	2,34	360000
7.7	150	2,57	201000
5.9	150	2,85	298500
6.8	150	2,28	219000
7.4	150	2,13	166500
7.6	150	2,04	280500
6.2	180	2,70	117000
5.2	180	3,12	78000

APÊNDICE G.11 – Resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica preparada com CAP 50/70– 30°C..

CP	Deformação	Vv	N ciclos
Nº	(μm)	(%)	(50% F)
5.24	150	2,94	987000
6.21	150	2,64	1417500
5.16	150	2,34	1245000
7.21	150	2,78	534000
6.15	150	2,90	2215500
7.11	150	2,51	904500
7.10	180	2,44	712500
7.18	180	2,01	349500
5.17	180	2,82	403500
5.18	180	2,60	264000
6.4	180	2,97	184500
5.15	180	2,95	210000
7.20	210	3,01	184500
5.14	210	2,43	379500
6.1	210	2,90	145500
7.17	210	3,03	246000
7.22	210	2,51	124500
7.23	210	2,84	123000

