

**Gustavo Garcia Otto**

**Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo  
Complexo**

**Florianópolis;  
2009**

**Gustavo Garcia Otto**

**Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo**

**Dissertação 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 Mestre em Engenharia Civil.**

**Professor Orientador Leto Momm**

**Florianópolis;  
2009**

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da  
Universidade Federal de Santa Catarina

- 091 Otto, Gustavo Garcia  
Misturas asfálticas mornas [dissertação] : verificação da fadiga e do módulo complexo / Gustavo Garcia Otto ; orientador, Leto Momm. - Florianópolis, SC, 2009. 179 f.: il., tabs., grafs., mapas
- Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Inclui bibliografia
1. Engenharia civil. 2. Misturas asfálticas mornas zeólita. I. Momm, Leto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

# **Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo**

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, especialidade ENGENHARIA CIVIL, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Leto MOMM - Orientador  
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Prof. Dr. Glicério Trichês  
Coordenador do Curso do PPGEC – UFSC

Comissão Examinadora:

Dr<sup>a</sup>. Leni Figueiredo Mathias Leite  
PETROBRAS

Prof. Dr. Amir Matar Valente  
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira  
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

**Florianópolis;  
2009**



Dedico a minha família por todo o apoio e compreensão nos momento mais difíceis da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Simone Paduan, minha companheira de todos os momentos, que cuida de mim e me incentiva no meu caminho. A minha mãe, Susana Garcia Otto, e meu pai, Sérgio da Silva Otto, que me cuidaram e me apoiaram em toda esta jornada. Aos meus irmãos, Rodrigo e Lunciana Garcia Otto. Aos meus familiares avós, avôs, tias, tios e primos que me ajudaram durante minha vida.

Agradeço ao Prof. Leto Momm, meu amigo desde época dos projetos CNPq. Aos colegas do Laboratório de Pavimentação Breno, Yader, Márcio, Carlos entre outros.

A Dr. Leni Figueiredo Mathias Leite pela pessoa simpática que é, e por se dispor a participar da banca avaliadora. Ao Prof. Dr. Amir Matar Valente, uma pessoa com incrível disposição. Ao Prof. Dr. Orlando Martini de Oliviera pelo apoio.

Agradeço aos amigos que acreditam em mim.

Agradeço a CAPES, que financia o aperfeiçoamento de pessoal de nível superior, pela bolsa de estudos.

A Empresa Petrobras que fez a doação do ligante asfáltico utilizado durante o estudo.

Ao Sidinei Gobbi do Departamento de Técnico da empresa Celta Brasil, que possibilitou o estudo das misturas asfálticas mornas com a doação da zeólita empregada.

## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.2.1 Geral.....	2
1.2.2 Específico.....	2
1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA.....	5
1.5 LIMITAÇÕES .....	6
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	7
<b>2 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS.....</b>	<b>9</b>
2.1 APRESENTAÇÃO .....	9
2.2 MISTURAS BETUMINOSAS.....	9
2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS - HISTÓRICO .....	11
2.4 BENEFÍCIO POTENCIAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS .....	13
2.4.1 Emissões.....	13
2.4.2 Viscosidade.....	15
2.4.3 Consumo de Energia .....	15
2.5 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS .....	16
2.6 ZEÓLITA ASPHA-MIN .....	18
2.7 CERA SASOBIT.....	23
2.8 CERA ASPHALTAN B .....	28
2.9 EVOTHERM .....	29
2.10 ZEÓLITAS E O BRASIL.....	31
2.10.1 Mineralogia.....	32
2.10.2 Geologia.....	35
2.10.3 Zeólitas em rochas sedimentares no Brasil .....	37
<b>3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....</b>	<b>40</b>
3.1 APRESENTAÇÃO .....	40

3.1.1	Solicitação nos Pavimentos Asfálticos .....	40
3.2	O MÓDULO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	44
3.2.1	Comportamento das misturas betuminosas .....	45
3.3	O MÓDULO COMPLEXO.....	46
3.3.1	Os Diferentes Tipos de Ensaio Existentes.....	48
3.3.2	Apresentação dos Resultados .....	50
3.3.3	Parâmetros Relevantes ao Módulo Complexo .....	56
3.4	FENÔMENO DE DEGRADAÇÃO POR FADIGA.....	58
3.4.1	A Fadiga das Misturas Asfálticas .....	60
3.4.2	Ensaio de Fadiga e Dimensionamento .....	62
3.4.3	Tipos de Solicitação.....	63
3.4.4	Determinação do Tipo de Solicitação .....	64
3.4.5	Freqüência e Temperatura de Ensaio .....	65
3.4.6	Critério de Ruptura .....	66
3.4.7	Mecanismo da Fadiga .....	67
3.4.8	Exploração dos Resultados .....	68
3.4.9	Parâmetros (Tensão ou Deformação).....	69
3.4.10	Influências Diversas .....	71
3.4.11	Principais Problemas.....	73
3.5	CONCLUSÕES.....	76
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>78</b>
4.1	APRESENTAÇÃO.....	78
4.2	MECANISMO DE FLEXÃO E OS TRAPEZÓIDES.....	79
4.3	MATERIAIS EMPREGADOS.....	82
4.3.1	Ligante Asfáltico .....	82
4.3.2	Zeólitas .....	83
4.3.3	Agregado Mineral e Distribuição Granulométrica.....	84
4.4	ENSAIO DE DOSAGEM MARSHALL.....	86
4.4.1	Ajuste do teor ótimo de betume .....	92
4.5	ENSAIO CÂNTABRO.....	93
4.6	ENSAIO LOTTMAN .....	95
4.7	COMPACTAÇÃO E CORTE DE PLACAS.....	99
4.7.1	Mistura .....	100
4.7.2	Compactação.....	105

4.7.3 Corte.....	109
4.8 TRIAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	113
4.9 ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO.....	117
4.9.1 A curva do espaço Black.....	119
4.9.2 Curva Cole-Cole.....	120
4.9.3 Curva Isócrona.....	121
4.9.4 Curva Isotérmica.....	121
4.9.5 Curva Frequência – Temperatura.....	122
4.10 ENSAIO DE FADIGA.....	123
<b>5 EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>130</b>
5.1 APRESENTAÇÃO.....	130
5.2 RESULTADOS DO ENSAIO LOTTMAN.....	130
5.3 RESULTADOS DO ENSAIO MÓDULO COMPLEXO.....	131
5.3.1 Curva Espaço Black.....	132
5.3.2 Curva Cole-Cole.....	133
5.3.3 Curva Isócrona.....	135
5.3.4 Curva Isotérmica.....	136
5.3.5 Curva Frequência-Temperatura.....	137
5.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE FADIGA.....	138
5.5 DIMENSIONAMENTO PARA PAVIMENTO MORNO.....	142
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>149</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>152</b>
<b>APÊNDICE A – Tabelas dos Resultados do Ensaio Marshall.....</b>	<b>156</b>
<b>APÊNDICE B – Preparação do Equipamento de Flexão Alternada para Ensaio de Módulo Complexo e Fadiga.....</b>	<b>158</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema dos ensaios da pesquisa.....	5
Figura 2 – Esquema de destilação do petróleo. ....	10
Figura 3 – Estrutura cristalina e face hexagonal de uma zeólita.....	18
Figura 4 – Alimentador e reservatório para zeólita Aspha-min. ....	20
Figura 5 – Introdução de umidade no agregado para o ensaio TSR. ....	22
Figura 6 – a) Sasobit em Flocos, b) Sasobit esferas.....	24
Figura 7 – Execução de superfície de rolamento com adição de Sasobit. ....	27
Figura 8 – Imagem térmica do material SEM adição de Sasobit.....	27
Figura 9 – Imagem termal do material COM adição de Sasobit.....	28
Figura 10 – Emissões provenientes das emissões Evothem e Mistura Quente.....	30
Figura 11 – Principais ocorrência de zeólitas em rochas sedimentares no Brasil.....	37
Figura 12 – Deformações no pavimento pela passagem de uma carga em movimento. ....	41
Figura 13 – Sinal de deformação longitudinal abaixo da camada de rolamento.....	42
Figura 14 – Sinal de deformação e decomposição em séries de Fourier.....	43
Figura 15 – Formas de sinais de tipos de sollicitação: (a) senoidal; (b) haversenoidal; (c) carregamento cíclico; (d) retangular. ....	44
Figura 16 – Isotérmica do módulo complexo.....	51
Figura 17 – Curva de Equivalência Freqüência/Temperatura. ....	52
Figura 18 – Translação gráfica das curvas isotérmicas.....	53
Figura 19 – Curva isócrona dos valores de módulo complexo.....	54
Figura 20 – Plano Cole-Cole.....	55
Figura 21 – Curva no Espaço de Black. ....	56
Figura 22 – Curva Wöhler .....	59
Figura 23 – Limite da Fadiga ou Resistência.....	60
Figura 24 – Resposta típica de um ensaio à fadiga, $\epsilon_6$ para $N_6 - 10^6$ ciclos.....	61
Figura 25 – Princípio do modelo de comportamento dos pavimentos asfálticos. ....	63
Figura 26 – Sinal de deformação longitudinal pela passagem de um veículo. ....	64
Figura 27 – Ensaio tensão controlada (a); Ensaio deformação controlado (b).....	66
Figura 28 – Evolução da amplitude da resposta segundo a sollicitação.....	68
Figura 29 – Imagem de dispositivo termográfico infravermelho em tons de verde. ....	74
Figura 30 – Dispositivo para o ensaio de flexão alternada. ....	79
Figura 31 – Mecanismo para ensaio de flexão alternada. ....	80

Figura 32 – Característica geométrica dos corpos trapezoidais.....	81
Figura 33 – Esquema de corte dos corpos de prova trapezoidal. ....	82
Figura 34 – Imagem por microscopia eletrônica e estrutura representativa da clinoptilolita. ....	84
Figura 35 – Distribuição granulométrica adotada.....	85
Figura 36 – Corpos de Prova Marshall ensaiados.....	87
Figura 37 – Prensa Marshall, determinação da estabilidade e fluência. ....	89
Figura 38 – Comparação entre os resultados Marshall das misturas Controle e Mornas. ....	91
Figura 39 – Comparação dos valores do ensaio Cântabro. ....	94
Figura 40 – Mosaico das fotos do ensaio Lottman.....	99
Figura 41 – Materiais granulares para uma placa, separados em bandejas. ....	102
Figura 42 – Ligante betuminoso em estufa na temperatura de mistura. ....	103
Figura 43 – Quantidade de zeólita para uma placa a 21% de umidade.....	103
Figura 44 – Misturador modificado para mistura da massa asfáltica. ....	104
Figura 45 – Mesa com compactador de placas do LCPC. ....	106
Figura 46 – Esquema de passagem do eixo da mesa compactadora vista em planta. ....	106
Figura 47 – Mosaico de Processo de compactação de placas.....	108
Figura 48 – Expansão volumétrica da massa após compactação, primeira placa. ....	109
Figura 49 – Equipamento de corte e mesa deslizante. ....	110
Figura 50 – Lógica de corte das placas. ....	111
Figura 51 – Serra circular e água para resfriamento. ....	111
Figura 52 – Plaqueta dos corpos de prova (quatro por vez). ....	112
Figura 53 – Corte das plaquetas dos corpos de prova. ....	113
Figura 54 – Trapézios finais cortados prontos para triagem.....	113
Figura 55 – Triagem dos corpos de prova. ....	114
Figura 56 – Colagem dos corpos de prova sobre os suportes metálicos. ....	117
Figura 57 – Curva no espaço Black com ângulo de fase (°) e norma do módulo (MPa). ....	119
Figura 58 – Curva Cole-Cole dos valores do módulo E1 e E2. ....	120
Figura 59 – Curva Isócrona com temperatura (°C) e norma do módulo (MPa). ....	121
Figura 60 – Curva Isotérmica com Freqüência (Hz) e norma do módulo (MPa). ....	122
Figura 61 – Curva Freqüência-Temperatura.....	123
Figura 62 – Quatro de oito corpos de prova para uma mesma deformação.....	125
Figura 63 – Sinal de um corpo de prova a def. de 150 µm, 10°C e 25 Hz. ....	126

Figura 64 – Curva de Fadiga para Mistura Asfáltica Morna com Zeólita. ....	128
Figura 65 – Representação dos resultados na Curva Espaço de Black.....	133
Figura 66 – Representação dos resultados na Curva Cole-Cole.....	134
Figura 67 – Representação dos resultados na Curva Isócrona. ....	135
Figura 68 – Representação dos resultados na Curva Isotérmica. ....	136
Figura 69 – Representação dos resultados na Curva Frequência-Temperatura.....	137
Figura 70 – Curva de Fadiga da mistura morna com adição de zeólita.....	139
Figura 71 – Curva de Fadiga da mistura morna controle (BARRA, 2009).....	139
Figura 72 – Comparação entre as curvas controle e zeólita. ....	141
Figura 73 – Estrutura de partida para dimensionamento.....	146
Figura 74 – Comparação entre os resultados de deformação. ....	147
Figura 75 – Estrutura final da mistura controle. ....	148
Figura 76 – Estrutura final da mistura com adição de zeólita.....	148



## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Detalhes da produção de Asfalto pista experimental. ....	16
Tabela 2 – Espécie de zeólitas naturais reconhecidas pela IMA até 1997, e respectivas fórmulas.....	35
Tabela 3 – Possíveis ocorrências de zeólitas no Brasil .....	39
Tabela 4 – Principais ensaios de módulo complexo existentes. ....	48
Tabela 5 – Comparação dos resultados obtidos nos ensaios à tensão controlada e à deformação controlada.....	70
Tabela 6 - Características físicas da clinoptilolita. ....	84
Tabela 7 – Curva granulométrica adotada. ....	85
Tabela 8 – Temperatura de mistura e compactação.....	88
Tabela 9 – Dados do ensaio de dosagem Marshall. ....	90
Tabela 10 – Resultados do Ensaio Cântabro para mistura controle e com adição de zeólita.....	94
Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração indireta. ....	98
Tabela 12 – Resultado da ação deletéria das misturas controle e com adição de zeólita.....	98
Tabela 13 – Material para preparo de uma placa (60x40x12 cm) com adição de zeólita. ....	101
Tabela 14 – Triagem dos corpos de prova para os ensaios.....	115
Tabela 15 – Dados do ensaio Módulo Complexo Mistura Morna com Zeólita.....	118
Tabela 16 – Resultados do ensaio a Fadiga com adição de zeólita, 10°C e 25 Hz. ....	127
Tabela 17 – Comparação dos resultados a ação deletéria pela água. ....	131
Tabela 18 – Comparação entre os resultados de Fadiga .....	141
Tabela 19 – Dados do Material Betuminoso. ....	143
Tabela 20 – Resultados das Deformações Admissíveis. ....	145
Tabela 21 – Valores de Deformação da Estrutura de Partida. ....	146
Tabela 22 – Valores de Espessura para Cada Camada e Deformação. ....	147

## RESUMO

O trabalho ocupa-se do estudo de misturas asfálticas mornas como alternativa menos agressiva ao meio ambiente. É uma pesquisa sobre o comportamento mecânico das misturas mornas com adição de zeólita para viabilidade de emprego no Brasil, sem comprometer o desempenho do pavimento. A pesquisa realiza-se em laboratório com os seguintes experimentos: dosagem das misturas asfálticas pelo procedimento Marshall; perda de massa por impacto, o ensaio Cântabro; adesividade por ação deletéria da umidade induzida (Lottman); análise da fadiga do material (NF-P-98-261-1); e determinação do Módulo Complexo (NF-P-98-260-1). Dois tipos de misturas são preparadas, uma de controle (agregado mineral mais ligante betuminoso CAP 50/70) e outra com adição de 0,3% de zeólita com 21% de umidade. Com um teor ótimo de betume de 4,86%, compactam-se placas de misturas asfálticas com adição de zeólita. Uma placa com período de descanso de uma hora e duas com período de três horas, devido a problemas com a água adsorvida pela zeólita. Extraem-se corpos de prova trapezoidais destas duas últimas placas. Analisa-se um conjunto de 28 corpos de prova quanto à fadiga, por solicitações sinusoidais repetidas a 25Hz e 10°C, e módulo complexo, com variação da frequência (1, 3, 10 e 30Hz) e variação de temperatura (-10, 0, 10, 15, 20, 30 e 40°C). No ensaio de Fadiga a mistura asfáltica morna com adição de zeólita demonstra menor suscetibilidade a variações do número de aplicação de solicitações e sua deformação para um milhão de ciclos é menor que a mistura controle. Nos resultados de Módulo Complexo a mistura morna apresenta maior suscetibilidade térmica, porém, maior valor absoluto da norma do módulo. No dimensionamento com em ambas misturas, com a mesma estrutura fictícia, a mistura morna apresenta maior espessura, em torno de 25% superior a controle.

**Palavras-chave:** Misturas asfálticas mornas; Misturas asfálticas mornas com zeólita; Zeólitas.

## ABSTRACT

The work deals with warm mix asphalt as environment less aggressive alternative. It's a research about the mechanical behavior of warm mixtures with zeolite addition for viability in Brazil without performance compromise. The following experiment procedures is conducted in laboratory: asphalt mix dosage with Marshall procedures; mass loss by impact, Cântabro test; resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage, Lottman test; complex modulus determination (NF-p-98-260-1); and, fatigue test (NF-p-98-261-1). Two types of mixtures are prepared, a control mix (mineral aggregate plus bitumen class CAP 50/70) and warm mix with zeolite addition by 0.3% in mass, with 21% of moisture contents. A warm mix plate was compacted with optimal content by 4.86% and added zeolite. One plate compacted with rest period of one hour and two plates with rest period of tree hour, due moisture release form zeolite mineral. A group of 28 trapezoid samples, extract from the warm mix plate, conduct in fatigue test, by repeated sinusoidal effort in a frequency of 25Hz and temperature of 10°C. Four more samples ware conducted in complex modulus test with a frequency variation (1, 3, 10 and 30Hz) and temperature variation (-10, 0, 10, 15, 20, 30 and 40°C). Fatigue test evidence that the warm mixture is less susceptible to grow of application efforts numbers and specific deformation in one millions cycles in compare with control mix. In the complex modulus test the warm mixture show more thermal susceptible, however, higher modulus value. In a pavement design with both mixtures, in an assumed structure, warm mix shows more thickness then control mix, about 25%.

**Key-words:** Warm mix asphalt, Warm mix asphalt with zeolite; Zeolite.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O planeta terra mostra sinais de que seu clima sofre com a alarmante interferência humana. “O aquecimento global é o maior desafio ambiental enfrentado pela humanidade”.

O quarto relatório do Grupo de Trabalho I do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) da ONU é contundente ao afirmar, com 90% de confiança, que as atividades humanas são a causa principal do aquecimento global observado nos últimos 50 anos e aponta o acúmulo de gases de efeito estufa, notadamente o dióxido de carbono, o metano e o óxido nitroso, cujas concentrações atmosféricas são as mais altas em pelo menos 650 mil anos de história do planeta, como os principais responsáveis. O relatório projeta que até o final do século XXI a temperatura média global pode subir de 2°C a mais de 4°C e o nível médio do mar aumentar entre 28 cm e 59 cm (VEJA, 2007, p.79).

Como uma tendência mundial, os governos da União Européia definiram como meta de redução de emissões de gás carbono na atmosfera em 15% no período de 1990 a 2010. Algumas mudanças climáticas já se tornaram inevitáveis, pois não é mais possível reverter totalmente o aquecimento global. As mudanças climáticas que podem ocorrer neste século irão afetar profundamente todos os habitantes e todas as formas de vida.

A tecnologia de Misturas Asfálticas Mornas se apresenta como um processo construtivo alternativo, por ser ecologicamente menos agressiva quando comparado com outras tecnologias, principalmente as misturas a quente (KOENDERS et al, 2000). Poucos processos e produtos tornaram-se disponíveis com capacidade de reduzir a temperatura pela qual o asfalto quente é misturado, sem comprometer o desempenho estrutural dos pavimentos. Estes novos produtos podem reduzir as temperaturas de produção em 40%. Diminuir a temperatura de mistura na usina significa, entre outras coisas, economizar custos com combustíveis ao contratante. Constatou-se que

diminuir a temperatura de usinagem pode levar a redução de 30 por cento no consumo de energia combustível.

Diminuição da temperatura significa também que qualquer emissão, visível ou não visível, que não contribua a saúde, problemas com odores ou emissão de gases que aumentam o efeito estufa, também serão reduzidas. Esta diminuição nas emissões representa significativamente economia, considerando que de 30-50 por cento dos custos são com sistemas de controle de emissões da usina. (RURLEY; PROWELL, 2005)

Abrandar as emissões permite que as usinas de misturas asfálticas estejam situadas em zonas regulamentadas com restrição de poluição do ar. Tendo uma usina localizada em uma área restrita com controle de poluição e produzindo mistura quente com produto que permite uma redução da temperatura de operação irá encurtar as distâncias que melhorará a produção e diminuição do período de construção. Outro potencial para Misturas Asfálticas Mornas é que o endurecimento por oxidação do asfalto será minimizado pela baixa temperatura e que resultará também em mudanças no seu desempenho, como: redução de trincas térmicas, e trincas em bloco. (RURLEY; PROWELL, 2005)

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Geral**

O objetivo principal é avaliar o comportamento de uma mistura asfáltica morna com adição do mineral zeólita para o emprego em estruturas de pavimento nos parâmetros de formulação de Fadiga e Módulo Complexo.

### **1.2.2 Específico**

Para alcançar o objetivo principal pretende-se avaliar, com ensaios de laboratório, o potencial da tecnologia das Misturas Asfálticas Mornas, avaliando estas misturas quanto ao seu comportamento mecânico. Será verificada a tecnologia da qual o princípio emprega o aditivo o mineral zeólita.

Para efeito de comparação é produzido dois tipos de misturas. Uma mistura com a adição de zeólita e outra de comparação sem qualquer tipo de adição. Para tal, ambas possuem a mesma composição granulométrica.

Estas duas misturas são avaliadas quanto ao seu comportamento mecânico adotando-se os seguintes procedimentos:

- Determinar a dosagem pelo procedimento do ensaio Marshall;
- Determinar a perda de massa por impacto com o ensaio Cântabro;
- Avaliar a adesividade por ação deletéria da umidade induzida (Lottman Modificado);
- Analisar seus Módulos através da determinação do Módulo Complexo – corpos de prova trapezoidais;
- Analisar quanto Fadiga – com corpos de prova trapezoidais;

### **1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO**

A avaliação do comportamento das misturas asfálticas com adição de zeólita depende de um referencial. Para o estudo tomam-se, este referencial, as misturas asfálticas convencionais (quentes) para sua comparação com as misturas mornas com adição de zeólitas.

São três tipos de materiais empregados na composição das misturas asfálticas: ligante asfáltico, agregado mineral granítico e mineral zeólitas. Estes permitem a execução das misturas controle e com adição de zeólita, que são necessários para comparação entre os diversos comportamentos pertinentes ao asfalto.

O método de dosagem Marshall permite determinar o teor ótimo de betume para cada tipo de mistura, bem como os valores de densidade aparente, volume de vazios, relação betume e vazios, fluência e estabilidade.

O desgaste por abrasão nos corpos de prova, o ensaio Cântabro, permite determinar qual a relação de desgaste pela comparação entre os pesos antes e após 300 revoluções no tambor “Los Angeles”. Com o ensaio de Lottman modificado avalia-se a resistência dos corpos de prova compactados (cilíndricos) quanto ao dano induzido por umidade.

A definição do teor ótimo de betume das misturas permite a produção dos corpos de prova trapezoidais. Estes são extraídos de placas com misturas asfálticas produzidas no compactados de mesa projetada pelo LPC (França). Após compactação, extraem-se corpos com uma serra circular e uma mesa de corte móvel.

No término dos cortes de todos os espécimes, define-se um processo de triagem para a escolha daqueles destinados aos ensaios de Fadiga e Módulo Complexo.

Os resultados de fadiga é um importante parâmetro para o dimensionamento das misturas betuminosas. Com este, determinam-se os valores referentes da vida útil da mistura para uma determinada deformação de solicitação. Ou seja, permite de terminar qual a deformação específica correspondente ao um milhão de solicitações.

Não obstante a Fadiga, o Módulo Complexo também é um importante parâmetro para o dimensionamento das misturas asfálticas. Este ensaio permite determinar o valor de módulo a diferentes temperaturas e frequência de solicitação.

De posse dos resultados dos ensaios, realiza-se uma análise comparativa dos resultados provenientes das misturas controle e das misturas mornas com adição de zeólita. Por fim, executa-se um dimensionamento de uma estrutura de pavimento flexível hipotético com ambas as misturas.

Em síntese os ensaios contam com a moldagem ou corte de corpos de prova conforme a seguir:

- Ensaio Marshall – moldam-se cinco (5) corpos de prova para cada teor de betume (4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5%);
- Desagregação Cântabro – moldam-se dois (2) corpos de prova para cada teor de betume acima descrito;
- Lottman Modificado – na tentativa de se avaliar a suscetibilidade a água das misturas moldam-se cinco (5) corpos de prova no teor ótimo de betume para os ensaios não condicionados e cinco (5) para os ensaios condicionados;
- Módulo e Fadiga – estes dois ensaios fazem o uso de três (3) placas com dimensões de 12x60x40cm, contendo a mistura asfáltica com adição de

zeólita. Destas placas serão extraídos corpos de prova trapezoidais para ambos os ensaios.

A Figura 1 apresenta quais ensaios são realizados no Laboratório de Pavimentação da UFSC e a respectiva quantidade de corpos de prova confeccionados no processo de pesquisa.

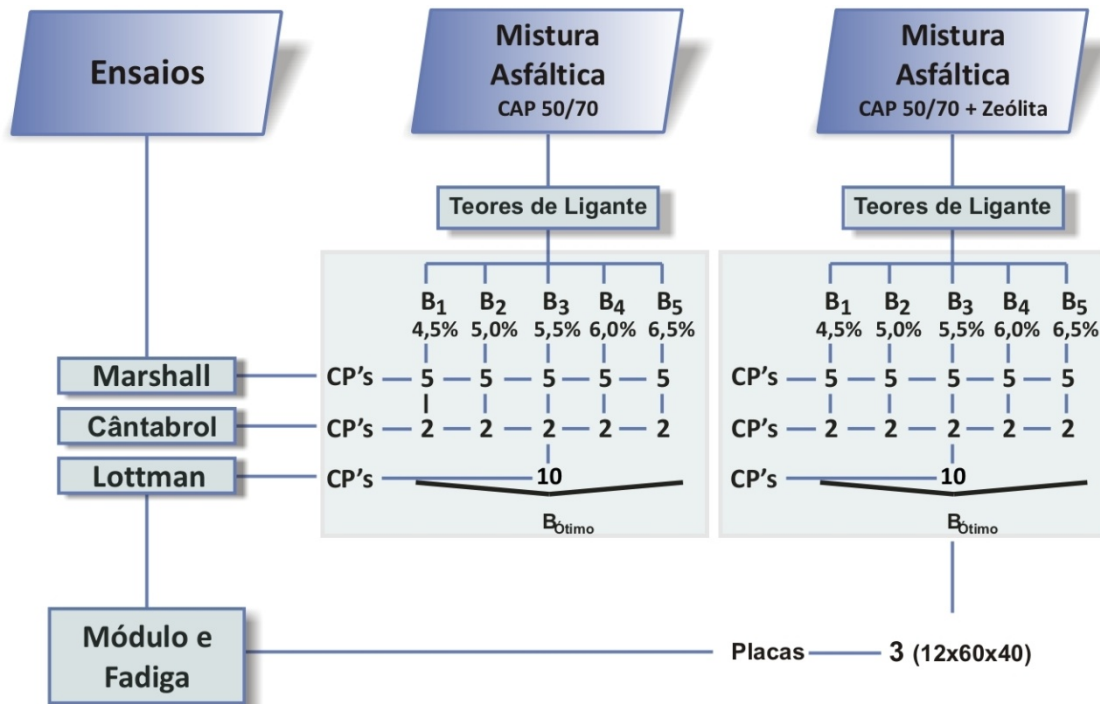


Figura 1 – Esquema dos ensaios da pesquisa.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Nunca a questão ambiental foi um assunto tão comentado. Voltando as décadas de 80 e 90 muitos assuntos relacionados ao meio ambiente estavam em pauta. Uma importante questão desta época é o comprometimento da camada de ozônio que, com ajuda da mídia, tornou-se uma cultura de “não uso” ao CFC (clorofluorcarboneto ou clorofluorcarbono).

Outro assunto de grande importância é a consideração da qualidade do ar nas grandes metrópoles. Muitas doenças respiratórias estão relacionadas à qualidade do ar. A poluição do ar passou a ser um fator de relativa importância para a qualidade de vida, já que existe um crescimento acelerado da frota de veículos e aumento das indústrias próximas as cidades.



Como medida preventiva destes problemas criou-se novas legislações inerentes a preservação do meio ambiente. Automóveis passaram a ter o uso obrigatório de catalisadores, responsável pela diminuição da poluição causada pela queima do combustível. As indústrias também foram obrigadas a implantar sistemas de filtros que reduzem a emissão de resíduos do processo de produção.

A construção civil não deixa de ter sua parcela de contribuição para a poluição do ar. É de se pensar que em muitos casos os processos construtivos não influenciam na qualidade do ar, mas muitos materiais empregados na construção civil foram preparados em indústrias, que, de certa forma, influenciam o meio ambiente, tais como: produção de aço, cimento, asfalto, entre outros (NIOSH, 2000).

A tecnologia de Misturas Asfálticas Mornas se apresenta como uma solução para um dos setores da indústria de construção civil. Ela apresenta diversas vantagens tanto ecológicas, quanto técnicas. Além da redução das emissões gasosas, por trabalhar com menores temperaturas, outra vantagem observada é a economia de energia consumida (KRISTJANSDOTTIR, 2006).

## **1.5 LIMITAÇÕES**

Mistura Asfáltica Morna é considerada, em todo o mundo, como uma tecnologia recente. Relativamente poucos trabalhos acadêmicos foram publicados, a maioria das publicações está em artigos de jornais de entidades. No Brasil a Universidade Federal do Ceará apresenta um trabalho relacionado ao tema. Com o título Avaliação da Influência de Zeólita Sobre as Propriedades Volumétricas de Misturas Asfálticas Produzidas a Temperaturas Intermediárias este trabalho tem seu título como uma forte indicação sobre o objetivo avaliado (SOUSA FILHO et al, 2006).

Os materiais empregados nos métodos conhecidos como misturas asfálticas mornas possuem pouca ou nenhuma utilização conhecida no ramo da construção nacional. As adições nas misturas se tornaram necessária para que o resultado esperado seja alcançado. Esses aditivos são pouco comercializados no Brasil e muitos produtos são de fabricação no exterior, devido o fato desta tecnologia ter sido mais estudadas pelos países do continente europeu. Sendo assim, não é possível testar

todas as tecnologias disponíveis, já que para adquirir estas é necessária uma negociação junto com diversos organismos para a importação a título de pesquisa.

Por isso o trabalho se limita as misturas asfálticas mornas com adição de zeólita, um mineral (silicato de alumínio) capaz de absorver 21% de água ao qual é liberada a temperaturas de 85 a 180°C. Este mineral é uma doação da empresa Celta Brasil que possui um Centro de Referência Latino Americana de Zeólita localizado na Rua Íris Meimberg, nº 200, na Vila Jovina Barro Branco em Cotia, São Paulo.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho apresenta-se organizado em capítulos cuja lógica das temáticas segue a seguinte forma:

**Capítulo 1:** Introdução do tema objeto de pesquisa, deixando o leitor integrado ao problema, aos objetivos do autor e ao panorama do trabalho.

**Capítulo 2:** Apresenta uma revisão sobre as Misturas Asfálticas Mornas apresentando diversas tecnologias que estão sendo desenvolvidas e estudadas pelo mundo. Serão apresentadas as características das técnicas e estudos de campo e laboratório.

**Capítulo 3:** Dispõe uma revisão dos aspectos ligados ao comportamento mecânico das misturas asfálticas. Tendo como foco a determinação da Fadiga das misturas e determinação do módulo pelo ensaio de Módulo Complexo.

**Capítulo 4:** Discorre sobre os materiais que foram utilizados na concepção das misturas: granulares graúdo e miúdo, o CAP e o mineral zeólita. Apresentam-se os métodos aplicados nos ensaios, tanto de caracterização como os relacionados ao comportamento mecânico das misturas e, por fim, os resultados de cada ensaio.

**Capítulo 5:** Realiza-se uma análise crítica dos resultados. Confronta os valores entre os resultados, de cada mistura, com procedência em um mesmo ensaio. E feita uma comparação entre as duas misturas em um dimensionamento com uma estrutura hipotética.

**Capítulo 6:** Neste capítulo constará todas as conclusões referente a pesquisa e as recomendações para trabalhos posteriores.

## **2 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS**

### **2.1 APRESENTAÇÃO**

Este capítulo apresenta uma breve introdução sobre as misturas betuminosas mornas e mostras, com estudos realizados em laboratórios de pesquisa em misturas asfálticas e os benefícios que podem ser obtidos com este tipo de tecnologia.

Inicialmente há uma explicação sobre a origem do petróleo e o processo de destilação fracionada de onde o ligante betuminoso é obtido. Segue, então, um histórico dos estudos destinados a redução da temperatura de usinagem das misturas quentes. Podem-se verificar os benefícios conseguidos com as mudanças no processo de mistura e aplicação.

Apresenta as metodologias e tecnologias aplicadas para redução das temperaturas nas misturas asfálticas quente. Sendo as mais conhecidas: adição do mineral zeólita, misturas asfálticas mornas espumada, adição de cera Sasobit e outros métodos.

A última parte do capítulo trata da mineralogia e geologia do mineral zeólita e conclui mostrando a localização geográfica das formações geológicas do Brasil com possibilidade de serem obtidas as zeólitas naturais.

### **2.2 MISTURAS BETUMINOSAS**

O petróleo tem sua origem da transformação da matéria orgânica acumulada no fundo dos oceanos e mares. Estas são mantidas por milhares de anos sobre pressão decorrente do acúmulo de sedimentos. Os produtos provenientes da degradação dos hidrocarbonetos e compostos voláteis são misturados aos sedimentos e resíduos orgânicos contidos pela rocha-mãe.

Com o decorrer do tempo o petróleo é expulso, isto devido o efeito do esmagamento causado pelo peso dos materiais da sedimentação. Estes migram para as areias e rochas mais porosas e mais permeáveis, tais como arenitos e calcários. Até que, por fim, permanece aprisionado em uma camada impermeável, uma espécie de

“armadilha”, que permite a acumulação dos hidrocarbonetos sem possibilidade de escapar.

O asfalto é um dos subprodutos da destilação do petróleo. O petróleo, no sentido de *óleo bruto*, é uma substância oleosa, inflamável, geralmente menos densa que a água, com cheiro característico e coloração que pode variar desde o incolor ao castanho claro e até preto, que passa por verde e marrom (castanho).

O ligante betuminoso é uma combinação complexa de hidrocarbonetos, composto em sua maioria por hidrocarbonetos alifáticos, alicíclicos e aromáticos. Também pode conter quantidades pequenas de nitrogênios, oxigênios, compostos de enxofre e metais, principalmente níquel e vanádio.

Nas refinarias, o petróleo é submetido a um processo por destilação fracionada, conforme o esquema ilustrado na Figura 2. O resultado desse processo é separado em grupos, conforme a temperatura: de 20 a 60 graus Celsius - éter de petróleo; de 60 a 90 graus Celsius - benzina; de 90 a 120 graus Celsius - nafta; de 140 a 200 graus Celsius - gasolina; de 150 a 300 graus Celsius - querosene; de 250 a 350 graus Celsius - gásóleo; de 300 a 400 graus Celsius - óleos lubrificantes; **resíduos** - asfalto, piche e coque; e subprodutos - parafina e vaselina.

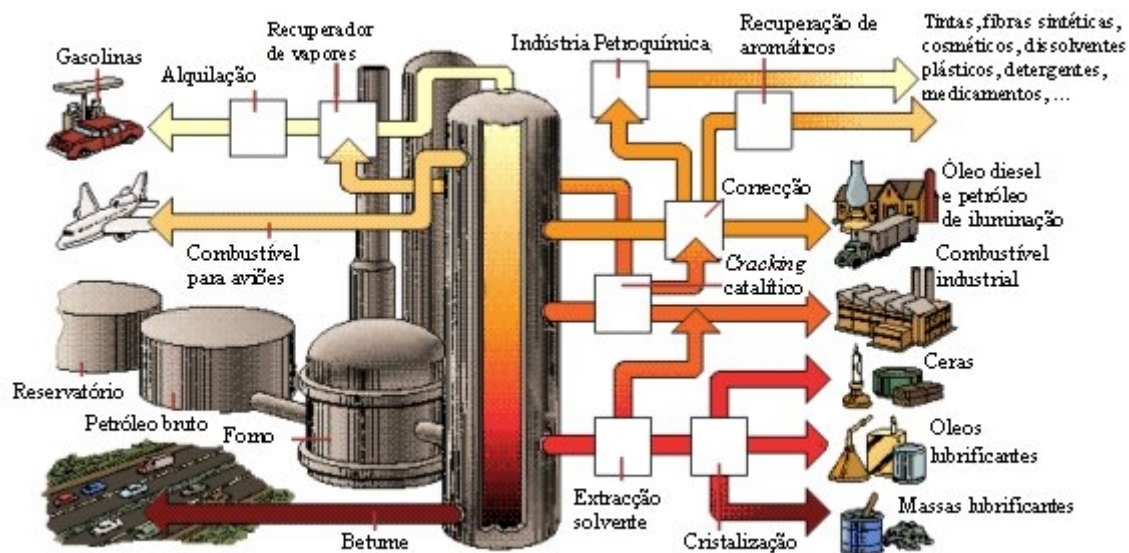


Figura 2 – Esquema de destilação do petróleo.

(DQA, 2009)

Misturas asfálticas betuminosas a quente são mais conhecidas no Brasil como CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente). Inúmeros projetos prevêem o uso dos concretos betuminosos usinados a quente em obras de pavimentação de rodovias e estacionamentos. Este é um composto de agregados mineral (com variação granulométrica) e ligante asfáltico derivado do petróleo ou alcatrão, que são previamente quantificados (peso ou volume) e aquecidos até certa temperatura, chamada temperatura de mistura ou usinagem. Após a mistura, o material é encaminhado até o local da execução da obra, onde é assentado e compactado a uma temperatura específica, temperatura de compactação, que varia em função da viscosidade do ligante.

Existem muitos estudos que se preocupam em conhecer novos materiais e novas formas de emprego em estruturas de pavimentação rodoviária. Nestes, encontram-se muitos aditivos melhoradores de comportamento, que transmitem características físicas as misturas, ou seja, as misturas asfálticas acabam por herdar tais características dos elementos adicionados.

### **2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS - HISTÓRICO**

Em 1956, Dr. Ladis H. Csanyi, professor da *Iowa State University*, estudou sobre o potencial das misturas espumadas para serem usadas como pasta selante. A partir de então, a tecnologia de asfaltos espumados, que permitem a diminuição das temperaturas de misturas, são usadas com sucesso em muitos países. O processo original consiste em uma injeção de vapor de água nas misturas quentes. Em 1968, a *Mobil Oil Australia*, ao qual adquiriu as patentes da invenção de Csanyi, modificou o processo original por adicionar água fria em vez de adicionar água em forma de vapor (MUTHEN, 1998).

Em 1994, Maccarone examinou os desenvolvimentos em misturas asfálticas baseadas no uso de asfaltos espumados e em emulsões com elevado teor de ligante. Tal sistema possui boa eficiência energética e é menos agressivo ao meio ambiente, isso porque as misturas frias não liberam hidrocarbonetos e consomem menos combustíveis (MACCARONE, 1994).

Apesar de possuir boas qualidades, as misturas frias não afetaram a posição de primeiro lugar, das quais as misturas asfálticas quentes possuem como material para as superfícies de rolamento, por não ser possível obter o mesmo desempenho e durabilidade.

Segundo Jenkins et al. (1999), introduziu um novo processo para produção de misturas mornas, tratamento de asfalto meio-morno espumado. Seu artigo explora as considerações relativas ao processo de produção e os possíveis benefícios conseguidos pelo aquecimento de uma variedade de agregados a temperaturas abaixo de 100°C antes da aplicação do asfalto espumado.

O processo de produção das misturas asfálticas mornas foram desenvolvidos na Europa e apresentado por Harrison e Christodulaki na Primeira Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos em Sidnei, 2000. Em 2007, a *Australian Asphalt Pavement Association* - AAPA publicou um artigo que descreve o processo inovador para a produção de misturas asfálticas mornas. Realizou-se este feito com estudos em laboratório, o que possibilitou uma extensa avaliação com experimentos de aplicação em campo (Noruega, Reino Unido e Finlândia), em particular na produção e aplicação de graduação densa (KOENDERS et al, 2000). Os resultados deste trabalho geraram recursos para o desenvolvimento das Misturas Asfálticas Mornas Espumado (SHELL, 2007).

No Congresso Eurobitume, em 2004, Barthel et al, (2007). introduz o uso da adição de um aditivo zeolítico na produzir uma mistura asfáltica morna. Neste, ele conclui que a adição de zeólita criou um efeito espumante e resultou em um ganho de trabalhabilidade durante o processo de mistura (BARTHEL et al, 2007).

Misturas mornas recebem atenção dos países da Europa e Austrália desde meados de 2000. A indústria de pavimentos na América do norte começou a dar atenção alguns anos depois e em junho de 2005, o Centro Nacional de Tecnologia do Asfalto (NCAT – *Nacional Center for Asphalt technology*), publicou dois relatórios sobre o uso de *Sasobit*, uma cera sintética, e *Aspha-mim*, uma zeólita sintética, em misturas asfálticas mornas (HURLEY et al, 2005).

## 2.4 BENEFÍCIO POTENCIAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Os benefícios potenciais das misturas asfálticas mornas são conhecidos dentro das bibliográficas pela redução das emissões de gases e vapores, pela redução da viscosidade do ligante e pela redução no consumo de energia durante os processos de produção e aplicação destas.

### 2.4.1 Emissões

Um dos principais benefícios das misturas asfálticas mornas é a redução da emissão de gases. Essa redução está diretamente ligada à redução da temperatura durante o processo industrial. De acordo com a literatura as misturas asfálticas mornas reduzem as emissões de vapores e odores se comparados com as produções de misturas asfálticas quentes convencionais. Emissões da produção de asfalto e compactação em campo podem ser prejudiciais à saúde.

Em 2000, o Instituto Nacional para Segurança e Saúde Profissional (*NIOSH – National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)*, pertencente ao Departamento Nacional de Saúde e Serviços Humanos) nos Estados Unidos publicou uma revisão do perigo de saúde com profissionais expostos ao asfalto. (NIOSH, 2000) Neste foi avaliado efeito potencial na saúde dos trabalhadores expostos ao asfalto. Em 1977, NIOSH determinou quais agentes adversos a saúde estão relacionados a irritações nas membranas do trato conjuntivo e respiratório. Também identificou evidências em estudos com animais, que o asfalto em contato com a pele, por um período longo, poderia causar um carcinoma local. Com bases nesta evidência o relatório recomenda os seguintes limites de exposição:

O Instituto NIOSH recomenda, com o intuito de minimizar os possíveis efeitos crônicos ou agudos a saúde provenientes da exposição ao asfalto, fumaça e vapores do asfalto e pinturas asfálticas, a adoção de um limite recomendado de exposição de 5 mg/m<sup>3</sup> (medido como total de partículas), por um período de 15 minutos. Recomenda-se, ainda, a implantação das seguintes práticas:

- Prevenir a exposição da derme.
- Manter a temperatura de aplicação do asfalto quente o mais baixo possível.
- Técnica de execução e boas práticas de trabalho para todos os locais de trabalho, no sentido de minimizar a exposição dos trabalhadores as fumaças e aos aerossóis das pinturas asfálticas.
- Uso apropriado de proteção respiratória (NIOSH, 2000, p. 96).



Em 1988, o Instituto identificou que os vapores provenientes do asfalto podem, também, ser considerado um fator potencial para o aparecimento de carcinoma (um tipo de câncer). Desde então novos estudos foram conduzidos em animais e novas informações foram coletadas junto aos trabalhadores exposto ao asfalto. O que levou a seguinte conclusão na publicação revisada de 2000:

Os achados da revisão sobre o perigo da exposição servem de apoio para avaliação dos critérios levantados em 1977. Relata sobre as fumaças provenientes do asfalto para impermeabilização, pavimentação e outros usos dos quais causam irritações aos olhos, vias nasais e garganta. Somam-se a isso estudos conduzidos desde a publicação de 77, onde, também foram encontrados estes sintomas em trabalhadores expostos aos vapores do asfalto com valores de concentração média abaixo de 1 mg/m<sup>3</sup> de partículas totais e abaixo de 0,3 mg/m<sup>3</sup> de benzeno solúvel ou partículas de dissulfeto de carbono solúvel [...]. Recentemente estudos demonstraram a evidência de sintomas mais agudos no trato respiratório inferior dos trabalhadores expostos aos vapores e fumos do asfalto (NIOSH, 2000, p. 94).

Outras considerações relacionadas a potencialidade do aparecimento de carcinogênese, devido aos vapores do asfalto, estão inseridas nas conclusões do Instituto NIOSH:

As informações consideradas para a associação entre a formação de carcinogênese em humanos e os vapores de asfalto são limitados. [...] Embora ensaios de genotoxicidade realizados em laboratório e em campo com vapores de asfalto mostrou que somente os vapores de laboratório se apresentam em sua forma tóxica. Conseqüentemente conclui que as informações coletadas do estudo durante a execução da pavimentação asfáltica são insuficientes para uma associação entre o câncer de pulmão e exposição a vapores exalados pelo asfalto. As informações disponíveis, no entanto, não negam o risco do desenvolvimento de carcinogênese por aqueles trabalhadores expostos durante os trabalhos de pavimentação (NIOSH, 2000. p. 95).

As discussões sobre os possíveis riscos do desenvolvimento de câncer em outras regiões fora dos pulmões são inconclusivas:

[...] A falta de consistência sobre os estudos geraram resultados que se confundem com os efeitos de outras substâncias, por isso, as evidências garantem associação entre a exposição ao asfalto e o câncer não-respiratório é relativamente fraco e necessita maiores confirmações (NIOSH, 2000, p. 75).

Em seguida, o relatório NIOSH menciona uma resposta positiva de mutagênese em estudos com animais em laboratório com vapores de asfalto que é uma causa de preocupação e suporte para futuras pesquisas (NIOSH, 2000, p. 87).

O Departamento de Saúde e Serviços Humanos apresenta um estudo conduzido em 1993. Onde se coletou amostras de vapores em tanques de armazenamento de misturas quente a temperatura de 149°C e conduziram a uma análise em busca de compostos policíclicos aromáticos. A concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos de quatro anéis foram os mais altos nos vapores de laboratório em altas temperaturas. Muitos dos hidrocarbonetos de quatro anéis são carcinogênico.

Estudos similares indicaram que os vapores asfálticos gerados nas altas temperaturas são os que mais geraram hidrocarbonetos policíclicos aromáticos carcinogênicos, na comparação com os gerados a temperaturas mais baixas (NIOSH, 2000). Embora, as duas temperaturas que foram comparadas neste estudo são mais altas que as temperaturas usuais para misturas asfálticas mornas e quentes. Esta poderosa informação indica uma vantagem para a redução das emissões; em outras palavras é possível dizer que os vapores tornaram-se menos perigoso com a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação.

#### **2.4.2 Viscosidade**

A funcionalidade tecnológica das misturas asfálticas mornas baseia-se na redução da viscosidade dos ligantes betuminosos em determinados limites de temperatura. A redução da viscosidade permite o total encobrimento do agregado a temperaturas mais baixas, do que tradicionalmente seriam necessárias para a produção de concretos betuminosos usinados a quente. Devido a isto, todos os processos de misturas mornas, de alguma forma, contribuem para o processo de redução da temperatura de compactação e isto será descrito mais adiante.

#### **2.4.3 Consumo de Energia**

A redução do consumo de energia é, para as literaturas e o mercado consumidor, definido como benefício mais óbvio das misturas asfálticas mornas. Estudos mostram que pode ser alcançada uma redução no consumo de energia em torno de 30% durante o processo de produção nas usinas de asfalto (BARTHEL et al, 2007).

Em setembro de 1996 uma pista experimental foi construída pela empresa Veidekke Asphalt utilizando uma mistura asfáltica morna densa, nas proximidades de Hunndalen (uma comunidade norueguesa), próximo a um segmento com mistura betuminosa quente. Com as duas informações coletadas dos segmentos com mistura morna e mistura quente, foi possível observar, conforme Tabela 1, os benefícios do uso das temperaturas intermediárias no que diz respeito a redução do consumo de combustível, emissão de poeira e CO<sub>2</sub>.

Tabela 1 – Detalhes da produção de Asfalto pista experimental.

(VEIDEKKE, 1996)

(Veidekke 1996)	Msitura Morna	Mistura Quente
Capacidade de Produção (tons/hr)	70	120
Consumo de Combustível (litros/hr)	4,5	6 a 7
Emissão de CO2 (%)	1	3
Poeira seca (mg/m <sup>3</sup> )	1	3
Emissão de Poeira (kg/hr)	0,03	0,09

## 2.5 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Tradicionalmente misturas asfálticas quentes são produzidas a temperaturas entre 140 e 180°C e compactadas de 130 a 160°C. A temperatura de mistura possui efeito direto sobre a viscosidade do ligante e assim sobre a compactação em si. Na medida em que a temperatura diminui, o ligante torna-se mais viscoso e mais resistente a deformação, ao qual resulta em uma menor diminuição dos vazios dentro de um dado esforço de compactação. Eventualmente, o ligante asfáltico torna-se duro o bastante, o que impede uma redução de vazios durante o processo de compactação. As temperaturas em que isto ocorre estão próximas a 79°C para as misturas quentes

densas. Desta forma, as temperaturas altas são importantes para a execução de misturas asfálticas quentes, que garante assim:

- A baixa viscosidade do betume, que permite um cobrimento total do agregado;
- A boa trabalhabilidade durante o espalhamento e a compactação da mistura;
- E, o aumento rápido da resistência mecânica após compactação (KOENDERS et al, 2002).

O objetivo do processo de produção das misturas asfálticas mornas é garantir a redução das altas temperaturas, aos quais tradicionalmente misturas asfálticas são produzidas e compactadas, sem afetar adversamente suas propriedades. Seus benefícios, correntemente introduzidos ao mercado e endereçados na literatura, são a redução do consumo de energia, necessário ao aquecimento tradicional, e a redução das emissões de gases, originado da queima de combustíveis, fumaças e odores gerados pelo aquecimento do betume.

Existem três principais tecnologias, desenvolvidas para a produção de misturas asfálticas mornas e que são referências nos estudos realizados na Europa. Outras tecnologias também são apresentadas, conforme lista abaixo:

- **Zeólita Aspha-min** – É a adição de um mineral denominado zeólita contendo aproximadamente 21% de água em peso, que é liberado a temperatura de 85 a 180°C.
- **Cera Sasobit** – É a adição de uma cera parafínica Fischer-Tropsch proveniente do processo de transformação do carvão ou gás natural em uma cadeia molecular de carbono (de C<sub>5</sub> a C<sub>100</sub>).
- **Misturas Asfálticas Mornas Espumada** – É um processo de mistura com dois ligantes com diferentes durezas. Adiciona-se primeiro o ligante mole para conferir um pré-envolvimento do agregado, em seguida adiciona-se o ligante duro em forma de espuma. Com este processo pode-se executar a mistura a temperaturas de 100 a 120°C.
- **Outros Métodos** – Outros métodos são mencionados na literatura, como os exemplos do Asphaltan B, uma cera esterificada de baixo peso

molecular, e do Evotherm, um processo acoplado a um pacote químico que incluem vários aditivos.

A redução da viscosidade é o que permite, a todas estas tecnologias, uma cobertura de ligante betuminoso sobre os agregados minerais, sem que, para isso, sejam necessárias altas temperaturas.

Atualmente não existe patentes para os equipamentos ou a própria maneira de adição dos elementos contribuintes para produção das misturas asfálticas mornas em usinas de asfalto. Uma explicação está no fato do processo não exigir grandes modificações do processo de produção da mistura. Em contra partida, os materiais empregados na concepção destas são, em sua maioria, industrializados e possuem patentes.

## 2.6 ZEÓLITA ASPHA-MIN

Um estudo realizado pelo *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) avaliou as misturas asfálticas com adição de zeólita Aspha-min, um produto da empresa Eurovia GmdH da Alemanha. O termo zeólita, que do grego é *zein+lithos*, significa “pedra que ferve”. São alumino-silicatos hidratados altamente cristalinos de metais alcalinos ou alcalinos terrosos. São compostas de uma rede tridimensional de tetraedros de  $AlO_4$  e  $SiO_4$  ligados entre si nos vértices pelos átomos de oxigênio, originando assim uma estrutura microporosa do tipo  $TO_4$  ( $T = Si, Al, etc$ ), compensada eletronicamente por outros cátions, como por exemplo, Na, K, Ca, Mg. A Figura 3 apresenta a estrutura cristalina e face hexagonal composta da zeólita.

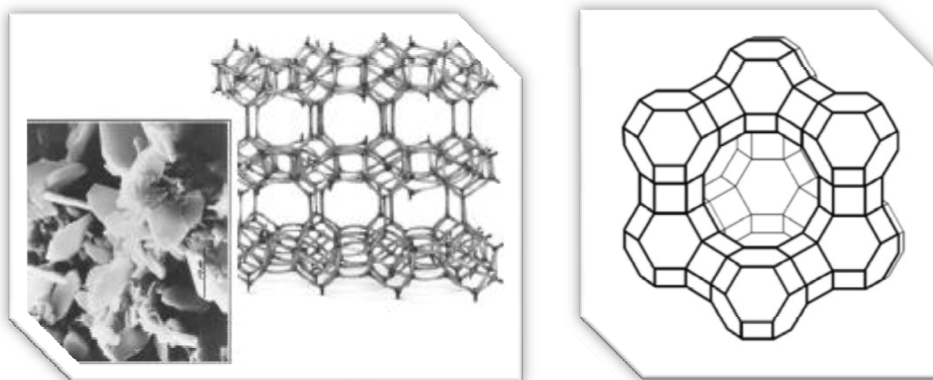


Figura 3 – Estrutura cristalina e face hexagonal de uma zeólita. (Eurovia GmdH)

A zeólita é um mineral de origem natural ou industrial, no caso o Aspha-mim é de origem industrial. Todos possuem a capacidade em adsorver e armazenar moléculas de água no interior de seu esqueleto molecular. O Aspha-min, nome comercial, contém aproximadamente 21% de seu peso em água, esta é liberada a temperaturas entre 85 e 180°C. A empresa Eurovia recomenda uma adição de Aspha-min na taxa **0,3%** da massa da mistura, o que permite uma redução de aproximadamente 30°C nas temperaturas produção e compactação (HURLEY et al, 2005).

Ao se adicionar Aspha-min à mistura, ao mesmo tempo em que o ligante é aquecido, as moléculas de água aprisionadas são liberadas na forma de vapor. Este vapor permanece aprisionado sob o ligante e gera uma expansão volumétrica, um efeito parecido ao asfalto espumado. Isto permite à mistura asfáltica um aumento da trabalhabilidade e o encobrimento dos agregados em temperaturas relativamente baixas, se comparado com as misturas quentes.

Na usinas de concretos asfaltos, a zeólita é adicionada de duas formas ou diretamente no interior do misturador, ou por um alimentador pneumático especialmente construído, que alimente o tambor alimentador. Os fabricantes do Aspha-min afirmam, especificamente, que não há necessidade de se construir um alimentador especial. A zeólita pode ser adicionada ao filler manualmente ou inserida juntamente com as fibras, se a usina estiver equipada com alimentação de fibras (KRISTJANSDOTTIR, 2006).

No estudo realizado pela NCAT em sua pista experimental, fora utilizado um alimentador por aletas, conforme apresenta a Figura 4, para controlar a taxa de adição e então usado um alimentador pneumático para espalhar pelo tambor, ao mesmo tempo em que o ligante era adicionado.



Figura 4 – Alimentador e reservatório para zeólita Aspha-min.

(NCAT, 2005, p. 23)

Os estudos em laboratório conduzidos pelo Centro Nacional de Tecnologia em Asfalto (NCAT), nos Estados Unidos, serviram para determinar a aplicabilidade da zeólita Aspha-min a uma obra de pavimentação típica sob as condições ambientais comumente encontradas nos EUA. Dois tipos de agregados foram usados o granito e o calcário com dois tipos de ligantes o PG 64-22 e o PG 58-28.

A preparação das misturas foi executada com o compactador giratório superpave, porém, para determinar as temperaturas de misturas, em uma análise da capacidade de compactação, serviu-se do compactador vibratório. Este estudo afirma que, com resultados de ensaios anteriores, o compactador giratório superpave mostrou-se insensível a variações de temperaturas. Outra justificativa é a de que, com o compactador vibratório, seria fácil para preparar amostras compatíveis com o analisador de pavimento asfáltico.

Conseqüentemente, as misturas foram compactadas utilizando o compactador vibratório nas temperaturas de 149°C, 129°C, 110°C e 88°C com temperaturas de mistura aproximadamente 19°C acima da temperatura de compactação. Os resultados do estudo foram:

- A adição do Aspha-min provocou a diminuição das porcentagens de vazios no compactador giratório. A mistura morna com o uso do ligante PG 62-22 teve quase a mesma porcentagem de vazios que a mistura de controle com o ligante PG 58-28. Isto sugere que a adição de zeólita diminui as temperaturas de compactação e de mistura, estes resultados também foram observados com os agregados calcários;
- A adição de zeólita melhorou a compactação no compactador vibratório quando comparado com a mistura controle, para todas as combinações de ligante, agregados e temperatura. A zeólita reduziu a porcentagem de vazios em 0,65%, em média, e melhorou a compactação a temperaturas abaixo de 88°C.
- A adição de zeólita não melhorou ou diminuiu a rigidez das misturas para qualquer temperatura de compactação. Mas, o módulo resiliênte diminuiu na medida em que a temperatura de compactação diminuiu e no aumento da porcentagem de vazios.
- A adição de zeólita não afetou a deformação permanente das misturas. A profundidade da deformação aumentou na medida em que a temperatura diminuiu para todas as combinações.
- As temperaturas baixas adotadas a mistura e a compactação das misturas asfálticas mornas com zeólita poderá aumentar os possíveis danos por ação da umidade. Estas temperaturas podem resultar em uma secagem incompleta dos agregados minerais e, conseqüentemente, a água adsorvida pelo agregado e encoberto por ligante pode resultar em danos por umidade.
- Os valores da taxa de residência a tração (*Tensile Strength Ratio – TSR*) das misturas mornas com zeólita diminuiu em comparação com os valores encontrados para as misturas controle, porém, com resultados aceitáveis. Observou-se um descascamento superficial em ambas as misturas produzidas a 121°C. Por isso, fez-se o uso de um agente anti-descascante e então avaliado quanto ao dano por umidade induzido. O agente é composto pela adição em dois estágios de 1,5% de cal hidratada, que resultou em um desempenho aceitável em termos de



coesão, resistência a umidade e diminuição da taxa de deformação permanente.

A Figura 5 apresenta o momento onde se adiciona umidade ao agregado para o ensaio de resistência a tração indireta.



Figura 5 – Introdução de umidade no agregado para o ensaio TSR.

(NCAT, 2005, p. 7)

O relatório do NCAT conclui e apresenta algumas recomendações para o uso da Zeólita Aspha-mim:

- O teor de asfalto deve ser determinado sem a adição da zeólita.
- Para contrapor a tendência do aumento da sensibilidade à deformação, afundamento por trilha de roda pela diminuição da temperatura de mistura, pode ser adicionado a mistura o cal hidratado ou, então, alterado a classe do ligante para ser compatível com temperaturas inferior a 135°C. Se a temperatura de mistura for superior, ambas as classes são compatíveis.
- Se os resultados do teste com dano por umidade induzida (TSR) não forem satisfatórios, a cal hidratada pode ser adicionada a mistura como

um agente anti-descascante, o que aumenta o valor de resistência a tração.

Complementando os estudos realizados no laboratório do Centro Nacional de Tecnologia em Asfalto (NCAT), conduziu-se outro projeto em fevereiro de 2004, na Flórida. Neste executou-se a pavimentação em um estacionamento com uso de uma mistura asfáltica morna com adição da zeólita Aspha-min e uma mistura controle. A mistura de controle foi executada em graduação fina superpave com 20% de pavimento asfáltico recuperado. A mistura morna foi produzida com a adição de zeólita Aspha-mim, na mesma granulometria e materiais da mistura controle, com adição de 0,3% do peso bruto total.

Durante a execução desta pavimentação os operários observaram que a mistura morna teve uma maior trabalhabilidade que a mistura de controle. Já as densificações obtidas em campo, tanto com a mistura morna quanto com a mistura controle, foram à mesma.

## **2.7 CERA SASOBIT**

Este é um produto da Sasol Wax International e é comercializado na Europa e na Ásia desde 1997. Sasobit é uma mistura de longas cadeias de hidrocarbonetos produzidos a partir da gaseificação do carvão, por formação através da síntese Fischer-Tropsch. É comumente conhecida como cera parafínica FT.

O carvão ou gás natural (metano) são parcialmente oxidados em monóxido de carbono (CO), ao qual reage, subsequentemente, com o hidrogênio (H<sub>2</sub>) sob condições catalíticas. O que produz uma mistura de hidrocarbonetos com uma cadeia molecular de carbono, que vai desde (C)<sub>5</sub> até mais de (C)<sub>100</sub>.

O processo se inicia com a geração de um gás sintético, que é catalisado tanto com aço quanto com cobalto. Onde, assim, formam produtos como a nafta, o querosene e as ceras. Os líquidos produzidos são separados e a cera Fischer-Tropsch é recuperada, dito, craqueada. O produto Sasobit (cera parafínica Fischer-Tropsch) é recuperado em cadeias de C<sub>45</sub> e a algumas com mais de C<sub>100</sub> (HURLEY et al, 2005).

O ponto de amolecimento da cera Sasobit é em torno de 100°C e completamente solúvel em temperaturas superiores a 120°C. Esta cera reduz a viscosidade do ligante na temperatura de trabalho, o que facilita o processo de mistura do asfalto. Permite, assim, o aumento da trabalhabilidade a temperaturas intermediárias, o que conduz a redução da emissão de odores, aumenta a economia de energia e reduz o tempo do ciclo de produção.

De acordo com a Sasol Wax a adição ótima de Sasobit é em torno de 3% em massa de betume (SASOL WAX, 2005).

Este potencial de redução da viscosidade do ligante asfáltico permite que se trabalhe com um decréscimo de temperatura entorno de 18° a 54°C, se comparado com as temperaturas usuais das misturas quentes. Na temperatura inferior ao ponto de amolecimento, a cera Sasobit apresenta-se sob a forma de uma estrutura de cadeia cristalina compatível com o ligante (HURLEY et al, 2005).

Sasobit pode ser combinado com polímeros ao qual contribui com a elasticidade a baixa temperatura (Sasoflex). Conforme a Figura 6, Sasobit está disponível em flocos (a) para adições derretidas ou em pequenas esferas (b) para adição direta com a mistura.

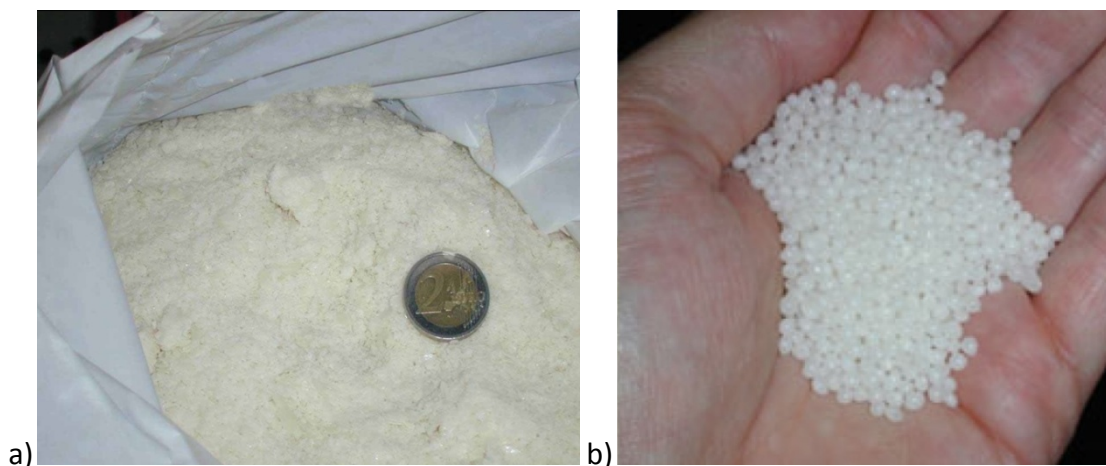


Figura 6 – a) Sasobit em Flocos, b) Sasobit esferas.

(NCAT, 2005, p. 3)

Nos Estados Unidos, o Sasobit tem sido misturado com o ligante em um terminal e bombeado diretamente a câmara de mistura ao mesmo tempo em que a fibra é adicionada ao SMA.

O Centro Nacional de Tecnologia em Asfalto (NCAT) realizou um estudo para determinar a aplicabilidade do produto Sasobit nos Estados Unidos da América. Neste, dois tipos de agregados serviram como referência, o granito e o calcário, assim como duas classes de ligante PG 64-22 e PG 58-28.

Com base nos resultados encontrados nos testes realizados em laboratório, as seguintes conclusões foram encontradas (HURLEY et al, 2005):

- A adição de Sasobit diminui os vazios nos ensaios com a prensa de compactação giratória;
- Efetivamente a cera Sasobit melhora a compacidade das misturas tanto para o compactador giratório superpave quanto para o compactador vibratório. Os resultados estatísticos indicaram uma redução média da porcentagem de vazio em 0,87%. A melhor compactação foi percebida a temperaturas baixas, como 88°C;
- A adição de Sasobit não afetou os resultados obtidos para o módulo resiliênte contendo o mesmo tipo de ligante PG;
- A adição de Sasobit diminui a deformação permanente das misturas avaliadas;
- Os resultados dos ensaios de tração indireta para as misturas com Sasobit foram menores, em alguns casos, quando comparados com as misturas de controle. Acredita-se que essa redução está relacionada à propriedade antienvelhecimento da cera Sasobit.
- A baixa temperatura de compactação usada para produzir misturas asfálticas pode ter aumentado o dano por umidade. A baixa temperatura utilizada para a mistura e compactação pode resultar em uma secagem incompleta do agregado. Como resultado, a água presa no agregado (encoberto por ligante) pode influenciar os resultados dos ensaios, devido ao dano causado pela umidade.

O relatório contempla algumas recomendações para o uso do Sasobit e Sasoflex (Sasobit + polímero e "cross-linking agent" agente de ligação cruzada) (HURLEY et al, 2005):

- Os ligantes modificados com Sasobit ou Sasoflex necessitam mais estudos para se ajustar à classe com desempenho desejado. Como exemplo deste estudo, um ligante classe PG 58-28 serviu como base asfáltica, que, por fim, recebeu a adição de 2,5 por cento de Sasobit. Como resultado produziu-se um ligante classe PG 64-22.
- O teor ótimo de ligante pode ser determinado com um ligante puro, da mesma classe de ligante modificado com Sasobit. Neste caso, amostras adicionais deverão ser produzidas com ligante modificado com Sasobit para que a densidade de campo seja ajustada.
- Com base nos resultados de compactação e deformação permanente, recomenda-se uma temperatura mínima de mistura de 129°C e uma temperatura mínima de compactação de 110°C. Se a temperatura de mistura for inferior a 129°C, então um ligante com características para altas temperaturas deve ser adicionada, no intuito de neutralizar a tendência de aumento da suscetibilidade térmica e de apresentar deformação permanente.
- Faz necessárias novas pesquisas para avaliações de desempenho em campo, seleção do teor ótimo de betume e da seleção da classe do ligante para produção de misturas com temperatura intermediária.

Em 2005, o Órgão de Administração de Estradas do Estado de Maryland (Maryland State Highway Administration) publicou dois relatórios; um que avalia o desempenho de um asfalto reciclado para base com adição Sasobit e outro que avalia o desempenho de uma mistura para superfície de rolamento com asfalto reciclado mais adição de Sasobit.

As principais conclusões, desta avaliação, foram que o uso do Sasobit, como melhorador da compactação das misturas, tem efeito mínimo nas propriedades mecânicas e que não possuem efeitos adversos do desempenho para o uso de Sasobit como melhorador da compactação na mistura em asfalto reciclado.

A experiência obtida em campo mostrou que a mistura com adição de Sasobit apresenta uma melhor trabalhabilidade. Por isso, foi adotada uma redução de 40% no número de ciclos de passagem do rolo compactador, em comparação a execução da

mistura controle. As Figuras 7, 8 e 9 apresentam algumas imagens obtidas da obra realizada pelo Órgão de Administração de Estradas do Estado de Maryland.



Figura 7 – Execução de superfície de rolamento com adição de Sasobit.

(KRISTJANSDOTTIR, 2006, p. 29)

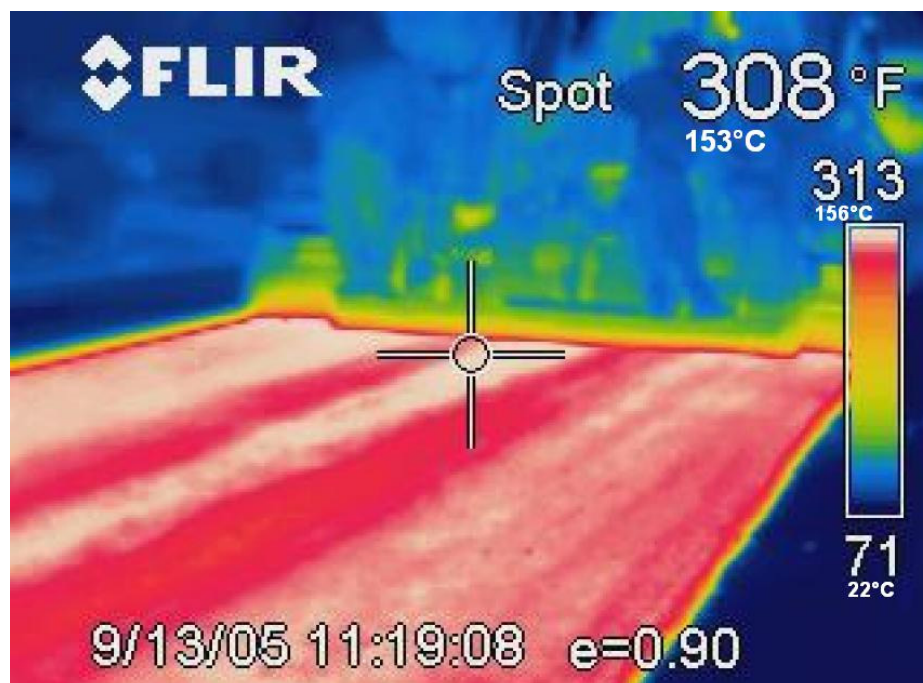


Figura 8 – Imagem térmica do material SEM adição de Sasobit.

(KRISTJANSDOTTIR, 2006, p. 29)



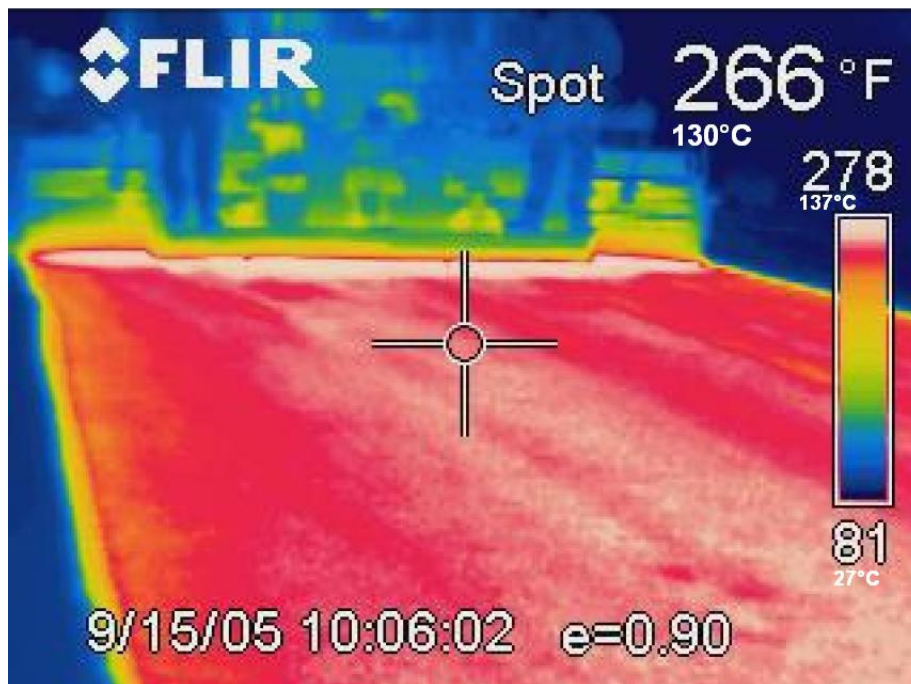


Figura 9 – Imagem termal do material COM adição de Sasobit.

(KRISTJANSDOTTIR, 2006, p. 30)

Ao todo, a empresa Sasol Wax conta com 143 projetos e pistas experimentais construídos. A maioria destes projetos estão localizados na Alemanha e em outros países como a República Checa, Dinamarca, França, Hungria, Itália, Malásia, Holanda, Nova Zelândia, Reino Unido, África do Sul, Suécia e Suíça. Nestes projetos foram realizadas adições de sasobit em misturas com os mais variados tipos de agregados, e em misturas como SMA e outros. As adições, em geral, limitaram-se em média de 3% do peso em massa, e permaneceram em uma faixa de adição de 1% a 4,5%.

## 2.8 CERA ASPHALTAN B

Asphaltan B é um produto da empresa Romonta GmbH, da Alemanha. Este é uma cera de baixo peso molecular que possibilita, quando aplicando em misturas asfálticas, a diminuição das temperaturas de mistura e de compactação, por possuir a capacidade de redução da viscosidade do ligante. Romonta recomenda a adição de 2 a 4% de massa de cera Asphaltan B em relação peso relativo do ligante (ROMONTA GmbH, 2005).

Este tipo de material pode ser adicionado juntamente aos materiais na usina de asfalto, por exemplo, pode ser adicionado individualmente, ou juntamente com

polímero, ou ser adicionado ao ligante durante sua produção. Similar ao Sasobit, este material atua como um melhorador das características do asfalto. Tais como capacidade de compactação e resistência a deformações permanentes.

O ponto de derretimento do Asphaltan B é aproximadamente 99°C, o que permite reduzir a temperatura de mistura e de compactação das misturas asfálticas. A Romonta não especifica quanto a temperatura de produção pode ser reduzida neste processo (FHWA, 2005).

## **2.9 EVOTHERM**

O Evotherm é uma tecnologia que baseia-se em processo químico, que inclui, aditivos que melhoram o filme de ligante no que diz respeito ao encobrimento dos agregados e que melhoram a trabalhabilidade, a adesividade e os agentes emulsivos. O produto Evotherm encontra-se disponível na forma de emulsão, contendo relativo resíduo de asfalto (aproximadamente 70%).

Diferente do asfalto tradicional, o Evotherm é estocado a 80°C. A água na emulsão é liberada pelo Evotherm como vapor, quando este é misturado com o agregado quente. O que resulta é um asfalto morno semelhante a uma mistura quente em termos de envolvimento do agregado e cor.

O primeiro projeto Evotherm foi construído na África do Sul, em 2003 e, em julho de 2005, foi construída outra pista nos Estados Unidos, em Indianápolis, Indiana. O Centro Nacional de Tecnologia em Asfalto (NCAT) representativamente testou o material proveniente desta pista experimental e obtiveram os seguintes resultados (NCAT, 2005):

- Evotherm melhorou a propriedade de compactação da mistura no compactador vibratório. Dados indicaram uma redução média de 1,5% na porcentagem de vazios;
- A adição não afetou o módulo resiliênte da mistura, comparada com um mistura quente com mesma classe PG de ligante;
- No geral a adição diminuiu o potencial a deformação permanente na mistura;



- As baixas temperaturas de produção da misturas asfálticas mornas podem aumentar o potencial dano causado por umidade;

Outra pista experimental foi construída em Ontário no Canadá e avaliada por J.K. Davidson, em agosto de 2005. A mistura foi realizada em usina a 130°C. Os resultados foram (DAVIDSON, 2005):

- A mistura Evotherm não gerou problemas durante o processo de usinagem da mistura ou durante a manipulação da emulsão;
- Como a emulsão é de apenas 70% de resíduo, a quantidade de emulsão necessitou ser acrescentada em 45% por tonelada de mistura;
- No período de avaliação não foram encontradas evidencias de desagregação do material durante a passagem do rolo compactador;

Neste estudo foram analisadas as emissões provenientes das misturas com adição de Evotherm. Na Figura 10 percebe-se que os valores obtidos, das emissões relativas às misturas mornas, ficaram abaixo dos valores de emissão da mistura quente.

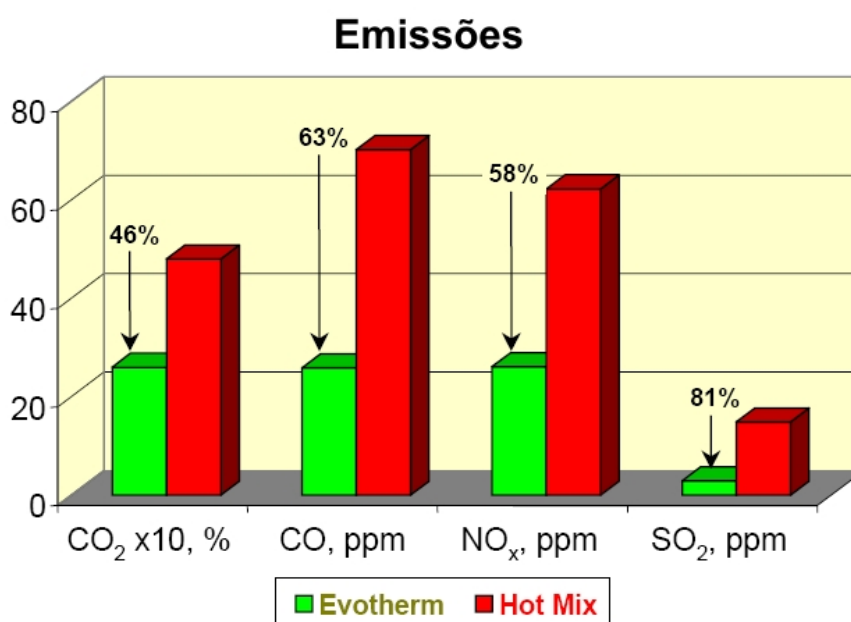


Figura 10 – Emissões provenientes das emissões Evotherm e Mistura Quente.

(DAVIDSON, 2005)

## 2.10 ZEÓLITAS E O BRASIL

Zeólita é um termo de origem grega (*zein* = ferver + *lithos* = pedra) e foi introduzido, em 1756, pelo mineralogista sueco Axel Fredrick Cronsted, para designar certos minerais segundo alusão ao caráter peculiar de suas respostas quando aquecidos.

Atualmente, as zeólitas são definidas, pelo Subcomitê em Zeólita da Associação Internacional de Mineralogia (*Subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association*) e pela Comissão em Nomes de Novos Minerais e Minerais (*Commission on New Minerals and Mineral Names*), como toda substância cristalina com estrutura construída por um arcabouço de tetraedros interligados, cada um consistindo de quatro átomos de oxigênio envolvendo um cátion. Esse arcabouço contém cavidades abertas em forma de canais e “gaiolas”, e que normalmente está ocupado por moléculas de água e cátions extra-arcabouço, em geral, são trocáveis. Os canais têm dimensões suficientes para permitir a passagem de certos elementos selecionados. Em fases hidratadas, a desidratação ocorre na maioria das vezes a temperaturas abaixo de 400°C, sendo quase sempre reversível. O arcabouço pode ser interrompido por grupos de OH e F, o que ocupam os vértices de tetraedros não compartilhados com tetraedros adjacentes (COOMBS et al, 1997 apud CETEM 2005).

Tal pureza e proximidade com a superfície dos depósitos sedimentares brasileiros provocam intenso interesse comercial tanto no Brasil como no exterior. Muitas aplicações industriais foram desenvolvidas, baseadas nas várias propriedades físico-químicas que a zeólita natural proporciona (CELTA BRASIL, 2007).

O uso comercial das zeólitas naturais ainda é tímido, porém, um total de mais de 300.000 toneladas de tufos zeolíticos são extraídos a cada ano nos Estados Unidos, Japão, Cuba, Bulgária, Hungria, Itália, Yugoslávia, Coréia, México, Alemanha e Rússia em conjunto (CETEM, 2005).

As zeólitas naturais encontram aplicações como carga na indústria de papel, como agregados leves na construção civil, em cimentos e concretos pozolânicos, como trocadores iônicos na purificação de água e efluentes de instalações nucleares, na concentração de oxigênio com alta pureza a partir do ar, como canalizador na indústria

de petróleo, como absorventes de resistência ácida na secagem e purificação de gás natural, e na remoção de compostos nitrogenados a partir de sangue renal.

As aplicações e o potencial de aplicações tanto para zeólita sintética quanto para a zeólita natural dependem, é claro, de suas propriedades físicas e químicas fundamentais. Estas propriedades são por sua vez relacionadas diretamente com a composição química e a estrutura cristalina das espécies individualmente.

### 2.10.1 Mineralogia

Na Tabela 2 são apresentadas as zeólitas naturais reconhecidas pela Associação de Mineralogia Internacional (*International Mineralogical Association – IMA*) (COOMBS et al, 1997 apud CETEM, 2005) e suas respectivas fórmulas químicas simplificadas. A Associação de Mineralogia atualiza freqüentemente essa listagem, com a incorporação de novas espécies descobertas. As descrições e as classificações mais tradicionais (fora de uso) das estruturas zeolíticas eram definidas em termos de suas unidades fundamentais de construção (unidades primárias e unidades secundárias) e limitavam-se às estruturas constituídas por tetraedros com  $\text{Si}^{+4}$  e  $\text{Al}^{+3}$ .

Os sistemas de canais das zeólitas são formados pelas diferentes combinações de anéis de tetraedros interligados. Quanto mais largos os canais, na sua parte mais estreita, maiores os cátions que podem ser admitidos na estrutura. Atualmente os minerais de zeólitas são classificados segundo um código (três letras maiúsculas) para a estrutura-tipo, definido pela *Structure Commission of the International Zeolite Association* (International Zeolite Association, 2004), exemplos: laumontita = LAU, estilbita = STI, phillipsita = PHI.

Quanto à composição química, as zeólitas foram consideradas alumino-silicatos hidratados, de metais alcalinos e/ou alcalino-terrosos. Apesar da conceituação de zeólitas ter-se ampliado, admitindo outros cátions que não apenas Si e Al, esses ainda prevalecem, conforme se observa na listagem das zeólitas reconhecidas pela *International Mineralogical Association* (IMA). Comportam-se, nesse caso, como tectossilicatos, da mesma forma que o quartzo e os feldspatos, consistindo de um arcabouço tridimensional de tetraedros de  $\text{SiO}_4^{4+}$ , em que todos os íons oxigênio, dos vértices de cada tetraedros, são compartilhados com tetraedros adjacentes.

Analogamente aos feldspatos, nas zeólitas parte do  $\text{Si}^{4+}$  está substituída por  $\text{Al}^{3+}$ , gerando uma deficiência de carga positiva, balanceada pela incorporação de cátions (cambiáveis) monovalentes ou divalentes, em algum lugar da estrutura, de forma que a relação alumina: bases = 1.

Os conceitos modernos de substituição iônica e de troca catiônica admitem que os cátions substituem-se livremente, um pelo outro, numa mesma espécie de zeólita e que a única restrição diz respeito ao balanço de carga. Assim, numa determinada espécie,  $2\text{Na}^+$  pode substituir  $1\text{Ca}^{2+}$ , ou  $2\text{NH}_4^+$  substituir  $1\text{Sr}^{2+}$ . É possível, por uma simples lavagem, produzir alterações no conteúdo catiônico, diferindo apenas a natureza do cátion nas posições de troca.

São propriedades conhecidas das zeólitas a adsorção, hidratação e desidratação e troca iônica (CELTA BRASIL, 2007).

**Propriedade de Adsorção:** em condições normais, as cavidades das zeólitas são preenchidas com moléculas de água formando esferas de hidratação em torno dos cátions cambiáveis. Uma vez removida a água, geralmente quando aquecidas à 300 – 400°C por algumas horas, as moléculas com diâmetro pequeno, suficiente para encaixar-se nas “janelas”, são rapidamente adsorvidas sobre a superfície interna das cavidades centrais desocupadas. O que gera a conhecida propriedade de “peneira molecular”, encontrada na maioria das zeólitas cristalinas.

**Propriedades de hidratação e desidratação:** devido a sua natureza uniforme dos poros da estrutura, os cristais de zeólitas possuem uma distribuição restrita dos tamanhos dos poros. Quase toda capacidade de adsorção das zeólitas para um gás em particular (incluindo água) é obtido em pressões parciais muito baixas, isto quer dizer que embora a sua capacidade total de adsorção possa ser menor que outros adsorventes (es. Sílica gel), as zeólitas são extremamente eficientes adsorventes mesmo em baixas pressões parciais. Esta propriedade das zeólitas tem sido aplicada na adsorção de traços de água a partir do gás Freon de refrigeradores comuns, o que poderia congelar e entupir bombas e válvulas.

**Propriedades de troca iônica:** os cátions intercambiáveis das zeólitas são fracamente ligados ao arranjo de tetraedros e podem ser removidos ou

intercambiados facilmente do arranjo estrutural lavando-se com uma forte solução de outro elemento. Como tal, as zeólitas são um dos mais efetivos trocadores iônicos conhecido pelo homem, com capacidade de 3 a 4 meq por grama sendo comum. A capacidade de intercâmbio catiônica é basicamente uma função do grau de substituição de silício por alumínio no arranjo da zeólita: quanto maior a carga deficiente da estrutura, e maior o número de átomos alcalinos e alcalinos terrosos requeridos para a neutralidade elétrica. Esse tipo de estrutura microporosa confere as zeólitas uma superfície externa. A estrutura da zeólita permite a transferência de matéria entre os espaços intracristalinos, no entanto, essa transferência é limitada pelo diâmetro dos poros das zeólitas. Dessa forma, só podem ingressar ou sair do espaço intracristalino aquelas moléculas cujas dimensões são inferiores a certo valor crítico, que varia de uma zeólita a outra.

Tabela 2 – Espécie de zeólitas naturais reconhecidas pela IMA até 1997, e respectivas fórmulas.

(CETEM, 2005, p.702)

Espécies	Fórmula simplificada	Espécies	Fórmula simplificada
Amicita	$K_4Na_4[Al_8Si_8O_{32}] \cdot 10H_2O$	Hsianghualita	$Li_2Ca_3[Be_8Si_5O_{12}]F_2$
Amonioleucita	$(NH_4)[AlSi_2O_6]$	Kalborsita	$K_6[Al_4Si_6O_{26}]B(OH)_4Cl$
Analcima	$Na[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$	Laumontita	$Ca_4[Al_8Si_{16}O_{48}] \cdot 18H_2O$
Barrerita	$Na_2[Al_2Si_7O_{18}] \cdot 6H_2O$	Leucita	$K[AlSi_2O_6]$
Bellbergita	$(K,Ba,Sr)_2Sr_2Ca_2(Ca,Na)_4[Al_{18}Si_{18}O_{72}] \cdot 30H_2O$	Levynita – Ca	$(Ca_2,Na,K)_2[Al_6Si_{12}O_{36}] \cdot 1.7H_2O^{(1)}$
Bikitaita	$Na[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$	Levynita - Na	
Boggsita	$Ca_8Na_3[Al_{19}Si_{77}O_{192}] \cdot 70H_2O$	Lovdarita	$K_4Na_{12}[Be_8Si_{28}O_{72}] \cdot 18H_2O$
Brewsterita – Sr		Maricopaíta	$(Pb_2Ca_2)[Al_{12}Si_{36}(O,OH)_{100}] \cdot n(H_2O,OH)$
Brewsterita – Ba	$(Sr,Ba)_2[Al_4Si_{12}O_{32}] \cdot 1.0H_2O^{(1)}$	Mazzita	$(Mg_{2.5}K_2Ca_{1.5})[Al_{10}Si_{26}O_{72}] \cdot 30H_2O$
Chabazita – Ca		Merlinoita	$K_5Ca_2[Al_9Si_{23}O_{64}] \cdot 22H_2O$
Chabazita – Na	$(Ca_{0.5},Na,K)_4[Al_4Si_8O_{24}] \cdot 12H_2O^{(1)}$	Mesolita	$Na_{16}Ca_{16}[Al_8Si_{72}O_{240}] \cdot 4H_2O$
Chabazita – K		Montesommaíta	$K_9[Al_9Si_{23}O_{64}] \cdot 1.0H_2O$
Chiavennita	$Ca,Mn[Be_2Si_5O_{13}(OH)_2] \cdot 2H_2O$	Mordenita	$(Na_2,Ca,K)_4[Al_8Si_{40}O_{96}] \cdot 28H_2O$
Clinoptilolita – K		Mutinaíta	$Na_3Ca[Al_{11}Si_{85}O_{192}] \cdot 60H_2O$
Clinoptilolita–Na	$(Na,K,Ca_{0.5},Sr_{0.5},Ba_{0.5},Mg_{0.5})_6[Al_6Si_{30}O_{72}] \cdot 20H_2O^{(1)}$	Natrolita	$Na_3[Al_2Si_3O_{10}] \cdot 2H_2O$
Clinoptilolita – Ca		Offretita	$CaKMg[Al_5Si_{13}O_{36}] \cdot 1.6H_2O$
Cowlesita	$Ca[Al_2Si_3O_{10}] \cdot 5,3H_2O$	Pahasapaíta	$(Ca_{5.5}Li_{3.6}K_{1.2}Na_{0.2}X_{213.5})Li_8[Be_{24}P_{24}O_{96}] \cdot 38H_2O$
Dachiardita – Ca		Partheíta	$Ca_3[Al_4Si_4O_{15}(OH)_2] \cdot 4H_2O$
Dachiardita – Na	$(Ca_{0.5},Na,K)_{4.5}[Al_{4.5}Si_{20-19}O_{48}] \cdot 13H_2O^{(1)}$	Paulingita-K	$(KCa_{0.5}NaBa_{0.5})_{10}[Al_{10}Si_{32}O_{84}] \cdot 27-44H_2O$
Edingtonita	$Ba[Al_2Si_3O_{10}] \cdot 4H_2O$	Paulingita-Ca	
Epistilbita	$(Ca,Na)_2[Al_2Si_4O_{12}] \cdot 4H_2O$	Perllialita	$K_9Na(Ca,Sr)[Al_{12}Si_{24}O_{72}] \cdot 1.5H_2O$
Erionita – Na		Phillipsita – Na	
Erionita – K	$K_2(Na,Ca_{0.5})_8[Al_{10}Si_{26}O_{72}] \cdot 3.0H_2O^{(1)}$	Phillipsita – K	$(K,Na,Ca_{0.5},Ba_{0.5})_x[Al_{2x}Si_{16-x}O_{32}] \cdot 12HO$
Erionita – Ca		Phillipsita – Ca	
Escolecita	$Ca[Al_2Si_3O_{10}] \cdot 3H_2O$	Pollucita	$(Cs,Na)[AlSi_2O_6] \cdot nH_2O$ , onde $(Cs+n)=1$
Estilbita – Ca	$(Ca_{0.5},Na,K)_9[Al_9Si_{27}O_{72}] \cdot 28H_2O^{(1)}$	Roggianita	$Ca_2[Be(OH)_2Al_2Si_4O_{13}] \cdot <2,5H_2O$
Estilbita – Na		Stellerita	$Ca[Al_2Si_7O_{18}] \cdot 7H_2O$
Faujasita – Na		Terranovaíta	$NaCa[Al_3Si_{17}O_{40}] \cdot >7H_2O$
Faujasita – Ca	$(Na,Ca_{0.5},Mg_{0.5},K)_x[Al_xSi_{12-x}O_{24}] \cdot 1.6H_2O^{(1)}$	Thomsonita	$Ca_2Na[Al_5Si_5O_{20}] \cdot 6H_2O$
Faujasita – Mg		Tschernichita	$Ca[Al_2Si_6O_{16}] \cdot \sim 8H_2O$
Ferrierita – Mg		Tschörtnerita	$Ca_4(K_2,Ca,Sr,Ba)_3Cu_3(OH)_8[Al_2Si_{12}O_{48}] \cdot nH_2O$
Ferrierita – K	$(K,Na,Mg_{0.5},Ca_{0.5})_6[Al_6Si_{30}O_{72}] \cdot 8H_2O^{(1)}$	Wairakita	$Ca[Al_2Si_4O_{12}] \cdot 2H_2O$
Ferrierita – Na		Weinebeneíta	$Ca[Be_3(PO_4)_2(OH)_2] \cdot 4H_2O$
Garronita	$Na,Ca_{2.5}[Al_6Si_{10}O_{32}] \cdot 14H_2O$	Willhendersonita	$K_xCa_{(1.5-0.5)x}[Al_5Si_3O_{12}] \cdot 5H_2O$ ; onde $0 < x < 1$
Gaultita	$Na_2[Zn_2Si_7O_{18}] \cdot 5H_2O$	Yugawaralita	$Ca[Al_2Si_6O_{16}] \cdot 4H_2O$
Gismondina	$Ca[Al_2Si_2O_8] \cdot 4,5H_2O$		
Gmelinita – Ca			
Gmelinita – K	$(Na_2,Ca,K)_4[Al_8Si_{16}O_{48}] \cdot 22H_2O^{(1)}$		
Gobbinsita	$Na_5[Al_5Si_{11}O_{32}] \cdot 12H_2O$		
Gonnardita	$(Na,Ca)_{6-8}[Al_8Si_{20}O_{40}] \cdot 12H_2O$		
Goosecrookita	$Ca[Al_2Si_6O_{16}] \cdot 5H_2O$		
Gottardita	$Na_3Mg_3Ca_5[Al_{19}Si_{117}O_{272}] \cdot 93H_2O$		
Harmotoma	$(Ba_{0.5},Ca_{0.5},K,Na)_5[Al_5Si_{11}O_{32}] \cdot 12H_2O$	Minerais com status duvidoso de zeolita	
Heulandita – Ca		Paranatrolita	$Na_2[Al_2Si_3O_{10}] \cdot 3H_2O$
Heulandita – Sr	$(Ca_{0.5},Sr_{0.5},Ba_{0.5},Mg_{0.5},Na,K)_9[Al_9Si_{27}O_{72}] \cdot \sim 24H_2O^{(1)}$	Tetranatrolita	$(Na,Ca)_{16}[Al_{16}Si_{21}O_{80}] \cdot 16H_2O$
Heulandita – K		Tvedalita	$(Ca,Mn)_4Be_3Si_6O_{17}(OH)_4 \cdot 3H_2O$

## 2.10.2 Geologia

As zeólitas podem ser encontradas em uma grande diversidade de ambientes geológicos, variando quanto à idade, associação litológica e condicionamentos genéticos. A literatura é fértil de referências sobre zeólitas preenchendo amígdalas e cavidades em rochas vulcânicas máficas, especialmente lavas basálticas. É desse universo que provêm os mais belos exemplares de cristais zeolíticos, em geral expostos

em museus ou disputados por colecionadores. Entretanto, face ao grande potencial de aproveitamento econômico, são os jazimentos associados às rochas sedimentares e/ou vulcano-sedimentares que vêm despertando maior interesse sob uma ótica de prospecção (REZENDE; ANGÉLICA, 1977 apud CETEM, 2005). Essas zeólitas são genericamente tratadas na literatura especializada como *zeólitas sedimentares*. Nesse universo predominam cinco espécies de zeólitas: analcima, clinoptilolita, heulandita, laumontita e phillipsita, e em menor proporção chabazita, erionita, mordenita, natrolita (com gonnardita) e wairakita (HAY, 1981 apud CETEM, 2005).

A diversidade dos condicionamentos geológicos e a complexidade para se estabelecer uma sistematização desses condicionamentos ficam bem evidentes nos trabalhos que buscam a compreensão dos mecanismos que controlam os jazimentos zeolíticos. Rezende; Angélica (1997 apud CETEM, 2005), fazem uma abordagem sintética de alguns desses trabalhos.

Uma sistematização bem completa é apresentada por Gottardi (1989 apud CETEM, 2005). Esse pesquisador propôs uma classificação englobando as diversas possibilidades genéticas para as zeólitas naturais, distinguindo-se quatro mecanismos básicos:

- Diagênese (e metamorfismo de baixíssimo grau);
- Gênese hidrotermal;
- Zeólitas em geodos e cavidades de basaltos;
- Gênese magmática.

A **diagênese** (metamorfismo de baixíssimo grau) compreende os processos desenvolvidos a baixas temperaturas (<200°C). Há duas condições específicas distintas: acima dos lençóis freáticos e abaixo.

Diagênese acima do lençol freático, envolvendo as ocorrências em solos, em sistemas hidrologicamente abertos, em sistemas hidrologicamente fechados e em geoautoclaves.

Diagênese abaixo do lençol freático, englobando as ocorrências em sedimentos marinhos e a diagênese por soterramento.

### 2.10.3 Zeólitas em rochas sedimentares no Brasil

Rezende; Angélica (1997 apud CETEM, 2005) desenvolveram essa temática, concentrando a abordagem em três ocorrências cujos condicionamentos geológicos poderiam servir como guias de prospecção regional:

- Zeólitas na Formação Corda - Bacia do Parnaíba (MA/TO);
- Analcima na Formação Adamantina - Bacia do Paraná (SP);
- Heulandita na Formação Botucatu - Bacia do Paraná (MS).

Além dessas, mencionam-se as ocorrências na Formação Uberaba, também na bacia do Paraná e as ocorrências na Formação Macau, Bacia Potiguar, conforme apresentado na Figura 11.

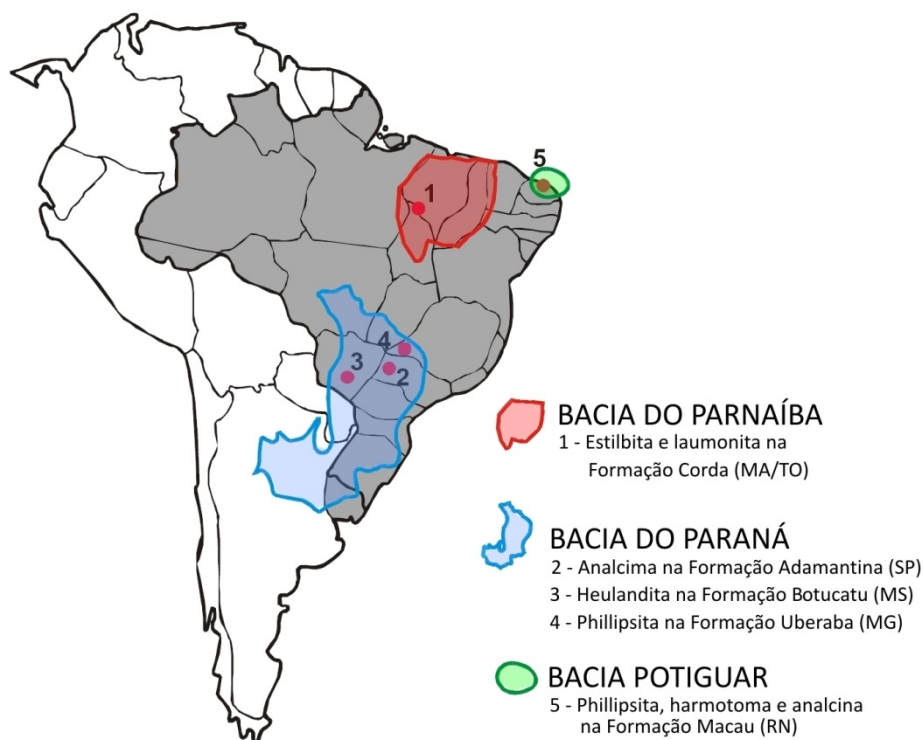


Figura 11 – Principais ocorrência de zeólitas em rochas sedimentares no Brasil.

(CETEM, 2005, p. 707)

**Zeólitas na Formação Corda - Bacia do Parnaíba (MA/TO)** - Compreendem os mais importantes registros de zeólitas em rochas sedimentares no Brasil. As zeólitas estilbita e laumontita ocorrem como cimento de arenitos eólicos e fluviais da Formação Corda, imediatamente recobrando basaltos da Formação Mosquito.



**Analcima na Formação Adamantina - Bacia do Paraná (SP)** - Trata-se de uma ocorrência em subsuperfície, na cidade de Macedônia, região noroeste do Estado de São Paulo. A analcima ocorre como cimento de arenitos, associada a argilominerais esmectíticos, na porção basal da Formação Adamantina, imediatamente acima de basaltos da Formação Serra Geral.

**Heulandita na Formação Botucatu - Bacia do Paraná (MS)** - a heulandita apresenta-se em lente de arenito intercalada a derrames de basalto da Formação Serra Geral. A heulandita ocorre como uma importante fase de cimentação. Os arenitos intratrapianos (ou intercalares) constituem, assim, alvos prospectivos merecedores de investigação nas bacias do Paraná e do Parnaíba.

**Phillipsita na Formação Uberaba** - a ocorrência de zeólitas na Formação Uberaba é resultado da alteração do material vulcânico detrítico e cimento, preenchendo o espaço intergranular da rocha. As zeólitas são formadas nos primeiros estágios da eodiagênese em um processo favorecido pela instabilidade termodinâmica do material vulcânico.

**Zeólitas na Formação Macau** - a phillipsita, a harmotoma, a wellsita e a analcima, preenchem tanto a vesícula como ocupam os espaços intersticiais nos hialoclastitos da Formação Macau, na Bacia Potiguar (RN), em subsuperfície. Esses hialoclastitos são rochas constituídas por fragmentos de olivina basaltos vítreos, formados a partir da interação entre lavas de composição básica e a água do mar.

**Outras áreas potenciais no Brasil** – outras áreas do Brasil apresentam potencial para prospecção de zeólitas, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Possíveis ocorrências de zeólitas no Brasil  
(RESENDE; ANGELA, 1997 apud CETEM, 2005)

Unidade	Idade	Localização	Litologia de interesse
Ilha de Trindade	Terciário / Quartenário	Ilha Oceânica	Lavas e piroclásticas alcalinas
Ilha de Fernando de Noronha	Terciário	Ilha Oceânica	Lavas , tufos e piroclásticas alcalinas
Formação Boa Vista	Terciário	PB	Basalto, cineritos e bentonitas
Bacia do Paraná: Fm. Bauru	Cretáceo	MG, PR	Arenito, tufos, argilas (alteritos)
Fm. Serra Geral	Cretáceo	PR, MS, SP, SC, RS, GO, MG	Lavas vítreas; sedimentos intercalados
Fm. Caiuá	Cretáceo	PR, MS, SP	Arenitos róseos, arroxeados a vermelho, origem eólica e fluvial
Fm. Uberaba	Cretáceo / Terciário	MG	Arenitos tufáceos
Bacia Sanfranciscana Fm. Mata da Corda	Cretáceo	MG	Vulcanitos, vulcanoclásticas e rochas sedimentáres associadas
Bacia do Takutu	Jurássico / Cretáceo	RR	Vulcânicas e sedimentos sobrepostos
Grupo Pernambuco: Fm. Ipojuca	Cretáceo	PE	Vulcânicas e vulcanoclásticas
Fm. Cabo	Terciário	PE	Conglomerados com fragmentos de vulcânicas

## **3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

### **3.1 APRESENTAÇÃO**

O entendimento das caracterizações mecânicas das misturas asfálticas parte do conhecimento dos materiais que a constituem. Sua origem é proveniente da soma dos conhecimentos coletados ao longo de anos de estudos e experimentos.

Com base em definições da bibliografia, considera-se que as misturas asfálticas possuem suas características físicas herdadas dos materiais constituintes. Os granulares conferem resistência à estrutura diante das aplicações de cargas. O ligante faz a união entre cada partícula deste esqueleto granular, elemento sólido com comportamento próximo ao elástico linear. O ligante é um material viscoelástico termo-suscetível, e assim as misturas asfálticas seguem o comportamento apresentado pelo ligante.

Este capítulo aborda os métodos de avaliação do comportamento mecânico, módulo e fadiga. Serão descritos os ensaios realizados em laboratório que avaliam corpos de prova trapezoidais. Estes métodos estão descritos com base na metodologia francesa de avaliação das misturas asfálticas.

O ensaio de módulo complexo propõe avaliar o módulo das misturas em diferentes temperaturas e frequências de sollicitação. O ensaio de fadiga permite avaliar quanto a sua durabilidade ou duração da vida útil.

#### **3.1.1 Sollicitação nos Pavimentos Asfálticos**

Todos os pavimentos estão sujeitos a sollicitações repetidas que se relacionam a cada passagem de um veículo. Sua carga é transmitida à estrutura diretamente por cada superfície de contato do tipo pneu/pavimento. Experiências realizadas com instrumentação de seções de pavimentos asfálticos comprovam o real comportamento das camadas. No momento da passagem de um veículo sobre um determinado ponto

da superfície pavimentada, o material componente de cada camada apresenta uma deformação correspondente.

Por sinais obtidos com sensores colocados sob a fibra inferior das camadas asfálticas, torna-se possível determinar os valores característicos de deformação. Da análise destes sinais é possível encontrar os valores máximos e mínimos de amplitude registrados.

A forma geral dos sinais de deformação pode ser dividida, de maneira simplificada em duas direções: longitudinal e transversal. Para compreender a forma destas curvas parametrizadas é necessário entender a deformação causada à estrutura do pavimento durante a passagem do veículo de carga. Em outras palavras, a forma depende do deslocamento da carga (PERRET, 2003).

A Figura 12 apresenta uma estrutura hipotética simplificada de duas camadas com as respectivas deformações encontradas durante a passagem de uma carga qualquer em movimento. É possível perceber que o material flexiona de maneira alternada entre compressão e tração na vista longitudinal.

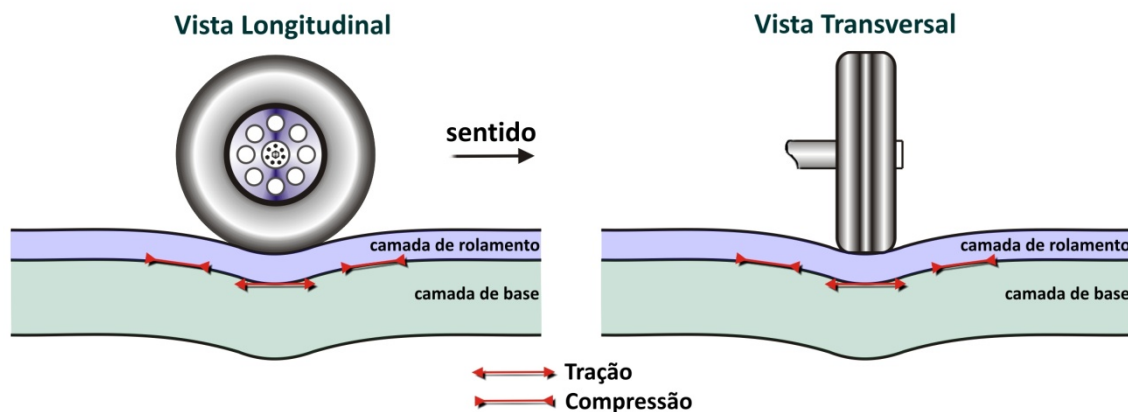


Figura 12 – Deformações no pavimento pela passagem de uma carga em movimento.

(PERRET, 2003, p. 62)

Esta alternância de esforço existe em qualquer posição de onde são realizadas medições (GROENENDIJK, 1999 apud PERRET, 2003 p.62), ou seja, o fenômeno independe da profundidade. Com sensores instalados sob a camada de rolamento, composta por mistura betuminosa, verifica-se que os valores da deformação no momento da passagem do veículo são de dois tipos: tração e compressão. Sua

distribuição segue, conforme a passagem da carga, em: compressão–tração–compressão (vista longitudinal).

Ao observar a vista longitudinal e transversal da Figura 12, nota-se que não existe modificação do sinal das deformações transversais durante a passagem da carga. Neste momento, os materiais estão submetidos a esforços de compressão e tração. Conforme já comentado, estes esforços variam segundo o ponto de medição, tanto lateralmente quanto verticalmente em relação à posição da carga. É possível resumir que abaixo da camada de rolamento há uma **zona de tração**, na região próxima da carga, e há uma **zona de compressão**, na região lateral da carga.

A Figura 13 apresenta o sinal obtido por sensores posicionados abaixo da camada de rolamento. As alternâncias de sinais são apresentadas na imagem da deformação longitudinal.

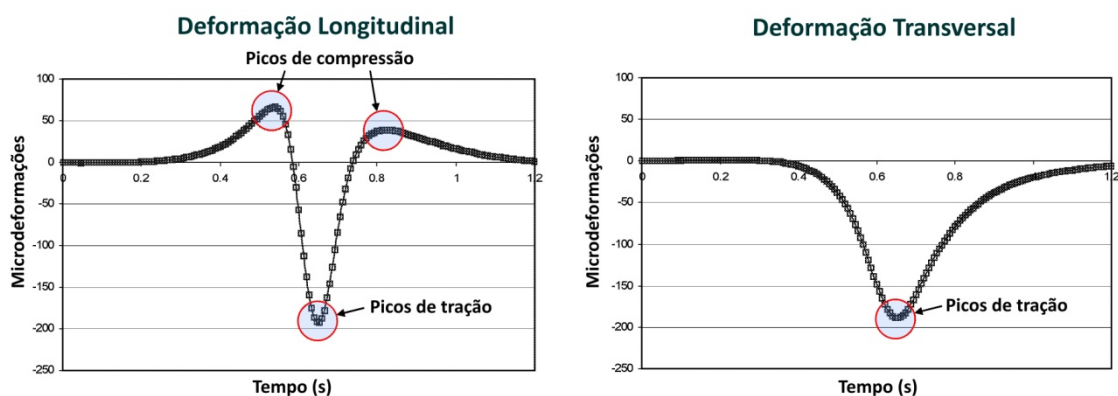


Figura 13 – Sinal de deformação longitudinal abaixo da camada de rolamento.

(PERRET, 2003, p. 83)

Os sinais de deformação longitudinal e transversal diferenciam-se entre si quanto a sua forma pelos picos de alternância. A deformação longitudinal apresenta alternância de sinal entre compressão e tração na forma de picos de sinal. Ao verificar o sinal longitudinal, é possível perceber uma dissimetria entre os dois picos de compressão. De acordo com Perret (2003), esta diferença de valores traduz o comportamento viscoelástico das misturas betuminosas.

Conforme representado na imagem da deformação longitudinal, existem picos de compressão antes e após a passagem do pneu, intercalados por um pico de tração. Este pico de tração representa o exato momento em que a carga passa sobre o sensor

de geração do sinal, o que representa o esforço máximo aplicado na estrutura da camada de rolamento.

Com estes resultados pode-se concluir que o comportamento real das camadas asfálticas segue os padrões de solicitações por flexão alternada. Este tipo de carregamento é uma tarefa difícil de reproduzir em laboratório. A sucessão de diferentes sinais varia segundo o tráfego passante, o ambiente (temperatura, umidade, envelhecimento), os níveis de amplitude, as distribuições de tensões e de deformações e a velocidade de amplitude de carregamento. Em laboratório, nos ensaios de módulo complexo e fadiga, os ciclos de aplicação das cargas ou deformações são sempre periódicos (DE LA ROCHE, 1996). Certos autores consideram que a forma de solicitação cíclica aplicada tem pouca influência sobre a duração da vida dos materiais (RAITHBY et al, 1972 apud DE LA ROCHE, 1996). Outros consideram que este é muito importante na análise dos resultados dos ensaios de Fadiga, sobretudo pela influência da velocidade de aplicação da carga sobre o módulo complexo (SAÏDE, 1988 apud DE LA ROCHE, 1996).

De fato, é muito comum simplificar as condições reais de carregamento, devido a sua complexidade. Em geral, tem-se preferido os sinais do tipo senoidal para a realização dos testes de fadiga e módulo complexo em laboratório. A frequência é geralmente escolhida em função da velocidade da solicitação. A forma do sinal de deformação experimental é comparada a uma curva sinusoidal, onde a frequência é escolhida a partir de uma decomposição em séries de Fourier, conforme mostra a Figura 14.

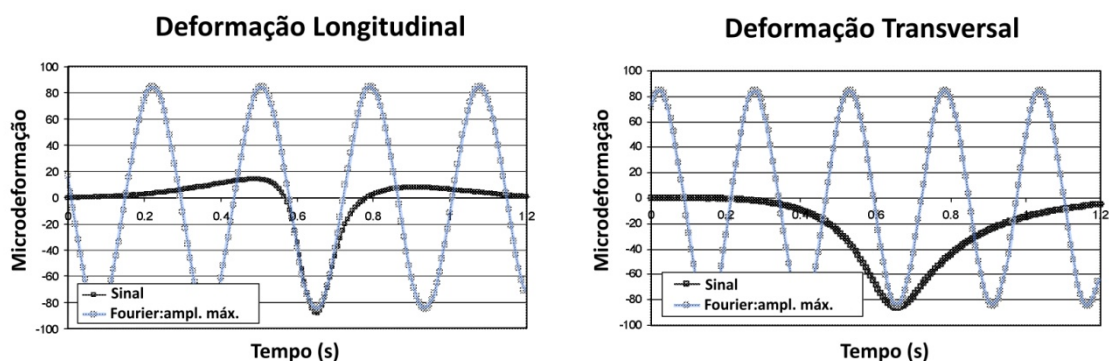


Figura 14 – Sinal de deformação e decomposição em séries de Fourier.

(PERRET, 2003, p. 151)

Existem outras formas de sinais utilizados em ensaios em laboratório como a haversenoidal, o carregamento cíclico e o retangular, conforme indicado na Figura 15.

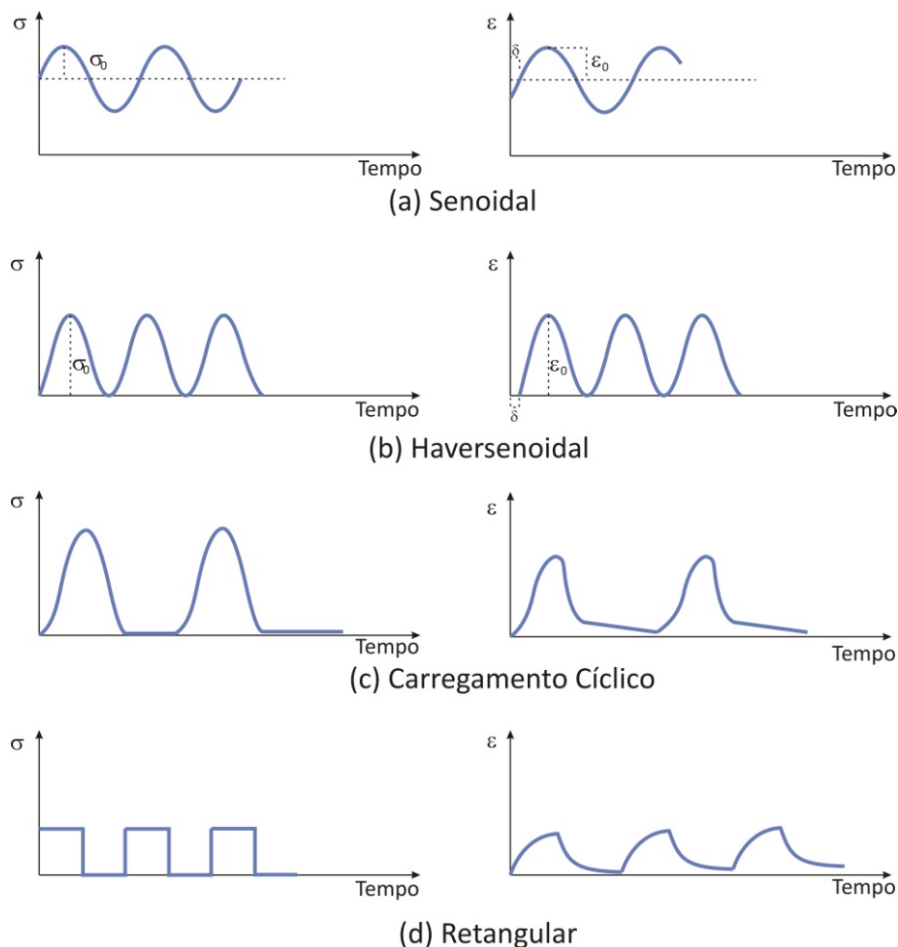


Figura 15 – Formas de sinais de tipos de sollicitação: (a) senoidal; (b) haversenoidal; (c) carregamento cíclico; (d) retangular.

(DE LA ROCHE, 1996, p. 84)

### 3.2 O MÓDULO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Existem muitos tipos de módulos utilizados para caracterizar as misturas betuminosas. Mesmo que esta seja uma característica de cada material, a determinação do módulo depende da forma em que são realizadas as medições e das condições físicas de condicionamento do material.

No caso dos materiais ditos perfeitamente elásticos, as deformações aparecem imediatamente após a aplicação da carga e desaparecem imediatamente ao removê-la. Contudo, esta definição não implica linearidade na relação tensão/deformação (MOMM, 1998).

Os concretos asfálticos exibem uma combinação de respostas elásticas e viscosas dependentes do tempo de aplicação de carga e da temperatura. Em certos casos a resposta pode ser tipicamente elástica e, em outros, tipicamente viscosa.

### **3.2.1 Comportamento das misturas betuminosas**

Os materiais betuminosos, de acordo com a literatura, são considerados homogêneos, isotrópicos, viscoelásticos, lineares e com susceptibilidade térmica.

#### **Homogeneidade**

Toda mistura betuminosa possui uma estrutura granular, conferindo um caráter heterogêneo. A homogeneidade das misturas está ligada diretamente aos processos de mistura e compactação das massas asfálticas. Admite-se, então, uma homogeneidade segundo as dimensões do maior grão existente na curva granulométrica.

Trabalhar com corpos de prova não-homogêneos torna-se um problema nos estudos em laboratório. Uma razão de 10 entre a espessura máxima dos granulares e a espessura dos corpos de prova é necessária para serem considerados como homogêneos. Embora nem sempre seja possível obter esta relação, a hipótese de homogeneidade é feita. Certos corpos testados a fadiga possuem uma relação entre o tamanho dos granulares e o tamanho do corpo de prova da ordem de 3 (DE LA ROCHE, 1996).

#### **Isotropia**

O modo como as estradas são compactadas (o espalhamento do material pelas camadas e compactados por passagens sucessivas do compactador pela superfície) confere ao material certa anisotropia (gradiente de densidade no sentido da espessura da camada, orientada pela compactação dos granulares). Da mesma forma, os corpos de prova em laboratório apresentam essa propriedade.

Para amenizar os efeitos do gradiente de compactação, os corpos de prova para os ensaios de módulo e de fadiga são extraídos da parte central das placas de concreto asfáltico. Sendo assim, é estabelecida a hipótese da isotropia da massa compactada. (MOMM, 1998).



### **Viscoelasticidade**

As misturas asfálticas herdam a característica viscoelástica do ligante que a constitui, um material viscoelástico e termossuscetível.

Nas cargas aplicadas muito rapidamente, a massa asfáltica apresenta um comportamento praticamente elástico; já nos casos quando a carga é aplicada muito lentamente, ela apresenta um comportamento predominante viscoso. Dentro destes dois extremos e nos limites da temperatura predominante no ambiente, os concretos asfálticos apresentam comportamento viscoelástico. No entanto, a linearidade é dependente do nível de deformação (MOMM, 1998).

### **Linearidade**

Assume-se que os materiais betuminosos possuem um comportamento linear no domínio das pequenas deformações (LINDER, 1977; HUET, 1963). Neste domínio, supõe-se a superposição dos efeitos: a resposta de um material a uma solicitação composta por um número de solicitações elementares, em outras palavras, é a soma das respostas de cada uma das solicitações elementares (DE LA ROCHE, 1996).

### **Susceptibilidade térmica**

A temperatura é um parâmetro determinante no comportamento do material betuminoso. Nas temperaturas baixas, as misturas possuem uma rigidez elevada, o que gera um comportamento frágil. Em outro extremo, a temperatura elevada, os valores de rigidez baixos, módulo menor apresentam deformabilidade alta.

## **3.3 O MÓDULO COMPLEXO**

O ensaio para avaliar o módulo complexo consiste em submeter o material (no caso as misturas asfálticas) a uma seqüência de solicitações sinusoidais com frequência variável, que se valida somente quando efetuado no domínio das pequenas deformações.

Ao avaliar uma mistura asfáltica no domínio das pequenas deformações onde o comportamento esperado é viscoelástico linear, uma solicitação sinusoidal aplicada desencadeia uma resposta também sinusoidal (HUET, 1963 apud DE LA ROCHE, 1996).

O **módulo complexo**  $E^*$  é um número complexo definido pela relação entre a amplitude complexa da tensão sinusoidal da pulsação  $\omega$  aplicada ao material  $\sigma = \sigma_0 \text{sen}(\omega t)$  e a amplitude complexa da deformação sinusoidal que resulta em regime estável. Em consideração à característica viscoelástica do material, a deformação apresenta uma defasagem com relação à tensão, o que é traduzido por um ângulo de fase  $\phi$  entre os dois sinais:  $\varepsilon = \varepsilon \text{sen}(\omega t - \phi)$ . Isso fornece parâmetros indicativos da predominância viscosa ou elástica do material, conforme os valores extremos:

$\phi = 0^\circ$  para materiais puramente elásticos;

$\phi = 90^\circ$  para materiais puramente viscosos.

O módulo complexo tem sua notação conforme as equações abaixo:

$$\sigma(t) = \text{lm}[\sigma_0 \cdot e^{i\omega t}] \text{ com } \sigma^*(t) = \sigma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \text{lm}[\varepsilon^*(t)] \text{ com } \varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \phi)} \quad (2)$$

$$E^*(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 e^{-i\phi}} = |E^*| e^{i\phi} \quad (3)$$

Onde  $|E^*|$  é denominado **módulo dinâmico** ou **módulo de rigidez**.  $\phi$  é denominado **ângulo de fase** do material (permite estimar a energia de dissipação do material).

A seguinte notação pode igualmente ser utilizada (lembre-se que  $i = \sqrt{-1}$ ).

$$E^*(i\omega) = E_1 + iE_2 \quad (4)$$

$E_1$  é denominado **módulo elástico real**: parte real do módulo e que está associado ao comportamento elástico do material. Permite avaliar a parte recuperável da energia armazenada.

$E_2$  é denominado **módulo da perda**: parte imaginária do módulo e está associada ao comportamento viscoso irreversível do material devido a uma dissipação de energia. Este valor representa a energia produzida por atrito interno no material (RIVIERE, 1996).

A representação no plano Argand-Gauss do módulo complexo permite separar a parte real da parte imaginária do módulo. O plano cartesiano  $xOy$  contém sobre os eixos  $Ox$  e  $Oy$ , respectivamente, a parte real e a parte imaginária. A **norma do módulo** é

definida pela equação da distância cartesiana ente a origem e o ponto nas coordenadas (E1;E2).

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

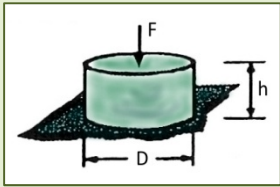
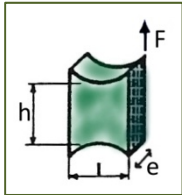
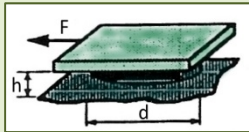
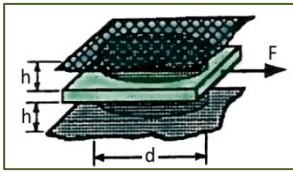
O módulo complexo permite a generalização dos corpos viscoelásticos pelas leis mecânicas, cujo princípio é reservado somente aos corpos elásticos.

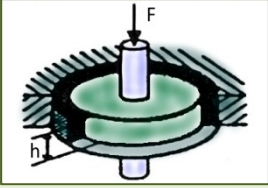
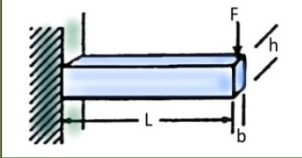
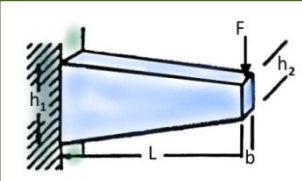
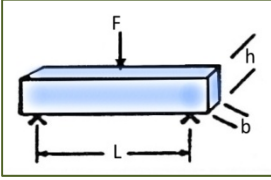
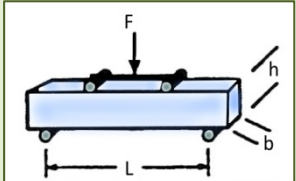
### 3.3.1 Os Diferentes Tipos de Ensaio Existentes

A Tabela 4 agrupa diferentes ensaios existentes com seu esquema e princípio. Contém os fatores de ‘forma’ e de ‘massa’ juntamente com as principais referências bibliográficas.

Tabela 4 – Principais ensaios de módulo complexo existentes.

(FRANCKEN et al, 1996 apud DE LA ROCHE , 1996).

Ensaio	Esquema do Princípio	Fator de Forma * $\gamma$	Fator de Massa	Referência
Tração compressão, com ou sem confinamento		$\frac{h}{\pi D}$	-	(CHARIF, 1991) (DOUBBANEH, 1995)
Cisalhamento		$\frac{l}{he}$	-	(ASSI, 1981)
Cisalhamento a altura constante		$\frac{h}{\pi D^2}$	-	(KENNEDY 48L 48L, 1994)
Shearing Test Machine		$\frac{h}{\pi D^2}$	-	(LEMPE 48L 48L, 1992)

Ensaio	Esquema do Princípio	Fator de Forma * $\gamma$	Fator de Massa	Referência
Co-Axial Shear Test		$\frac{\ln\left(\frac{d}{D}\right)}{2\pi D^2}$	-	(GÜBLER, 1990)
Flexão 2 Pontos		$\frac{4L^3}{bh^3}$	$\frac{M}{4} + m$	(FRANCKEN 49L 49L, 1994)
Flexão 2 Pontos		$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)} \left[ \left( 2 - \frac{h_2}{h_1} \right) \cdot \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$	$0,135M + m$	(HUET, 1963) (CHAUVIN, 1992)
Flexão 3 Pontos		$\frac{24L^3}{4\pi bh^3}$	$0,5M + m$	(MYRE, 1992)
Flexão 4 Pontos		$\frac{2L^3 - 3Ll^2 + l^3}{8bh^3}$	$0,5M + m$	(PRONK, 1996)

Onde: M, massa do corpo de prova e m massa do equipamento motor. No caso do ensaio de cisalhamento, o fator de forma é dado pelo cálculo de G.

Existem duas maneiras distintas para obter o módulo das misturas betuminosas. A primeira permite acesso direto às tensões e deformações por ensaios tração/compressão e cisalhamentos. Na segunda maneira, os ensaios são executados por sucessivas flexões em corpos de provas prismáticos.

De maneira genérica com os valores da força **F** e da deformação **D** aplicada aos corpos de prova, juntamente com a defasagem  $\varphi$  entre os dois sinais, na determinação do módulo complexo da mistura betuminosa dois fatores o amparam:

- Um fator da forma  $\gamma$ , dependente do dimensionamento dos corpos de prova;
- Um fator da massa  $\mu$ , dependente da soma (caso necessário) dos efeitos inerentes da massa **M** do corpo de prova em movimento e da massa **m** do equipamento (capa de fixação, união corpo de prova e mecanismo motor, etc.).

As partes, real e imaginária, do módulo complexo são representadas por Huet, 1963:

$$E_1 = \gamma \left( \frac{F}{D} \cos\varphi + \mu\omega^2 \right) \quad (6)$$

$$E_2 = \gamma \left( \frac{F}{D} \sin\varphi \right) \quad (7)$$

Onde  $\omega$  é a pulsação.

### 3.3.2 Apresentação dos Resultados

Os diferentes componentes do módulo complexo variam com a temperatura e a frequência de solicitações fixadas para cada ensaio elementar. Os resultados experimentais  $|E^*|$ ,  $\varphi$ , **E1** e **E2** são usualmente expressos com auxílio das representações clássicas nas curvas Isotérmica, Frequência-Temperatura, Isócora, Espaço Black e Cole-Cole.

#### 3.3.2.1 Curvas Isotérmicas

Os resultados das curvas isotérmicas são obtidos ao traçar o módulo do módulo complexo  $|E^*|$  em função da frequência e por cada temperatura de ensaio T em coordenadas logarítmicas (Figura 16). As curvas isotérmicas permitem estimar a susceptibilidade cinética a uma dada temperatura. Cada descontinuidade das linhas da curva representa uma variação de estado. A variação do módulo em função da

temperatura, para uma dada freqüência, permite avaliar a susceptibilidade térmica das misturas asfálticas (RIVIERE, 1996).

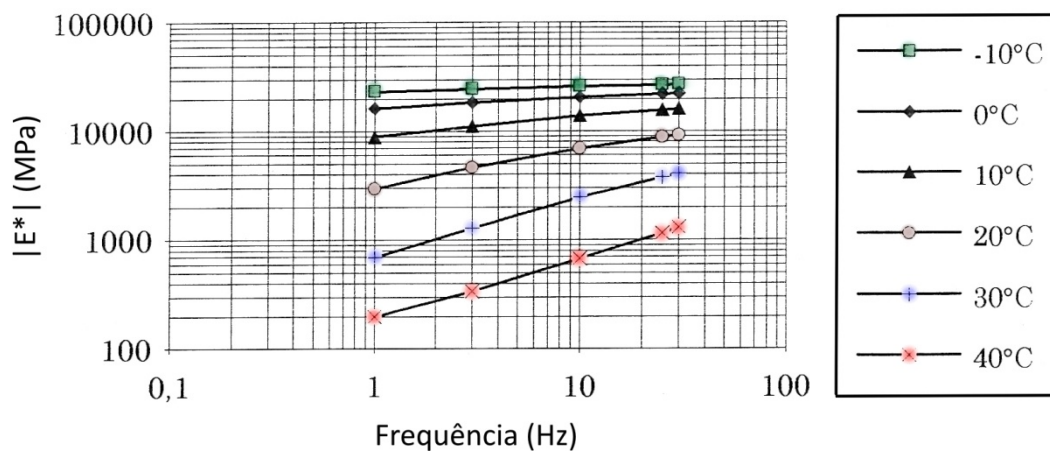


Figura 16 – Isotérmica do módulo complexo.

(DE LA ROCHE, 1996, p. 11)

### 3.3.2.2 Curva Equivalência Freqüência-Temperatura

É possível utilizar a propriedade de equivalência tempo-temperatura para obter uma curva contínua (freqüência-temperatura). Esta representação gráfica fornece informações sobre o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, uma união das curvas que unem pontos com o mesmo valor de módulo do material.

A curva de equivalência freqüência-temperatura pode ser determinada pela transformação da relação  $E^*(\omega, T)$  na relação  $E^*(\omega f(T))$ . Nesta relação é possível construir uma curva  $(\log |E^*|, \log F)$  para uma temperatura de referência ( $T_R$ ) escolhida arbitrariamente, com a translação paralela dos eixos das freqüências de cada isotérmica relacionada com a isotérmica correspondente e a temperatura de referência, até que haja uma superposição de pontos de mesma ordenada.

A curva obtida é denominada curva mestre. Ela permite obter valores de módulo para freqüências inacessíveis em experimentações, conforme Figura 17. Ela é geralmente determinada por uma temperatura  $T_R$  de 10°C.

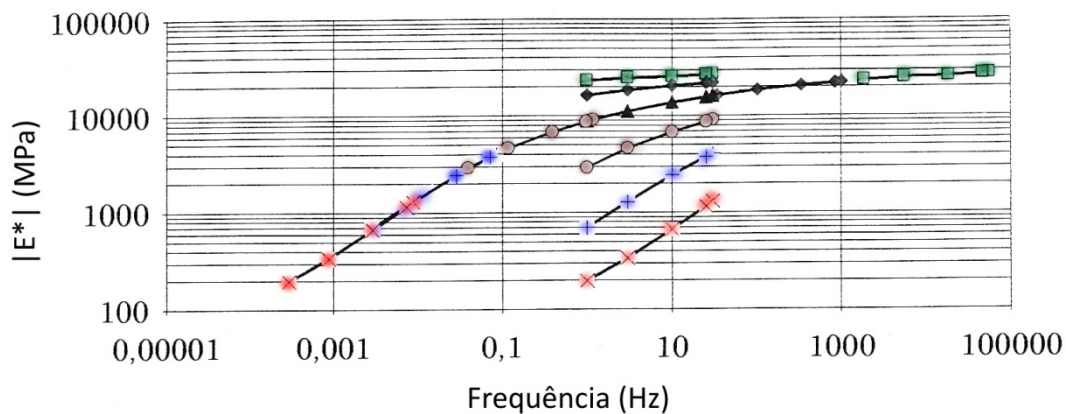


Figura 17 – Curva de Equivalência Freqüência/Temperatura.

(DE LA ROCHE, 1996, p. 12)

Uma curva mestre, ou matriz, cujos valores formam uma linha horizontal, caracterizaria uma mistura com comportamento puramente elástico (RIVIERE, 1996). Por outro lado, uma curva próxima do vertical corresponderia a um concreto asfáltico muito susceptível às variações de freqüência e de temperatura.

Existem três formas de construção da curva matriz que permitem realizar a translação das curvas isotermas. Duas destas são formulações matemáticas com base em um coeficiente de translação e uma forma gráfica.

Para a fórmula de William, Landel e Ferry e a equação de Arrhénius, o coeficiente de translação da isotérmica  $T$  em relação à isotérmica  $T_R$  da referente escolhida é  $\log(a_T)$ , tal que  $E^*(\omega, T) = E^*(\omega \cdot a_T)$  com  $a_T = 1$ . A representação de  $\log(a_T)$  é:

Fórmula de William, Landel e Ferry:

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_R)}{(T - T_R) + C_2} \quad (8)$$

(ou) A equação de Arrhénius:

$$\log(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (9)$$

Com  $C_1$  e  $C_2$  constantes dependentes do material;

$\delta H$  energia aparente de ativação característica do material;

$R$ , constante de gás parafina;

$T$  e  $T_R$ , temperatura expressa em °K.

Na translação gráfica, um ponto de referência é escolhido ( $F_{ref}, E_{ref}$ ) sobre a curva que se quer transferir (ver Figura 18). Sobre a outra curva, três pontos são escolhidos ( $F_1, E_1$ ;  $F_2, E_2$  e  $F_3, E_3$ ) de maneira que o valor do módulo do ponto de referência seja próximo do valor do módulo no ponto ( $F_2, E_2$ ). As retas que passam pelos pontos são então determinadas. Dois pontos onde o valor de módulo é igual ao valor do módulo de referência são obtidos. A frequência média destes dois pontos é utilizada para a translação, que é realizada em escala logarítmica.

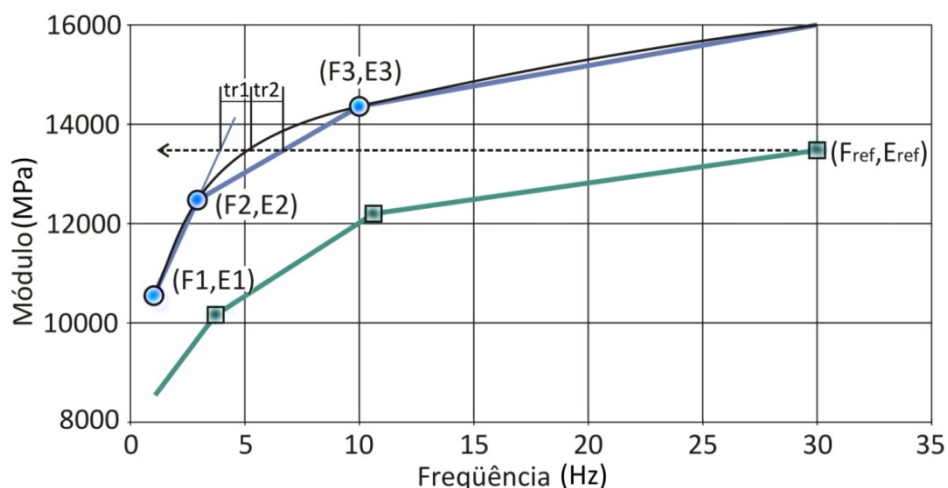


Figura 18 – Translação gráfica das curvas isotérmicas.

Com a determinação dos pontos, a translação da referente curva é determinada por:

$$tr_1 = \exp \left[ \ln(F_1) + \frac{\ln\left(\frac{F_2}{F_1}\right)}{\ln\left(\frac{E_2}{E_1}\right)} \right] \times \ln\left(\frac{E_{ref}}{E_1}\right) \quad (10)$$

$$tr_2 = \exp \left[ \ln(F_2) + \frac{\ln\left(\frac{F_3}{F_2}\right)}{\ln\left(\frac{E_3}{E_2}\right)} \right] \times \ln\left(\frac{E_{ref}}{E_2}\right) \quad (11)$$

$$tr_m = \frac{(tr_1 + tr_2)}{2} \quad (12)$$

$$\ln(\alpha_T) = \ln\left(\frac{F_{ref}}{tr_m}\right) \quad (13)$$

Onde:

$tr_1$ ,  $tr_2$  são as translações;



( $F_i$ ,  $E_i$ ) são pontos (frequência, módulo);

$\alpha_T$  é o fator de translação.

A construção da curva mestra submetida a um grande número de resultados experimentais, proveniente de diferentes tipos de ensaios por Francken (1996) apud De La Roche (1996), permite concluir que a melhor equação é a de Arrhénius para  $\log(a_T)$ .

### 3.3.2.3 Curvas Isócronas

As curvas Isócronas permitem visualizar a diminuição do valor da norma do módulo complexo da mistura com o aumento da temperatura. Cada uma das curvas representa uma das respectivas frequências de ensaio. A Figura 19 apresenta uma das curvas utilizadas por De La Roche (1996).

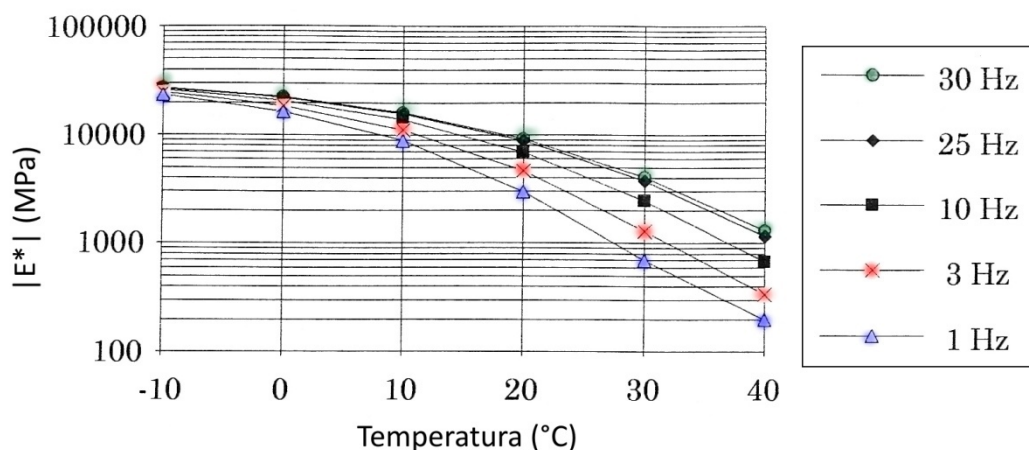


Figura 19 – Curva isócrona dos valores de módulo complexo.

(DE LA ROCHE, 1996, p. 13)

Semelhante às curvas isotérmicas, esta representação permite estimar a susceptibilidade térmica das misturas betuminosas (variação do módulo pela variação da temperatura).

### 3.3.2.4 Representação Cole-Cole

A representação do módulo complexo no plano cole-cole consiste na apresentação dos valores da parte real, ou seja,  $E_1$  no eixo das abscissas. Além disso, A

representação do módulo complexo no plano cole-cole permite apresentar os valores da parte imaginária  $E_2$  no eixo das ordenadas. Esta curva é semelhante a um arco de círculo, conforme é possível observar na Figura 20.

A representação pode ser utilizada para calibrar um dos modelos de comportamento reológico das misturas asfálticas: o modelo de Huet.

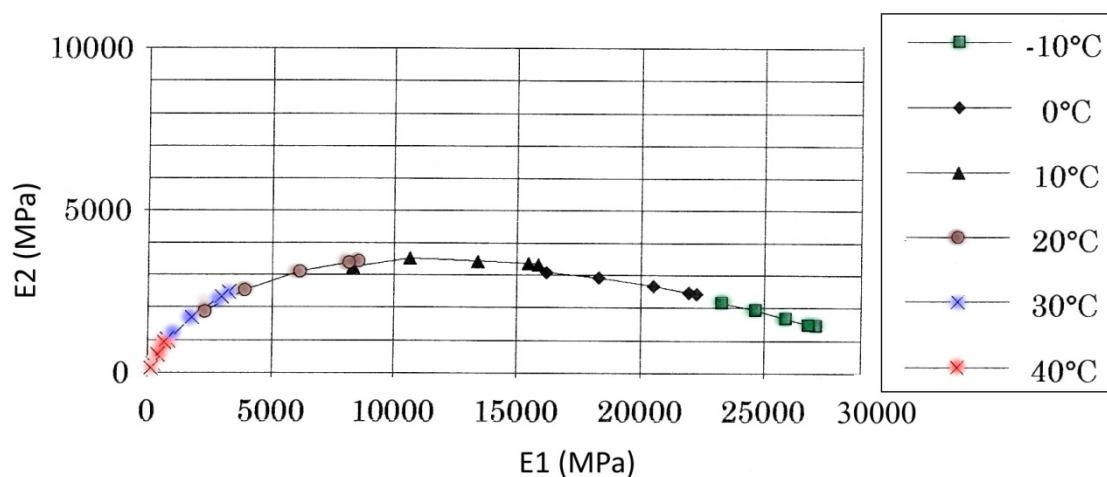


Figura 20 – Plano Cole-Cole.

(DE LA ROCHE, 1996, p. 13)

### 3.3.2.5 Curva Espaço de Black

Esta representação consiste em traçar, de forma logarítmica, a norma do módulo complexo  $|E^*|$  em função do ângulo de fase ( $\varphi$ ) correspondente. Nesta curva, o eixo das abscissas que contém o ângulo de fase respectivo ao material testado encontra-se invertido, ou seja, os valores crescem da direita para a esquerda.

Esta curva, apresentada na Figura 21, permite visualizar a zona com valores baixos de módulo, onde os valores do ângulo de fase são maiores é possível notar a influência da temperatura nos valores do ângulo. Para altas temperaturas ocorre uma diminuição do valor encontrado. Este fenômeno está relacionado à presença dos granulares na mistura, ou seja, para o betume, o ângulo de fase aumenta de maneira contínua, porém com granulares, próximo ao seu maior valor e tende a ter uma assintótica com o aumento da temperatura.

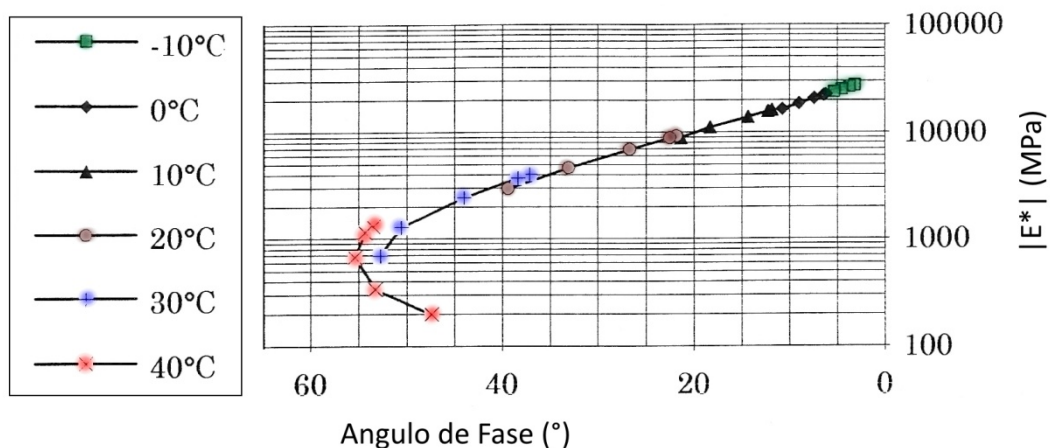


Figura 21 – Curva no Espaço de Black.

(DE LA ROCHE, 1996, p. 14)

### 3.3.3 Parâmetros Relevantes ao Módulo Complexo

O valor do módulo complexo varia em função dos parâmetros de ensaio e da formulação do material betuminoso. Os parâmetros de ensaio influentes na evolução do módulo são a temperatura e a velocidade de carregamento. Os principais parâmetros de formulação são a natureza e o teor de ligante, a porcentagem de granulares e de finos e a forma de compactação.

#### Temperatura e Velocidade de Carregamento

Um aumento da temperatura provoca uma diminuição da rigidez do corpo de prova. Nesta condição, a defasagem aumenta até um valor máximo, que se traduz em um comportamento mais viscoso a temperatura elevada. Em geral, o efeito mais crítico de temperatura e velocidade de carregamento acontece a 15°C a 10 Hz nos materiais betuminosos (RIVIERE, 1996).

#### Natureza do Ligante

Para as mesmas condições de temperatura e frequência, o módulo complexo é diretamente influenciado pela rigidez do ligante, assim como sua susceptibilidade térmica e cinética (influenciando a defasagem). Quanto maior a rigidez do ligante, maior o valor da norma do módulo. Neste caso, a mistura torna-se menos sensível à

temperatura e sua resistência mecânica se eleva. Contudo, existe um limite de fragilidade que não deve ser transpassado (RIVIERE, 1996).

### **Teor de Ligante**

Este parâmetro tem grande influência na rigidez das misturas betuminosas. Não pode ser considerado o único, já que influencia na compacidade da mistura obtida e, com isso, influencia no seu módulo. É possível, no entanto, encontrar algumas tendências gerais: o aumento do teor de betume conduz ao aumento do módulo até um valor ótimo. Acima deste valor ótimo, do teor de ligante, o módulo diminui.

### **Granulares**

A natureza mineralógica dos granulares, assim como sua forma, parece ter pouca influência sobre os valores do módulo complexo, assumindo-se que o ligante é suficientemente rígido (DE LA ROCHE, 1996 apud SOLIMAN et al, 1977). Espera-se que o granular tenha uma relativa importância nas misturas betuminosas na medida em que o betume assume um comportamento predominantemente viscoso (para as baixas frequências e em altas temperaturas).

### **Teor de finos**

A adição de finos permite melhorar a qualidade da mistura e, como efeito, para um teor de betume dado, a espessura do filme de betume sobre os granulares depende da quantidade de finos, que possui superfície específica maior. As características mecânicas das misturas melhoram com o aumento de finos. Contudo, além do teor de finos, pode-se constatar a perda destas características se o material não possuir um teor de betume suficiente (DE LA ROCHE, 1996).

### **Compactação**

A compactação das misturas betuminosas não é propriamente dito um parâmetro de formulação. Entretanto, ela é uma característica da mistura resultante ao mesmo tempo dos fatores de formulação e dos fatores de aplicação. Dessa forma, isso exerce influência sobre o módulo das misturas (DE LA ROCHE, 1996): a rigidez das misturas asfálticas aumenta com a compactação. O aumento da compactação torna as misturas menos suscetíveis à temperatura. A rigidez tende a um valor ótimo, e,

conseqüentemente, quando a compactação ultrapassa o ótimo, a norma do módulo complexo diminui (RIVIERE, 1996).

### 3.4 FENÔMENO DE DEGRADAÇÃO POR FADIGA

O fenômeno de degradação por fadiga é representado pela ruptura do material após uma seqüência de solicitações repetidas, geralmente um grande **número de ciclos** denominado **N**. A amplitude de solicitação é sempre inferior ao esforço necessário para a ruptura instantânea do material. Os primeiros estudos relacionados ao fenômeno da fadiga em laboratório foram realizados em 1852, por Wöhler, que analisou este comportamento em metais.

Nas estruturas rodoviárias, as misturas asfálticas são constantemente submetidas a solicitações de curta duração em cada passagem de eixo de carregamento. O pavimento, que se comporta como um material rígido repouso sobre um suporte deformável, trabalha estruturalmente a flexão (com alternância de esforços de tração e compressão). Nestas condições, a deformação encontrada na fibra inferior da camada asfáltica é de tração e se repete a cada passagem do rodado.

As cargas aplicadas ao pavimento não provocam a imediata ruptura da estrutura. No entanto, sua repetição possui efeito acumulativo, o que podem levar a ruptura do material, fissuração por fadiga (PERRET, 2003).

Reproduzir o fenômeno real, em laboratório, não é uma tarefa simples. Na natureza são muitas as variáveis que podem influenciar no comportamento real dos materiais. Limitar as condições de contorno de um determinado experimento é conhecer todas as possíveis variáveis de interesse. Em pesquisas realizadas em laboratórios, a determinação da fadiga consiste em submeter corpos de prova a uma seqüência de solicitações que se repetem e registra-se o número de ciclos que o levou a ruptura.

Este tipo de ensaio permite a representação dos seus valores em uma curva **Amplitude x N° Ciclos**. Ela representa a duração da vida de um corpo de prova em função da amplitude de solicitações aplicadas *S*. A Figura 22 é denominada curva

Wöhler de um material, sempre em escala log-log, e habitualmente caracterizada pela relação do tipo (RIVIERE, 1996):

$S = a N^{-b}$ , a curva é então um reta com coordenadas logarítmicas; ou

$S = a - b \log(N)$ , onde a curva é uma reta em referência semilogarítmica.

A equação pode ser apresentada por:

$$N = a * S^{-b} \quad (14)$$

Onde:

N é o número de aplicações da solitação;

S é a solitação (pode ser tensão ou deformação);

a e b são constantes.

A equação de Wöhler na forma de coordenadas logarítmicas é definida como a reta de fadiga do material:

$$\log(N) = \log(a) - b \log(S) \quad (15)$$

Onde a constante b representa a inclinação da reta de fadiga.

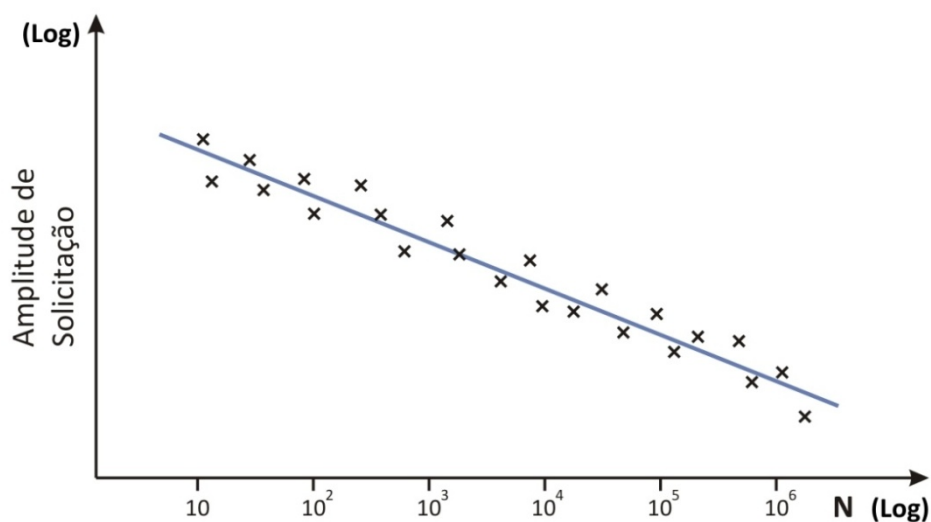


Figura 22 – Curva Wöhler

(DE LA ROCHE, 1996).

Como consta no item comportamento das misturas betuminosas em módulo complexo, as misturas asfálticas são definidas como sendo viscoelásticas. Logo, não

somente nos ensaios de fadiga, observa-se uma diferença entre a sollicitação aplicada e sua correspondente resposta.

É denominada resistência à fadiga por **N** ciclos de sollicitação o valor de sollicitação conduzido a ruptura em **N** ciclos.

O comportamento da fadiga depende do nível de sollicitação para todos os materiais. Em alguns casos, é possível observar que abaixo de um determinado valor de amplitude de sollicitação o material poderá não se romper, ou seja, este poderá ser sollicitado infinitas vezes ou um valor experimentalmente muito grande, sem observar a ruptura do corpo de prova. Este valor de amplitude de sollicitação chama-se **limite de fadiga** ou **limite de resistência do material** (DE LA ROCHE, 1996) e está apresentado na Figura 23. Para os materiais betuminosos, nenhum limite de resistência tem sido observado até agora.

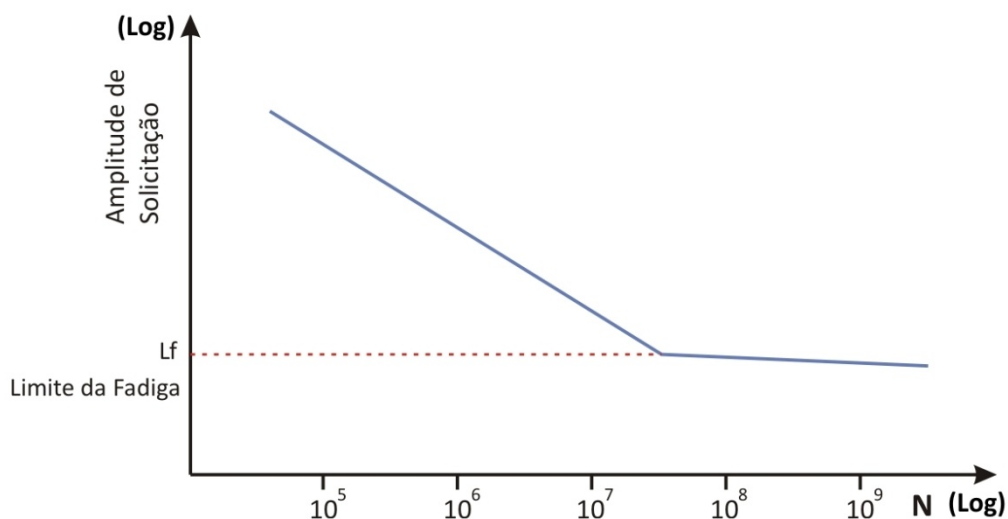


Figura 23 – Limite da Fadiga ou Resistência.

(DE LA ROCHE, 1996).

### 3.4.1 A Fadiga das Misturas Asfálticas

Na realidade, os ensaios à fadiga em misturas asfálticas oferecem resultados dispersos devido à própria heterogeneidade do material e ao próprio fenômeno da fadiga. O número de ciclos a ruptura pode ter uma dispersão ao repetir, por numerosas vezes, o ensaio com corpos de prova idênticos. Nos metais, a razão varia de 1 para 10

entre os menos duráveis e os mais duráveis (BRAND et al, 1992 apud DE LA ROCHE, 1996).

É comum que se efetue um grande número de repetições a uma mesma deformação a fim de se minimizar o efeito da dispersão e auxiliar no tratamento estatístico das informações para obter um conjunto de valores cujo número de ciclos de solicitação seja representativo ao fenômeno real.

Os corpos de prova são escolhidos em laboratório e agrupados em conjuntos de corpos com determinado valor calculado de solicitação representativa. A escolha está fundamentada na análise das características geométricas (forma espacial) e físicas (volume de vazios) de cada corpo de prova.

De posse dos valores de ensaio é feita a construção da curva da vida em escala log-log, onde a ordenada é a **Amplitude de Solicitação** e a abscissa o **Nº de ciclos**. Para o estudo em questão, onde será utilizado o ensaio com deformação controlada, o valor da amplitude de solicitação é a deformação.

Nesta representação são apontados também os dados de frequência e temperatura de ensaio, os valores de épsilon 6 ( $\epsilon_6$ ) e delta épsilon 6 ( $\Delta\epsilon_6$ ), o desvio padrão dos resíduos, as características do concreto asfáltico e a equação da reta de regressão, de acordo com a Figura 24.

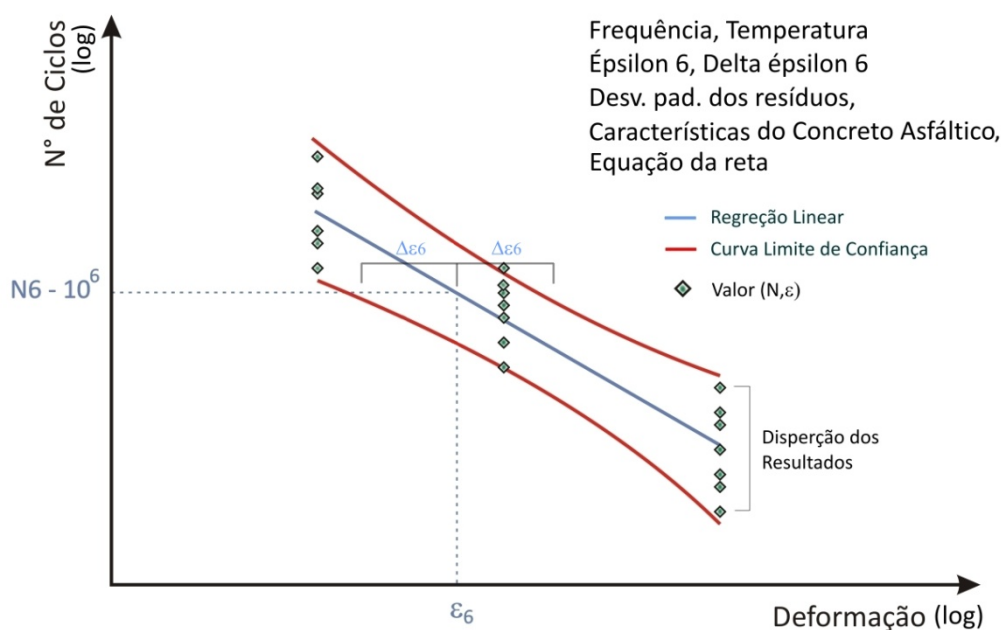


Figura 24 – Resposta típica de um ensaio à fadiga,  $\epsilon_6$  para  $N_6 - 10^6$  ciclos.



O valor de  $\epsilon_6$  representa a deformação correspondente a um milhão de ciclos de solitação sobre a reta de fadiga. Delta  $\epsilon_6$  ( $\Delta\epsilon_6$ ) representa os valores da variação de  $\epsilon_6$  no intervalo de confiança e representado sobre as curvas limites de confiança (intervalo para 95% de confiança).

A duração à vida (**N6**) ou a resistência a fadiga é obtida de maneira estatística por intermédio de regressão linear entre os valores de amplitude de solitação aplicada e da duração da vida correspondente.

### **3.4.2 Ensaio de Fadiga e Dimensionamento**

As misturas asfálticas, assim como todo material destinado a suportar carregamentos, estão destinadas ao rompimento. Prever quando e como isso irá acontecer demanda estudo e dedicação e é alvo das metodologias de dimensionamento existentes.

Os métodos de dimensionamento com base na teoria da elasticidade de meios semi-infinitos estratificados tratam o pavimento como um maciço de múltiplas camadas. O pavimento é modelado sob a forma de uma superposição de camadas elásticas, lineares, homogêneas, isotrópicas, semi-infinitas e planas. Cada camada é caracterizada por seu módulo elástico, seu coeficiente de Poisson e sua espessura. Após a modelação da carga aplicada, os cálculos das deformações e tensões no modelo de múltiplas camadas são efetuados com auxílio de softwares de análise mecanicista.

De acordo com De La Roche (1996) a origem de ensaio de fadiga reside na comparação dos valores de deformação e de tração por flexão, calculados na base das camadas asfálticas com os valores de deformação máximos suportados por um corpo de prova de mistura asfáltica em laboratório durante o ensaio de fadiga.

Com o auxílio de um equipamento de flexão alternada, os corpos de provas trapezoidais são testados em ensaios de flexão por dois pontos. O parâmetro adotado para o ensaio é a deformação máxima encontrada na fibra central lateral do corpo de prova. Durante o ensaio de fadiga, a amplitude sinusoidal possui flecha constante. Esta

deformação é calculada a partir da flecha da base menor, supondo o material homogêneo.

A Figura 25 apresenta o princípio do modelo de comportamento dos pavimentos asfálticos. Os ensaios de fadiga propõem simulação em laboratório das condições de serviço encontradas em campo.

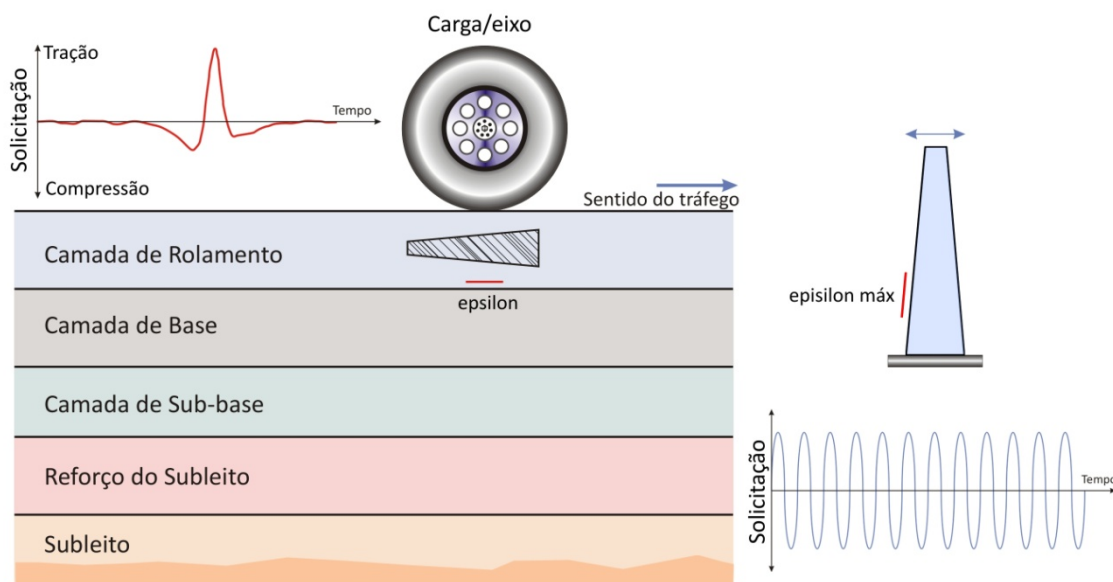


Figura 25 – Princípio do modelo de comportamento dos pavimentos asfálticos.

Em laboratório é possível determinar a deformação  $\epsilon_6$  da curva de fadiga do material para  $10^6$  ciclos de solicitação. Uma deformação admissível  $\epsilon_{adm}$  é calculada a partir deste valor de  $\epsilon_6$ , levando-se em conta a diferença existente entre as condições de ensaio de laboratório e o comportamento real (carregamento, temperatura) por meio de um coeficiente correlativo.

O dimensionamento da camada betuminosa é considerado correto quando a deformação calculada pelo modelo mecanicista for menor que a deformação admissível de cada camada,  $\epsilon_{calculado} < \epsilon_{admissível}$ . Caso essa condição não seja satisfeita, realiza-se o aumento da espessura da camada a ser dimensionada.

### 3.4.3 Tipos de Solicitação

Conforme já descrito anteriormente, os tipos de solicitações para o ensaio de fadiga seguem o mesmo princípio das solicitações reais ao pavimento pelas cargas em

movimento. A Figura 26 apresenta o sinal de deformação longitudinal pela passagem de um veículo em movimento durante estudos realizados no LCPC, na França (DE LA ROCHE, 1996). Os valores de tração são os positivos (um critério adotado). O sinal representa a resposta do sensor de deslocamento encontrado sobre a camada asfáltica. Fica evidente que a estrutura da camada betuminosa não trabalha somente com esforços de tração na fibra inferior, o sinal registra uma seqüência de tensões de compressão – tração – compressão, como apresentado no início do capítulo, em cada passagem da carga em movimento.

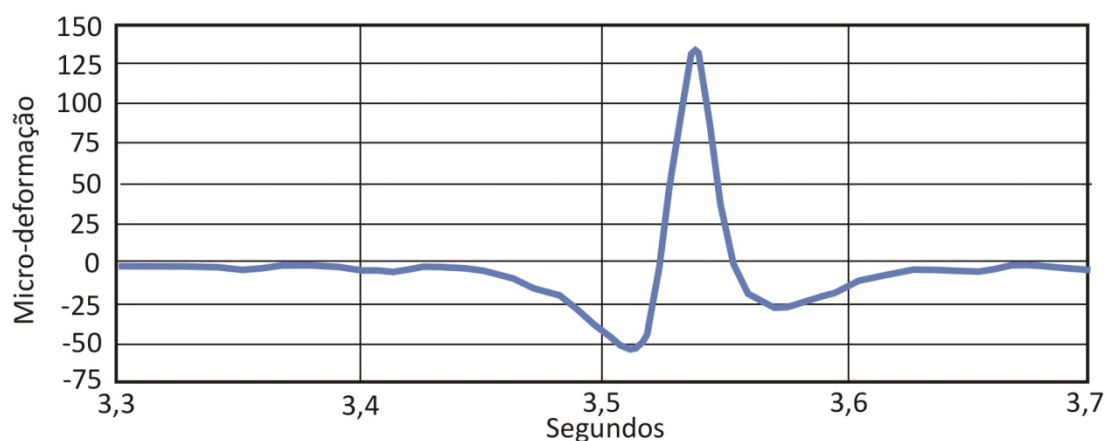


Figura 26 – Sinal de deformação longitudinal pela passagem de um veículo.

(DE LA ROCHE, 1996)

É uma tarefa difícil reproduzir em laboratório este tipo de carregamento. A sucessão de diferentes sinais varia segundo o tráfico passante e o ambiente (temperatura, umidade, envelhecimento), em termos de níveis de amplitude, distribuição de tensões e de deformações, velocidade de amplitude de carregamento. Em laboratório, os ciclos de aplicação das cargas ou deformações são sempre periódicos (DE LA ROCHE, 1996).

#### 3.4.4 Determinação do Tipo de Solicitação

O tipo de solicitação nos ensaios à fadiga é um parâmetro determinante sobre o tipo de resposta esperada. Conceitualmente, existem duas formas de conduzir os ensaios a fadiga em laboratório: ou mantêm-se a força constante ou a deformação.

### 3.4.5 Freqüência e Temperatura de Ensaio

Nos materiais viscoelásticos e termossuscetível, a freqüência e temperatura predominam sobre o comportamento esperado do material durante os períodos de solitação. Para as misturas asfálticas, o clima da região onde são realizadas as obras de pavimentação exerce enorme influência no seu comportamento mecânico. Neste contexto, a freqüência de solitação também exerce influência.

O aumento de temperatura afeta a duração da vida nos concretos asfálticos, devida à redução da sua rigidez (MOMM, 1998). Para as temperaturas de ensaio acima de 20°C e freqüência entre 30 a 50 Hz, o ângulo de fase tende a permanecer acima de 22°, podendo atingir valores de 45° com forte dissipação de energia. Produz-se, assim, um comportamento viscoelástico não-linear (HUET, 1968 apud RIVIRE, 1996).

Por outro lado, nas temperaturas baixas compreendidas entre -10°C e 10°C e freqüência de 50 Hz, os concretos asfálticos podem apresentar deformações que tendem ao domínio elástico (SAUNIER, 1968 apud MOMM, 1998). O aumento da temperatura para os ensaios à deformação controlada e tensão controlada apresenta uma diferença relacionada à duração da vida.

Nos ensaios à deformação controlada realizados com temperaturas de ensaio entre 0°C a 25°C, observa-se uma tendência de aumento da duração da vida com o aumento da temperatura, o que implica aumento da inclinação da reta de fadiga, assim, também, susceptibilidade à temperatura (DE LA ROCHE, 1996 apud MOMM, 1998).

Nos ensaios realizados à tensão controlada, o comportamento encontrado em ensaios à flexão senoidal mostrou a diminuição da duração da vida com o aumento da temperatura, indicando assim uma reta média de fadiga decrescente.

No entanto, esta aparente contradição entre a fadiga nos ensaios a tensão e deformação controlada reflete a sensibilidade do módulo de rigidez dos concretos asfálticos com a variação da temperatura. No aumento da temperatura o módulo diminui.

Em resumo, nos ensaios à tensão controlada, a deformação cresce (maior aquecimento interno) e nos ensaios à deformação controlada, a tensão diminui (menor aquecimento interno) ao longo do experimento. A duração da vida para os concretos asfálticos é dependente da deformação inicial, da temperatura e frequência (MOMM, 1998).

Assim como a temperatura, a frequência exerce influência de maneira diferente entre os ensaios à tensão controlada e à deformação controlada. Sendo assim, nos ensaios à tensão controlada, o aumento da frequência de ensaio causa um aumento da duração da vida, enquanto nos ensaios à deformação controlada a duração da vida diminui. Contudo, nos ensaios à deformação controlada, a duração da vida não pode ser considerada proporcional à variação do módulo em função da frequência.

De acordo com as metodologias de ensaio e dimensionamento descritos pelas normas francesas, o ensaio de fadiga é realizado em modo contínuo à deformação controlada. A deformação correspondente para um milhão de carregamentos ( $\epsilon_6$ ) é avaliado para 10°C e 25 Hz (RIVIERE, 1996).

#### 3.4.6 Critério de Ruptura

Definido o modo de ensaio entre tensão controlada e deformação controlada, a rigidez dos corpos de prova diminui na medida em que as solicitações são acumuladas. Nos casos onde a amplitude da força é mantida constante, a amplitude de deslocamento aumenta. A amplitude da força diminui quando a amplitude de deslocamento é mantida. A Figura 27 apresenta a evolução do deslocamento (a) e a evolução da força (b).

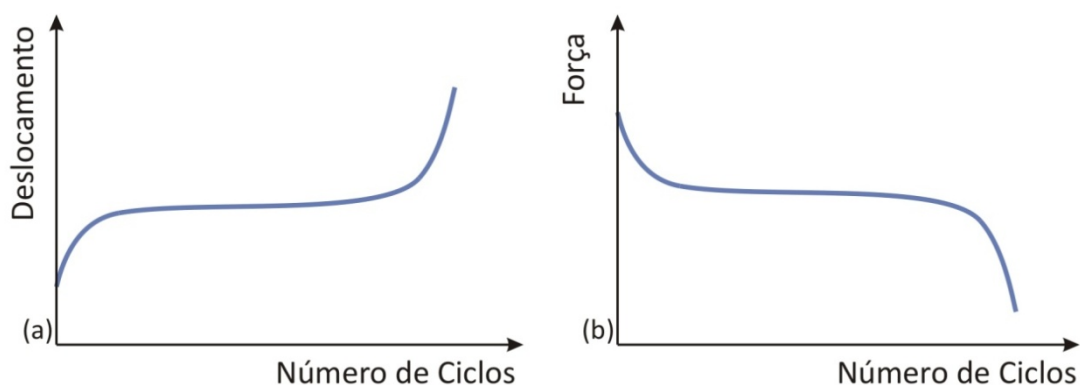


Figura 27 – Ensaio tensão controlada (a); Ensaio deformação controlado (b).

O critério arbitrário para se determinar o fim do ensaio de fadiga é quando ocorre a queda até a metade da rigidez do corpo de prova. Destarte, para cada modo de ensaio:

- **Força<sub>final</sub> = ½ Força<sub>inicial</sub>** para os ensaios de deformação controlada.

$$E_{inicial} = \frac{\sigma_{inicial}}{\varepsilon_m} \quad (16)$$

$$E_{final} = \frac{E_{inicial}}{2} = \frac{\sigma_{inicial}}{2 \cdot \varepsilon_m} = \frac{\sigma_{final}}{\varepsilon_m} \quad (17)$$

$$\sigma_{final} = \frac{1}{2}\sigma_{inicial} \quad (18)$$

- **Deslocamento<sub>final</sub> = 2 Deslocamento<sub>inicial</sub>** para os ensaios de tensão controlada.

$$E_{inicial} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_{inicial}} \quad (19)$$

$$E_{final} = \frac{E_{inicial}}{2} = \frac{\sigma_m}{2 \cdot \varepsilon_{inicial}} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_{final}} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{final} = 2 \cdot \varepsilon_{inicial} \quad (21)$$

Vale observar que as solicitações aplicadas durante os ensaios à tensão controlada e os ensaios à deformação controlada são muito diferentes, mesmo se coincidirem, no primeiro ciclo, os valores de amplitude da força ou deslocamento (ou seja, força inicial e deslocamento inicial) (DE LA ROCHE, 1996).

Nos ensaios à tensão controlada, a duração da vida é definida pela ruptura completa do corpo de prova, que difere do que foi definido pela redução da metade do módulo da rigidez do corpo de prova (DOAN, 1977 apud DE LA ROCHE, 1996). Para os ensaios com deformação controlada o critério permanece o definido pela metade da tensão inicial, visto que não ocorre a ruptura real do corpo de prova.

### 3.4.7 Mecanismo da Fadiga

A evolução das solicitações de ensaio pode ser subdividida em três fases, que se repetem em toda resposta ou reação às solicitações. Conforme apresentado na Figura 28, as seguintes fases são apresentadas:

1. **Aquecimento e adaptação** – esta fase caracteriza-se pela queda acentuada da tensão nos ensaios à deformação controlada (a) ou pelo aumento rápido da deformação nos ensaios à tensão controlada (b);
2. **Estabilização e lenta evolução da deterioração** – o gráfico apresenta uma região com uma pequena inclinação em regime quase estável com uma lenta evolução da deterioração;
3. **Ruptura do Corpo de Prova** – ocorre uma concentração de tensões na região próxima da fissura de ruptura que acaba por ocasionar a ruptura completa do corpo de prova.

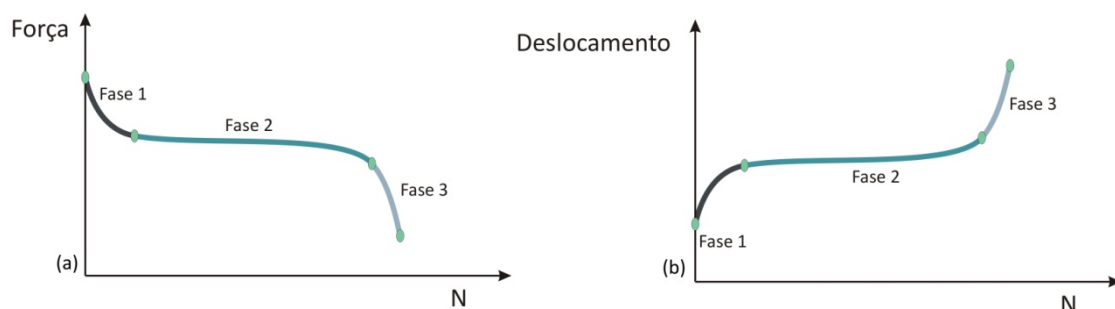


Figura 28 – Evolução da amplitude da resposta segundo a solitação.

Segundo Alimami (1988 apud RIVIERE 1996), a degradação dos materiais betuminosos está ligada à deterioração das ligações betume-granular devido ao aquecimento por atrito interno seguido de uma desagregação conseqüente do crescimento dos vazios e micro vazios.

### 3.4.8 Exploração dos Resultados

Os ensaios de fadiga geralmente são realizados com solitações contínuas e de forma senoidal. Para uma dada solitação senoidal ( $S^*$ ) existe uma resposta também senoidal ( $R^*$ ). Nos materiais viscoelásticos, ocorre uma diferença entre a solitação e sua respectiva resposta, que se traduz por uma defasagem (ângulo de fase  $\varphi$ ) entre os valores:

$$S^* = S_m \cdot e^{(i\omega t)} \quad (22)$$

$$R^* = R_m \cdot e^{(i\omega t - \varphi)} \quad (23)$$

Onde,

$S^*$  é a solicitação senoidal,

$R^*$  é a resposta senoidal,

$S_m$  e  $R_m$  são as amplitudes da solicitação e da resposta,

$\omega$  é a pulsação;

$\varphi$  é a defasagem entre a solicitação e a resposta.

Diferentes ensaios de um mesmo material a diferentes níveis de solicitação permitem traçar a reta de fadiga do tipo Wöhler:  $N = f(S)$ . Esta regra é obtida pela regressão linear dos resultados obtidos para cada nível de solicitação e se apresentam em escala logarítmica.

$$\log (N) = \log (a) - b \log (S) \quad (24)$$

Onde a constante **b** representa a inclinação da reta de fadiga.

A reta da fadiga permite caracterizar o comportamento à fadiga dos concretos asfálticos através de dois parâmetros:

1. A **inclinação da reta b** (negativo e de valor absoluto pequeno): A inclinação da reta de fadiga indica a susceptibilidade do comportamento do material à variação do número de aplicação da solicitação;
2. O valor da **amplitude de solicitação** obtida em **milhão de solicitações**: este serve como valor de referência aos programas de dimensionamento para avaliar a solicitação admissível do material e indicam uma primeira comparação entre os diferentes materiais testados em laboratório. Este valor é dependente do material testado e das condições de ensaio utilizados (frequência e temperatura).

#### 3.4.9 Parâmetros (Tensão ou Deformação)

Primeiramente, existem tendências bem distintas observadas entre os resultados de ensaio a tensão controlada e deformação controlada, conforme apresentado na Tabela 5.



Tabela 5 – Comparação dos resultados obtidos nos ensaios à tensão controlada e à deformação controlada.

(DE LA ROCHE, 1996)

<b>Critério</b>	<b>Ensaio a Tensão Controlada</b>	<b>Ensaio a Deformação Controlada</b>
<b>Evolução durante o ensaio</b>	Aumento do deslocamento	Diminuição da força
<b>Critério de ruptura usual</b>	Deslocamento final = 2x deslocamento inicial	Força final = ½ Força inicial
<b>Aumento da temperatura (<math>\phi &gt; 0^{\circ}\text{C}</math>)</b>	Pequeno	Grande
<b>Misturas com módulo de rigidez elevado</b>	Aumento da duração da vida	Diminuição da duração da vida
<b>Duração da propagação de fissuras</b>	Breve	Longo

As tendências obtidas para os diferentes tipos de ensaio são geralmente opostos. No entanto, isso pode ser explicado pelo mecanismo durante a execução dos dois tipos de ensaios.

Para o ensaio à tensão controlada, a taxa de dano acelera durante o ensaio, o domínio da sollicitação seria fortemente não-linear e a duração da propagação de fissuras breve. A deformação aumenta durante o ensaio, pois este fica com um aspecto exponencial ao longo dos últimos ciclos. As misturas betuminosas de forte rigidez se comportam geralmente melhor durante este tipo de ensaio (RIVIERE, 1996).

Constata-se que os ensaios realizados à tensão constante são mais pessimistas que os ensaios à deformação constante e, portanto, observa-se uma menor dispersão dos resultados. De fato, estes são os ensaios mais agressivos para os corpos de prova porque a deformação aumenta ao logo do ensaio.

No ensaio da deformação controlada, a taxa de dano desacelera moderadamente, o domínio de sollicitação é mais próximo do domínio linear e, pelo contrário, o tempo de propagação de fissura é mais relevante (DOAN, 1977 apud DE LA ROCHE, 1996).

A tensão diminui durante ensaio com uma queda brusca no início dele. Se o ensaio não é interrompido quando a rigidez diminui pela metade, a tensão continua a

diminuir até que se anule. No início do ensaio, a tensão se adapta a uma deformação constante 'economizando' assim o corpo de prova. Obtêm-se então uma duração de vida mais importante que a rigidez dos materiais fracos, o que não corresponde ao comportamento dos materiais 'in situ' (RIVIERE, 1996).

A diferença existente entre os dois tipos de ensaios conduz certos autores à não realização de certos ensaios de fadiga por energia imposta.

#### **3.4.10 Influências Diversas**

A influência dos parâmetros de solicitação das misturas asfálticas e seu comportamento em relação à fadiga foram objeto de numerosos estudos. Algumas características comuns tendem a predizer o comportamento à fadiga das misturas asfálticas a partir da sua composição. Os parâmetros mais influentes podem ser: a natureza do ligante e seu teor, o teor de vazios, o teor de finos e os granulares (mineralogia).

##### **Natureza do ligante**

A natureza do ligante é um parâmetro de grande importância, pois confere ao material suas propriedades termo-reológicas. A susceptibilidade à temperatura do betume é um parâmetro que influencia muito os resultados, em virtude do aquecimento que se produz durante curso do ensaio.

Como as misturas asfálticas herdam as características do ligante, um betume duro adicionado tornará a mistura mais rígida, sendo então mais suscetível às condições de temperatura e frequência e, por isso, mais eficiente durante os ensaios de fadiga uma vez que a duração da vida será mais prolongada.

Para um betume mole, a característica viscoelástica será acentuada. Este será mais sensível ao aquecimento e por isso mais interessante para a fadiga. Segundo sua natureza, uma mesma dosagem de betume pode ter os efeitos contrários sobre o comportamento da mistura asfáltica (RIVIERE, 1996).

##### **Teor de Ligante**

Para muitos autores, o teor de ligante é um fator relevante para os resultados de fadiga. Para um betume dado, existe um valor ótimo no qual a duração da vida

aumenta com o teor de ligante. Abaixo de certo valor, a resistência à fadiga decresce com o aumento do teor de ligante. Este teor ótimo se situa por volta de 7% de ligante para as misturas betuminosas e parece depender da natureza dos granulares utilizados (EPPS et al, 1969 apud DE LA ROCHE, 1996).

Para teores de ligante utilizados freqüentemente na França (como utilizados no Brasil, inferiores a 7%), o aumento de teor de ligante conduz a um aumento da duração da vida a fadiga. A quantidade deste aumento em termos de  $\epsilon_6$  segue a seguinte relação: o aumento de 1 ponto no teor de ligante conduz a um aumento de  $25 \times 10^{-6}$  sobre o valor  $\epsilon_6$  nos ensaios à deformação controlada em corpos de prova trapezoidais (DE LA ROCHE, 1996).

### **Compactação**

Os resultados dos ensaios à fadiga geralmente são melhores (maior duração da vida) quando a compactação for elevada. A norma do módulo complexo de uma mistura asfáltica aumenta com a compactação, verificando-se uma melhora da resistência à fadiga e na deformação permanente (BAZIN et al, 1967 apud RIVIERE, 1996).

### **Teor de Finos**

Como para o módulo complexo, existe um teor de finos ótimo relacionados à resistência à fadiga. A mistura será menos resistente se este valor for ultrapassado. A relação finos/betume deve ser elevada, para que as deflexões sejam menos importantes a alta temperatura, o que ao mesmo tempo reduz o risco da fadiga e da deformação permanente (RIVIERE, 1996).

### **Forma dos granulares**

Isso parece representar um papel importante para a fadiga, que é contrario ao ensaio de módulo complexo. Isto se explica pela importância do atrito interno nos fenômenos de dissipação de energia. No entanto, para os ensaios realizados a baixas temperaturas, a forma do granular possui pouca influência. Mas a energia dissipada por atrito interno é fraca nestas condições de ensaio, até mesmo negligenciado (SAUNIER, 1996 apud RIVIERE, 1996).

### **3.4.11 Principais Problemas**

Pode-se dizer que os ensaios de fadiga não estão livres de limitações e problemas. O próprio comportamento do material, viscoelástico e termossuscetível, modifica-se durante o curso de ensaio. Alguns autores que estudaram o comportamento a fadiga das misturas asfálticas nos ensaios a fadiga relacionam os problemas possíveis encontrados: Dissipação Térmica; Auto-Reparação; Dilatação dos Corpos de Prova; e, Aquecimento por Atrito Interno.

#### **Dissipação Térmica por Atrito Interno**

As misturas asfálticas, devido ao seu comportamento viscoelástico, apresentam a características de dissipação térmica. A energia dissipa pela parte viscosa quando conduzidos a ensaios em modo contínuo, onde ocorre um aumento da temperatura do corpo de prova. Stéfani (1981 apud DE LA ROCHE, 1996), apresenta o estudo sobre o aumento de temperatura com medidas com termográfico infravermelho.

A temperatura aumenta por volta da região de fissura na altura da seção de ruptura. Dois pontos de aquecimento podem ser percebidos sobre as superfícies laterais, conforme mostra a Figura 29.

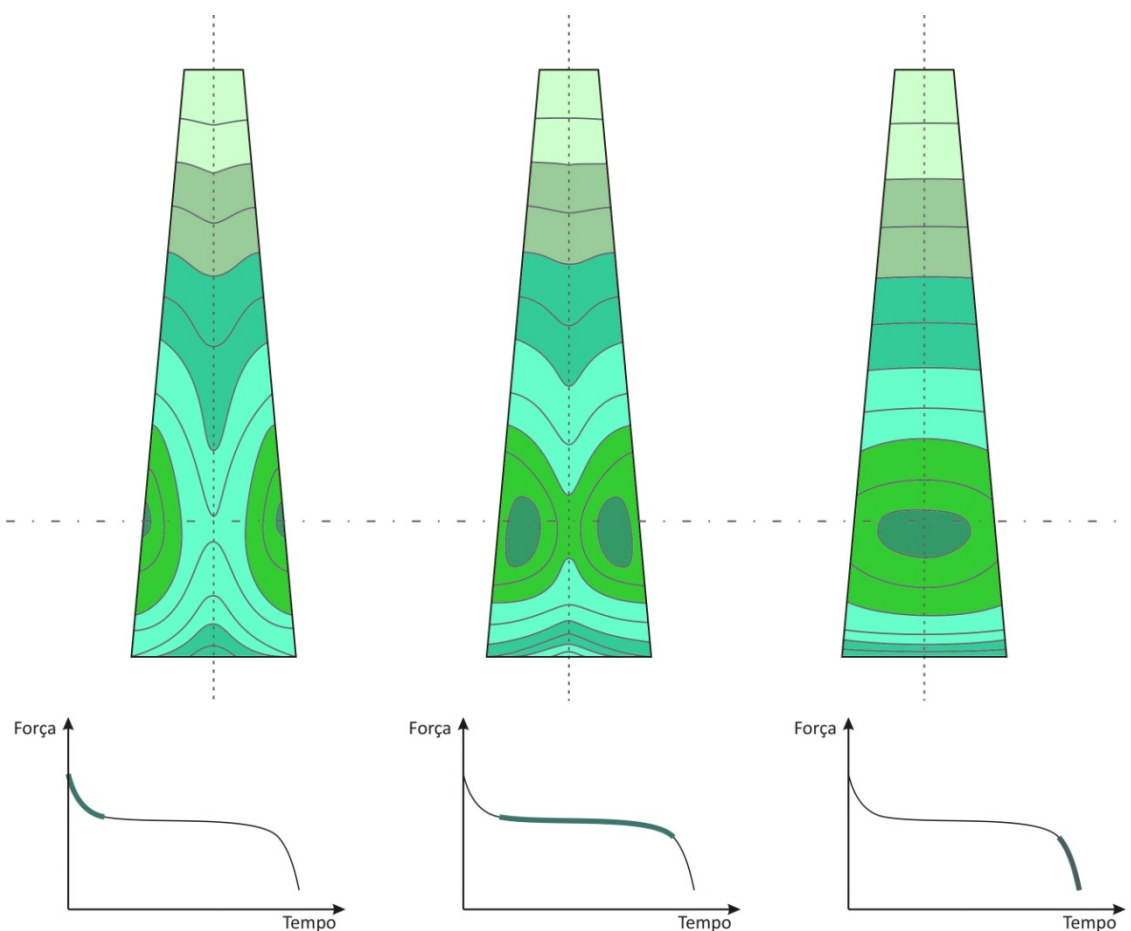


Figura 29 – Imagem de dispositivo termográfico infravermelho em tons de verde.

(RIVIERE, 1996, P. 31)

Segundo o nível de sollicitação, frequência e temperatura de ensaio, uma fração da energia mecânica é absorvida pelo material e se dissipa na forma de calor. Conhecido como efeito da histerese do material.

O aquecimento produzido contribui para uma diminuição local do módulo ( $E = \sigma_m / \varepsilon_m$ ), que não caracteriza um dano puro. Pode-se então remeter à questão da redução da metade desta relação como critério de ruptura por dano causado (SAUNIER 1968 apud RIVIERE, 1996).

O ângulo de fase varia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Sobre este intervalo a função seno é crescente. A energia dissipada aumenta com a defasagem dita como a viscosidade do material. A energia dissipada por ciclo e por volume unitário é dada pela relação:

$$\Delta W = \pi \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma_m \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (25)$$

Esta hipótese implicitamente admite supor, nos ensaios à fadiga, que a defasagem é pouco influente no fenômeno da microfissuração. O registro do ângulo de fase  $\varphi$ , durante o curso do ensaio, apresenta uma idéia da energia dissipada sob a forma de calor.

A energia dissipada evolui de forma diferente segundo a solicitação imposta: ela diminui nos ensaios à deformação controlada e em certas condições ela pode se tornar negligenciada ao longo do ensaio; ela dobra com a deformação durante os ensaios à tensão controlada.

A energia total dissipada é dependente da velocidade da energia aplicada. A soma total da energia dissipada à fadiga é menor quando a soma da energia dissipada por ciclo de carregamento for grande (RIVIERE, 1996).

O coeficiente de atrito interno corresponde à fração da energia máxima (fornecida por deformação do corpo de prova), que é dissipada a cada ciclo por histerese mecânica. Este é calculado pela relação da energia dissipada por ciclo e por um volume unitário ( $\Delta W$ ) sobre a energia armazenada na extremidade deste mesmo ciclo ( $W = 1/2 \cdot \sigma_m \cdot \varepsilon_m \cdot \cos(\varphi)$ ):

$$K = \frac{\Delta W}{W} = 2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \quad (26)$$

### **Auto-Reparação**

Uma das explicações para as divergências existentes entre as previsões feitas a partir dos resultados dos ensaios à fadiga e do comportamento real dos pavimentos pode estar ligada ao fenômeno da auto-reparação das misturas asfálticas (DE LA ROCHE, 1996).

Soliman (1968 apud DE LA ROCHE, 1996), em estudos realizados em laboratório, apresenta o fenômeno de auto-reparação. Os corpos de prova foram solicitados a tração até sua ruptura, posteriormente mantidos sob pressão por um peso sobre os corpos de prova reconstituídos. Após diferentes períodos de repouso, os corpos de provas apresentaram resistência à tração entre 80 e 100% dos valores obtidos após o período de repouso.

Este fenômeno tem sua origem na característica de “cicatrização” pelo ligante. A auto-reparação está ligada à componente viscosa do módulo do ligante. Sua natureza e sua origem são parâmetros secundários (SAUNIER, 1968 apud RIVIERE, 1996).

Nos ensaios à deformação controlada, após repouso, a mistura betuminosa tem uma melhora de comportamento caso o ligante for suficientemente flexível. Nos ensaios à tensão controlada, a mistura tem um comportamento melhor se o ligante for suficientemente rígido.

### **Dilatação do Corpo de Prova**

Durante os ensaios à fadiga, em modo contínuo e descontínuo, pode-se observar alongamentos verticais e horizontais nos corpos de prova testados. No curso do ensaio o material é submetido a uma sucessão de solicitações por flexão, ou seja, em cada ciclo de flexão as suas superfícies laterais situadas ao plano médio se deformam até formar uma superfície côncava, nos picos das tensões de compressão, e uma superfície convexa durante os picos de tensão de tração. As deformações médias positivas (tração) se acumulam e dão origem a um alongamento do material (SOLEIMANI, 1975 apud RIVIERE, 1996). O material apresenta uma fluência vertical dinâmica ligada à soma das deformações por esforços de tração acumulados na zona central dos corpos de prova, alternado o seu comprimento.

## **3.5 CONCLUSÕES**

Entender o comportamento mecânico das misturas asfálticas permite o desenvolvimento de novas tecnologias de dimensionamento de pavimentos. O módulo complexo e a fadiga são alguns dos fatores preponderantes na determinação da qualidade do material. Como para o dimensionamento, estes ensaios permitem uma melhor avaliação do comportamento das misturas controle e com adição de zeólita.

O Módulo Complexo permite avaliar o comportamento das misturas a diferentes temperaturas e freqüência de solicitação. A Fadiga permite comparar número de solicitações entre as misturas da pesquisa.

Com o Módulo é possível avaliar as diferenças entre o comportamento viscoso e o elástico, observados nas misturas asfálticas. Além disso, suas representações possibilitam entender quais parâmetros de frequência e temperaturas representam a pior condição de ensaio.

Os resultados do ensaio de fadiga permitem representar a linha de tendência à deformação controlada. Desta reta, o coeficiente angular representa a susceptibilidade ao número de solicitações pela deformação.

As misturas asfálticas são solicitadas nos ensaios com o mecanismo de flexão alternada de forma semelhante às condições observadas sobre a camada de rolamento das rodovias porque os corpos de prova, para os ensaios em laboratório, recebem a aplicação da carga no mesmo sentido, ou melhor, na mesma orientação que a densificação durante a compactação do material.



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 APRESENTAÇÃO

O presente capítulo apresenta os materiais empregados e os métodos de ensaio para avaliar o comportamento mecânico das misturas. Além disso, este capítulo aborda os resultados dos ensaios com a mistura asfáltica controle e mistura morna com adição de zeólita, objeto deste estudo.

A primeira parte deste capítulo abrange o mecanismo de flexão alternada e os corpos de prova trapezoidais. O item com o subtítulo materiais empregados apresenta a classe do ligante, as zeólitas e o agregado mineral. Em seguida, define-se a curva granulométrica para compor as misturas.

A pesquisa do teor ótimo de betume segue a metodologia do ensaio Marshall. O ensaio permite avaliar ao mesmo tempo diversos resultados, auxiliando a determinação do teor de betume para o experimento. Aplica-se um ajuste no teor de betume com os resultados.

A resistência à abrasão das misturas é medida por ação de sucessivos impactos pelo tambor “Los Angeles”. Em seguida, as misturas são avaliadas quanto à ação deletéria por umidade no ensaio Lottman.

Os ensaios de Módulo Complexo e Fadiga são responsáveis pela definição das características das misturas asfálticas necessárias ao dimensionamento de pavimentos. São necessários placas de cimento asfáltico para estes dois ensaios, compactadas por ação da mesa compactadora LPC. Destas placas são extraídos os corpos de prova, etapa de corte, e por um processo de triagem de corpos homogêneos são definidos os grupos de cada ensaio.

Os resultados dos ensaios de módulo complexo podem variar com a frequência de solicitação e, principalmente, com a temperatura. A construção de curvas de representação dos resultados permite avaliar a influência da frequência e temperatura de ensaio.

A fadiga das misturas permite avaliar a correspondência entre a deformação máxima e a duração da vida útil. A representação deste importante parâmetro está na construção de pontos dos valores de número de ciclos em uma reta linearizada. Neste, ainda, encontra as curvas limites dos resultados, a inclinação da reta (susceptibilidade) e a deformação específica para um milhão de ciclos.

#### 4.2 MECANISMO DE FLEXÃO E OS TRAPEZÓIDES

O equipamento que permite realizar ensaios de flexão alternada em corpos de prova trapezoidais é apresentado na Figura 30. A frequência, amplitude de solitação e a temperatura são, geralmente, as variáveis dos ensaios com este tipo de equipamento. Os ensaios de módulo complexo, habitualmente, são realizados respectivamente nas seguintes frequências e temperaturas: -10, 0, 10, 20, 30 e 40°C; e 1, 3, 10, 25, 30 e 40 Hz (DE LA ROCHE, 1996). Já os ensaios a fadiga são realizados a uma temperatura e frequências predefinidas. Em estudos realizados pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Laboratório Central de Pontes e Rodovias), na França, constatou que a condição mais severa para condução dos ensaios a fadiga se reflete a temperatura de 10°C e frequência de 25 Hz.

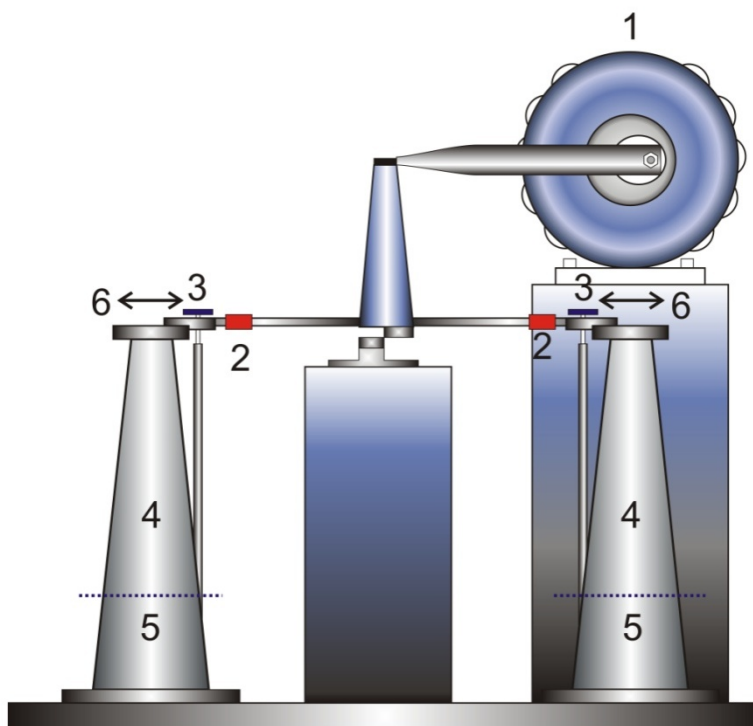


Figura 30 – Dispositivo para o ensaio de flexão alternada.

O dispositivo para realizar os ensaios com solicitação por flexão alternada conta com:

1. Motor eletromagnético com excêntrico;
2. Sensor de força (célula de carga);
3. Sensor de deslocamento (por efeito Hall);
4. Corpo de prova trapezoidal;
5. Seção de ruptura;
6. Solicitação por vibração sinusoidal.

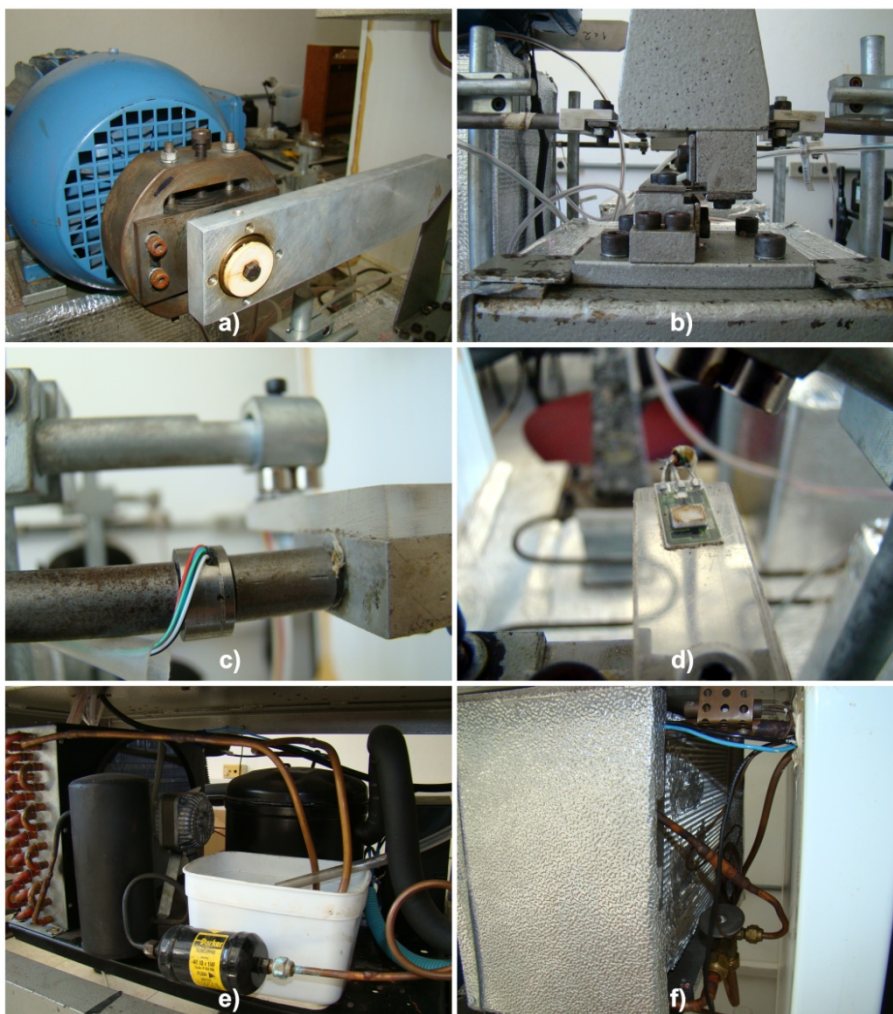


Figura 31 – Mecanismo para ensaio de flexão alternada.

Na Figura 31, as imagens do mosaico são do equipamento utilizado para o ensaio de flexão alternada. A imagem **a** corresponde ao motor elétrico cuja frequência de giros é controlada. A imagem **b** apresenta o dispositivo que transforma o esforço proveniente do motor em esforço tangencial sobre o topo do corpo de prova. A

imagem **c** mostra a célula de pressão presa na haste de transmissão de esforços. A imagem **d** apresenta o sensor de deslocamento por efeito Hall. As imagens **e** e **f** correspondem aos mecanismos de resfriamento, sendo a primeira correspondente à parte externa e a segunda à parte interna.

A deformação máxima  $\varepsilon_{máx}$  e a tensão máxima  $\sigma_{máx}$  são calculadas de acordo com as características geométricas dos corpos de prova. As formulações seguem o cálculo clássico da resistência dos materiais. A Figura 32 apresenta as características geométricas dos corpos de prova trapezoidais.

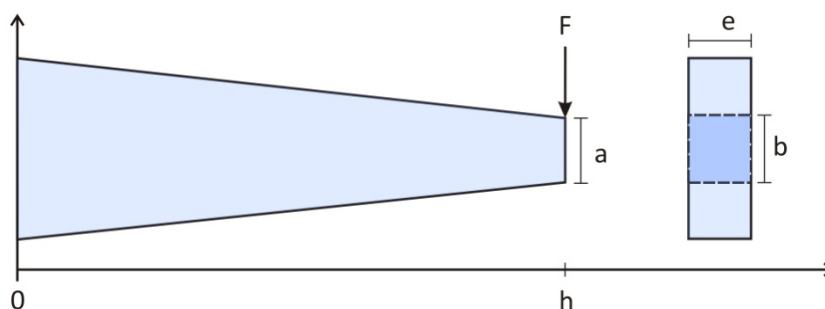


Figura 32 – Característica geométrica dos corpos trapezoidais.

$$\varepsilon_{máx} = \frac{(b - a)^2}{8h^2a \left( \ln \frac{b}{a} - \frac{(b - a)(3b - a)}{2b^2} \right)} x d \quad (27)$$

e

$$\sigma_{máx} = \frac{3h}{2ea(b - a)} x F \quad (28)$$

Nas dimensões:

- Base maior (b) = 70 ± 1 mm;
- Base menor (a) = 25 ± 1 mm;
- Espessura (e) = 25 ± 1 mm;
- Altura (h) = 250 ± 1 mm.

Cada corpo é extraído do interior das placas de concreto asfáltico com as dimensões 60x40x12 cm, conforme apresentado na Figura 33.

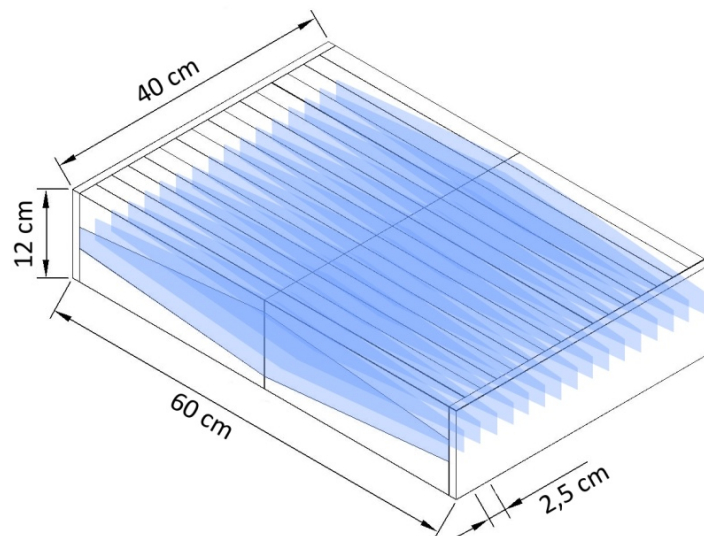


Figura 33 – Esquema de corte dos corpos de prova trapezoidal.

### 4.3 MATERIAIS EMPREGADOS

Os materiais empregados neste estudo são: ligante asfáltico, agregado mineral granítico e zeólitas. Estes materiais são doações, frutos de contatos com empresas que percebem a importância dos estudos realizados em laboratórios universitários.

#### 4.3.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico é uma doação da empresa brasileira Petrobras. Para a mistura morna foi requisitado o ligante da refinaria mais próxima da Santa Catarina, no caso do município de Araucária, Paraná. No entanto, para a mistura controle, utilizou-se um ligante proveniente da refinaria Lubnor, localizado em Fortaleza Ceará. O ligante betuminoso escolhido para a preparação dos corpos de prova das misturas representa o tipo comum comercializado para várias obras de pavimentação dentro do território brasileiro.

As pesquisas realizadas por diversas entidades de pesquisa sobre o tema misturas asfálticas mornas com adição de zeólita não mencionam o emprego de um tipo especial de ligante ou por processo prévio de modificação. Existem algumas tecnologias descritas no capítulo dois, apresentadas na revisão bibliográfica sobre misturas asfálticas mornas, que fazem o uso de ligantes especialmente modificados para o emprego em misturas a temperatura intermediária. Mas como apresentado nos

estudos que fazem a adição de minerais, sejam estes artificiais ou naturais, os ligantes empregados sempre foram os convencionais.

Como a intenção de avaliar as misturas asfálticas mornas dentro da realidade brasileira, optou-se pelo uso de ligantes com características conhecidas por pesquisas anteriores. Então, foi requisitada a Petrobras, de ambas as fornecedoras (Araucária e de Fortaleza), a doação de um ligante do tipo **CAP 50/70**.

#### 4.3.2 Zeólitas

A zeólita utilizada neste estudo é uma cortesia da empresa Celta Brasil. Esta empresa fornece este tipo de material para diversos tipos de nichos industriais. As zeólitas naturais possuem aplicações como carga para indústria do papel, como agregados leves na construção civil, em cimentos e concretos pozolânicos, trocadores iônicos na purificação de água e efluentes de instalações nucleares, na concentração de oxigênio com alta pureza a partir do ar, como canalizador na indústria de petróleo, como absorventes de resistência ácida na secagem e purificação de gás natural e na remoção de compostos nitrogenados a partir de sangue renal.

O material destinado a esta pesquisa possui a fórmula empírica e célula da clinoptilolita (CELTA BRASIL, 2007):



Elementos ou cátions entre o primeiro conjunto de parênteses na fórmula são conhecidos como cátions intercambiáveis; aqueles entre o segundo conjunto de parênteses são chamados de cátions estruturais, porque, junto com oxigênio, eles compõem o arranjo tetraédrico da estrutura. Moléculas de água livre também estão presentes na estrutura de todas as zeólitas naturais, em torno dos cátions intercambiáveis em grandes espaços de poros.

Enquanto os arranjos estruturais de quartzo e feldspato são densos e firmemente empacotados, as estruturas das zeólitas minerais são notadamente abertas e o volume de espaços vazios de espécies desidratadas conhecidas chega a 50%. Cada espécie de zeólita tem sua estrutura cristalina própria e, portanto, seu próprio conjunto de visualizada como tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$  conectados juntos em

uma forma geométrica simples. Este poliedro particular é conhecido como um cubo-octaédro truncado.



Figura 34 – Imagem por microscopia eletrônica e estrutura representativa da clinoptilolita.

(CELTA BRASIL, 2000, p. 4)

As seguintes características físicas foram determinadas pelo laboratório da Celta Brasil, Tabela 6:

Tabela 6 - Características físicas da clinoptilolita.

(CELTA BRASIL, 2000, p. 1)

<b>Ponto de Fusão</b>	<b>1300°C</b>
<b>Peso específico</b>	<b>2,1 g/cm<sup>3</sup></b>
<b>Densidade aparente</b>	<b>0,98 g/L</b>
<b>pH</b>	<b>7,6</b>
<b>Capacidade de troca catiônica (CTC)</b>	<b>1,57 meq/g</b>
<b>Cor</b>	<b>Verde pistache</b>

#### 4.3.3 Agregado Mineral e Distribuição Granulométrica

A curva granulométrica de uma mistura asfáltica é tão importante quanto a natureza do ligante. Ela define a resistência das misturas asfálticas contra os esforços de compressão devido à passagem dos carregamentos. O objetivo deste trabalho não contempla encontrar a curva ideal para as misturas betuminosas, embora a adoção e escolha de uma curva tornam-se fundamental ao sucesso da pesquisa.

Seu comportamento esperado seja tal que não exista discrepância dos resultados nos ensaios. Por este motivo, foi realizada uma pesquisa sobre curvas granulométricas com bons resultados de comportamento comprovadas historicamente. A curva escolhida pertence ao estudo de Barra (2005), Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico, e possui diâmetro máximo de 19,1 mm e  $n = 0,48$ .

A Tabela 7 apresenta os dados da curva granulométrica adotada, como peneira, abertura e porcentagem passante.

Tabela 7 – Curva granulométrica adotada.

(BARRA, 2005)

Peneira	Abertura (mm)	Pocentagem Passante
3/4"	19,1	100
1/2"	12,5	81,3
3/8"	9,5	70,1
N° 04	4,75	49,4
N° 10	2,8	33,4
N° 16	1,18	24,5
N° 30	0,6	17,2
N° 50	0,3	12,1
N° 100	0,15	8,5
N° 200	0,075	6

Em seguida, a Figura 35 apresenta o traçado da curva em escala semi-logarítmica.

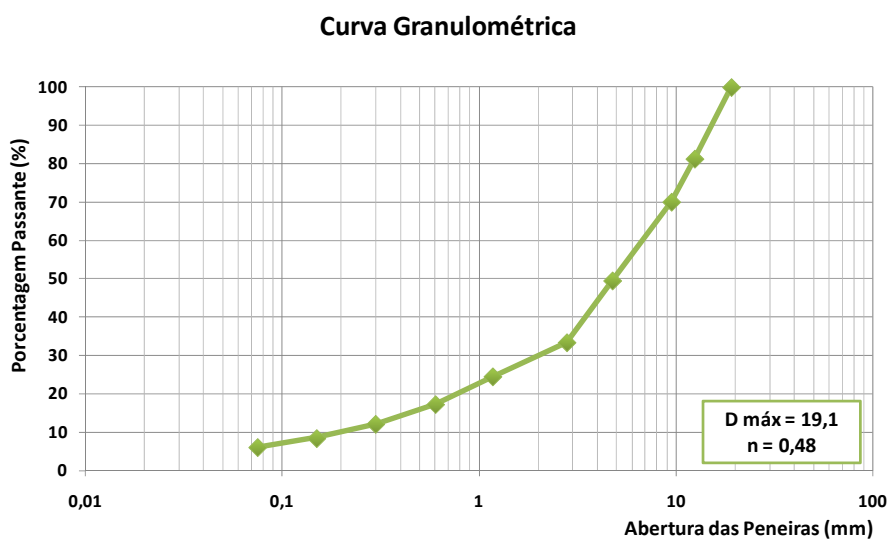


Figura 35 – Distribuição granulométrica adotada.



#### 4.4 ENSAIO DE DOSAGEM MARSHALL

O teor ótimo de betume confere uma variável importante ao desempenho das misturas asfálticas. Neste projeto são estudados os teores de betume das misturas asfálticas mornas, com adição de zeólita, e da mistura quente com mesma granulometria. Apesar da literatura não aconselhar a realização do estudo da dosagem asfáltica com espécimes contendo adição de zeólita, realizou-se o ensaio de determinação do teor ótimo de betume com ambas as misturas para uma confirmação do resultado.

Na tentativa de encontrar o teor ideal de betume, o método de dosagem Marshall foi utilizado, confeccionando-se cinquenta corpos de prova cilíndricos. Aplicam-se setenta e cinco (75) golpes a cada um dos lados do cilindro. O diâmetro do cilindro é constante de 101,5 mm. Destes corpos, metade para as misturas controle e outra para mistura morna. O estudo contempla ensaios não-destrutivos e ensaios destrutivos.

Conforme descrito pela metodologia de ensaio Marshall (ME043-95), DNIT, cada corpo de prova contém aproximadamente 1200g de massa da mistura betuminosa. As porcentagens de ligante por massa variam em: 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5%. Para cada um destes teores de betume são compactados cinco corpos de prova. A Figura 36 apresenta dois grupos de corpos de prova à espera do ensaio.



Figura 36 – Corpos de Prova Marshall ensaiados.

Os corpos de prova, moldados no compactador Marshall, são organizados conforme teor de betume e adição, ou não, de zeólita. Pelos teores de betume são atribuídas letras em seqüência tanto para a mistura controle como para as misturas com zeólita. Assim, as letras A, B, C, D e E são as misturas sem adição de zeólitas e teores de betume de 4,5%, 5%, 5,5%, 6% e 6,5% respectivamente. As letras F, G, H, I e J representam a mesma lógica para as misturas com adição de zeólita.

Para o presente ensaio a seguinte lógica é obedecida:

- Mistura e compactação dos corpos de prova;
- Medidas físicas: altura, diâmetro, peso e peso imerso;
- Ensaio destrutivo com a prensa Marshall.

A etapa de mistura e compactação segue a seqüência:

1. Aquecimento dos agregados graúdos e finos (separadamente);
2. Aquecimento do ligante a temperatura de mistura;
3. Misturas dos agregados graúdos (abertura 12,5 até 1,18) com ligante;
4. Adição dos agregados finos (0,6 até fundo);
5. No caso das misturas mornas, adiciona-se a zeólita logo após a adição dos finos;

6. Vai para estufa por uma hora a temperatura de compactação (este intervalo tem o objetivo de simular o que acontece em campo quando o asfalto é transportado até o local de compactação, um envelhecimento em curto prazo);
7. Compactação com 75 golpes para cada lado;
8. Desmolde.

O primeiro procedimento é a medição de cada corpo (os ensaios não-destrutivos). Cada corpo é medido com auxílio de paquímetro em três diferentes posições. Após medição, os corpos são pesados em balança com precisão de 0,1 grama. São duas as medidas de peso necessárias: um ao ar livre e outro imerso em água.

A temperatura adotada segue conforme o encontrado para as misturas quentes e para as misturas mornas, conforme a literatura sugere. As temperaturas de misturas para as massas mornas são de 80°C até 150°C e as temperaturas para as massas quentes: de 140°C até 180°C. Como a tecnologia de misturas mornas, a viscosidade do ligante durante o processo de mistura e compactação utilizada segue a Tabela 8.

Tabela 8 – Temperatura de mistura e compactação.

Mistura Controle		Mistura com Zeólita	
Material	°C	Material	°C
Agregado aquecido	165	Agregado aquecido	145
Ligante aquecido	155	Ligante aquecido	135
Mistura	155	Mistura	135
Compactação	145	Compactação	125

Com estes valores são definidos os Volumes, as Densidades teóricas, as Densidades aparentes, o Volume de vazios e a Relação betume e vazios. Em seguida, executam-se os ensaios destrutivos.

São então realizados os ensaios destrutivos dos espécimes na prensa Marshall. O valor de Estabilidade e Fluência é obtido pelo conjunto instalado na prensa. A instrumentação conta com uma célula de carga e um LVDT (*Linear Diferencial Transformer*) para medir o deslocamento linear.



Figura 37 – Prensa Marshall, determinação da estabilidade e fluência.

A Figura 37 apresenta os detalhes do mecanismo de ensaio Marshall. A imagem **a)** é uma vista geral da prensa Marshall, corpo de prova e os dispositivos célula de carga e LVDT. A imagem **b)** é o detalhe da posição do LVDT e molde de compressão. A imagem **c)** é uma vista da prensa, e os sensores, e do sistema de aquisição de dados. A imagem **d)** é a tela do programa de leitura e armazenamento dos dados do experimento.

A metodologia adotada para realizar o ensaio destrutivo segue com o aquecimento dos corpos de prova em estufa e imersão em água a 60°C por 40 minutos (envelhecimento em curto prazo); em seguida, posiciona-o no molde de compressão e realiza o ensaio com o armazenamento dos valores de força e deslocamento de ensaio. Os dados são armazenados em pacotes TXT com os valores de força em Newton e deslocamento em mm.

O valor de estabilidade é a carga necessária para causar o rompimento do corpo de prova. A fluência é o valor do deslocamento sofrido pelo corpo de prova até a ruptura. Os valores são obtidos pela média de pelo menos três corpos de prova. Neste estudo, os valores são da média de cinco corpos.

A Tabela 9 apresenta os diversos resultados encontrados durante o experimento Marshall. Estes valores são resultados das médias das medidas de cinco corpos de prova para cada item. Os valores são: relação betume vazios (RBV%); volume de vazios (Vv%); densidade aparente (D); estabilidade (N); fluência (mm).

Tabela 9 – Dados do ensaio de dosagem Marshall.

Controle					
Betume	RBV (%)	Vv (%)	D	Estab (N)	Fluen (mm)
4,5%	61,0	6,8	2,40	12969,5	6,052
5,0%	71,7	4,7	2,41	12928,2	6,039
5,5%	78,7	3,6	2,41	12806,6	5,765
6,0%	85,4	2,4	2,41	11349,0	5,759
6,5%	85,9	2,5	2,40	9724,4	6,985
Zeolita					
Betume	RBV (%)	Vv (%)	D	Estab (N)	Fluen (mm)
4,5%	56,0	8,3	2,38	8358,7	6,132
5,0%	67,8	5,6	2,40	9377,2	5,769
5,5%	75,4	4,2	2,40	9298,0	5,879
6,0%	81,1	3,3	2,40	8922,7	6,940
6,5%	82,7	3,2	2,39	7448,0	7,210

O método *Rice* é adotado para encontrar o valor da densidade máxima teórica das misturas (Gmm). Então, são determinadas as densidades reais dos agregados para cada peneira granulométrica é pelo método de cálculo da densidade encontram-se as densidades máximas teóricas para cada teor de betume. Este valor possibilita a determinação do valor de volume de vazios e, por conseqüência, o valor de BRV.

O teor ótimo de betume é definido pela análise dos diversos resultados obtido. A construção das curvas com os resultados segue com os valores de porcentagem de betume no eixo das abscissas e os demais valores no eixo das ordenadas. As misturas devem possuir a máxima densidade possível, ter estabilidade mínima de 5.000 N, ter volume de vazios entre 3% e 5%, e, por fim, uma relação betume e vazios entre 75% e 82%. Assim, pela soma destas propriedades, define-se o teor ótimo de betume, que assume as melhores características encontradas para as misturas asfálticas.

A Figura 38 apresenta os resultados do ensaio Marshall para as misturas controle e misturas mornas com adição de zeólita. As curvas são arranjadas e alinhadas conforme o teor de betume. Com uma reta unem-se os valores com as melhores características e esta reta passa sobre o teor ótimo de betume.

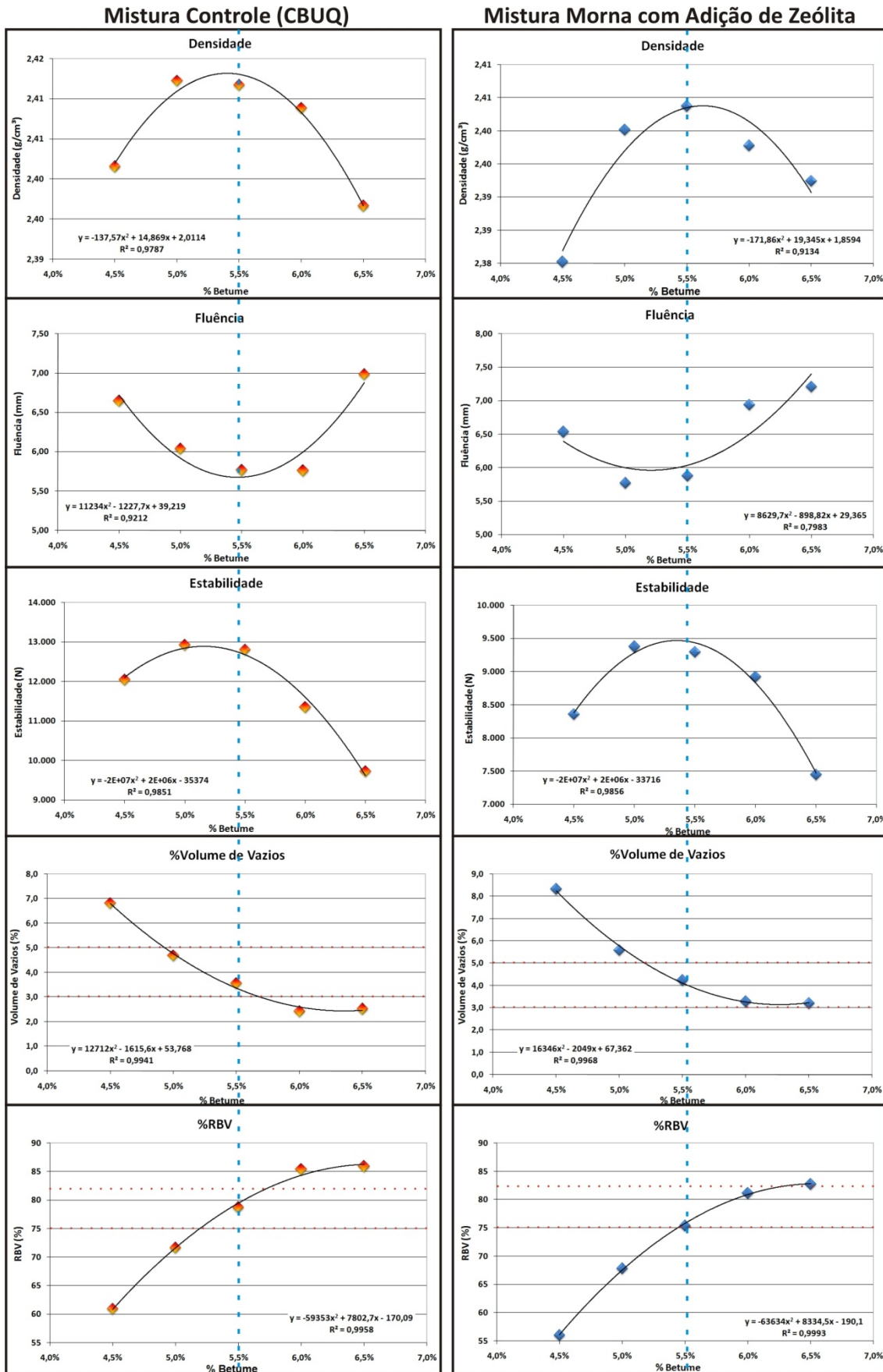


Figura 38 – Comparação entre os resultados Marshall das misturas Controle e Mornas.



Ao analisar os valores de volume de vazios, é possível verificar que os resultados da mistura com adição de zeólita são superiores ao da mistura controle (ver Tabela 9). Pode-se atribuir a este resultado superior a temperatura inferior à controle durante o processo de compactação.

Para ambas as misturas o **teor ótimo de betume** permaneceu em **5,5%**. Este valor serve de referência para as misturas dos demais experimentos. Nota-se que o valor de estabilidade para a mistura controle é superior ao valor da mistura morna, no teor ótimo de betume. Os valores de volume de vazios em ambas também sobre o teor ótimo estão próximos de 4%. Mesmo assim a mistura morna apresenta um menor desempenho ao ensaio.

#### **4.4.1 Ajuste do teor ótimo de betume**

Em estudos realizados pelo Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina, com misturas betuminosas e o ensaio Marshall, conclui-se que os valores de teor ótimo de porcentagem de betume encontrado são superiores ao valor necessário para mistura. De acordo com Carvalho (1999 apud BARRA, 2005, p. 133) existe a necessidade de redução do teor encontrado pelo método Marshall, devido aos problemas com afundamento excessivo por fluência na trilha de roda nos ensaios de deformação permanente.

A exemplo de outros estudos, tais como o de Barra (2005), sugere-se uma redução de porcentagem do teor ótimo de betume sempre que é realizado o dimensionamento da mistura pelo Marshall. Esta redução pode variar de acordo com a curva granulométrica, os valores de variação estão entre 0,5% a 1,2%.

Neste estudo foi adotado que a redução do teor ótimo de betume em torno de 0,64%. Ou seja, o teor ótimo encontrado de **5,5%** de betume é reduzido para **4,86%** de betume. Este teor está empregado nas misturas asfálticas controle e com adição de zeólita, porém, seu emprego é somente para as placas para módulo e fadiga.

#### 4.5 ENSAIO CÂNTABRO

O ensaio cântabro é de origem espanhola (CEDEX NLT - 362/92, 1986), preconizado pela proposta de norma do Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) - Centro de Estudios de Carreteras e utiliza o equipamento de abrasão “Los Angeles” sem o emprego das esferas metálicas. No Brasil, foi homologado pela ABNT sob a referência NBR 15140/2004. Este ensaio avalia, primeiramente, misturas asfálticas com elevadas percentagens de vazios, ou seja, os revestimentos drenantes. Entretanto, ele vem sendo empregado na avaliação de outros tipos de misturas asfálticas.

Este ensaio permite avaliar de maneira indireta a coesão, resistência à abrasão e à desagregação das misturas e consiste em colocar grupos de corpos de prova com a mesma dosagem de CAP. Estes são moldados no equipamento de compactação Marshall e são posicionados no interior do tambor da máquina de abrasão “Los Angeles” onde se aplica uma rotação de 33 rpm. Após 300 revoluções, retira-se o corpo de prova do equipamento e o conduz a balança para medição da massa. Com os valores da massa inicial e da massa final temos como calcular o desgaste por abrasão, Cântabro, pela equação:

$$D\% = 100 \cdot \frac{(P - P')}{P} \quad (29)$$

Onde:

D% = desgaste da massa do corpo de prova, em %;

P = peso inicial do corpo de prova, em g; e,

P' = peso final do corpo de prova, em g.

O índice de perda do ensaio Cântabro é a média dos valores obtida a partir dos corpos de prova ensaiados. O índice numérico aceitável é de no máximo 20% de perda, conforme preconizam as normas CEDEX NLT - 362/92 (1986) e a NBR 15140/2004. Os resultados do ensaio obtidos para misturas controle e morna com adição de zeólita estão contidos na Tabela 10.



Com os apontamentos da Tabela 10 torna-se possível observar que os resultados de desgaste médio para a mistura morna são superiores aos valores apresentados para a mistura controle. Em análise destes os valores, verifica-se que estão eles abaixo do limite de desgaste de 20%.

Tabela 10 – Resultados do Ensaio Cântabro para mistura controle e com adição de zeólita.

%Bet	CPs	h1(mm)	h2(mm)	h3(mm)	h médio	Massa Inicial(g)	Massa Final (g)	D%	Média D%
4,5%	A9	64,23	64,28	64,35	64,29	1191,8	1050,9	11,8%	Mistura Controle
4,5%	A10	63,90	63,61	63,95	63,82	1188,4	1061,4	10,7%	
5%	B8	63,62	63,21	63,25	63,36	1189,5	1103,3	7,2%	
5%	B9	62,53	63,23	63,11	62,96	1187,3	1090,8	8,1%	
5,5%	C8	62,72	62,65	62,51	62,63	1189,6	1131,5	4,9%	
5,5%	C9	61,63	61,82	61,93	61,79	1184,2	1115,8	5,8%	
6%	D8	62,23	62,46	62,49	62,39	1184,3	1117,5	5,6%	
6%	D9	61,86	61,84	61,97	61,89	1174,5	1115,2	5,0%	
6,5%	E8	62,55	62,76	62,71	62,67	1184,5	1148,2	3,1%	
6,5%	E9	62,35	62,09	62,03	62,16	1173,9	1128,0	3,9%	
4,5%	F8	65,69	66,06	65,67	65,81	1192,4	1055,2	11,5%	Mistura Morna (Zeólita)
4,5%	F9	66,68	66,75	66,57	66,67	1197,7	1035,9	13,5%	
5%	G8	63,16	63,47	63,21	63,28	1190,9	1100,9	7,6%	
5%	G9	63,89	64,03	63,92	63,95	1184,0	1062,1	10,3%	
5,5%	H8	64,20	63,90	63,91	64,00	1192,7	1112,4	6,7%	
5,5%	H9	63,16	63,05	63,10	63,10	1190,5	1099,1	7,7%	
6%	I8	62,41	62,73	62,62	62,59	1189,9	1126,6	5,3%	
6%	I9	63,21	63,42	63,24	63,29	1183,6	1114,1	5,9%	
6,5%	J8	63,25	63,36	63,43	63,35	1184,7	1142,6	3,6%	
6,5%	J9	62,54	62,52	62,52	62,53	1190,5	1124,4	5,6%	

A Figura 39 apresenta os resultados, em forma de curva, para as misturas controle e morna com adição de zeólita. A mistura morna apresenta desgaste médio superior ao da mistura controle.

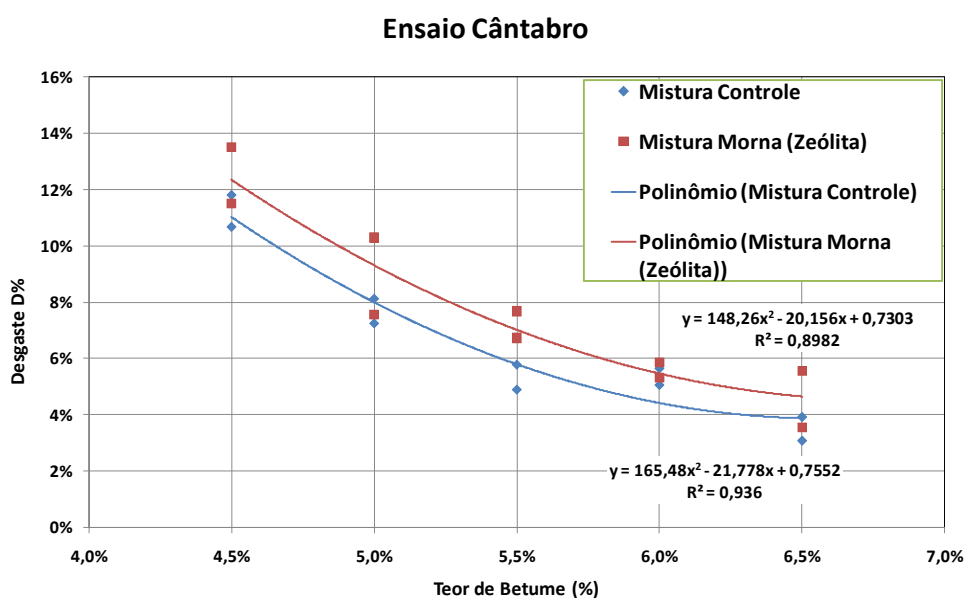


Figura 39 – Comparação dos valores do ensaio Cântabro.

#### 4.6 ENSAIO LOTTMAN

O ensaio Lottman tem suas diretrizes de execução determinadas pela *American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO (1998): T 283-89*. Com o título de Resistência das Misturas Asfálticas ao Dano Induzido por Umidade, esta norma tem por objetivo de avaliar a variação da resistência a tração indireta de corpos diametrais saturados e condicionados em laboratório. Este ensaio também é conhecido como Resistência à Tração por Umidade Induzida.

Corpos de provas cilíndricos são confeccionados para o ensaio com o equipamento de compactação Marshall. Estes devem possuir um determinado volume de vazio tal que o volume de água absorvido seja compatível com o determinado pela norma de ensaio. Com este objetivo foi realizado um estudo sobre os Vv%. Verificou-se que o volume de vazios das misturas controle e com adição de zeólita eram inferior ao necessário, logo foi feita uma avaliação da redução da energia de compactação (a referência Marshall é de 75 golpes para cada lado).

De acordo com o ensaio Marshall, o teor ótimo de betume da mistura ficou em 5,5% da massa. O ensaio Lotman determina que o volume de água absorvido seja no mínimo de 55%, o que indica que o volume de vazios deve estar em 8%. Assim, realizou-se um estudo para verificar a energia necessária para produzir tal valor.

Três tentativas foram realizadas, todas com redução da energia de compactação em 1/3 e 1/5 do número de golpes. E por meio deste, o resultado gerado é a aplicação de 11 golpes para as misturas controle e 14 golpes para as misturas com zeólita. Foram confeccionados dez espécimes para as misturas controle e dez para as misturas com adição de zeólita. Destes, metade (cinco espécimes) é destinada ao ensaio a seco, a outra metade é destinada ao ensaio com saturação parcial e condicionamento a umidade.

Os corpos testados a seco são armazenados em ambiente com temperatura constante até seu rompimento. Antes, estes deverão ser embalados em um filme plástico ou em sacos plásticos resistentes. Para garantir a temperatura de ensaio, os corpos ficam de repouso em um banho com água a temperatura de 25°C por no mínimo de duas horas e, somente então, testados.

Os espécimes condicionados deverão seguir o procedimento de congelamento seguido por aquecimento em presença de água. Antes, cada corpo de prova terá que passar por um pré-condicionamento a vácuo para determinar o grau de saturação.

O grau de saturação é determinado pela comparação entre o volume absorvido de água com o volume de vazios de cada corpo de prova. Se o volume de água absorvido estiver com valor entre 55% e 80% do volume de ar, então, este estará apto a ser ensaiado. Caso o volume de água for inferior a 55%, o procedimento de aplicação de vácuo deverá ser repetido com uma força maior de vácuo ou em um intervalo maior. Caso o volume for superior a 80%, pode ser aplicada uma menor força de vácuo ou por um período menor, não inferior a 5 minutos. Ao se repetir os procedimentos de aplicação de vácuo e, mesmo assim, os valores de volume de água absorvida permanecerem fora dos limites, superior e inferior, o corpo de prova será descartado.

A primeira etapa do ensaio para os corpos de prova condicionados é a imersão em água destilada e aplicação de vácuo. O equipamento de vácuo deverá estar munido de um pressurizador e um container capaz de resistir e manter baixas pressões. Este dispositivo será preenchido com água destilada suficiente para manter uma camada de aproximadamente uma polegada sobre os corpos imersos. Com o sistema container e bomba selados, uma pressão absoluta de 13 a 67 kPa é aplicada por um curto período de tempo (de 5 a 10 minutos). Ao final deste período cada espécime permanece submerso em água por mais um curto período (5 a 10 minutos).

Como é aplicado um condicionamento por congelamento, cada espécime é, após o período de aplicação de vácuo e repouso, embalado em sacolas plásticas resistentes. Estas embalagens deverão conter aproximadamente 10 ml de água. Depois de seladas, cada espécime é colocado em um freezer com temperatura de  $-18^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  por um período mínimo de 16 horas. Com o término do intervalo, os espécimes são removidos do freezer e colocados em um banho contendo água destilada a temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ . Após imersão, no primeiro momento mais rápido possível, é removida a embalagem plástica. Neste container, eles deverão permanecer em água a  $60^{\circ}\text{C}$  por um período de 24 horas.

Após as 24 horas em banho com água a  $60^{\circ}\text{C}$ , os corpos de prova são removidos e colocados em um banho com água a  $25^{\circ}\text{C}$  e neste permanecerão por um período de

2 ± 1 horas. Em alguns casos, a normatização AASHTO (1998) cita a necessidade de ser adicionado gelo, mas, somente no caso da temperatura da água aumentar demasiadamente. Neste banho, não deverá ultrapassar 15 minutos para que a água estabilize sua temperatura a 25°C. Terminado este período de condicionamento, os espécimes são testados.

Do mecanismo utilizado para romper os corpos de prova sem e com condicionamento são obtidas as cargas registradas durante o ensaio. Com a carga máxima resistida por cada corpo de prova é possível transformar em tensão de tração, que em unidades internacionais é obtida por:

$$S_t = \frac{2000 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (30)$$

Onde:

$S_t$  é a tensão de tração em kPa;

$P$  é a carga máxima em N;

$T$  é a altura média do corpo de prova em mm;

$D$  é o diâmetro médio do corpo de prova em mm.

É expresso numericamente o índice ou a resistência da mistura asfáltica ao efeito da deterioração pela ação da água como a relação entre a tensão original, ou resistência sem condicionamento, com a resistência remanescente após o condicionamento por congelamento e aquecimento. O cálculo segue a equação:

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \quad (31)$$

Onde:

TSR (*Tensile Strength Ratio*) razão de força de tração;

$S_1$  é a resistência média dos corpos de prova ensaiados a seco;

$S_2$  é a resistência média dos corpos de prova condicionados.

A Tabela 11 apresenta os valores obtidos para cada corpo de prova ensaiado não condicionado e condicionado. A Tabela 12 apresenta o resultado com o valor do índice numérico da deterioração por ação da água.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração indireta.

Controle não Condicionado						Zeólita não Condicionado					
CP	D	H	Vv%	P (N)	St (kPa)	CP	D	H	Vv%	P (N)	St (kPa)
C1	101,55	74,46	9,16	4836,48	407,18	Z3	101,55	71,51	10,57	4503,40	394,80
C2	101,55	71,15	10,24	5726,41	504,55	Z4	101,55	67,57	7,79	4837,26	448,79
C3	101,55	69,52	8,72	6676,25	602,07	Z7	101,55	69,17	8,30	6752,70	611,98
C4	101,55	70,35	9,37	5964,50	531,51	Z8	101,55	68,09	7,46	5158,20	474,91
C7	101,55	69,75	8,97	6388,50	574,16	Z10	101,55	67,61	7,22	4806,24	445,67
Controle Condicionado						Zeólita Condicionado					
CP	D	H	Vv%	P (N)	St (kPa)	CP	D	H	Vv%	P (N)	St (kPa)
C5	101,55	69,23	8,63	4098,22	371,09	Z1	101,55	67,42	7,10	4657,35	433,06
C6	101,55	69,23	8,47	4048,77	366,65	Z2	101,55	67,90	6,60	2985,62	275,64
C8	101,55	70,30	8,54	3773,66	336,53	Z5	101,55	67,34	6,72	2436,00	226,79
C9	101,55	69,49	8,00	4178,06	376,94	Z6	101,55	67,90	6,99	2098,69	193,78
C10	101,55	69,21	7,91	4045,49	366,46	Z9	101,55	66,86	6,94	2551,87	239,28

Os valores:

D e H estão em mm;

St é a resistência a tração em kPa;

S1 é a resistência a tração média dos corpos não condicionados (kPa);

S2 é a resistência a tração média dos corpos condicionados (kPa);

TSR é a valor da relação da resistência da mistura por efeito de deterioração pela água.

Tabela 12 – Resultado da ação deletéria das misturas controle e com adição de zeólita.

TSR controle		TSR zeólita	
S1	523,89	S1	475,23
S2	363,53	S2	273,71
TSR	69,4%	TSR	57,6%

O índice numérico ou resistência da mistura asfáltica ao efeito de deterioração da água é dado com a relação da resistência original, que é retida após condicionamento de congelamento e aquecimento. Conforme os resultados obtidos, verifica-se que o valor de TSR da mistura controle está no limite aceitável, pois o método aplica limite de aceitação de maior ou igual a 70%. Sendo assim, não haveria a necessidade de adição de um melhorador de adesividade (Dope). Porém, com os resultados de TSR da mistura morna com adição de zeólita, verifica-se a necessidade de adição de Dope.

A Figura 40 mostra algumas imagens registradas durante o processo de execução dos experimentos.



Figura 40 – Mosaico das fotos do ensaio Lottman.

Na Figura 40: a imagem **a)** apresenta os corpos de prova após aplicação de vácuo e em embalagens com dez mililitros de água; a imagem **b)** apresenta os corpos de prova no congelador daqueles destinados ao ensaio condicionado; a imagem **c)** apresenta os corpos de prova em estufa a 60°C; a imagem **d)** apresenta os corpos de prova após banho a sessenta graus; a imagem **e)** apresenta o posicionamento do corpo de prova para execução do ensaio de tração indireta; e, por fim, a imagem **f)** apresenta um corpo rompido durante o ensaio de tração indireta.

#### 4.7 COMPACTAÇÃO E CORTE DE PLACAS

As placas com misturas asfálticas permitem a extração de corpos de prova em diferentes formatos, dependente da necessidade de cada estudo. Com uma serra copo

poderia ser extraído, por exemplo, corpos de prova cilíndricos. De outra maneira, uma serra circular permitiria a extração de corpos de provas prismáticos das mais variadas formas.

A forma do corpo de prova relaciona-se diretamente ao tipo de ensaio desejado. No estudo em questão, a forma trapezoidal apresenta certas vantagens no que diz respeito às solicitações alternadas com aplicação de grande número de ciclos, devido ao fato de que o esforço máximo está a um terço da altura do corpo de prova, sem grande influência sobre as bases de apoio, conforme mostra a Figura 30.

Os corpos de prova trapezoidais somente são extraídos de grandes placas com dimensões padronizadas de 12x40x60cm. Estas podem ser tanto extraídas diretamente de campo para ensaios de controle de execução ou para deflagração de restauração como podem ser moldadas em laboratório, para dimensionamento de pavimentos novos ou ensaios de pesquisas.

No presente estudo, os corpos de prova trapezoidais serão extraídos de placas misturadas, compactadas e cortadas em laboratório. O processo de mistura acontece com o auxílio de um misturador industrial adaptado para misturas asfálticas quentes. A compactação será feita com um equipamento próprio para execução em laboratório e contém um macaco hidráulico e um pneu duplo. Realiza-se o corte com uma serra circular adaptada sobre uma mesa, cujos controles de posicionamento transversais e longitudinais servem para ajustar o tamanho dos corpos de prova.

#### **4.7.1 Mistura**

Os processos de misturas das massas asfálticas devem seguir conforme os procedimentos elaborados para as misturas em usinas. Uma seqüência lógica de tarefas permite a padronização do processo, o que garante a repetibilidade dos ensaios propostos.

O volume de material necessário para a compactação de uma placa de dimensões 60x40x12 cm é de 28,8 dm<sup>3</sup> (ou litros). O laboratório de pavimentação da UFSC possui um misturador com capacidade nominal de 22 litros, o que por si só limitaria sua execução em pelo menos duas vezes. Limita-se por uma questão da

capacidade física e potência elétrica do equipamento em 10 kg de massa para cada etapa de mistura, que com uma densidade encontrada pelo método Marshall (e corrigido) produz um volume aproximado de 4 litros. A seguir, a Tabela 13 apresenta a quantidade de material necessário para a produção de uma placa de concreto asfáltico com adição de zeólita nas dimensões supracitadas.

Tabela 13 – Material para preparo de uma placa (60x40x12 cm) com adição de zeólita.

# (mm)	% Retido	Kg 1 placa	g 1 placa
12,5	17,7	12,182	12182,2
9,5	10,6	7,296	7296,3
4,75	19,6	13,485	13485,1
2,8	15,1	10,423	10423,3
1,18	8,4	5,798	5797,9
0,6	6,9	4,756	4755,6
0,3	4,8	3,322	3322,4
0,15	3,4	2,345	2345,2
0,075	2,4	1,629	1628,6
Fundo	5,7	3,909	3908,7
Total		65,1453	65145,3

Densidade	Vol dm3	kg
2,39	28,80	68,9368

% Bet	Kg Betume	g Bet (B)	Kg A+B
4,86	3,3278	3327,8	68,4731

m%	0,003
massa (kg)	68,4731
Zeólitas (g)	205,4
h2o (g)	43,1
zolit sec (g)	162,3

Como o equipamento não permite a mistura de 68,94 kg de material de uma placa, esta quantidade será dividida e preparada em sete vezes, cada uma destas será misturada contendo 9,84 kg de material. São mantidas as proporções da curva granulométrica e do teor de betume para cada uma das misturadas.

Estabelecida a quantidade de material, é necessário elaborar uma seqüência de execução rápida que não comprometa a qualidade da mistura. Logo, a seguinte lógica de mistura é estabelecida:

- Separar os materiais granulares em bandejas, sendo eles 7 ao todo, conforme mostrado na Figura 41;



- Separar a quantidade de ligante para uma bandeja de material granular, conforme é apontado na Figura 42;
- Separar a quantidade de zeólita necessária a uma placa, com 21% de umidade, de acordo com a Figura 43;
- Aquecimento dos granulares e do ligante betuminoso a temperatura de mistura;
- Aquecimento das partes do equipamento de mistura;
- Misturar todos os materiais.

Para cada etapa de mistura, divididas em 7 vezes, são necessários em torno de 6 minutos, que contempla colocação do material na misturadora em rotação, separar e adicionar o ligante e adicionar a zeólita. No total são utilizados 42 minutos para o processo de mistura de uma placa.



Figura 41 – Materiais granulares para uma placa, separados em bandejas.



Figura 42 – Ligante betuminoso em estufa na temperatura de mistura.



Figura 43 – Quantidade de zeólita para uma placa a 21% de umidade.

A mistura de todos os materiais segue o seguinte procedimento: primeiramente são despejados os granulares graúdos dentro do recipiente com o misturador ligado, conforme mostra a Figura 44. Em seguida é adicionada a quantidade definida e o ligante e prossegue com o equipamento ligado até que todo o material fique todo encoberto. Assim que esta mistura apresentar homogeneidade, adiciona-se a zeólita úmida. Após a adição da zeólita, o equipamento de misturas permanece ligado até que a massa apresente consistência visual adequada. Identifica-se, durante o processo de mistura, que a zeólita adicionada foi encoberta pelo ligante e que continuou a liberar umidade.

Uma colher moldada em madeira auxilia todo o processo de mistura, para garantir que não ocorram falhas. O equipamento de mistura contém uma boca de fogo móvel, igual a um fogão industrial, alimentada por um bужão de gás acoplado, uma panela com um sistema para bascular a mistura, um conjunto de pás metálicas soldadas a uma haste presa a um motor elétrico.



Figura 44 – Misturador modificado para mistura da massa asfáltica.

A após cada uma das sete etapas de mistura de uma placa, o material é depositado seqüencialmente em bandejas maiores, onde se realiza aeração, necessária para a liberação da umidade remanescente. Em seguida, o material permanece em descanso em estufa na temperatura de compactação até o momento da execução.

#### 4.7.2 Compactação

A compactação das placas é executada na mesa de compactação do LPC (Laboratoire des Pontes et Chaussés). Este equipamento possibilita uma compactação, em uma única camada de massa asfáltica com o mesmo princípio de execução de campo, ou seja, trata-se de um pneumático com pressão regulável acoplado a um macaco hidráulico cuja pressão pode ser ajustável conforme a energia de compactação desejada.

O macaco hidráulico pode funcionar tanto com o eixo bloqueado quanto livre. Por um lado, quando bloqueado, o eixo adquire a pressão pré-estabelecida, mas não permite oscilações do eixo por qualquer obstáculo encontrado, ou seja, ele mantém constante a altura de passagem com variação somente da pressão do pneu. Por outro lado, quando livre, permite que o eixo se adapte a qualquer pressão adicional encontrada durante a passagem do rodado, ou seja, o aparelho funciona tal que a carga aplicada sobre a superfície da placa permaneça constante durante as passadas.

Este mecanismo permite, quando bloqueado, uma acomodação forçada da mistura. Isso faz com que a superfície da mistura, em pré-adensamento, permaneça nivelada. Quando livre, o mecanismo permite que a compactação seja mais homogênea possível.

Existem dois conjuntos de pneus: um conjunto com um rodado apenas e outro conjunto com rodado duplo. O dispositivo com o rodado simples é exclusivo para a compactação das placas menores. O rodado duplo é exclusivo para a compactação das placas maiores de 12x40x60cm, conforme a Figura 45. À esquerda, imagem **a)**, é apresentada a mesa com o rodado duplo e fôrma para placas maiores. À direita, imagem **b)**, apresenta-se o bloco de comando. O bloco de comando permite os ajustes de pressão e a programação das passadas.



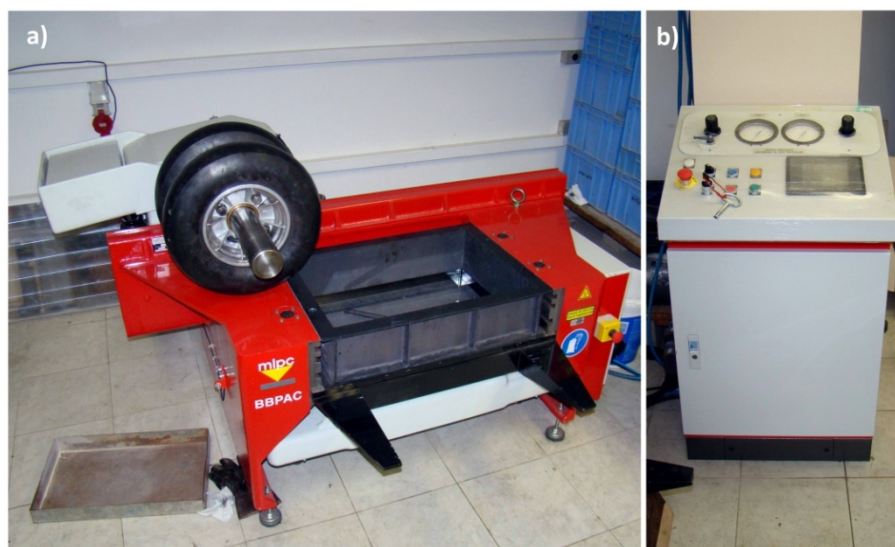


Figura 45 – Mesa com compactador de placas do LCPC.

O eixo permite que o rodado tenha um posicionamento de passagem relativo ao eixo da placa. Existem três posições possíveis: pelo centro da placa, ou eixo; pela lateral, à frente; e, pela lateral, a trás. Estas posições podem variar com número de passadas e, normalmente, de acordo com a norma francesa de compactação de placas (NF P 98-250-2), as primeiras passagens servem como acomodação da mistura, para isso o deslocamento lateral em relação ao eixo, dimensão  $a$  da Figura 46, é de 7,5cm. As demais passadas seguem com deslocamento de 4,5 cm.

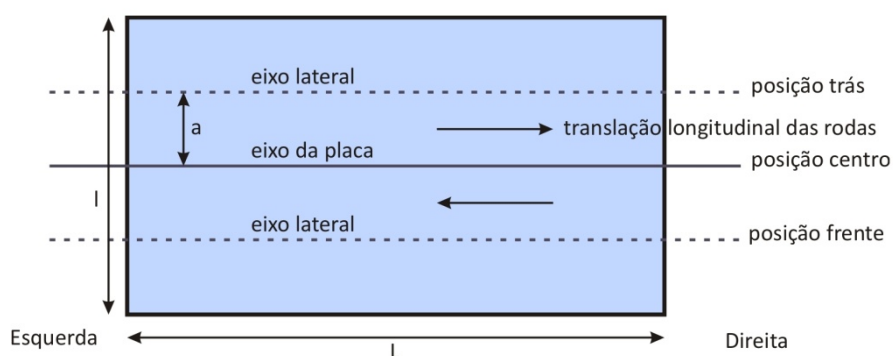


Figura 46 – Esquema de passagem do eixo da mesa compactadora vista em planta.

O equipamento permite um ajuste contínuo da profundidade da fôrma da placa. Durante o despejo do material no interior do molde deve-se manter a maior profundidade possível para, assim, evitar perda de material no decorrer das primeiras passadas do rodado, com pressão nos pneus e do macaco hidráulico bloqueado.

O processo de compactação tem início após a permanência do material em descanso, em estufa. Este descanso tenta reproduzir o deslocamento da massa que após a mistura em usina viaja por cerca de uma hora até o local de compactação. Então, conforme a Figura 47, temos a seguinte seqüência:

1. Retira-se o material da estufa a temperatura de compactação de 125°C;
2. Deposição da mistura na fôrma, imagem **a**;
3. Acomodação da mistura, imagens **b** e **c**;
4. Primeiras passagens de pré-compactação, imagem **d**;
5. Demais passagens de compactação, imagens **e** e **f**.

A acomodação da mistura, Figura 29 imagem **b**, serve para prevenir uma falha de distribuição do material pelas dimensões da placa. A imagem **c** apresenta o nivelamento da superfície da placa antes das passagens. A imagem **d** apresenta as primeiras passagens de pré-compactação e acomodação. Estas são importantes, uma vez que garantem que a placa seja compactada uniformemente até o final do procedimento (usa-se uma placa que pode ser de metal ou madeira). E, por fim as imagens **e** e **f** apresentam as passagens de compactação propriamente dita, apresentando respectivamente as passagens lateral trás e central.



Figura 47 – Mosaico de Processo de compactação de placas.

Foi possível notar que as misturas asfálticas mornas com adição de zeólita apresentam uma **sensibilidade** sobre o **tempo de repouso em estufa**. Isto se deve ao fato de que a água adsorvida pela zeólita não se liberta com facilidade quando coberta por ligante asfáltico.

Das três placas compactadas, somente duas puderam ser aproveitadas. Na primeira placa adotou-se um intervalo de uma hora de descanso e logo a execução da

compactação, conforme Figura 48. Nesta observou-se uma expansão da massa da placa mesmo após o procedimento de compactação. Expansão com provável origem na água liberada da zeólita em forma de vapor e aprisionada pelo ligante em forma de espuma.



Figura 48 – Expansão volumétrica da massa após compactação, primeira placa.

Na tentativa de diminuir os efeitos causados pela expansão volumétrica adotaram-se novos intervalos de descanso em estufa. Primeiro emprega-se um intervalo de duas horas de descanso, após mistura em temperatura de compactação de 125°C. Observa-se que este intervalo é suficiente, pois reduziu consideravelmente este fenômeno. Mesmo assim, identificou-se uma expansão abaixo do observado pela primeira placa.

Na compactação da última placa, com um intervalo de três horas em estufa, apresentou a mesma expansão observada no intervalo de duas horas. Conclui-se, assim, que o intervalo de descanso, para a eliminação total da água aprisionada pela ligante em forma de espuma, converge a um valor superior a três horas e que se deve avaliar melhor a relação dos efeitos, desta umidade retida, sobre o volume de vazios e o tempo de repouso.

#### 4.7.3 Corte

O corte das placas de mistura asfálticas mornas com adição de zeólita tem o objetivo de formar o conjunto de corpos de prova para triagem e ensaios de módulo e fadiga. O Laboratório de Pavimentação da UFSC construiu um equipamento segundo as condições necessárias ao corte de misturas asfálticas. As normas francesas, que



regulam os ensaios com corpos de prova trapezoidais, pedem um descanso mínimo de 15 dias após a compactação.

Um dos problemas mais comuns existentes no corte das misturas asfálticas diz respeito ao aquecimento existente no atrito entre o material e a serra de corte. Ensaios realizados no LCPC, na França, concluíram que durante o corte das placas asfálticas, o aquecimento gerado pode causar deformações que descaracterizam a homogeneidade da mistura.

O equipamento de corte, então, deve minimizar este efeito. Existem duas maneiras para a redução da temperatura: uma é molhar constantemente a serra circular; a outra forma é controlar a velocidade de progressão do corte, que deve ser igual ou inferior a 2 cm/min.

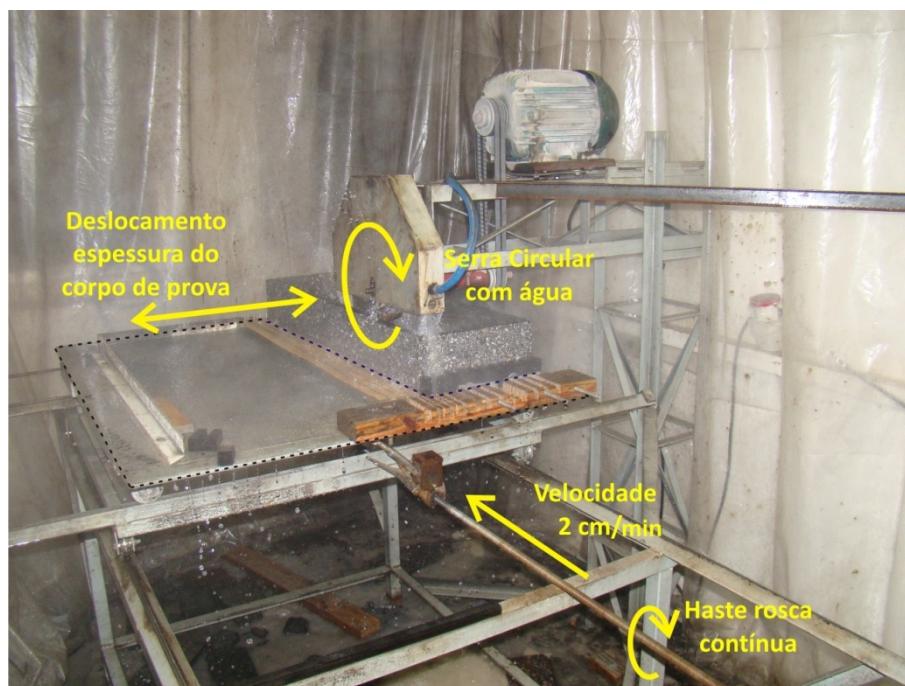


Figura 49 – Equipamento de corte e mesa deslizante.

Para o controle da velocidade de progressão do equipamento do laboratório da UFSC, é utilizado um dispositivo automático que fica acoplado a uma haste com rosca contínua, movimentando a mesa de apoio, conforme mostra a Figura 49.

O sistema de corte possibilita cortar duas placas ao mesmo tempo (quatro corpos de prova). Primeiramente são aparadas as bordas, aproximadamente 25 mm da borda, e nas metades, na sua maior dimensão a 250 mm da borda, porque após a

remoção da fôrma é possível observar que as bordas laterais do paralelepípedo apresentam problemas de densificação. A Figura 50 apresenta a lógica de corte seguido para a confecção dos corpos de prova.

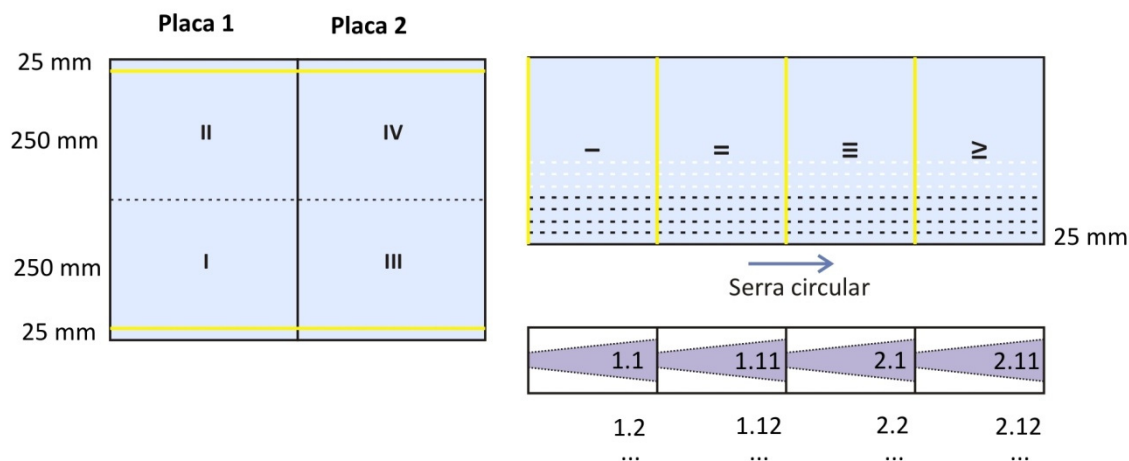


Figura 50 – Lógica de corte das placas.

Após a remoção das bordas, as metades são alinhadas de maneira a permitir o início da remoção das plaquetas que contêm os corpos de prova. A Figura 51 apresenta a serra circular próxima à borda da última plaqueta, final de corte, de um conjunto de quatro plaquetas. O uso da água é destinado ao resfriamento da serra.



Figura 51 – Serra circular e água para resfriamento.

Após o corte de quatro plaquetas, é feita então uma verificação de controle das espessuras. Esta verificação é realizada após cada corte e tem o objetivo de garantir que a espessura do corpo de prova não ultrapasse os limites estabelecidos por norma ( $25 \pm 1$  mm).

Cada plaqueta é numerada por um valor código que a identifica em relação sua posição na placa e na posição de corte. A Figura 52 apresenta uma plaqueta de uma linha de corte. O código varia em função do número da placa e a posição na linha de corte.



Figura 52 – Plaqueta dos corpos de prova (quatro por vez).

A forma de codificação segue conforme **X.XX**, o primeiro valor antes do ponto é o valor do número da placa, o segundo é referente à posição em relação à linha de corte. A primeira linha então é **1.1; 1.11; 2.1; 2.11**, a segunda linha **1.2; 1.12; 2.1; 2.12**, e assim por diante até a última linha (**1.11; 1.111; 2.11; 2.111**).

Depois da identificação, as plaquetas são colocadas de quatro em quatro para o início do corte final de formação dos corpos de prova. A Figura 53 apresenta um conjunto de oito plaquetas, onde o alinhamento é mantido durante todo o processo de corte e somente são cortados quatro corpos de prova por vez.





Figura 53 – Corte das plaquetas dos corpos de prova.

Após o fim do corte, conforme pode ser observado na Figura 54, os corpos de prova são alinhados e agrupados de acordo com sua codificação. Assim permanecem até o final do período de descanso de quinze dias, quando então é realizada a triagem para ensaio.



Figura 54 – Trapézios finais cortados prontos para triagem.

#### 4.8 TRIAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A triagem dos corpos de prova tem o objetivo de agrupar corpos de prova com mesmas características ou próximas. Neste sentido, são formados conjuntos de corpos estatisticamente homogêneos, usando os seguintes parâmetros necessários: dimensões e densidade dos corpos de prova. Realiza-se a triagem dos corpos de prova pela percentagem de vazios (%Vv) e coeficiente de forma ( $K\epsilon$ ). A Figura 55 apresenta os corpos de prova trapezoidais com suas respectivas codificações.



Figura 55 – Triagem dos corpos de prova.

A porcentagem de vazios é calculada conforme a relação entre a densidade teórica e a densidade aparente. A relação segue conforme descrito abaixo:

$$\%Vv = \frac{100 \cdot (D_{teórica} - D_{aparente})}{D_{teórica}} \quad (32)$$

Onde:

%Vv é o volume de vazios;

$D_{teórica}$  é a densidade teórica do corpo de prova;

$D_{aparente}$  é a densidade aparente do corpo de prova;

O coeficiente de forma ( $K\varepsilon$ ) é calculado para cada corpo de prova. A seguinte equação relaciona as dimensões os valores das dimensões com o valor do  $K\varepsilon$  (NF P 98-261-1):

$$K\varepsilon = \frac{(B - b)^2}{8 \cdot h^2 \cdot b \cdot \left( \ln \left( \frac{B}{b} \right) - \frac{(B - b) \cdot (3B - b)}{2 \cdot b^2} \right)} \quad (33)$$

Onde:

B é a base maior (em mm);

b é a base menor (em mm);

h é a altura do corpo de prova (mm).

Destina-se um tipo de ensaio a cada grupo de quatro espécimes ditos homogêneos. Primeiramente, os corpos são classificados pelo coeficiente de forma ( $K\epsilon$ ). Com os valores de  $K\epsilon$  próximos, os corpos de prova são selecionados de maneira que o grupo tenha um desvio padrão do volume de vazios inferior a 0,5%.

Tabela 14 – Triagem dos corpos de prova para os ensaios.

CP	K épsilon (mm)	K sigma (mm)	Volume de Vazios Vv%	Desvio Vv%	Média K épsilon	Def. max ( $\mu\text{m}$ )	Flecha ( $\mu\text{m}$ )	Amplitude ( $\mu\text{m}$ )	Ensaio
1.12	8,897E-04	1,31E-02	4,95	0,5	8,91E-04	150	168,26	336,52	Fadiga
1.111	8,90E-04	1,37E-02	5,24						
1.4	8,93E-04	1,33E-02	5,09						
2.18	8,96E-04	1,30E-02	6,07						
1.13	8,95E-04	1,29E-02	4,99	0,1	8,96E-04	150	167,40	334,81	
1.3	8,95E-04	1,29E-02	5,09						
1.14	8,97E-04	1,32E-02	4,98						
1.5	8,98E-04	1,34E-02	4,92						
1.2	8,98E-04	1,30E-02	4,62						
1.19	8,98E-04	1,30E-02	4,31	0,5	8,98E-04	120	133,58	267,17	
1.9	8,98E-04	1,28E-02	4,76						
2.3	8,99E-04	1,28E-02	5,55						
2.17	8,99E-04	1,29E-02	4,85	0,3	8,99E-04	40	44,51	89,01	Módulo Complexo
2.12	8,99E-04	1,30E-02	4,21						
2.2	8,99E-04	1,30E-02	4,77						
2.5	8,99E-04	1,34E-02	4,55						
1.10	9,00E-04	1,35E-02	5,10	0,3	9,00E-04	120	133,37	266,75	Fadiga
2.13	9,00E-04	1,28E-02	5,06						
2.110	9,00E-04	1,36E-02	5,77						
1.16	9,01E-04	1,31E-02	5,07						
1.17	9,01E-04	1,27E-02	4,51	0,4	9,02E-04	100	110,92	221,84	
2.11	9,01E-04	1,28E-02	4,78						
2.111	9,02E-04	1,35E-02	5,54						
2.7	9,02E-04	1,28E-02	5,10						
2.6	9,03E-04	1,33E-02	4,81	0,4	9,05E-04	100	110,53	221,07	
2.1	9,04E-04	1,28E-02	5,57						
2.14	9,05E-04	1,31E-02	5,85						
2.10	9,06E-04	1,35E-02	5,33						
1.6	9,05E-04	1,30E-02	5,13	0,5	9,03E-04	150	166,03	332,06	Fadiga (substituição)
1.18	9,02E-04	1,30E-02	4,42						
2.19	8,96E-04	1,28E-02	5,49	0,3	8,98E-04		167,06	334,12	
2.9	9,00E-04	1,28E-02	5,10						
2.11	9,01E-04	1,28E-02	4,78	0,1	9,01E-04	100	110,98	221,95	
2.16	9,01E-04	1,33E-02	4,59						
2.15	9,00E-04	1,32E-02	4,45	0,2	8,99E-04		111,22	222,44	
1.7	8,99E-04	1,28E-02	4,68						

A Tabela 14 apresenta os corpos de prova selecionados e agrupados conforme a necessidade do ensaio. Em sua maioria, os espécimes são para o ensaio de fadiga, pois é necessária a variação do valor da deformação máxima em três pontos e oito

corpos para cada. Para os ensaios de Módulo Complexo, são necessários quatro corpos de prova e a deformação de solicitação é constante, geralmente inferior a 50  $\mu\text{m}$ , o que permite trabalhar no domínio da linearidade.

Outro fator importante para o cálculo do valor do módulo é o coeficiente de força  $K_\sigma$ . Este, como o  $K_\epsilon$ , é dependente da geometria do corpo de prova e está relacionado com a posição da tensão máxima.

$$K_\sigma = \frac{3 \cdot h}{2 \cdot e \cdot b \cdot (B - b)} \quad (34)$$

Onde  $e$  é a espessura do corpo de prova.

Durante os experimentos, mais especificamente no ensaio de fadiga para os corpos de prova com deformação máxima de 100  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ , foram observados problemas relacionados ao comportamento esperado. São dois os critérios analisados: o primeiro é quanto à altura de ruptura do corpo de prova; o segundo é o número de ciclos até a ruptura. Estes critérios filtram aqueles corpos cuja ruptura é devida a falhas localizadas. A Tabela 14, na parte inferior (Fadiga Substituição), apresenta os corpos que substituíram os rejeitados. Somente o corpo de prova 1.6 foi descartado também pelos mesmos critérios.

Os corpos de prova selecionados para os ensaios de módulo e fadiga são colados com uma cola epóxi em suportes metálicos, conforme mostra a Figura 56. Após período de 24 horas de descanso, tempo de cura da cola, os corpos de provas são afixados na estrutura do mecanismo de solicitação alternada pelos suportes metálicos através de parafusos, permitindo a calagem dos sensores de aquisição de dados.





Figura 56 – Colagem dos corpos de prova sobre os suportes metálicos.

#### 4.9 ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

O registro dos valores do ensaio de módulo complexo tem origem no equipamento de solicitação alternada. A obtenção dos dados dos sensores de força e deslocamento ocorre, para o ensaio de módulo, nos intervalos de temperatura entre os valores de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ , e frequência de solicitação de 1Hz, 3Hz, 10Hz, 30Hz. A determinação do módulo da mistura é realizada no domínio linear, ou seja, a pequenas deformações. Este limite encontra-se abaixo de 50 microdeformação. Portanto, adota-se uma deformação de ensaio a **40  $\mu\text{m}$** . Este será constante para todo o ensaio.

O tempo de aquisição dos dados é relativamente curto, se comparado ao tempo necessário ao condicionamento térmico dos espécimes. O tempo de condicionamento é de 6 horas para cada temperatura de ensaio determinada. Após o condicionamento de cada temperatura é realizado o ensaio propriamente dito.

O sistema de aquisição de dados gera um arquivo contendo um minuto de informação, estes dados são registrados em arquivos pacotes. Posteriormente cada pacote é lançado a uma planilha de Excel e cada arquivo, Excel, contém as informações de força em Newtons, frequência da força em Hz, ângulo da força ( $^{\circ}$ ), amplitude de deslocamento em micrometro, frequência de deslocamento em Hz, ângulo do deslocamento ( $^{\circ}$ ) e por último o ângulo de fase entre a força e o deslocamento em ( $^{\circ}$ ).



Deste processamento de dados obtém-se o resultado do experimento que determina o valor do módulo complexo em uma determinada temperatura e frequência. Os valores obtidos para o cálculo correspondem a média aritmética dos valores amostrados nos últimos dez segundos do experimento, ou seja, as últimas linhas da planilha. Realiza-se o cálculo com o valor médio (dos 10s de dados) da força em Newtons e do ângulo de fase. A Tabela 15 apresenta os resultados do ensaio módulo complexo correspondente a cada temperatura e frequência de ensaio com as misturas asfálticas mornas com adição de zeólita.

Tabela 15 – Dados do ensaio Módulo Complexo Mistura Morna com Zeólita.

Temperatura (° C)	Frequência (Hz)	Fase (°)	E*  (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-10°C	1	6,3	14159	14074	1547
-10°C	3	5,2	14936	14876	1343
-10°C	10	4,2	15733	15691	1156
-10°C	30	3,8	16026	15991	1060
0°C	1	11,2	11471	11251	2234
0°C	3	8,6	12630	12486	1898
0°C	10	7,0	13769	13667	1669
0°C	30	6,1	14409	14328	1519
10°C	1	17,9	8192	7795	2516
10°C	3	14,9	9670	9345	2485
10°C	10	11,8	11119	10883	2278
10°C	30	10,1	11993	11806	2104
15°C	1	24,6	6112	5555	2549
15°C	3	20,3	7756	7277	2685
15°C	10	16,0	9438	9074	2596
15°C	30	13,2	10618	10336	2431
20°C	1	29,4	4682	4077	2302
20°C	3	25,3	6228	5629	2665
20°C	10	19,9	8087	7605	2749
20°C	30	17,7	9013	8587	2740
30°C	1	42,2	1654	1225	1112
30°C	3	40,2	2670	2038	1725
30°C	10	33,9	4282	3555	2387
30°C	30	29,8	5190	4505	2576
40°C	1	40,3	643	491	415
40°C	3	44,5	918	655	643
40°C	10	46,8	1504	1030	1095
40°C	30	46,0	2129	1479	1531

Calcula-se o módulo com os valores de força e amplitude de deformação de cada corpo de prova. A norma do módulo, correspondente ao binário temperatura e

freqüência, é a média dos módulos dos quatro corpos de prova. Com o valor do ângulo de fase são calculados os valores para o módulo elástico dinâmico **E1** e o módulo de perda **E2**.

As representações dos resultados auxiliam no entendimento do comportamento mecânico das misturas em função da temperatura e freqüência. As representações conhecidas são: curva no espaço de **Black**, curva **Cole-Cole**, curva **Isócrona**, curva **Isotérmica** e curva **Freqüência-Temperatura**.

A seguir são apresentadas as representações dos dados coletados do ensaio de módulo complexo da mistura asfáltica morna.

#### 4.9.1 A curva do espaço Black

A curva no espaço Black é a representação da norma do módulo complexo  $|E^*|$  em função do ângulo de fase. Ao se observar a Figura 57, nota-se a influência da temperatura nos valores de ângulo de fase. O aumento da temperatura tem efeito no aumento do ângulo de fase, enquanto o valor da norma do módulo diminui.

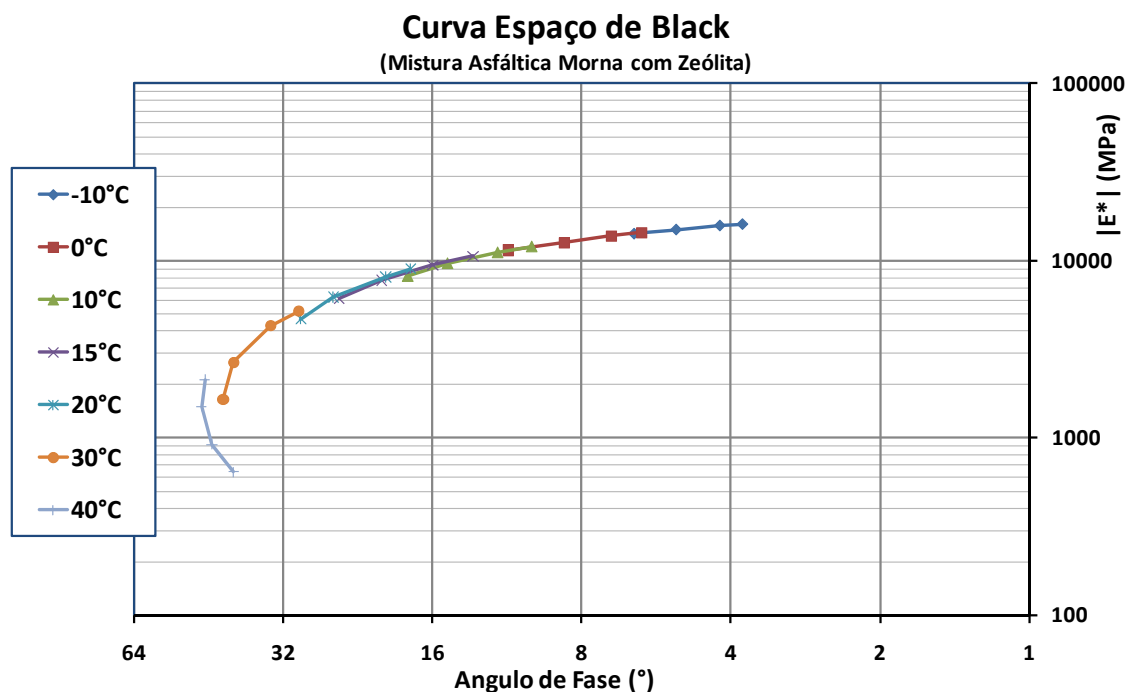


Figura 57 – Curva no espaço Black com ângulo de fase (°) e norma do módulo (MPa).

O ângulo de fase pode ser associado ao estado do material. Conforme a temperatura aumenta o ângulo de fase também aumenta e, para temperaturas altas, os resultados tendem a formar uma assintótica.

#### 4.9.2 Curva Cole-Cole

A representação do módulo complexo no plano cole-cole consiste em apresentar os valores da parte real, ou seja, E1 no eixo das abscissas e apresentar os valores da parte imaginária E2 no eixo das ordenadas. Esta curva é semelhante a um arco de círculo e independe da frequência e da temperatura, conforme apresenta a Figura 58.

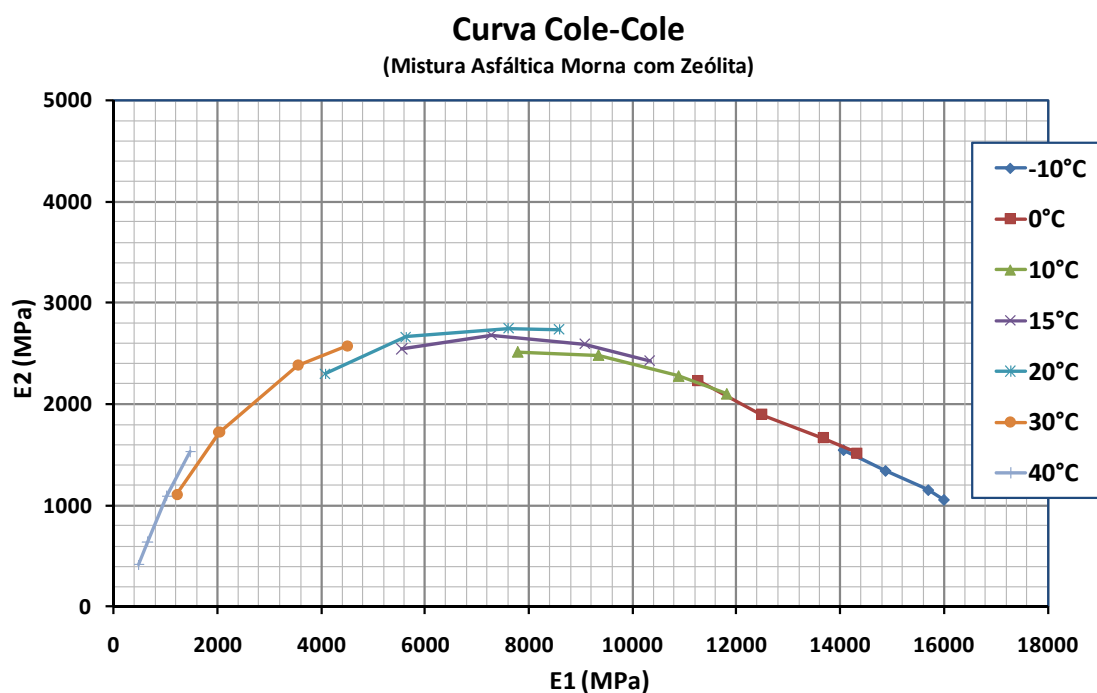


Figura 58 – Curva Cole-Cole dos valores do módulo E1 e E2.

O módulo da perda E2, que representa o comportamento viscoelástico, apresenta seu maior valor no grupo de temperatura em 20°C. Ou seja, é o grupo com maior perda irreversível encontrado, devido a dissipação de energia por atrito interno transformado em aquecimento do corpo de prova.

### 4.9.3 Curva Isócrona

As curvas Isócronas apresentam em um mesmo gráfico a norma do módulo pela temperatura, em escala semilog. As curvas seguem conforme os valores de frequência de solicitação.

Na Figura 59, observa-se que nas curvas ocorre a diminuição dos valores da norma do módulo com o aumento da temperatura. Observa-se, também, a influência da frequência de solicitação nos valores de módulo.

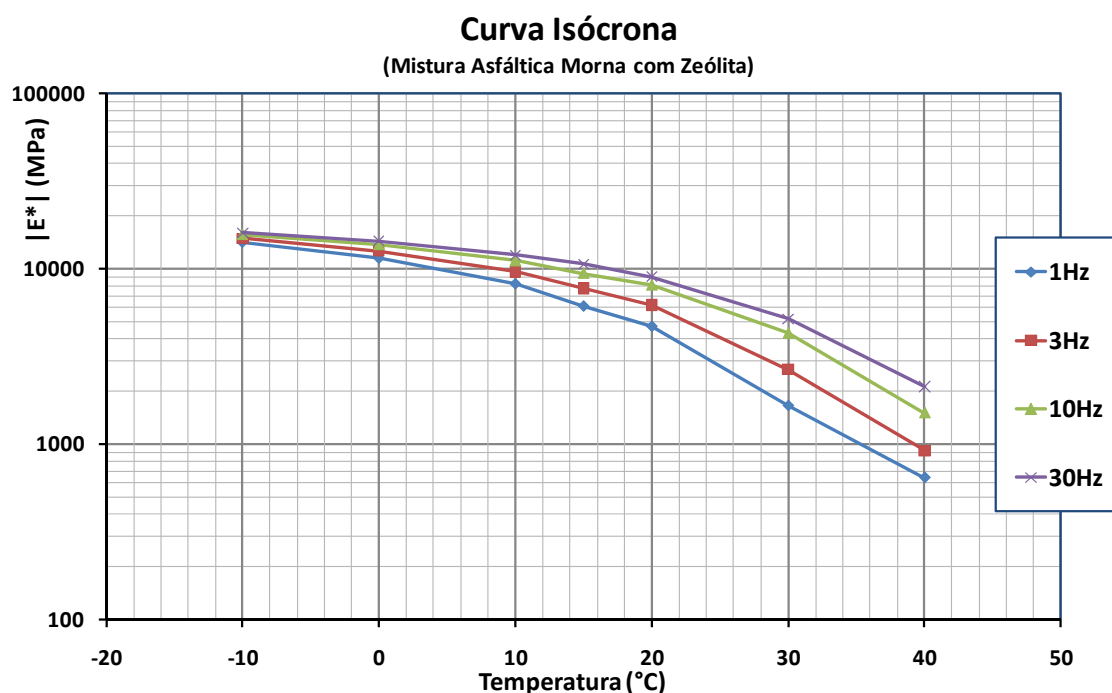


Figura 59 – Curva Isócrona com temperatura (°C) e norma do módulo (MPa).

Conforme a temperatura aumenta, observa-se a queda do valor da norma do módulo em todas as frequências de ensaio. Observa-se, também, uma dispersão relativa dos resultados da norma nas temperaturas mais altas

### 4.9.4 Curva Isotérmica

A curva isotérmica é obtida pela construção dos pontos, em escala log-log, da norma do módulo complexo  $|E^*|$  em função da frequência de solicitação. Onde cada curva representa uma temperatura. Permite avaliar a variação do módulo com a temperatura, ou seja, sua susceptibilidade térmica. A Figura 59 apresenta a curva dos ensaios de módulo com misturas asfálticas mornas.

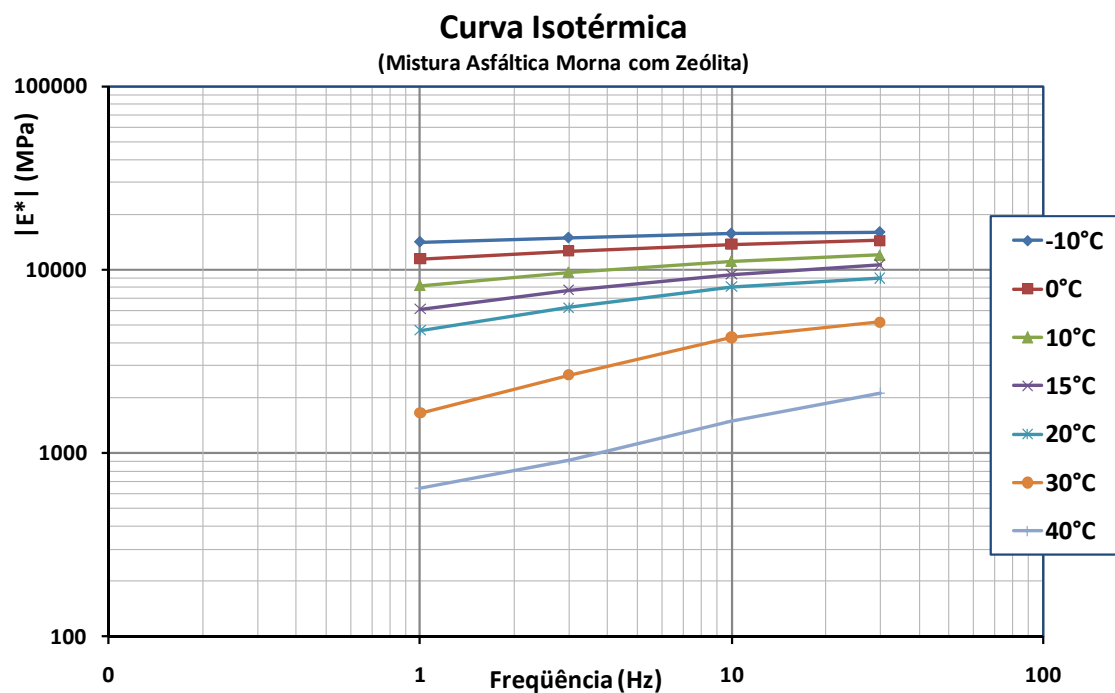


Figura 60 – Curva Isotérmica com Freqüência (Hz) e norma do módulo (MPa).

Os valores indicam um aumento na queda do valor da norma do módulo para cada temperatura. Conforme a freqüência cresce, a dispersão do valor da norma do módulo é menor.

#### 4.9.5 Curva Freqüência – Temperatura

A curva freqüência-temperatura é a transformação das curvas do módulo pela temperatura, curva isotérmica, em uma única curva. A temperatura escolhida como referência é  $T_{ref} = 15^{\circ}\text{C}$ . Definido o referencial os demais valores são transportados por um fator alfa até obter linearidade.

A Figura 61 apresenta a curva freqüência-temperatura obtida para os valores de módulo das misturas mornas com zeólitas. São apresentados juntamente aos valores definidos na curva isotérmica.

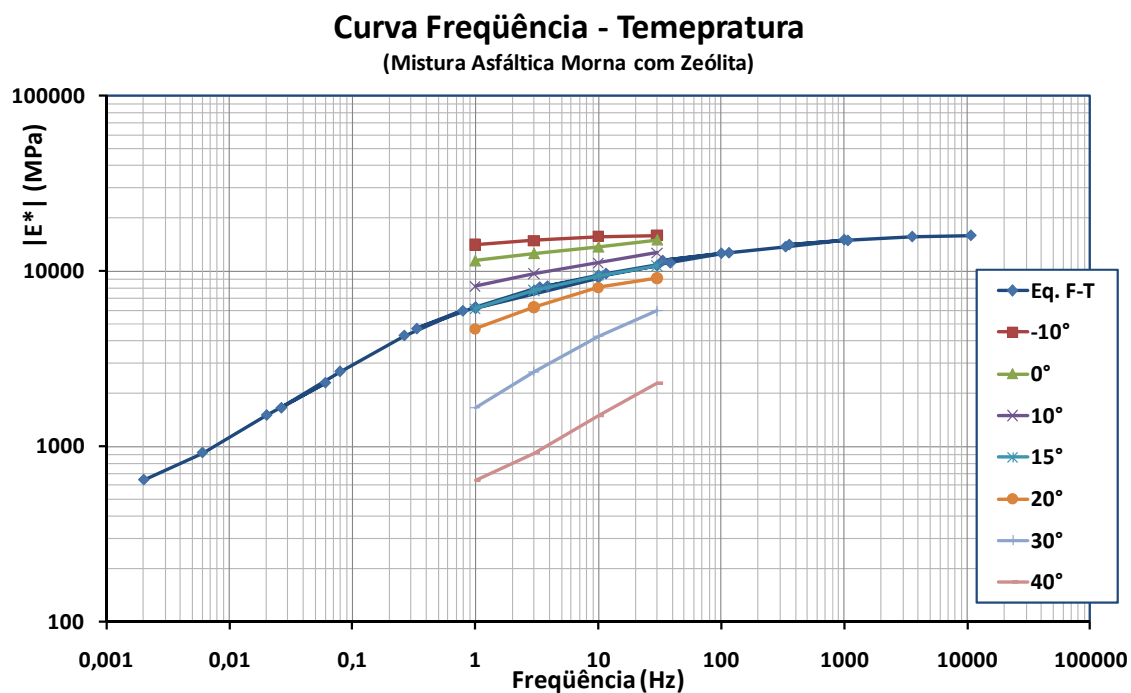


Figura 61 – Curva Freqüência-Temperatura.

Esta representação fornece informações sobre o comportamento viscoelástico do material. Permite obter valores de módulo em freqüências inacessíveis durante a experimentação. Uma curva próxima a horizontal caracteriza uma mistura com comportamento puramente elástico. De outro lado, uma curva vertical caracteriza uma mistura puramente viscosa. Ambos os resultados são difíceis de serem observados em misturas asfálticas.

Conforme observado da Figura 61, a mistura morna apresenta uma suave inclinação da curva Freqüência-Temperatura, como é de se esperar de uma mistura viscoelástica. Nota-se, também, que quanto maior a velocidade de aplicação da sollicitação (freqüência) maior é o valor da norma do módulo, comum nos corpos com comportamento viscoelástico.

#### 4.10 ENSAIO DE FADIGA

Executa-se o ensaio de Fadiga de maneira contínua com o equipamento de flexão alternada. O ensaio em si é do tipo deformação controlada. Ou seja, o critério de ruptura é a queda da metade da força inicial. O equipamento permanece a sollicitar

os corpos de prova até que todos os espécimes tenham sua força, registrada, abaixo da metade.

O mecanismo de flexão funciona ininterruptamente. Durante o ensaio não há necessidade de intervenção. O sistema possui sensores de força e deslocamento ligados a um aquisitor de dados e a um computador. Estes permanecem ligados durante todo o tempo de execução. O sistema é capaz de gerar um pacote de informações a cada um minuto e são armazenados no computador.

Com um software especializado transformam-se os dados brutos dos pacotes em arquivo Excel. Neste arquivo, realiza-se o monitoramento dos valores da força e o armazenamento dos resultados dos quatro corpos de prova.

As principais informações obtidas neste pacote são a força (N), registrada pela célula de carga, o deslocamento ( $\mu\text{m}$ ), registrado pelo sensor por efeito Hall, e o ângulo de fase ( $^\circ$ ). Como cada pacote, de um minuto de dados, registra 1500 ciclos de solicitação, é fácil calcular o número de solicitações sofridas por cada corpo de prova.

O mecanismo de ensaio permite que quatro corpos de prova sejam solicitados ao mesmo tempo, conforme Figura 62. Ao todo, necessitam-se vinte quatro (24) corpos de prova e se seleciona os espécimes que melhor representam o comportamento a fadiga.

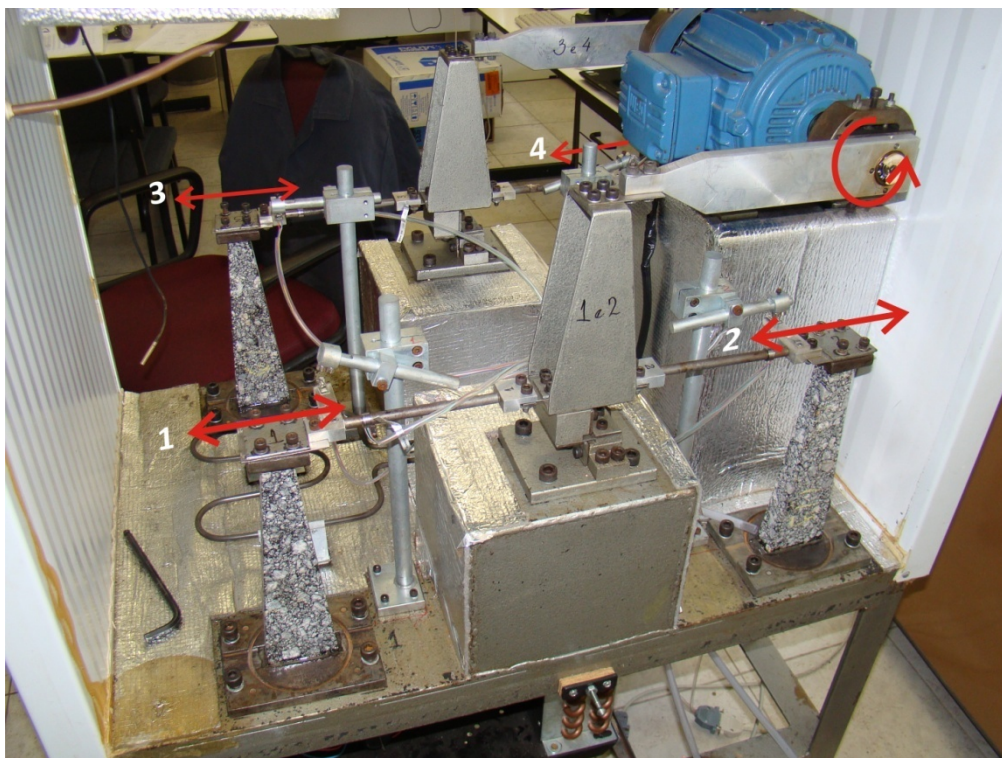


Figura 62 – Quatro de oito corpos de prova para uma mesma deformação.

Pelo fato dos resultados com misturas asfálticas serem dispersos, verifica-se os resultados após a conclusão do ensaio. O primeiro critério de aceitação é a altura da seção média de ruptura de cada espécime. Em seguida, verifica-se o valor N do número de ciclos necessários a ruptura, o critério da ruptura com a queda da força pela metade.

Neste trabalho se assume o valor inicial de deformação em 150  $\mu\text{m}$ . Após realizar o ensaio, verifica-se o número de ciclos encontrado da ruptura do corpo de prova. Caso seja inferior ao esperado de um milhão de ciclos, adota-se uma segunda deformação, no caso 120  $\mu\text{m}$ .

Assim, assumi-se esta como deformação média. Determina-se, então, a última deformação a ser adota nos ensaio a deformação de 100  $\mu\text{m}$ . O espaçamento, entre os valores de deformação, devem ser aquele que melhor represente o comportamento a fadiga da mistura, ou seja, nem muito próximas e nem muito distantes uma das outras.

Os resultados parciais variam para cada espécime (corpo e prova), mas é possível identificar sempre a mesma tendência quanto ao formato das curvas força pelo número de ciclos e ângulo de fase pelo número de ciclos.



Na medida em que o número de ciclos cresce a força tende a apresentar três estágios de comportamento, conforme a bibliografia. A primeira caracteriza-se por uma forte queda da força resistente. Na segunda parte, os valores estabilizam e perduram por intervalos maiores de tempo. A terceira, e última parte, os valores voltam a cair mais fortemente até o ponto de ruptura.

A Figura 63 apresenta o sinal do corpo de prova 1.3 no ensaio a fadiga com 150 micro deformações a temperatura de 10°C e frequência de solitação de 25 Hz. Observa-se, também as fases do corpo de prova durante o ensaio, aquecimento e adaptação (na o eixo ciclos de 0 até próximo a  $2 \times 10^5$ ), estabilização lenta com aumento da deterioração (de 2 até  $8 \times 10^5$ ) e, por fim, a ruptura (de 8 até  $8,3 \times 10^5$ ).

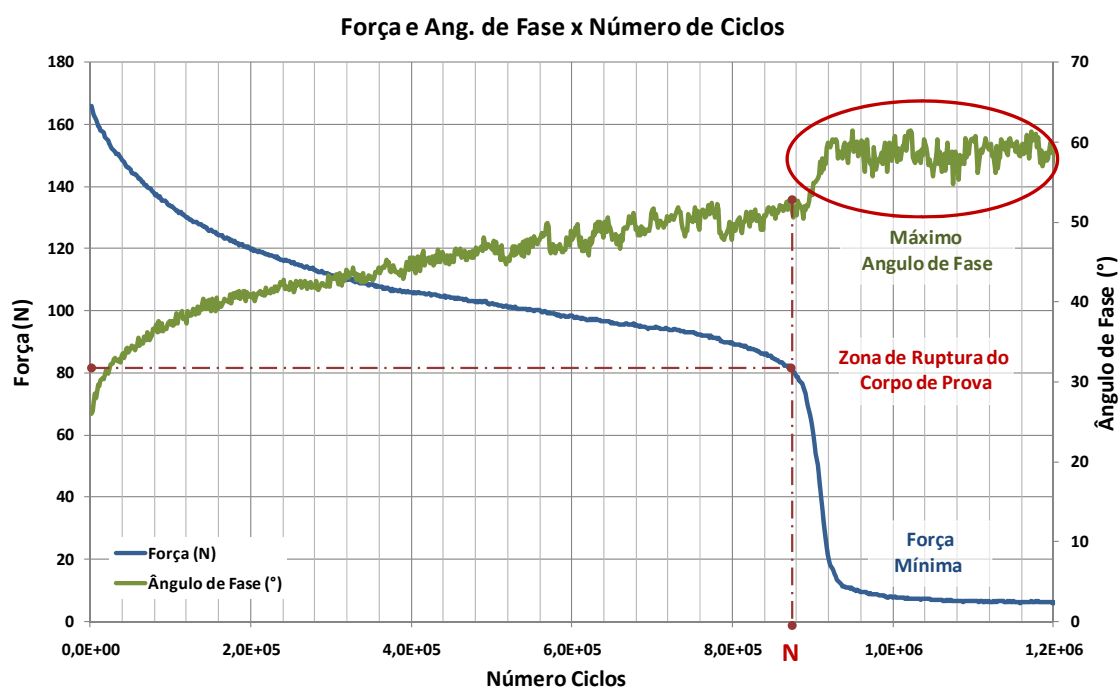


Figura 63 – Sinal de um corpo de prova a def. de 150  $\mu$ m, 10°C e 25 Hz.

De posse de todos os resultados, são apurados todos os resultados que possam representar melhor o comportamento da mistura asfáltica. Neste experimento consideraram-se válidos os valores de altura de ruptura acima de 1,5 cm. Foram assim tratados, apenas porque apresentam valores de número de ciclos compatível com os resultados médios do experimento.

Os resultados do ensaio a Fadiga para as misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas estão apresentados na Tabela 16. Além da deformação de ensaio,

observam-se os valores de  $k\epsilon$ ,  $K\sigma$ , volume de vazios, número de ciclos e a amplitude de solicitação, fixado com micrômetro. Em uma análise mais cuidadosa dos valores apresentados percebe-se, para uma mesma deformação de ensaio, a dispersão dos resultados.

As misturas asfálticas são, naturalmente, composições não homogêneas e esta característica influencia os resultados de fadiga. Um exemplo claro desta influência está nos valores dos corpos testados a 120 micro deformação ( $\mu\text{m}$ ). Nota-se um valor (número de ciclos) máximo de  $2,0 \times 10^6$  e um mínimo de  $1,9 \times 10^5$ . Esta diferença é natural ao ensaio e pode ser tanto menor quanto maior, independente do tipo de mistura e deformação aplicada.

Tabela 16 – Resultados do ensaio a Fadiga com adição de zeólita, 10°C e 25 Hz.

Deformação ( $10^6$ )	Nº do CP	K epsilon	K sigma	Vazios (%)	N (cilos)	Amplitude (aplicado micrometro)
100	2.16	9,01E-04	1,33E-02	4,59%	3804000	221,95
100	2.15	9,00E-04	1,32E-02	4,45%	3465000	222,44
100	2.1	9,04E-04	1,28E-02	5,57%	3243000	221,07
100	2.6	9,03E-04	1,33E-02	4,81%	2838000	221,07
100	2.11	9,01E-04	1,28E-02	4,78%	2670000	221,84
100	1.17	9,01E-04	1,27E-02	4,51%	2428500	221,84
100	1.7	8,99E-04	1,28E-02	4,68%	1035000	222,44
100	2.111	9,02E-04	1,35E-02	5,54%	855000	221,84
120	1.10	9,00E-04	1,35E-02	5,10%	2020500	266,75
120	2.3	8,99E-04	1,28E-02	5,55%	1918500	267,17
120	1.2	8,98E-04	1,30E-02	4,62%	879000	26717
120	1.19	8,98E-04	1,30E-02	4,31%	741000	267,17
120	2.110	9,00E-04	1,36E-02	5,77%	525000	266,17
120	1.9	8,98E-04	1,28E-02	4,76%	235500	267,17
120	2.13	9,00E-04	1,28E-02	5,06%	192000	266,75
150	1.13	8,95E-04	1,29E-02	4,99%	663000	334,81
150	1.18	9,02E-04	1,30E-02	4,42%	555000	332,06
150	1.4	8,93E-04	1,33E-02	5,09%	201000	336,52
150	1.111	8,90E-04	1,37E-02	5,24%	160500	336,52
150	2.19	8,96E-04	1,28E-02	5,49%	157500	334,12
150	2.18	8,96E-04	1,30E-02	6,07%	115500	336,52
150	2.9	9,00E-04	1,28E-02	5,10%	103500	334,19

Aprimora-se o resultado pela construção da chamada curva de fadiga da misturas, com a qual se constrói a curva de fadiga do material, onde a deformação está no eixo das abscissas e o valor do número de ciclos no eixo das ordenadas.

Encontra-se a curva fadiga pela regressão linear dos pontos (deformação; n° de ciclos) de cada espécime do ensaio. O resultado é uma reta cuja equação está representada por uma equação exponencial.

Outro componente importante é a representação do intervalo de confiança. O intervalo de confiança está desenhado na mesma curva de fadiga. De acordo com a norma francesa (NF P 98-261-1; Determinação da resistência a fadiga das misturas hidrocarbonetos) o intervalo de confiança é 95% de certeza.

A Figura 64 apresenta a curva de fadiga do material asfáltico com adição de zeólita. Em azul está representada a curva linearizada dos resultados do ensaio. As duas curvas em vermelho representam o intervalo de confiança. A linha de cima é o limite superior e abaixo o limite inferior.

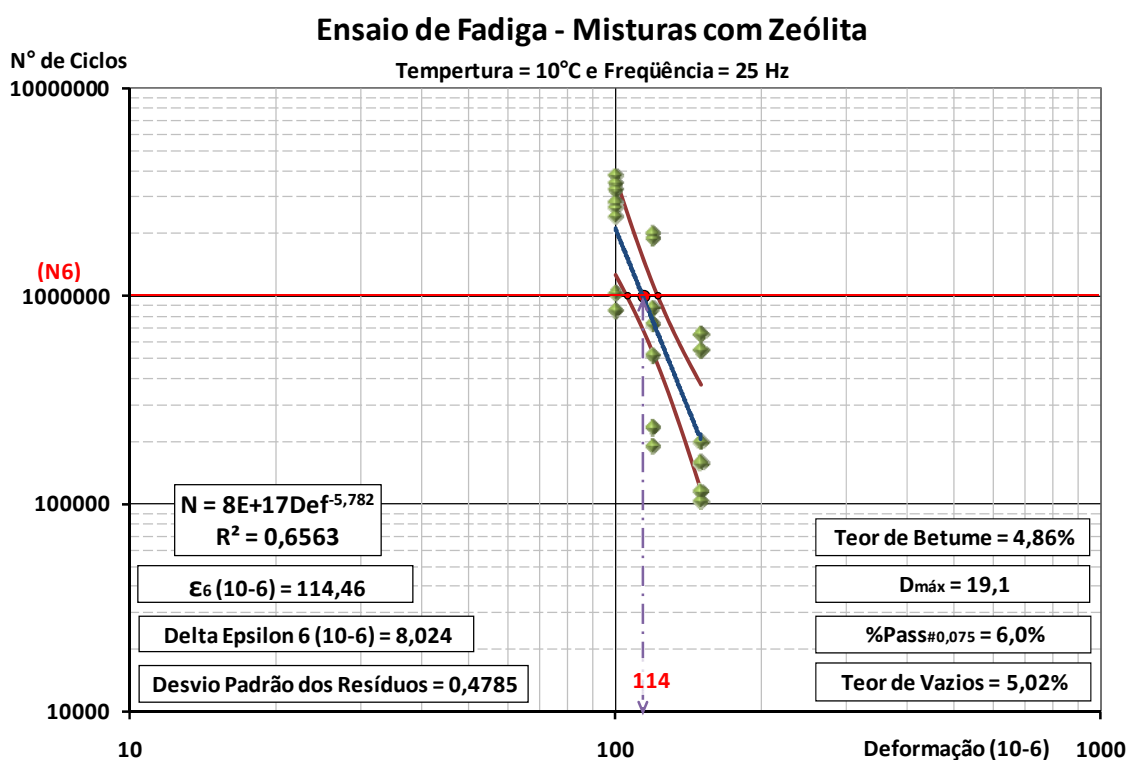


Figura 64 – Curva de Fadiga para Mistura Asfáltica Morna com Zeólita.

A equação da curva de fadiga apresenta importantes valores de discussão. O primeiro diz respeito à inclinação da reta e o segundo sobre o valor da deformação para um milhão de ciclos.

Devido ao fato de a reta ser representada por uma equação exponencial o valor da inclinação é o expoente da variável. O parâmetro de inclinação da reta indica à

susceptibilidade do material a aplicação das solicitações. Em todos os casos, espera-se que o valor seja negativo e quanto menor o valor mais susceptível a mistura é, pois a reta inclina-se mais.

O ensaio de fadiga representa uma importante ferramenta para o dimensionamento das misturas asfálticas. O valor da deformação para um milhão de ciclos representa a deformação admissível de projeto. Esta deformação garante a vida útil das misturas. O valor encontrado para deformação em um milhão de ciclos das misturas asfálticas mornas com adição de zeólita é de **114 microdeformações**.

## **5 EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **5.1 APRESENTAÇÃO**

Este capítulo explora alguns dos resultados obtidos durante o período de ensaios, comparando os resultados obtidos com o ensaio Módulo Complexo, Fadiga e Lottman para a mistura asfáltica morna com adição de zeólita e a mistura controle.

Os resultados provenientes da mistura controle nos ensaios de Módulo Complexo e Fadiga são correspondentes ao estudo realizado por Barra (2009). Neste trabalho, o autor procura trabalhar o efeito da água sobre o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica (convencional). A mistura controle contém a mesma curva granulométrica, o mesmo teor de ligante e a mesma classe de ligante (CAP 50/70). Neste estudo é denominado de CTBseca.

Primeiramente serão abordados os resultados obtidos no ensaio Lottman. Neste ensaio a mistura controle foi executada com os mesmos materiais das misturas mornas, porém sem as zeólitas.

No resultados do ensaio de Módulo Complexo os dados das misturas controle e das com adição de zeólita estão em um mesmo gráfico para facilitar a observação e a compreensão da diferença entre as diversas representações dos resultados. Não obstante, os resultados do ensaio a Fadiga estão construídos separadamente. Mesmo assim, neste caso, os resultados são comparados.

### **5.2 RESULTADOS DO ENSAIO LOTTMAN**

O ensaio Lottman permite determinar a influência da água sobre o comportamento mecânico das diferentes misturas. Esta influência é expressa numericamente como índice ou resistência das misturas asfálticas ao efeito da deterioração pela ação da água, entendida como a relação entre a tensão original, ou resistência sem condicionamento, e a resistência remanescente após o condicionamento por congelamento e aquecimento.

A relação entre as forças de tração (TSR - *Tensile Strength Ratio*) é descrita na equação:

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \quad (35)$$

Onde:

TSR (*Tensile Strength Ratio*) razão de força de tração;

$S_1$  é a resistência média dos corpos de prova ensaiados a seco;

$S_2$  é a resistência média dos corpos de prova condicionados.

A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos do cálculo das relações das resistências da mistura controle e das misturas com adição de zeólita.

Tabela 17 – Comparação dos resultados a ação deletéria pela água.

TSR controle		TSR zeólita	
S1 (kPa)	523,89	S1 (kPa)	475,23
S2 (kPa)	363,53	S2 (kPa)	273,71
TSR	69,4%	TSR	57,6%

Quanto maior o valor da TSR, menor é a diferença numérica entre os valores do ensaio normal e o condicionado. Nota-se que a diferença entre os resultados é maior nas misturas controle do que a observada nos resultados da mistura com adição de zeólita.

As misturas com adição de zeólita apresentam uma maior influência por ação do condicionamento em água, pois seu valor TSR é **11,8%** inferior ao valor da mistura controle (TSR **69,4%**). No entanto, os corpos de prova do grupo zeólitas apresentam média inferior aos valores da mistura controle, o que indica que a mistura controle tem susceptibilidade ao condicionamento por água superior à mistura morna, apesar de que a mistura controle tem médias de resistência a tração indireta superior às médias da mistura com adição de zeólita.

### 5.3 RESULTADOS DO ENSAIO MÓDULO COMPLEXO

Os resultados de ambas as misturas, controle e zeólita, estão agrupados em um mesmo gráfico e em todas as representações do resultado módulo complexo. As

representações são a Curva no Espaço Black, Curva Cole-Cole, Curva Isócrona, Curva Isotérmica e a Curva Frequência-Temperatura.

Em cada uma destas representações, os valores referentes às séries da misturas controle aparecerão acompanhados pela letra **C** e em cor **AZUL**. A mistura com adição de zeólita está acompanhada pela letra **Z** e em cor **VERDE**.

### 5.3.1 Curva Espaço Black

A curva no espaço Black apresenta o módulo em função do ângulo de Fase. Ela permite notar a queda do valor da norma do módulo complexo conforme o ângulo de fase aumenta.

O ângulo de fase apresenta papel importante na separação da parte real e da parte imaginária do módulo. Conforme o ângulo de fase aumenta, maior a variação da parte elástica e da parte imaginária das misturas. Para valores de ângulo próximos a zero indica um material puramente elástico, sem perdas de energia. Um ângulo próximo a noventa graus indica que o material tem comportamento puramente elástico, com muita perda de energia.

A Figura 65 é a representação, no espaço de Black, dos resultados da mistura controle e da mistura com adição de zeólita. A mistura controle está em azul e em verde estão os valores da mistura com zeólita. Os grupos de mesma temperatura de ensaio encontram-se na legenda.

O ângulo de fase em ambas as misturas apresenta o mesmo comportamento com relação à temperatura. Quanto maior a temperatura, maior é o valor do ângulo de fase e quanto maior o ângulo de fase menor o valor da norma do módulo complexo.

### Curva Espaço de Black

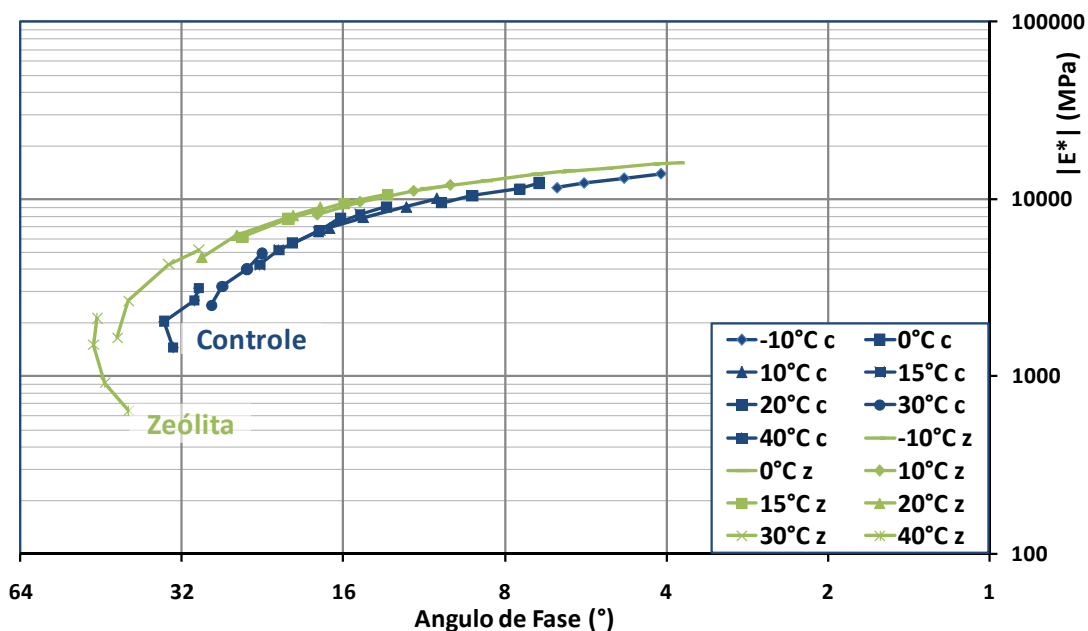


Figura 65 – Representação dos resultados na Curva Espaço de Black.

Observa-se, com o aumento da temperatura, que a mistura morna apresenta valores de ângulo de fase maior, o que representa uma maior dissipação de energia ou maior perda por atrito interno.

#### 5.3.2 Curva Cole-Cole

A curva Cole-Cole é a representação das duas componentes do módulo complexo: a parte real, correspondente à parte elástica do módulo, e a parte imaginária, correspondente à parte viscosa do módulo ou de perda. Ela permite avaliar como o valor da temperatura influencia a parte elástica e a viscosa do módulo das misturas.

A Figura 66 apresenta os resultados da mistura controle e da mistura com adição de zeólita. Observa-se que a situação mais severa para a mistura controle é no ensaio realizado a 15°C, diferentemente da mistura controle, cuja temperatura fica em 20°C. Ao se observar o comportamento das duas misturas, é evidente que a mistura morna apresenta valores de módulo  $E_2$  superior a mistura controle. O módulo  $E_2$ , conhecido como módulo da perda, representa a parte imaginário do módulo complexo que está associada à perda de energia produzida pelo atrito interno do material, situação de maior severidade.



### Curva Cole-Cole

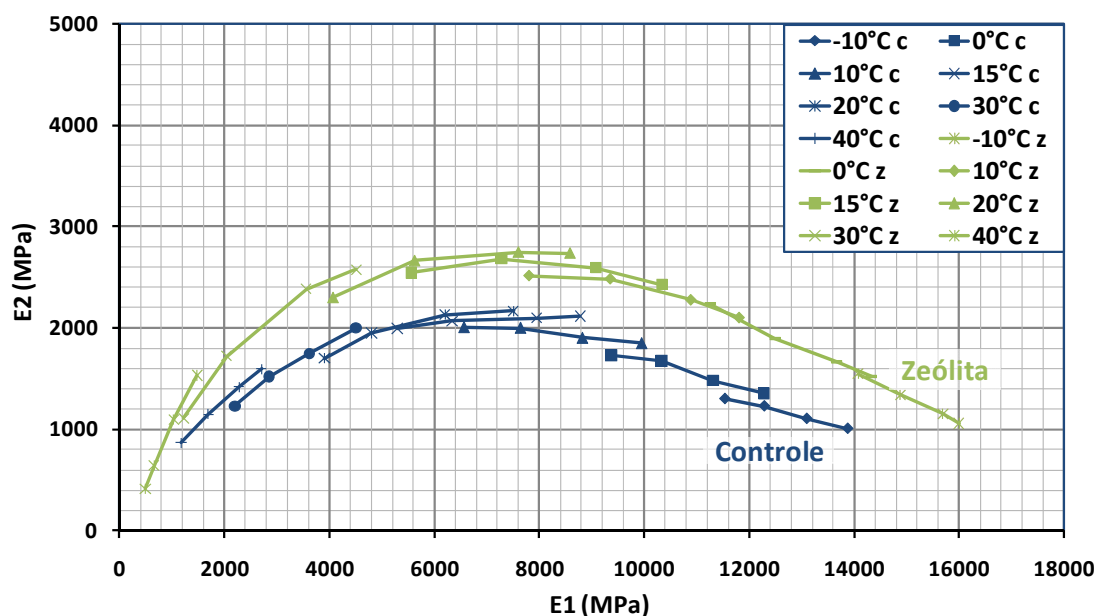


Figura 66 – Representação dos resultados na Curva Cole-Cole.

Sendo assim, a mistura morna apresenta maior perda de energia do que a mistura controle. No entanto, há uma exceção para os valores na temperatura de 40°C, onde os valores de E2 da mistura controle superam os da mistura com zeólita, indicando que nesta temperatura a perda por atrito interno é maior.

Percebe-se ainda que a mistura controle apresenta maiores valores, ao se analisar o módulo elástico E1 das misturas para altas temperaturas (30°C e 40°C). Isso indica um comportamento mais próximo ao elástico.

No entanto, a mistura com zeólita apresenta valor superior ao da mistura controle para as demais temperaturas, sugerindo que nas temperaturas de 20°C, 15°C, 10°C, 0°C e -10°C, a mistura com adição de zeólita apresenta um comportamento mais próximo ao elástico do que a mistura controle.

Nas altas temperaturas ocorre uma inversão dos resultados e a mistura controle apresenta maior módulo da perda, ou seja, maior dissipação de energia. Mesmo assim, em geral, a mistura morna é mais suscetível à temperatura.

Em síntese, a mistura com adição de zeólita apresenta maior perda de energia, devido ao comportamento viscoso irreversível. Porém, ela apresenta um comportamento elástico recuperável maior nas baixas temperaturas.

### 5.3.3 Curva Isócrona

A curva Isócrona trata da representação gráfica da norma do módulo pela temperatura agrupada por freqüência de ensaio. Esta representação permite avaliar a suscetibilidade da mistura quanto à temperatura nas freqüências de ensaio.

Na Figura 67, a mistura controle está em azul e os valores da mistura com zeólita estão em verde. Na legenda encontram-se os grupos de mesma freqüência de ensaio.

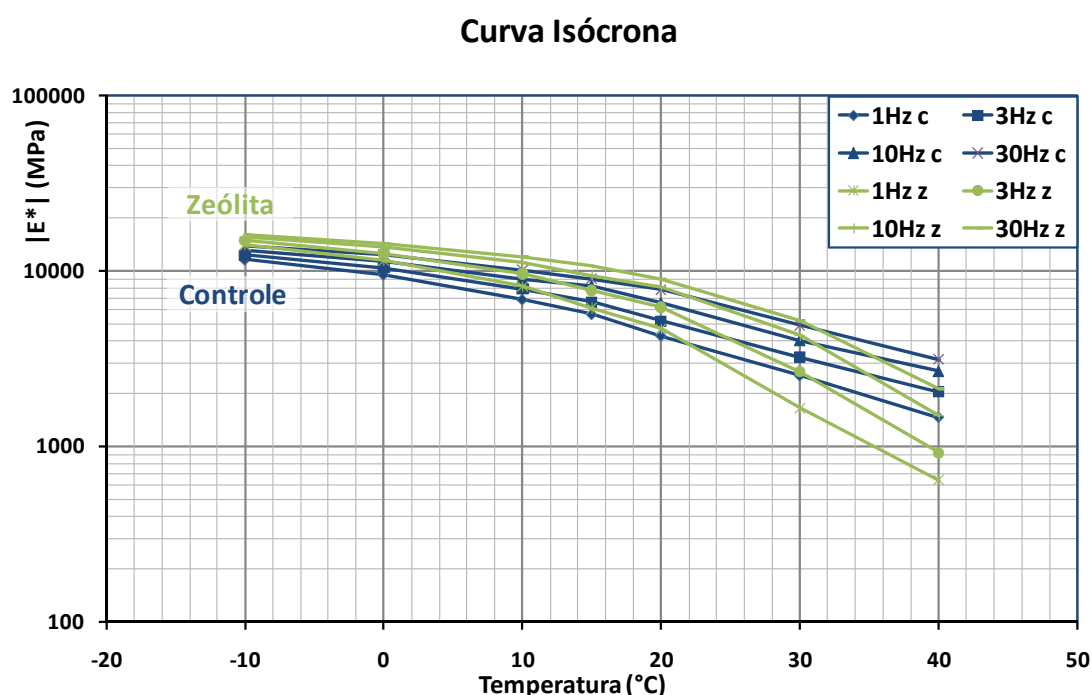


Figura 67 – Representação dos resultados na Curva Isócrona.

Os valores da norma do módulo para a mistura asfáltica morna com adição de zeólita a  $-10^{\circ}\text{C}$ , na maioria das freqüências, é superior aos da norma dos módulos da mistura controle. Por outro lado, com temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ , percebe-se uma alternância da predominância. Nesta temperatura os valores da norma do módulo para a mistura controle é superior.

As curvas da mistura controle apresentam menor influência da temperatura. Conforme a temperatura aumenta, menor é a queda do valor da norma do módulo, se comparado com as curvas da mistura morna, sugerindo que a mistura morna apresenta maior susceptibilidade térmica.

### 5.3.4 Curva Isotérmica

A curva Isotérmica é a representação da norma do módulo pela freqüência de ensaio, agrupado conforme a temperatura de ensaio. Com esta representação é possível visualizar a viscosidade cinética da mistura em uma dada temperatura.

Cada curva isoladamente representa uma mudança de estado, já que há um aumento de temperatura. Na Figura 68, os valores da mistura controle estão em azul e em verde estão os valores da mistura com zeólita. Na legenda podem ser visualizados os grupos de mesma temperatura de ensaio.

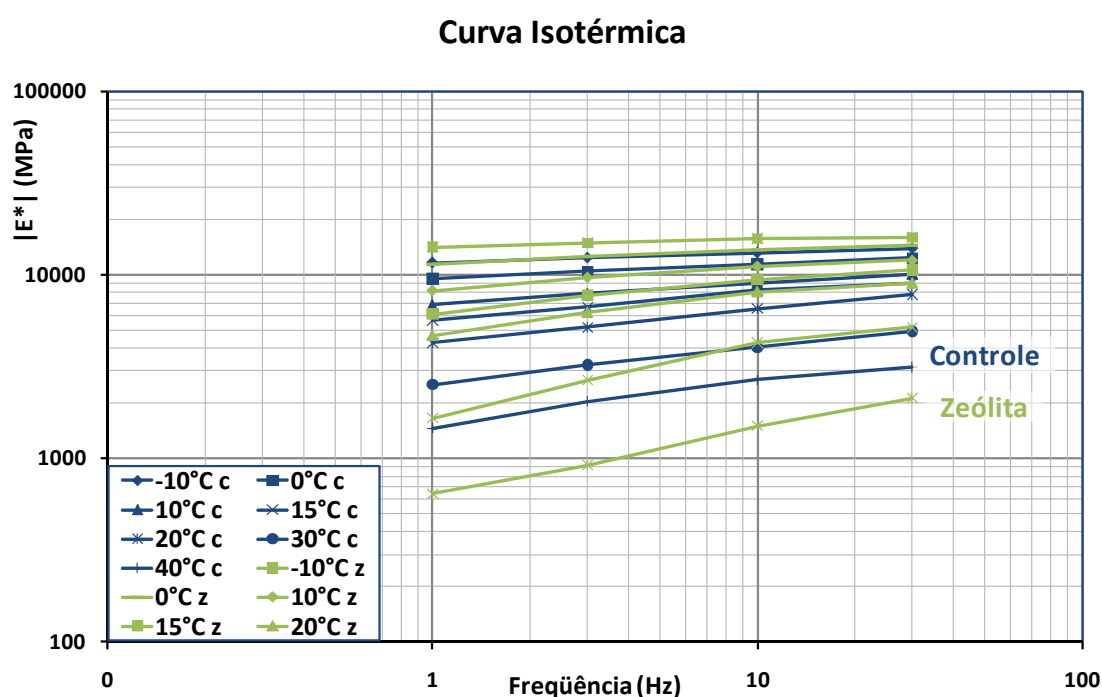


Figura 68 – Representação dos resultados na Curva Isotérmica.

Em ambas as curvas, controle e com zeólita, os resultados apresentam uma maior dispersão do valor da norma para freqüência de 1 Hz e uma menor dispersão para 30 Hz. Esta dispersão destaca susceptibilidade cinética das misturas, pois conforme ocorre o aumento da freqüência de ensaio, menor é a dispersão dos valores do módulo. Em outras palavras, quanto mais rápida é a aplicação da solicitação, melhor é o valor do módulo.

Os valores do módulo da mistura com adição de zeólita apresentam maior dispersão em todas as freqüências. Isso novamente confirma uma maior

susceptibilidade térmica e maior susceptibilidade cinética nas altas temperaturas, por ter maior inclinação das retas.

### 5.3.5 Curva Freqüência-Temperatura

A curva Freqüência-Temperatura nasce da translação dos valores representação isotérmica, ou seja, segue pela multiplicação de um coeficiente de translação. Esta representação fornece informações sobre o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas.

A Figura 69 apresenta as duas representações da curva Freqüência-Temperatura das misturas controle e com adição de zeólita, denominados FT Controle e FT Zeólita respectivamente.

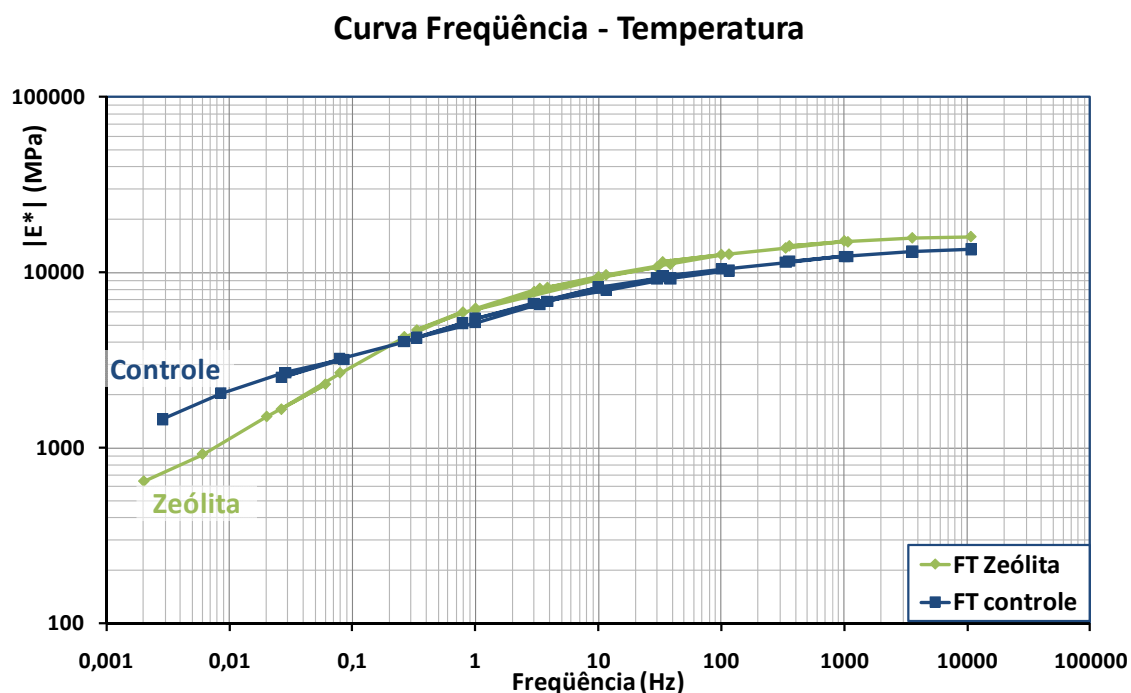


Figura 69 – Representação dos resultados na Curva Freqüência-Temperatura.

Em ambas, adota-se a temperatura de referência  $T_R = 15^\circ\text{C}$ . As curvas são construídas a partir da translação dos valores da norma do módulo a uma curva matriz que passa pela temperatura referência.

Sabe-se que nesta representação uma linha horizontal representa um material de comportamento puramente elástico. Logo, é evidente que ambas as curvas

representam um material viscoelástico, pois suas curvas apresentam uma suave inclinação.

A mistura controle apresenta uma inclinação menor, o que indica um comportamento mais elástico. Já a mistura morna apresenta um comportamento mais viscoso. Percebe-se que para as altas temperaturas (40°C) o valor da norma do módulo da mistura morna é inferior ao da mistura controle. Porém em 30°C ocorre uma inversão das tendências, devido à menor inclinação da curva, os valores do módulo da mistura controle tende a ser inferior em baixa temperatura.

Após a inversão as duas curvas apresentam aumento no valor da norma com taxa de crescimento similar. Conclui-se então que a mistura morna com adição de zeólita apresenta um comportamento mais viscoso e mais susceptível a temperatura do que a mistura controle.

#### **5.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE FADIGA**

A Curva de Fadiga das misturas asfálticas é uma importante ferramenta para dimensionamento de pavimentos. Com ela é possível extrair a deformação admissível da mistura, que garante a vida útil da mistura. De acordo com a metodologia francesa de dimensionamento, o valor da deformação admissível é correspondente a deformação obtida em um milhão de ciclos ( $10^6$ ), conhecida como  $\epsilon_6$ .

A curva de fadiga fornece informações sobre a susceptibilidade à aplicação de carregamentos (solicitações) cíclicos. Esta informação está contida no coeficiente angular da reta, pois, quanto maior for a inclinação, menor será a susceptibilidade. Esta susceptibilidade exerce grande influência no valor obtido da deformação em milhão de ciclos.

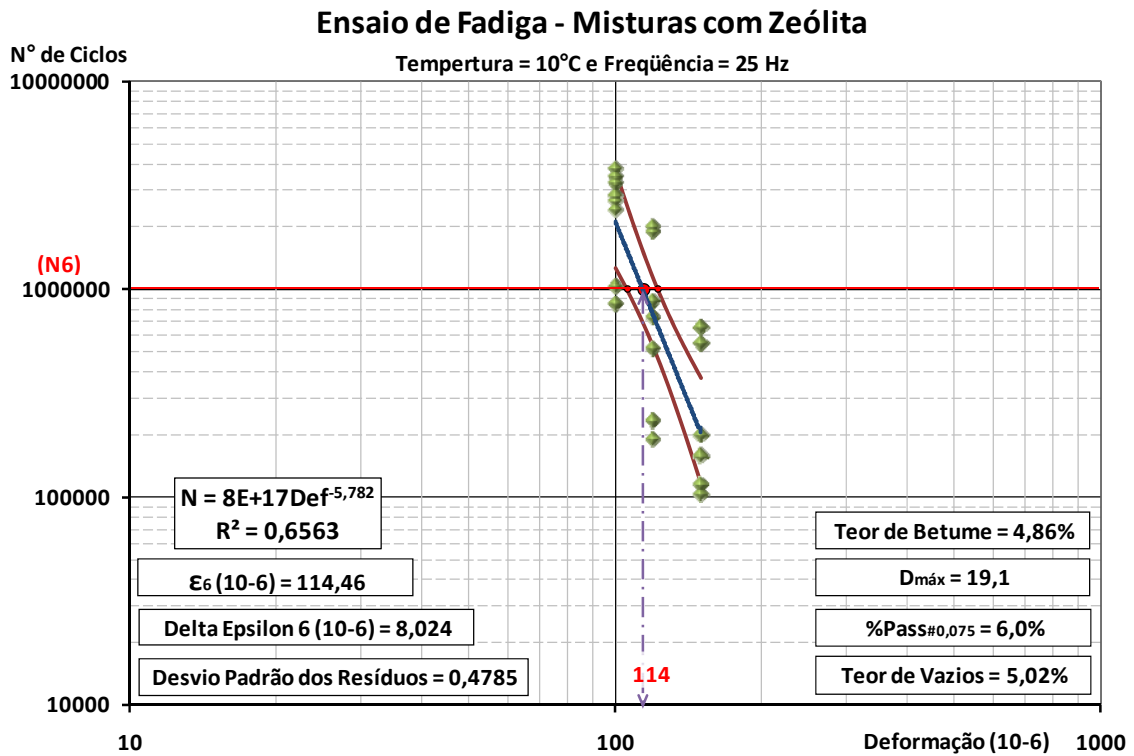


Figura 70 – Curva de Fadiga da mistura morna com adição de zeólita.

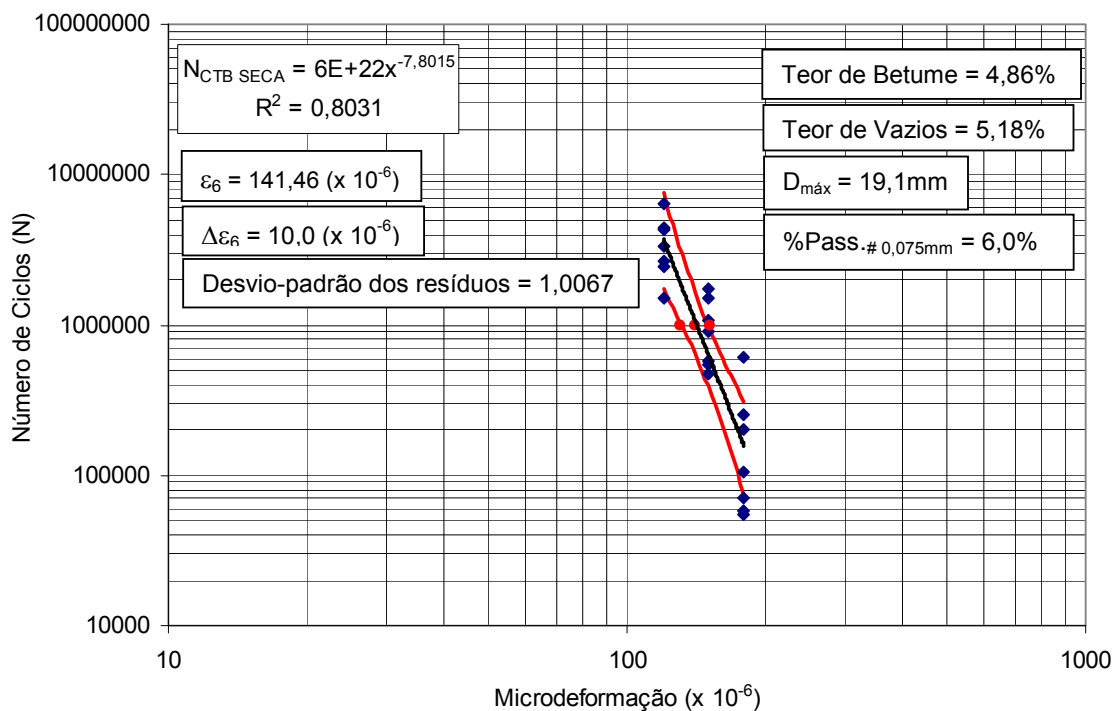


Figura 71 – Curva de Fadiga da mistura morna controle (BARRA, 2009).

As informações mais pertinentes dos ensaios devem ser apresentadas nos gráficos de ambas as misturas. São as informações mais importantes do ensaio de fadiga: a equação da reta (exponencial); o valor do  $R^2$ ; o valor de  $\epsilon_6$ ; o valor de  $\Delta\epsilon_6$ ;

diâmetro máximo dos granulares; teor de vazios; teor de betume; porcentagem passante em #0,075; e, desvio padrão dos resíduos.

As Figuras 70 e 71 apresentam as curvas de fadiga das misturas morna com adição de zeólita e controle, respectivamente. Observa-se que as informações mais relevantes são as curvas do intervalo de confiança, o limite inferior e superior. Para ambas o intervalo de confiança é de 95%.

Dentro das deformações de ensaio adotadas, a curva de fadiga das misturas mornas tem como níveis de deformação os valores 100, 120 e 150  $\mu\text{m}$ , enquanto, a mistura controle adota valores de 120, 150 e 180  $\mu\text{m}$ .

O coeficiente angular da reta de fadiga da mistura controle é de **-7,8015**, enquanto que este mesmo coeficiente, na curva com zeólita, é **-5,782**. Esta diferença indica que a mistura com adição zeólita é menos suscetível a aplicação das solicitações.

Mesmo com maior susceptibilidade, a mistura controle apresenta maior valor da deformação para um milhão de solicitações,  **$141,46 \times 10^{-6}$** , enquanto que o valor da mistura morna com adição de zeólita é de  **$114,46 \times 10^{-6}$** .

Conclui-se que a mistura com adição de zeólita necessitará, quando usado no dimensionamento de camada asfáltica, uma espessura de camada maior do que a mistura controle, dado o fato de que sua deformação admissível será mais exigente, limitando a camada a maiores espessuras.

A Figura 72 apresenta as respectivas curvas de ambas as misturas do estudo. A comparação das duas curvas de fadiga (linearizadas) permite a verificação das inclinações das duas retas e as respectivas relações de cada. Observam-se os pontos extrapolados pelas equações da reta de fadiga de cada material. Nada mais do que encontrar o valor correspondente, sobre a reta da mistura com zeólita, do nº de ciclos com a deformação encontrada na mistura controle e vice-versa.

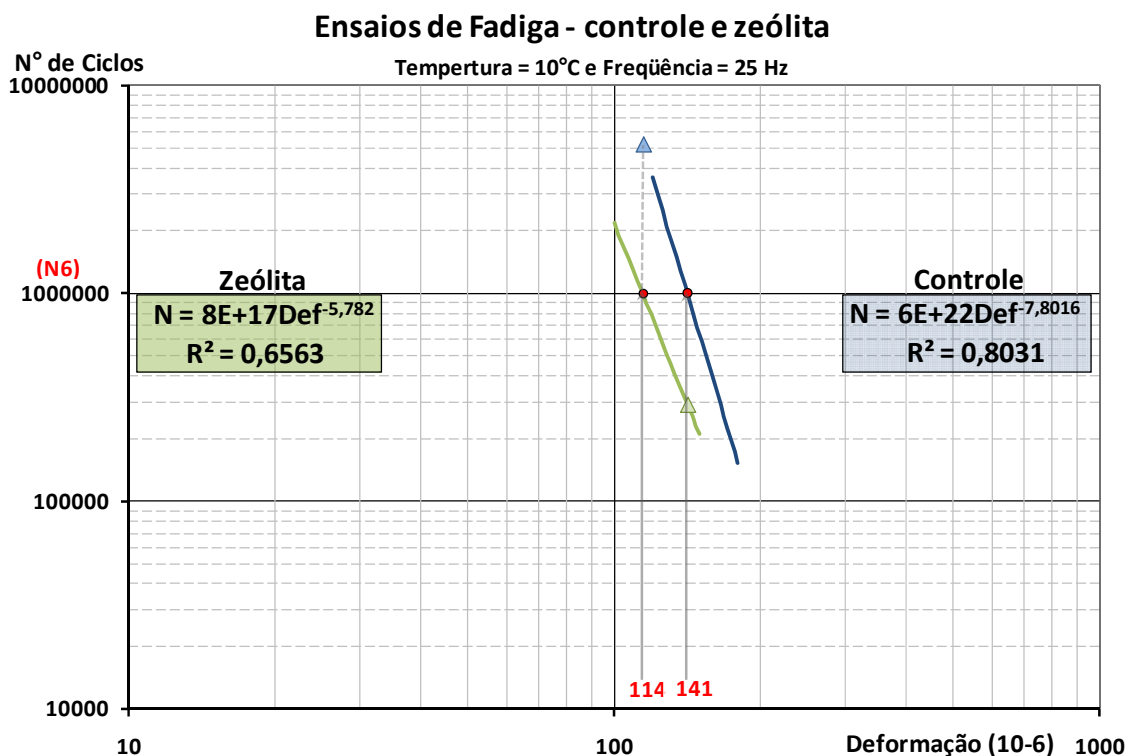


Figura 72 – Comparação entre as curvas controle e zeólita.

É possível observar que a curva de Fadiga da mistura controle apresenta um deslocamento à direita da curva da mistura com adição de zeólita, ou seja, para a mesma deformação, o número de ciclos necessário para o rompimento do material é maior do que apresentado pela mistura com adição de zeólita. A Tabela 18 apresenta, em síntese, os resultados de fadiga das duas misturas.

Tabela 18 – Comparação entre os resultados de Fadiga

Resultados	Zeólita	Controle
Coeficiente angular	-5,782	-7,8015
Épsilon 6 (10-6)	114,46	141,46
Projeção	Zeólita	Controle
Nº de Ciclos c/ def 114,46	1,00E+06	5,22E+06
Nº de Ciclos c/ def 141,46	2,94E+05	1,00E+06

Observa-se que o valor de deformação ( $\epsilon_6$ ) obtido na mistura morna inserido na curva da mistura controle apresenta número de ciclos superior a um milhão. Por outro lado, ao se executar o mesmo procedimento para mistura morna, com  $\epsilon_6$  da controle, o número de ciclos para o rompimento da mistura é inferior a um milhão de ciclos.



## 5.5 DIMENSIONAMENTO PARA PAVIMENTO MORNO

O dimensionamento das misturas asfálticas, morna com adição de zeólita e controle, permite englobar os parâmetro de módulo e fadiga em uma única análise. Adotar uma hipótese de partida possibilita a comparação do real desempenho destas misturas, pois a análise das tensões e deformações, das equações de Burmaister (1945) oferece mecanismo de determinação da espessura das camadas em função da deformação admissível de cada material.

A análise de tensão e deformação é efetuada com o programa EVERSTRESS 5.0 desenvolvido pelo Washington State Department of Transportation (WSDOT, 1999), sistema que considera a estrutura com múltiplas camadas e comportamento elástico linear, homogêneo e isotrópico.

Os dimensionamentos das estruturas seguem a metodologia francesa SETRA-LCPC. Onde os parâmetros necessários para o cálculo são: o módulo complexo para 10°C e 10Hz, 10°C e 25Hz e 15°C e 10Hz ( $|E^*|$ ); deformação específica para um milhão de ciclos ( $\epsilon_6$ ); e, inclinação da reta de fadiga ( $b$ ).

São duas as deformações admissíveis: uma deformação para o topo das camadas subjacentes à superfície e uma deformação para a base da camada betuminosa. A primeira está relacionada aos materiais componentes das camadas de base, sub-base, reforço (quando existir) e subleito devem ter de deformação específica admissível. A segunda possui relação com o limite de deformação de acordo com os parâmetros observados no ensaio de fadiga.

Como o estudo limita-se à comparação entre as ambas, adota-se uma única estrutura de partida e um único volume de tráfego (ou eixos). Os parâmetros de tráfego são:

- Classe: T1 (Volume Médio Diário Anual – VMDA  $\geq$  500 caminhões pesados; peso bruto total acima de 50,0KN);
- Eixo-padrão considerado: 130,0KN;
- Taxa de crescimento anual: 3,8%;
- Período de projeto inicial: 10 anos;

- Número de eixos equivalentes (NE): 1,95 x 10<sup>6</sup>;
- Coeficiente de risco (r): 50,0% (quando se tem como base dados das curvas de fadiga para os materiais betuminosos, segundo a metodologia).

A estrutura adotada segue a tradição brasileira de construção de rodovias. A metodologia francesa adota como dados iniciais a relação de rigidez entre as acamadas conforme a regra: subleito  $E_{\text{subleito}}$ ; camada de reforço  $E_{\text{reforço}} = 3 \cdot E_{\text{subleito}}$ ; camada granular (BGS – brita graduada simples)  $E_{\text{BGS}} = 3 \cdot E_{\text{reforço}}$ . Os materiais empregados nas camadas abaixo da capa superficial são:

- Subleito suporte AR2, na condição PST nº3: 50,0 MPa;
- Camada de reforço:  $E_{\text{reforço}} = 3 \cdot E_{\text{subleito}} = 150,0$  MPa;
- Camada granular (BGS):  $E_{\text{BGS}} = 3 \cdot E_{\text{reforço}} = 450,0$  MPa.

Na falta de parâmetros experimentais, o coeficiente de Poisson  $\nu=0,35$  é adotado. Considera-se, também, que a condição nas interfaces das camadas é totalmente aderência. A Tabela 19 apresenta os dados referentes aos materiais betuminosos.

Tabela 19 – Dados do Material Betuminoso.

Mistura Asfáltica	Módulo Complexo (MPa)			Fadiga	
	$ E^* $ (10°C; 10Hz)	$ E^* $ (10°C; 25Hz)	$ E^* $ (15°C; 10Hz)	$\epsilon_6$ (10 <sup>6</sup> )	Inclinação da Curva de Fadiga (b)
Controle	9030	9854	8227	141,46	-0,13
Zeólita	11119	11163	9438	114,46	-0,17

De acordo com a metodologia SETRA-LCPC, a deformação admissível no topo das camadas adjacentes a camada asfáltica é definida pela equação (equação para tráfego pesado):

$$\epsilon_{z,adm} = 0,012 \cdot (NE)^{-0,222} \quad (36)$$

Onde:

$\epsilon_{z,adm}$  é a deformação admissível no topo das camada adjacentes;

NE é o número de eixos equivalentes (no caso 1,95x10<sup>6</sup>).

A deformação admissível, para comparação com deformação de projeto, é:

$$\varepsilon_{(NE,\theta_{eq},f)} = \varepsilon_{6(10^{\circ}C,25Hz)} \cdot \left( \frac{E_{(10^{\circ}C)}}{E_{(\theta_{eq})}} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{NE}{10^6} \right)^b \quad (37)$$

Onde:

$\varepsilon_{(NE,\theta_{eq},f)}$  é a deformação admissível do material em função do número de eixos equivalentes da temperatura equivalente e da frequência de solitação;

$\varepsilon_{6(10^{\circ}C,25Hz)}$  é a deformação calculada a partir do ensaio de fadiga a 10°C e 25 Hz;

$E_{(10^{\circ}C)}$  é o módulo complexo referente a temperatura (10°C) e para este estudo 10Hz;

$E_{(\theta_{eq})}$  é o módulo complexo referente temperatura equivalente para o estudo (15°C, 10Hz);

NE é o número de eixos equivalente;

B é a inclinação da reta de fadiga do material.

São aplicados coeficientes de correções (Kr, Kc, Ks) aos valores de deformações admissíveis das camadas betuminosas. O coeficiente Kr ajusta a deformação admissível em consideração ao risco r. Assim, é adotado o valor do risco em 50%. Define-se Kr pela equação:

$$Kr = 10^{-ub\delta} \quad (38)$$

Onde:

u é a variável associada ao risco u = 0 (50%);

b é inclinação da curva de fadiga;

$\delta$  é o desvio-padrão da distribuição.

Como u = 0 o valor de Kr = 1,0.

O coeficiente kc ajusta os resultados do modelo computacional de acordo com o comportamento observado sobre estruturas de pavimentos reais do mesmo tipo. No caso desta pesquisa, foi utilizado o valor de 1,1, correspondente às misturas de concreto betuminoso.

O coeficiente  $k_s$  leva em consideração o efeito da falta de uniformidade pontual da capacidade de suporte. Segundo a metodologia, considera-se o valor do módulo que corresponde a do material da camada de subleito (a fundação da estrutura) e para que não haja redução pelo fator  $k_s$ , o módulo deverá ter valor superior a 120 MPa. Como a estrutura não se apóia diretamente sobre o subleito e sim sobre uma plataforma de fundação de reforço, considera-se somente o módulo da camada de reforço. Conforme o valor de 150 MPa do módulo de suporte adotado, o valor de  $k_s$  é neutro, ou seja,  $K_s = 1,0$ .

A Tabela 20 apresenta os valores das deformações admissíveis das camadas ( $\epsilon_{z,adm}$ ) e do concreto betuminoso ( $\epsilon_{adm}$ ), com os devidos ajustes ( $K_r$ ,  $K_c$ ,  $K_s$ ).

Tabela 20 – Resultados das Deformações Admissíveis.

Parâmetros	Controle	Zeólita
NE	1,95E+06	1,95E+06
$\epsilon(NE, \theta_{eq}, f)$	136	111
$k_r$	1,0	1,0
$k_c$	1,1	1,1
$k_s$	1,0	1,0
$\epsilon(z, adm)$	482	482
$\epsilon(adm)$	150	122

O dimensionamento está correto quando as deformações obtidas nas camadas é menor ou igual às deformações admissíveis calculadas. Em outras palavras:

$$\epsilon_{obtido} \leq \epsilon_{admissivel}$$

A Figura 73 apresenta a estrutura de partida para o dimensionamento. A estrutura para a análise das tensões e deformações no EVERSTRESS é:

- 5 cm de concreto asfáltico betuminoso  $E(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$  ;
- 25 cm de base com brita graduada simples (BGS)  $E = 450,0$  MPa;
- 30 cm de reforço do subleito  $E = 150,0$  MPa;
- Subleito  $E = 50,0$  MPa.

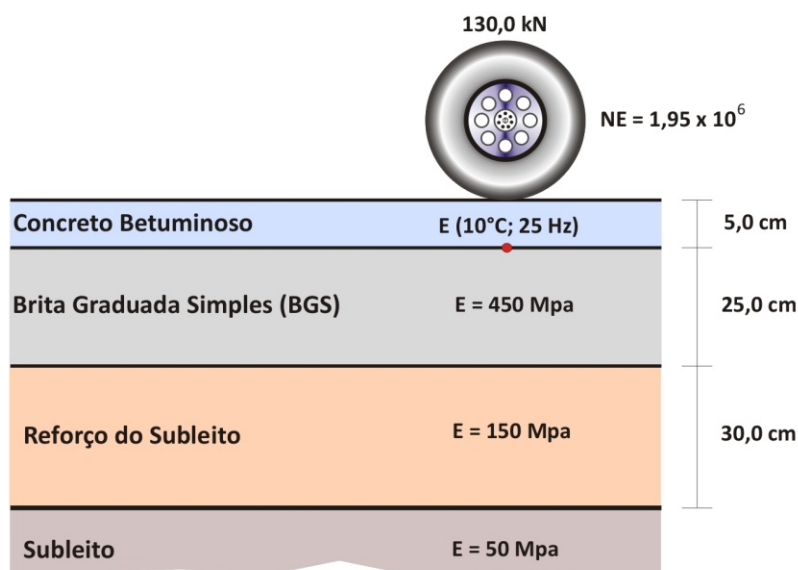


Figura 73 – Estrutura de partida para dimensionamento.

A Tabela 21 apresenta os resultados das deformações encontrados no programa de análise de tensões e deformações. Nota-se que os valores de deformação obtidos, em ambas as misturas, são superiores aos limites estabelecidos pelas deformações admissíveis.

Tabela 21 – Valores de Deformação da Estrutura de Partida.

Mistura Controle - Estrutura de Partida					
Estrutura do Pavimento	Espessura	$\epsilon(z)$ obtido ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(z,adm)$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(t)$ obtido ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(adm)$ ( $10^{-6}$ )
Mistura Morna	5,0 cm	-	-	<b>180,42</b>	<b>150,47</b>
Base (BGS)	25,0 cm	199,41	<b>481,72</b>	-	-
Reforço	30,0 cm	<b>569,78</b>	<b>481,72</b>	-	-
Subleito	-	315,59	<b>481,72</b>	-	-
Mistura Morna - Estrutura de Partida					
Estrutura do Pavimento	Espessura	$\epsilon(z)$ obtido ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(z,adm)$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(t)$ obtido ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(adm)$ ( $10^{-6}$ )
Mistura Morna	5,0 cm	-	-	<b>175,80</b>	<b>121,75</b>
Base (BGS)	25,0 cm	190,08	<b>481,72</b>	-	-
Reforço	30,0 cm	<b>561,48</b>	<b>481,72</b>	-	-
Subleito	-	313,21	<b>481,72</b>	-	-

Observam-se, na Tabela 22, os valores finais encontrados, após a verificação da conformidade entre as deformações encontradas no pavimento. As espessuras das camadas base de brita graduada e reforço apresentam a mesma espessura. Nota-se ainda que ocorre variação somente no valor de espessura da camada betuminosa.

Tabela 22 – Valores de Espessura para Cada Camada e Deformação.

Estrutura do Pavimento	Espessura	$\epsilon(z)$ obtido ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(z,adm)$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(t)$ obtido ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(adm)$ ( $10^{-6}$ )
Mistura Morna	9,0 cm	-	-	149,55	150,47
Base (BGS)	28,0 cm	149,42	481,72	-	-
Reforço	30,0 cm	368,75	481,72	-	-
Subleito	-	388,01	481,72	-	-
<b>Mistura Morna - Estrutura Final</b>					
Estrutura do Pavimento	Espessura	$\epsilon(z)$ obtido ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(z,adm)$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(t)$ obtido ( $10^{-6}$ )	$\epsilon(adm)$ ( $10^{-6}$ )
Mistura Morna	12,0 cm	-	-	116,80	121,75
Base (BGS)	28,0 cm	113,40	481,72	-	-
Reforço	30,0 cm	284,69	481,72	-	-
Subleito	-	324,78	481,72	-	-

A Figura 74 agrupa as informações de espessura, deformação admissível, deformação de partida e deformação final referente cada material.

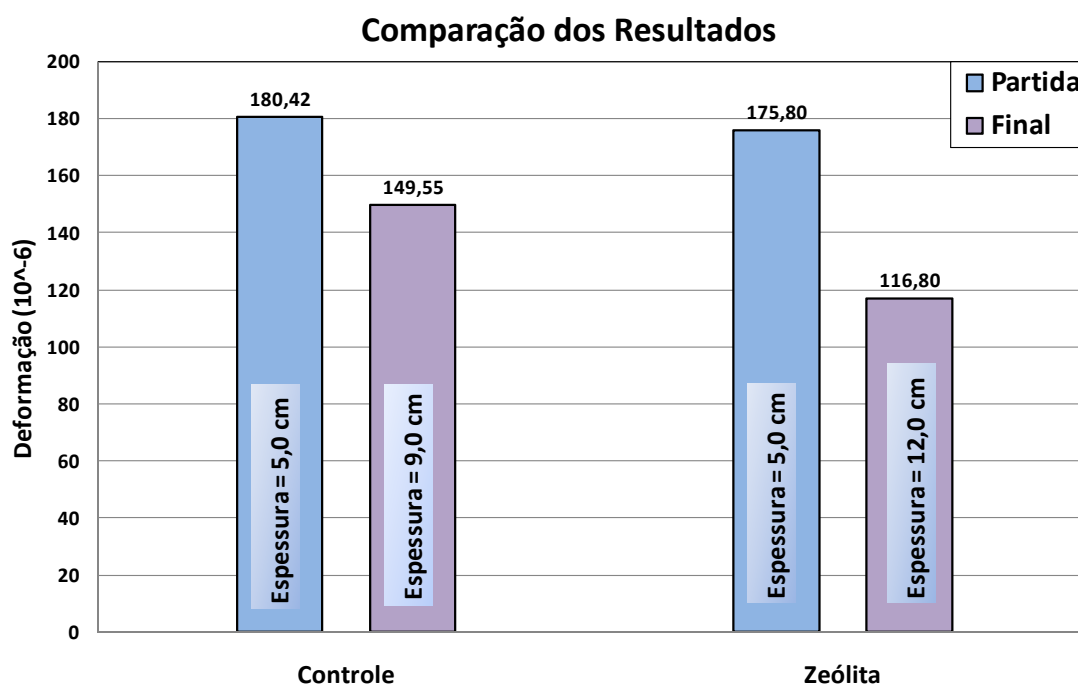


Figura 74 – Comparação entre os resultados de deformação.

Os resultados da estrutura de cada camada e sua respectiva deformação mostram que mesmo o módulo da mistura morna ( $E_{(10^{\circ}C,25Hz)} = 11.163$  MPa) superior ao módulo da mistura controle ( $E_{(10^{\circ}C,25Hz)} = 9854$  MPa), a espessura final é maior na mistura morna. Devida à deformação admissível ser menor na mistura morna do que a

mistura controle. Esta diferença limita mais a espessura da primeira mistura do que a da segunda mistura.

As Figuras 75 e 76 ilustram as duas estruturas finais e as respectivas dimensões avaliadas com o programa de tensões e deformações EVERSTRESS 5.0.

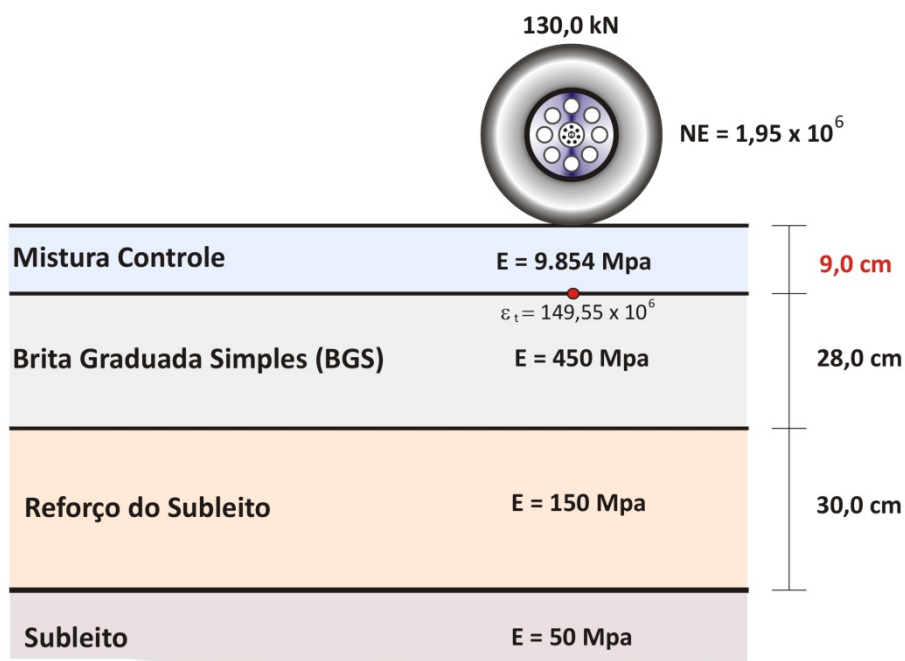


Figura 75 – Estrutura final da mistura controle.

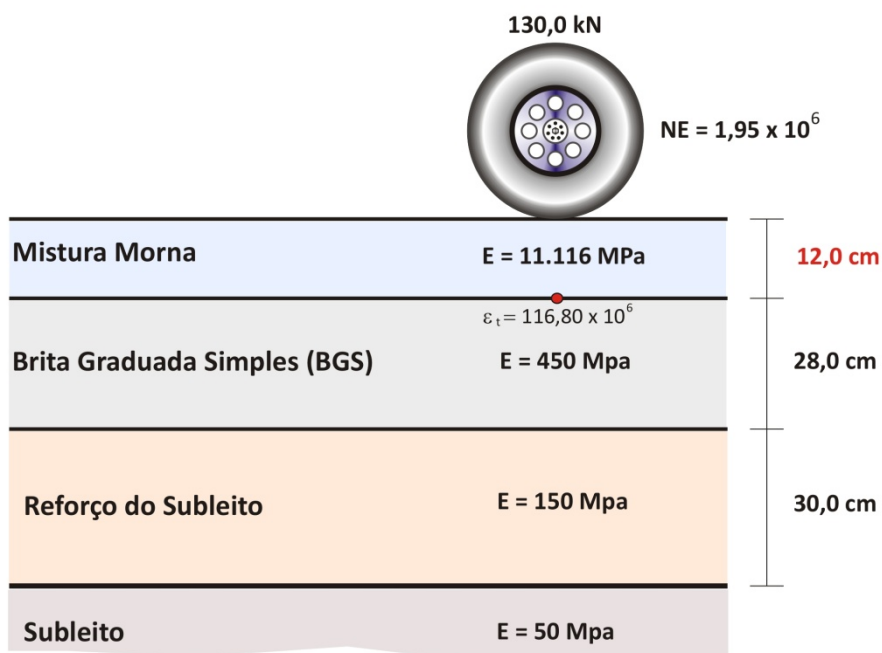


Figura 76 – Estrutura final da mistura com adição de zeólita

## 6 CONCLUSÕES

Nunca na história da humanidade o conceito de preservação do meio ambiente esteve tão forte quanto nos dias atuais. Conforme a tendência mundial, de assumir o compromisso de reduzir a emissão de CO<sub>2</sub>, as misturas asfálticas mornas surgem com alternativa denominada 'verde'.

Estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas com os ensaios de módulo complexo e fadiga é uma grande contribuição para a engenharia de rodovias, além de promover contribuição para o combate ao aquecimento global. Este estudo pôde avaliar o comportamento das misturas asfálticas mornas com adição de zeólita com análise dos parâmetros de Fadiga e Módulo Complexo. Os resultados apresentados neste estudo estão limitados a uma única comparação entre as duas misturas referenciadas, o que não permite generalizar o comportamento do material.

Os primeiros indícios do comportamento das misturas mornas estão nos resultados do ensaio Marshall. Em todas variáveis analisadas neste ensaio, os valores referente ao comportamento da mistura morna com adição de zeólita permaneceu inferior ao da mistura controle. O desgaste por abrasão Cântabro segue a mesma tendência e a mistura com adição de zeólita apresenta maior desgaste.

O estudo identifica a mesma tendência quando observados os resultados referentes ao ensaio Lottman. A mistura morna com adição de zeólita apresenta uma maior influência ao condicionamento em água quando comparada com a mistura controle. Os valores de TSR da mistura controle estão no limite para uma necessária correção. Contudo, o valor para a mistura com adição de zeólita indica a necessidade de correção da adesividade pela adição de Dope.

Não é possível determinar o grau de influência da expansão observada na mistura asfáltica morna sobre os valores dos resultados dos ensaios. Os corpos de prova compactados pelo método Marshall (cilíndrico) são menos suscetíveis a esta influência devido à maior energia transmitida à mistura. Verificou-se este fenômeno somente durante a compactação com a mesa compactadora LPC, que utiliza pneus para a compactação.



Observam-se algumas tendências com a análise dos resultados do ensaio de Módulo Complexo. Na curva do espaço Black, os valores de ângulo de fase são maiores com o aumento da temperatura do que o observado na mistura controle, representando assim uma maior dissipação de energia ou maior perda por atrito interno.

Apesar da mistura com zeólita ter maior perda de energia, esta apresenta um comportamento elástico recuperável maior para as baixas temperaturas, de acordo com a curva Cole-Cole. Nesta mesma representação, para as altas temperaturas, a mistura controle possui maior dissipação de energia, maior módulo de perda. Não obstante, a mistura controle descreve um comportamento mais suscetível à temperatura.

Outra confirmação da suscetibilidade térmica da mistura morna encontra-se na curva Isócrona. Conforme a temperatura aumenta, ocorre menor diminuição da norma do módulo para a mistura controle em comparação com a morna. Além da temperatura, a mistura morna apresenta maior susceptibilidade cinética, ou seja, com a queda do valor da frequência de solicitação, o valor da norma do módulo também sofre declínio.

Com base na representação da curva Frequência-Temperatura, conclui-se que a mistura morna com adição de zeólita possui um comportamento mais viscoso e mais susceptível à temperatura do que a mistura controle.

Ainda, observa-se, para um mesmo valor de deformação, que o número de ciclos de solicitação necessário para o rompimento do material é maior na mistura controle. Destarte, conclui-se que a mistura morna necessitará um maior espessura de camada asfáltica, uma vez que sua deformação admissível será mais exigente.

De maneira geral, a mistura morna com adição de zeólita apresenta um comportamento termo suscetível e um desempenho a fadiga inferior aos apresentados pela mistura controle, mas mesmo assim não é suficiente para desacreditar nas misturas mornas, visto que os valores da norma do módulo são relativamente superiores, com exceção para temperaturas acima de 30°C.

O dimensionamento para uma estrutura fictícia confirma as premissas de comportamento supracitadas. Os resultados mostram que apesar da mistura morna apresentar valor da norma do módulo complexo (temperatura e frequência) superior a mistura controle, sua espessura de cálculo não segue a mesma grandeza. A explicação para este fato reside no fato de o valor de deformação admissível (proporcional ao valor da deformação obtido no ensaio de Fadiga) ser inferior na mistura com zeólita.

Este trabalho possibilita a comparação das misturas em diversos parâmetros de comportamento. Porém, não é possível explorar todas as possibilidades de emprego das misturas mornas com adição de zeólita. Para isso recomendam-se as seguintes ações de continuidade:

- a. Avaliar os mesmos comportamentos com uma mistura asfáltica morna com zeólita com adição de um melhorador de adesividade. Adição de Dope ou de Cal na mistura em estudo;
- b. Realizar uma dosagem com a utilização da prensa de compactação giratória, seleção de granulometria pelo critério Bailey e o efeito do tempo de evaporação da água adsorvida no interior das partículas de zeólita (maturação da mistura) no emprego em situações reais onde o tempo de transporte é de uma (1) hora de viagem;
- c. Estudo do módulo e fadiga das misturas asfálticas mornas condicionadas em água (ensaio de corpos de prova trapezoidais imerso em água).

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFNOR. **Détermination de la résistance em fatigue des Mélanges Hydrocarbonés:** Partie 1: Essai par flexion à amplitude de fleche constante (NF P 98-261-1). Paris, 1993.

AFNOR. **Détermination de la résistance em fatigue des Mélanges Hydrocarbonés:** Partie 1: Essai par flexion à amplitude de fleche constante (NF P 98-261-1). Paris, França, 1993.

AFNOR. **Préparation des mélanges hydrocarbonés:** Partie 2: compactage des plaques (NF P 98-250-2). Paris, França, 1991.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage:** T 283-89. Washington D.C., USA, 1998, p. 1029 – 1033.

ASSOCIAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DA AUSTRÁLIA – AAPA . **Advisory note 17 – Warm Mix Asphalt – a state of the art review.** Disponível em: <<http://www.aapa.asn.au/docs/no17.pdf>> . Acesso em: 15 set. 2007.

BARTHEL, W.; MARCHAND, J.P.; Von DEVIVERE, M. Warm asphalt mixes by adding a synthetic zeolite. **Aspha-min.** Disponível em: <[www.asphamin.com](http://www.asphamin.com)>. Acesso em: 05 set. 2007.

BARRA, B. S. **Avaliação do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas Densas Utilizando Materiais do Estado do Pará com o Emprego de Pó Calcário.** 2005. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

CELTA BRASIL. **Zeólitas Naturais.** Cotia, São Paulo, 2007, p. 6. (Comunicação).

CENTRO TECNOLÓGICO MINERAL (CETEM). Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. In: MONTE, M. B. de M; RESENDE, N. das G. de A. da M. (Org.). **Zeólitas Naturais.** Rio de Janeiro, dez. 2005. Cap. 33.

DAVIDSON, J.K. **Evotherm Trial.** Serviços de Engenharia McAsphalt. Ontário, 2005. Disponível em:<[http://www.meadwestvaco.com/asphalt.nsf/\(vRes\)/CalgaryTrial/\\$FILE/EVOTHERM+TRIAL+-+Calgary.pdf](http://www.meadwestvaco.com/asphalt.nsf/(vRes)/CalgaryTrial/$FILE/EVOTHERM+TRIAL+-+Calgary.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2007.

DE LA ROCHE, C. **Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux:** Expérimentations et Nouvelles Perspectives d'Analyse. 1996. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Ecole Centrale de Paris, Paris, 1996.

DEPARTAMENTO DE QUIMICA AMBIENTAL - DQA. Webpage da UENF. Disponível em: <[HTTP://www.uenf.br/uenf/centros/cct/gambiental/pe\\_derivados.html](http://www.uenf.br/uenf/centros/cct/gambiental/pe_derivados.html)>. Acesso em: 01 jun. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro**. Rio de Janeiro, Brasil, 1995, p. 11.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Misturas Betuminosas a quente: Ensaio Marshall (DNER-ME 043/95)**. Rio de Janeiro, Brasil, 1995, p. 11.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. Department of Transportation. **Pavements**. 2005. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>>. Acesso em: 02 nov. 2007.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. **Evaluation of Aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt**. NCAT Report 05-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, jun. 2005. Disponível em: <<http://www.eng.auburn.edu/center/ncat/reports/rep05-04.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2007.

\_\_\_\_\_. **Evaluation of Potencial Processes for Use in Warm Mix Asphalt**. NCAT. Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Jun. 2005.

\_\_\_\_\_. **Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt**. NCAT Report 05-06. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Jun. 2005.

JENKINS, K. J.; de GROOT, L. A.; VAN de VEM, M. F. C.; MOLENAAR, A. A. A. Half-warm foamed bitumen treatment, a new process. In: CONFERENCIA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DA ÁFRICA DO SUL, 7º. 1999. **Anais...** Victoria Falls: CAPSA, Set. 1999.

KOENDERS, B. G.; STOKER, D. A.; BOWEN, C.; de GROOT, P.; LARSEN, O.; HARDY, D.; WILMS, K. P. Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures. In: CONGRESSO EURASPHALT & EUROBITUME. 2º. **Anais...** Barcelona, Espanha Set. 2000.

KOENDERS, B. G.; STOKER, D. A.; ROBERTUS, C.; LARSEN, O.; JOHANSEN, J. WAM-Foam, Asphalt Production at Lower Operating Temperatures. In: SOCIEDADE INTERNACIONAL PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. 9º. 2002. **Anais...** Copenhagen, 2002.

KRISTJANSDOTTIR, Olof. **Warm mix asphalt for cold weather paving**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Washington, Estados Unidos, Washington, 2006.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTES ET CHAUSSÉES - LCPC. **Deroulement d'un essai de fatigue flexion a amplitude de fleche constante em continu.** Nantes, França, 1997, p. 20. (Método de Ensaio).

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTES ET CHAUSSÉES - LCPC. **L'Essai de Module Complexe.** Paris, França, 1992, p. 20. (Método de Ensaio).

MACCARONE, S. Cold asphalt systems as an alternative to hot mix. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL AAPA. Austrália, 1994. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://asphalt.csir.co.za/FArefs/>>. Acesso em: 15 set. 2007.

MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrot textura Superficial do Concreto Asfáltico e Seu Comportamento Mecânico.** 1998. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1998.

MUTHEN, K. M. Foamed Asphalt Mixes: Mix Design Procedures. **Sabita**, África, dez. 1998. Disponível em: <<http://asphalt.csir.co.za/foamasph/foamasph.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2007.

National Center for Asphalt Technology. Evaluation Warm Mix Asphalt. **Asphalt Technology News**, Auburn. v. 7, n. 2, p. 1-8, out. 2005.

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. Department of health and human services. Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt. **NIOSH**. USA, Dez. 2000. Disponível em: <<http://www.cdc.gov/niosh/pdfs/01-110.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2007.

PERRET, J. **Déformations des Couches Bitumineuses au Passage D'une Charge de Trafic.** 2003. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2003.

RIVIERE, N. **Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux.** 1996. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Université de Bordeaux I, Bordeaux, 1996.

ROMONTA GmbH. Webpage da Romonta GmbH. Disponível em: <[http://www.romonta.de/ie4/english/Romonta/i\\_start.htm](http://www.romonta.de/ie4/english/Romonta/i_start.htm)>. Acesso em: 05 out. 2007.

SASOL WAX. Webpage da Sasol Wax. Disponível em: <[www.sasolwax.com](http://www.sasolwax.com)>. Acesso em: 04 set. 2007.

SHELL. Webpage da Shell Global Solution. Disponível em: <<http://www.shell.com>>. Acesso em: 04 set. 2007.

SOUSA FILHO, A. C. ; SILVEIRA, L. E. M. ; SOARES, J. B. ; SANTANA, H. B. **Avaliação da Infuência de Zeólitas Sobre as Propriedades Volumétricas de Misturas Asfálticas Prodizadas a Temperaturas Intermediárias.** In: XX Congresso da Associação Naciocal de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, Brasília, 2006.

VEIDEKKE. Webpage da Kolo Veidekke a. s. Disponível em: <<http://www.veidekke.no>>. Acesso em: 22 jun. 2009.

VEJA. **A Fronteira Final.** Rio de Janeiro. Abril. Ano 40, n. 14, p. 78-91, abr. 2007.

## APÊNDICE A – Tabelas dos Resultados do ensaio Marshall

### Tabela A.1 - Mistura Controle

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm <sup>3</sup> )	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
A-1	4,5%	64,10	64,25	64,00	6,412	1199,2	699,5	519,3	2,400	2,464	2,309	899,6	1,009	907,4	4,876	6,275	10,588	16,863	62,786
A-2	4,5%	64,05	63,85	63,85	6,392	1193,6	695,1	517,7	2,394	2,464	2,306	1077,5	1,014	1092,4	6,970	6,421	10,563	16,985	62,195
A-3	4,5%	63,45	63,55	63,60	6,353	1194,0	696,7	514,6	2,401	2,464	2,320	1294,3	1,024	1325,3	7,215	5,825	10,592	16,417	64,520
A-4	4,5%	64,40	64,10	64,40	6,430	1194,3	695,1	520,8	2,392	2,464	2,293	1260,7	1,004	1265,7	5,214	6,924	10,555	17,479	60,385
A-5	4,5%	64,20	64,20	64,15	6,418	1191,4	695,8	519,8	2,408	2,464	2,292	1362,3	1,007	1371,8	5,432	6,982	10,606	17,587	60,303
A-6	4,5%	63,50	63,40	64,65	6,385	1192,5	696,8	517,1	2,406	2,464	2,306	1407,7	1,016	1429,6	5,431	6,410	10,613	17,023	62,347
A-7	4,5%	63,65	65,50	63,60	6,425	1192,2	696,6	520,4	2,406	2,464	2,291		1,005			7,016	10,613	17,629	60,202
A-8	4,5%	63,95	63,70	69,00	6,555	1194,4	698,7	530,9	2,410	2,464	2,250		0,973			8,692	10,630	19,322	55,017
<b>Média</b>					<b>6,421</b>	<b>1194,0</b>	<b>696,8</b>	<b>520,1</b>	<b>2,402</b>	<b>2,46</b>	<b>2,296</b>	<b>1217,0</b>	<b>1,006</b>	<b>1232,0</b>	<b>5,856</b>	<b>6,818</b>	<b>10,595</b>	<b>17,413</b>	<b>60,969</b>

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm <sup>3</sup> )	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
B-1	5,0%	62,90	63,05	62,90	6,295	1198,5	697,2	509,9	2,391	2,446	2,351	1290,4	1,040	1341,4	6,899	3,887	11,720	15,606	75,094
B-2	5,0%	62,85	62,70	62,60	6,272	1187,3	695,0	508,0	2,412	2,446	2,337	1239,0	1,046	1295,9	5,427	4,431	11,822	16,253	72,739
B-3	5,0%	63,60	63,80	62,60	6,333	1190,2	698,0	513,0	2,418	2,446	2,320	1139,5	1,029	1172,9	5,436	5,130	11,854	16,984	69,793
B-4	5,0%	63,65	63,50	62,80	6,332	1191,2	698,0	512,8	2,415	2,446	2,323	1304,8	1,030	1343,5	5,468	5,026	11,839	16,865	70,201
B-5	5,0%	62,75	62,80	62,95	6,283	1189,6	698,2	509,9	2,421	2,446	2,338	1256,7	1,043	1310,4	6,964	4,423	11,867	16,290	72,846
B-6	5,0%	56,65	56,20	56,85	5,657	1191,2	640,7	458,2	2,164	2,446	2,600		1,239			6,308	10,607	4,299	246,706
B-7	5,0%	63,50	63,55	63,50	6,352	1192,2	698,9	514,4	2,417	2,446	2,317		1,024			5,245	11,847	17,092	69,313
<b>Média</b>					<b>6,218</b>	<b>1191,5</b>	<b>689,4</b>	<b>503,6</b>	<b>2,377</b>	<b>2,45</b>	<b>2,369</b>	<b>1246,1</b>	<b>1,064</b>	<b>1292,8</b>	<b>6,039</b>	<b>3,119</b>	<b>11,651</b>	<b>14,770</b>	<b>96,670</b>

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm <sup>3</sup> )	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
C-1	5,5%	62,90	62,65	62,65	6,273	1188,7	694,6	508,1	2,41	2,428	2,340	1184,3	1,045	1238,0	5,425	3,640	12,972	16,612	78,089
C-2	5,5%	62,30	62,20	62,00	6,217	1188,7	696,0	503,5	2,41	2,428	2,361	1182,7	1,061	1255,0	7,180	2,761	13,009	15,771	82,490
C-3	5,5%	63,50	63,60	62,55	6,322	1182,1	692,1	512,0	2,41	2,428	2,309	1088,3	1,032	1123,5	5,337	4,908	13,008	17,916	72,608
C-4	5,5%	63,50	63,60	63,45	6,352	1189,6	694,8	514,4	2,40	2,428	2,312	1054,3	1,024	1079,9	5,412	4,756	12,964	17,720	73,159
C-5	5,5%	62,10	61,80	62,00	6,197	1185,2	694,6	501,9	2,42	2,428	2,361	1106,5	1,067	1180,3	5,470	2,735	13,026	15,761	82,648
C-6	5,5%	62,50	62,80	62,60	6,263	1187,6	696,3	507,3	2,42	2,428	2,341		1,048			3,575	13,034	16,610	78,474
C-7	5,5%	62,00	61,80	62,00	6,193	1186,9	695,2	501,6	2,41	2,428	2,366		1,068			2,543	13,016	15,559	83,656
<b>Média</b>					<b>6,260</b>	<b>1187,0</b>	<b>694,8</b>	<b>507,0</b>	<b>2,412</b>	<b>2,43</b>	<b>2,341</b>	<b>1123,2</b>	<b>1,049</b>	<b>1175,4</b>	<b>5,765</b>	<b>3,560</b>	<b>13,004</b>	<b>16,564</b>	<b>78,732</b>

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm <sup>3</sup> )	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
D-1	6,0%	61,5	61,85	61,65	6,167	1174,7	687,5	499,5	2,41	2,410	2,352	1123,2	1,075	1207,7	4,898	2,420	14,183	16,603	85,424
D-2	6,0%	59,8	60	60,15	5,998	1139,6	665,8	485,8	2,41	2,410	2,346	972,0	1,125	1093,7	6,564	2,679	14,148	16,828	84,078
D-3	6,0%	61,75	61,9	61,7	6,178	1179,0	689,3	500,4	2,41	2,410	2,356	1027,8	1,072	1101,7	6,966	2,248	14,162	16,410	86,302
D-4	6,0%	63	63,25	63,15	6,313	1208,8	707,8	511,3	2,41	2,410	2,364	1056,8	1,035	1093,4	5,198	1,920	14,193	16,113	88,083
D-5	6,0%	61,15	61,4	61,35	6,130	1169,1	684,7	495,5	2,41	2,410	2,355	1084,9	1,086	1178,0	5,171	2,304	14,197	16,501	86,035
D-6	6,0%	62,55	62,5	61,2	6,208	1183,9	691,7	502,8	2,41	2,410	2,354		1,063			2,316	14,149	16,465	85,934
D-7	6,0%	62,5	62,65	62,5	6,255	1183,7	691,8	506,6	2,41	2,410	2,336		1,050			3,061	14,155	17,216	82,220
<b>Média</b>					<b>6,179</b>	<b>1177,0</b>	<b>688,4</b>	<b>500,4</b>	<b>2,409</b>	<b>2,41</b>	<b>2,352</b>	<b>1053,0</b>	<b>1,072</b>	<b>1134,9</b>	<b>5,759</b>	<b>2,421</b>	<b>14,170</b>	<b>16,591</b>	<b>85,439</b>

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm <sup>3</sup> )	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
E-1	6,5%	61,65	61,6	61,55	6,160	1168,9	683,0	498,9	2,41	2,393	2,343	924,7	1,077	996,1	6,572	2,092	15,330	17,422	87,992
E-2	6,5%	61,1	61	61,2	6,110	1162,3	678,1	494,9	2,40	2,393	2,349	953,8	1,092	1041,2	7,119	1,848	15,274	17,145	89,220
E-3	6,5%	61,5	61,85	61,7	6,168	1162,2	677,3	499,6	2,40	2,393	2,326	812,9	1,075	873,7	7,000	2,785	15,274	18,058	84,579
E-4	6,5%	62,05	62,05	62,1	6,207	1168,7	681,3	502,7	2,40	2,393	2,325	950,7	1,064	1011,4	7,201	2,845	15,280	18,125	84,304
E-5	6,5%	61,6	62,75	62,65	6,233	1162,4	677,0	504,9	2,39	2,393	2,302	889,5	1,056	939,7	7,032	3,782	15,261	19,043	80,136
E-6	6,5%	62	62,2	62,2	6,219	1176,7	685,0	503,2	2,39	2,393	2,338		1,062			2,385	15,250	17,535	86,970
E-7	6,5%	61,5	62	61,05	6,152	1168,2	679,0	498,2	2,39	2,393	2,345		1,080			2,018	15,218	17,236	88,291
<b>Média</b>					<b>6,176</b>	<b>1167,1</b>	<b>680,1</b>	<b>500,3</b>	<b>2,397</b>	<b>2,39</b>	<b>2,333</b>	<b>906,3</b>	<b>1,072</b>	<b>972,4</b>	<b>6,985</b>	<b>2,522</b>	<b>15,273</b>	<b>17,795</b>	<b>85,928</b>

Tabela A.2 – Mistura Morna com Adição de Zeólita

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm³)	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
F-1	4,5%	67,45	67,15	67,40	6,73	1197,9	689,5	545,4	2,36	2,464	2,20	679,2	0,931	632,3	6,148	10,849	10,395	21,245	48,931
F-2	4,5%	64,90	65,10	64,70	6,49	1195,1	695,0	525,6	2,39	2,464	2,27	948,6	0,989	938,0	5,073	7,723	10,543	18,266	57,719
F-3	4,5%	64,25	64,25	64,66	6,44	1191,1	691,0	521,5	2,38	2,464	2,28	907,5	1,002	909,1	6,347	7,299	10,508	17,806	59,011
F-4	4,5%	64,75	64,81	64,67	6,47	1195,2	695,8	524,4	2,39	2,464	2,28	912,0	0,993	905,3	5,179	7,492	10,559	18,051	58,494
F-5	4,5%	65,28	65,33	65,46	6,54	1196,3	693,7	529,3	2,38	2,464	2,26	813,0	0,977	794,7	7,911	8,276	10,501	18,777	55,925
F-6	4,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F-7	4,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Média</b>					<b>6,53</b>	<b>1195,1</b>	<b>693,0</b>	<b>529,24</b>	<b>2,38</b>	<b>2,46</b>	<b>2,26</b>	<b>852,1</b>	<b>0,978</b>	<b>835,9</b>	<b>6,132</b>	<b>8,328</b>	<b>10,501</b>	<b>18,829</b>	<b>56,016</b>

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm³)	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
G-1	5,0%	63,55	63,60	63,45	6,35	1193,6	696,6	514,6	2,40	2,446	2,32	928,6	1,024	950,8	5,406	5,159	11,773	16,931	69,532
G-2	5,0%	64,00	63,94	63,75	6,39	1196,4	697,9	517,5	2,40	2,446	2,31	978,5	1,014	992,6	7,157	5,477	11,765	17,241	68,235
G-3	5,0%	63,93	63,91	63,62	6,38	1194,9	695,9	516,9	2,39	2,446	2,31	826,7	1,016	840,2	5,392	5,482	11,738	17,220	68,166
G-4	5,0%	64,65	63,70	63,80	6,41	1196,9	699,9	518,8	2,41	2,446	2,31	1007,4	1,010	1017,9	5,443	5,664	11,805	17,469	67,578
G-5	5,0%	64,50	64,40	64,00	6,43	1195,4	696,6	520,8	2,40	2,446	2,30	883,6	1,004	887,1	5,448	6,148	11,748	17,896	65,645
G-6	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G-7	5,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Média</b>					<b>6,39</b>	<b>1195,4</b>	<b>697,4</b>	<b>517,71</b>	<b>2,40</b>	<b>2,45</b>	<b>2,31</b>	<b>925,0</b>	<b>1,014</b>	<b>937,7</b>	<b>5,769</b>	<b>5,586</b>	<b>11,766</b>	<b>17,352</b>	<b>67,831</b>

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm³)	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
H-1	5,5%	63,40	63,05	63,00	6,32	1193,9	697,7	511,5	2,41	2,428	2,33	910,7	1,024	941,8	5,483	3,857	12,974	16,831	77,084
H-2	5,5%	63,65	64,60	63,40	6,39	1194,8	696,9	517,4	2,40	2,428	2,31	919,0	1,015	932,6	5,211	4,889	12,939	17,828	72,578
H-3	5,5%	63,40	63,00	63,30	6,32	1191,7	695,7	512,1	2,40	2,428	2,33	924,0	1,032	953,5	6,429	4,161	12,955	17,116	75,692
H-4	5,5%	63,60	63,30	63,30	6,34	1194,2	697,1	513,5	2,40	2,428	2,33	868,6	1,027	892,4	5,226	4,212	12,954	17,166	75,643
H-5	5,5%	63,66	63,24	63,41	6,34	1196,8	699,8	513,8	2,41	2,428	2,33	904,8	1,026	928,7	7,044	4,059	12,985	17,043	76,185
H-6	5,5%	63,40	63,22	63,44	6,34	-	-	513,1	-	-	-	-	1,029	-	-	-	-	-	-
H-7	5,5%	65,35	64,96	64,85	6,51	-	-	526,9	-	-	-	-	0,985	-	-	-	-	-	-
<b>Média</b>					<b>6,36</b>	<b>1194,3</b>	<b>697,4</b>	<b>515,48</b>	<b>2,40</b>	<b>2,43</b>	<b>2,33</b>	<b>905,4</b>	<b>1,021</b>	<b>929,8</b>	<b>5,879</b>	<b>4,235</b>	<b>12,961</b>	<b>17,197</b>	<b>75,401</b>

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm³)	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
I-1	6,0%	63,00	63,30	63,10	6,31	1189,8	693,9	511,3	2,40	2,410	2,33	932,4	1,035	964,7	7,235	3,462	14,113	17,575	80,303
I-2	6,0%	62,57	62,71	62,53	6,26	1188,3	693,5	507,0	2,40	2,410	2,34	863,8	1,049	906,1	7,234	2,767	14,127	16,894	83,620
I-3	6,0%	63,15	63,05	63,00	6,31	1190,4	693,1	510,8	2,39	2,410	2,33	729,7	1,036	756,3	7,773	3,311	14,081	17,392	80,962
I-4	6,0%	63,25	63,00	62,85	6,30	1190,7	694,5	510,5	2,40	2,410	2,33	802,9	1,037	832,8	7,110	3,236	14,116	17,351	81,352
I-5	6,0%	63,60	63,40	63,40	6,35	1193,8	695,3	514,0	2,39	2,410	2,32	976,4	1,026	1001,5	5,370	3,646	14,087	17,733	79,439
I-6	6,0%	63,60	63,41	63,39	6,35	-	-	514,0	-	-	-	-	1,026	-	-	-	-	-	-
I-7	6,0%	62,61	62,83	63,00	6,28	-	-	508,7	-	-	-	-	1,043	-	-	-	-	-	-
<b>Média</b>					<b>6,31</b>	<b>1190,6</b>	<b>694,1</b>	<b>510,75</b>	<b>2,40</b>	<b>2,41</b>	<b>2,33</b>	<b>861,1</b>	<b>1,037</b>	<b>892,3</b>	<b>6,940</b>	<b>3,284</b>	<b>14,105</b>	<b>17,389</b>	<b>81,135</b>

Código	% Betume	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	H méd. (cm)	Peso ar	Peso imerso	Volume (cm³)	d	D	d_ap	Carga	Correção	Estab. (kgf)	Fluência	Vv (%)	Vb	VAM (%)	RBV (%)
J-1	6,5%	63,64	63,64	63,79	6,37	1193,8	692,0	515,8	2,38	2,393	2,31	784,2	1,020	799,7	8,887	3,288	15,161	18,448	82,178
J-2	6,5%	62,81	62,56	62,59	6,27	1183,8	688,3	507,5	2,39	2,393	2,33	855,5	1,048	896,2	7,010	2,511	15,225	17,736	85,842
J-3	6,5%	62,70	64,06	63,61	6,35	1185,9	688,5	514,0	2,38	2,393	2,31	682,7	1,026	700,4	5,229	3,575	15,193	18,768	80,954
J-4	6,5%	63,76	64,06	63,61	6,38	1189,6	699,2	516,8	2,43	2,393	2,30	652,6	1,017	663,5	7,417	3,809	15,458	19,268	80,230
J-5	6,5%	63,63	63,66	63,91	6,37	1184,3	687,0	516,2	2,38	2,393	2,29	652,0	1,019	664,2	7,505	4,123	15,176	19,299	78,638
J-6	6,5%	62,10	63,39	62,83	6,28	1186,8	689,9	508,4	2,39	2,393	2,33	-	1,044	-	-	2,451	15,220	17,671	86,131
J-7	6,5%	62,71	62,31	62,81	6,26	1181,1	688,8	507,1	2,40	2,393	2,33	-	1,049	-	-	2,666	15,289	17,955	85,151
<b>Média</b>					<b>6,35</b>	<b>1187,5</b>	<b>691,0</b>	<b>514,05</b>	<b>2,39</b>	<b>2,39</b>	<b>2,31</b>	<b>725,4</b>	<b>1,026</b>	<b>744,8</b>	<b>7,210</b>	<b>3,461</b>	<b>15,243</b>	<b>18,704</b>	<b>81,568</b>



## APÊNDICE B – Preparação do Equipamento de Flexão Alternada para Ensaios de Módulo Complexo e Fadiga

### B.1 Disposição dos corpos de provas e canais do sistema



Figura B.1 – Corpos de Prova.

Lista de Canais no sistema de aquisição de dados:

- 0 – Célula (CP1);
- 1 – Célula (CP2);
- 2 – Célula (CP3);
- 3 – Célula (CP4);
- 4 – Hall (CP1);
- 5 – Hall (CP2);
- 6 – Hall (CP3);
- 7 – Hall (CP4)

## B.2 Fixação dos Corpos de Prova



Figura B.2 – Fixação do Corpo de Prova

- Para colocar os Corpos de Prova:
  - 1º Apertar os parafusos da base;
  - 2º Em seguida apertar os da cabeça;
- Para retirar os corpos de prova:
  - 1º Afrouxar a cabeça;
  - 2º Afrouxar a base;

*Observação: antes ajustar a deformação de ensaio, verificar a amplitude do ensaio anterior.*

### B.3 Ajuste dos Sensores Hall

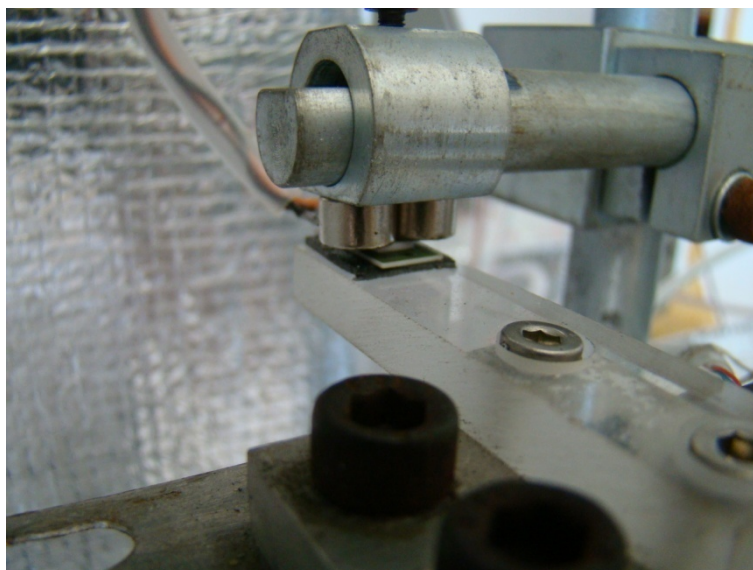


Figura B.3 – Sensor por efeito Hall.

- Os ímãs devem estar centralizados com o sensor.
- Devem estar distantes dos sensores o equivalente a espessura de uma folha de papel.

### B.4 Ajuste mecânico da Amplitude/Flecha



Figura B.4 – Micrometro “relógio”.

- Sempre girar o eixo do motor no mesmo sentido da rotação de ensaio.
- Fixar o “relógio” com a **ponta** encostada na cabeça do CP.

- O “relógio” (Micrometro), em si, não deve encostar nas partes do conjunto de ensaio.
- A rotação do excêntrico é no sentido anti-horário para os corpos de 1 e 2.
- A rotação do excêntrico é no sentido horário para os corpos de 3 e 4.
- O relógio de medição marca em  $\mu\text{m}$ .
- Corre para o sentido horário e sentido anti-horário.
- É posicionado sempre nos corpos 1 e 4.

### B.5 Excêntrico



Figura B.5 – Excêntrico de flexão alternada.

Sempre a marca preta (ponto zero), deve indicar o alinhamento. Os parafusos acima e abaixo do dispositivo excêntrico ajustam a amplitude de solicitações. Para diminuir ou aumentar o valor da amplitude deve-se apertar e soltar os parafusos. A seguinte regra é válida para diminuir e aumentar a amplitude de solicitação:

**Para aumentar nos CPs 1 e 2:** solte em cima, aperte em baixo.

**Para diminuir nos CPs 3 e 4:** solte em baixo, aperte em cima.

### B.6 Calculo das amplitudes com relógio

- Da planilha de tiragem dos corpos de prova temos a informação da Def. Máxima, flecha e amplitude.

- Assume-se um limite de  $\pm 3\mu\text{m}$ .
- São feitas **n** tentativas até encontrar boa relação entre a amplitude calculada e real.

#### **Exemplos de cálculos.**

- Para deformação máxima  $150\mu\text{m}$  tem-se uma flecha de  $164,33$  e amplitude de  $328,67$ .

1º tentativa:  $173,45 + 151,22 = 324,67 < 328,67 \pm 3\mu\text{m}$  (descarta-se).

2º tentativa:  $174,45 + 152,22 = 326,67 \cong 328,67 \pm 3\mu\text{m}$  (aceita-se).

Então a flecha:

(Ampl.Calc.)  $326,67/2 = 163,34$  (flecha calculada).

Flecha calculada - Flecha encontrada -  $163,34 - 152,22 = 11,12$ ;

A subtração do valor da flecha calculada da flecha encontrada (o menor valor) permite encontrar o zero do relógio.

#### **B.7 Ajuste com o software Aquisição de Dados**

No software Aq. Dados existem duas formas que são utilizadas para realizar a configuração de entrada dos sinais.

- Aferição por Regressão linear.
- Aferição por ganho e Ponto de referência.

##### **Regressão Linear**

Na Aferição por Regressão Linear, o fabricante apresenta os seguintes passos para aferir um canal por Regressão Linear:

1. Na caixa de diálogo configuração de entrada, selecione o canal a ser aferido e executado o comando Aferir por Regressão Linear ou pressione o botão correspondente.
2. Remova os pontos apresentados na tabela pressionando repetidamente o botão remover.

3. As etapas 4, 5 e 6 devem ser repetidas para cada ponto da tabela de aferição do sensor.
4. Edite no campo valor no A/D o valor em volts do ponto a ser inserido.
5. Edite no campo Valor Engenharia o valor correspondente em unidade de engenharia do ponto a ser inserido.
6. Pressione o botão inserir para inserir na tabela o ponto editado.
7. Devem ser inseridos no campo mínimo dois pontos e no máximo 50 pontos na tabela. A partir da inserção do seguinte ponto na tabela, a cada novo ponto inserido, o software realiza a regressão linear dos pontos tabelados e apresenta os limites calculados e o índice de correlação.
8. Pressione o botão Aceita Limites Calculado para salvar os limites calculados.
9. Pressione o botão anterior ou botão próximo para selecionar respectivamente o próximo canal do módulo.

Para a execução da aferição ao sinal no estudo em questão, estes passos são validos. Somente os sensores de deformação (Hall) serão calibrados por regressão. São os canais equivalentes. Canal 4, 5, 6 e 7. Em geral são inseridos três pontos: 1º é o zero da leitura (Valor da Eng. 0); 2º é o primeiro valor da flecha (Valor Eng.Flecha 1); 3º é o segundo ponto da flecha (Valor Eng.Flecha2). O objetivo é fazer o software entender onde são os máximos e mínimos da amplitude.

#### **Exemplo de Aplicação (canal 4):**

- Encontrado o zero do relógio e a amplitude.
- Abrir programa em aferição por Regressão Linear.
- Com o excêntrico na posição de flecha zero.
  - Pressionar ler A/D (esperar até que pisque pelo menos 3 vezes).
  - Pressionar Inserir (para inserir a tabela).
- Do exemplo calculado no item B.6 temos a flecha calculada de 163,34.
- Conferir com o relógio se aparece o valor calculado.

- Posicionar o excêntrico na posição de forma solicitar o corpo de prova CP1 a compressão, na posição máxima da amplitude, ou seja, o Valor de Engenharia será positivo (Positivo compressão, Negativo tração).
  - Valor de Engenharia = + 163,34 (CP1), compressão no corpo.
  - Pressionar Ler A/D (Piscar 3 Vezes).
  - Inserir valor na tabela.
- Pressionar o excêntrico na posição solicitação do CPI a tração. Ou seja, Valor de Engenharia será negativo.
  - Valor de Eng = -163,34 (CPI), tração no corpo.
  - Pressionar ler A/D (Piscar 3 Vezes).
  - Inserir Valor na Tabela.
- Nos canais 5, 6 e 7 seguem o mesmo procedimento porém modifica-se o valor de Eng. (canal 6 e 7 é o mesmo mas diferente do canal 5 é igual a 4). O canal 5 segue a seguinte metodologia de sinais: como o excêntrico sempre se movimenta no sentido de rotação do motor, enquanto no CP1 o esforço é de compressão, no CP2 é tração, logo;
  - 1º Valor de Eng. Zero (1ºm).
  - 2º Valor de Eng. (Tração) = - 163,34.
  - 3º Valor de Eng. (Compressão) = + 163,34.
- Nos canais 6 e 7, a setagem é invertida. Primeiro o relógio é posicionado no CP4. A aferição dos sinais seguem as mesmas regras: positivo para compressão e negativo para tração.
  - Depois de inserir ponto para Reg.Linear checa-se a correlação dos pontos.

Uma correlação boa é próxima de 99%.

#### **Aferição por ganho e Ponto de referência**

A aferição por ganho e ponto de referência é ajustada manualmente no hardware de aquisição de sinais.