

FABIO ISSAO IWANAGA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE AGREGADO, DO  
TIPO DE LIGANTE, DO TIPO DE MOLDAGEM E DO TIPO  
DE FÍLER NA VIDA DE FADIGA DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS DENSAS

Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo, como  
parte dos requisitos para obtenção  
do título de “Mestre em Engenharia  
Civil: Transportes”.

Orientador: Professor Doutor Glauco Tulio Pessa Fabbri

São Carlos

2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

I96a Iwanaga, Fabio Issao  
Avaliação da influência do tipo de agregado, do tipo de ligante, do tipo de moldagem e do tipo de Fíler na vida de fadiga de misturas asfálticas densas / Fabio Issao Iwanaga ; orientador Glauco Tulio Pessa Fabbri. -- São Carlos, 2007.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infra-Estrutura de Transportes) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

1. Misturas asfálticas. 2. Fadiga. 3. Fíler mineral.  
4. Agregados péticos. 5. Ligante asfáltico. I. Título.

*“ Mostra sabedoria quem acredita que todos os que estão ao seu redor, mesmo os mais humildes, têm algo a lhe ensinar”*

Provérbio Árabe

Dedico este trabalho  
à minha família, que sempre me apoiou.

## Agradecimentos

---

- Aos meus pais Pedro e Cida, meu irmão Denis e meu avô Angelo pelo apoio durante toda minha formação;
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri, pelos ensinamentos e pela compreensão desde a graduação até o período de orientação acadêmica;
- À CAPES pela bolsa concedida e a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo;
- À minha namorada Carla e sua família pelo apoio durante todo o mestrado;
- À minha Madrinha Maria Carolina e família pelo apoio durante minha formação;
- À toda família Iwanaga;
- À Antonio Carlos Gigante, técnico responsável pelo laboratório do departamento pelos ensinamentos técnicos e a grande ajuda na parte laboratorial;
- À João Domingos pela ajuda essencial na preparação e moldagem dos corpos-de-prova;
- À Paulo Toyama pela ajuda na preparação e moldagem dos corpos-de-prova e pelo apoio durante todo o período que frequentei o laboratório;
- À Ana Furlan pela grande ajuda na elaboração do projeto e durante a fase experimental e de redação da tese;
- Ao grande amigo Jesner Ildelfonso por todo o apoio, amizade e ensinamentos durante o programa de mestrado;
- Aos amigos André, Matheus, Camila, Reginaldo, Caramuru, Zanchetta, Jorge, Vivian, Eduardo, Bruno, Stella, Fred, Rodrigo, Fernanda, Adson, Marcos, Toco, Alexandre, Vicente e a todos os colegas do STT;
- Aos grandes amigos trainees 2006 da CVRD: Adão, Pará, Sheik, Ozônio, Negão, Piolho, Penna, Baiano, Atoladinha, Mourão, Roberta, Indião, Salsa, Luique, Jegue, Leão Lobo, Zeca, Tiozão, Bruna, Moça, Gonzo, César, Tizil, Durval e Jiló.
- Ao pessoal da GEVIT: Plínio Toccheto, Carlos Buss, Alan, Charles, Guido e Mario;
- Ao amigo Ângelo Donaggio pelo apoio durante todo o ano de 2006.



## Resumo

---

IWANAGA, F. I. (2007). “Avaliação do Tipo de Agregado, do Tipo de Ligante, do Tipo de Moldagem e do Tipo de Fíler na Vida de Fadiga das Misturas Asfálticas”.2007. 120f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento à fadiga de algumas misturas asfálticas, à luz de resultados de ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, considerando-se a variação de quatro fatores: tipo de agregado, tipo de ligante, tipo de moldagem e tipo de filler. Todos os corpos-de-prova foram moldados na mesma faixa granulométrica (centro da faixa C do DNER ), segundo os procedimentos dos métodos Marshall, ASTM D 4867 ou AASHTO T 283, variando o tipo de agregado (basalto, granito e gábro), tipo de ligante (CAP 20 e CAP 40) e o tipo de material de preenchimento (Cal Hidratada). São apresentados resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e de fadiga. Os modelos de fadiga são apresentados em função das diferenças de tensões e deformações. Para avaliar o desempenho relativo das misturas em serviço, foram simuladas três estruturas de pavimentos com a ajuda do programa ELSYM5, para as quais foram determinadas as tensões e deformações atuantes que foram utilizadas nos modelos de fadiga para que todas as misturas fossem avaliadas sob o mesmo referencial. Os resultados indicam que em relação ao tipo de moldagem, as misturas moldadas pelo método da AASHTO T 283 apresentaram melhor desempenho (maior vida de fadiga), sendo que a maioria das misturas moldadas com CAP 40 apresentou um desempenho melhor que as moldadas com CAP 20. Com relação ao tipo de agregado os materiais gábricos apresentaram o melhor desempenho, seguidos pelos basálticos e graníticos. As misturas moldadas com Cal Hidratada como filler também apresentaram melhor desempenho à fadiga.

Palavras-chave: Misturas Asfálticas. Fadiga. Fíler mineral. Agregados pétreos. Ensaios mecânicos

## Abstract

---

IWANAGA, F. I. (2007). “Na Evaluation of Aggregate type, Asphalt Type, Molded Type, and Filler Type on Fatigue Lifespan of Asphalt Mixtures”. 2007. 120 p. Master thesis (Mastering) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

The purpose of this research is to evaluate the fatigue behavior of some asphalt mixtures, by means of indirect tests with controlled stress, considering the variation of four factors: aggregate type, asphalt type, molded type and filler type. The specimens was molded in same gradation (center of DNER C gradation), according to Marshall, ASTM D 4867 or AASHTO T 283 design Method, with the variation of three aggregates (basaltic, granite and gabbro), two asphalt (CAP 20 and CAP 40) and the presence of lime. Tests results of indirect tensile strength, resilient modulus and fatigue are presented. The fatigue models are constructed as a function of the differences of stress and strain. The fatigue behavior of asphalt mixtures was evaluated based on three structures which the stress and strains was estimated with aid of ELSYM5 program. The tests results indicated that all mixtures molded with AASHTO T 283 design Method presented highe fatigue life than the other ones, and almost all asphalt mixtures molded with CAP 40 presented higher fatigue life than mixtures molded with CAP 20. Considering the type of aggregate, the specimens molded with gabbro presented higher fatigue life than basaltic and granite. The mixtures molded with presence of lime presented an increase in fatigue life.

Keywords: Asphalt Mixtures. Fatigue. Mineral filler. Aggregate. Mechanical tests.



# Sumário

---

CAPITULO 1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Considerações Iniciais	19
1.2	Objetivos	20
1.3	Organização do Trabalho	21
CAPÍTULO 2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	23
2.1	Considerações Iniciais	23
2.2	Fatores que Influenciam o Comportamento a Fadiga das Misturas Asfálticas	24
2.2.1	Considerações Iniciais	24
2.2.2	Tipo e Teor de Ligante	26
2.2.3	Temperatura	26
2.2.4	Volume de Vazios	27
2.2.5	Propriedades dos Agregados e Distribuição Granulométrica	28
2.2.6	Envelhecimento do Ligante	28
2.2.7	Formas de Aplicação do Carregamento em Ensaios Laboratoriais	29
2.2.7.1	Ensaio a Tensão Controlada	29
2.2.7.2	Ensaio a Deformação Controlada	30
2.3	Critério de Ruptura	32
2.4	Métodos para Avaliar Fadiga	33
2.4.1	Simulador de Tráfego	34
2.4.2	Flexão Alternada	36
2.4.3	Flexão em amostras trapezoidais	37
2.4.4	Tração Indireta por Compressão Diametral	39
2.5	Análise Mecânica com ELSYM 5	40
2.6	Uso da Cal Hidratada como Fíler	40

CAPÍTULO 3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	Considerações Iniciais	43
3.2	Materiais	44
3.2.1	Agregados	44
3.2.2	Ligante Asfáltico	46
3.2.3	Temperatura de Trabalho do Asfalto	47
3.2.4	Fíler	48
3.3	Misturas Asfálticas	49
3.3.1	Dosagem Marshall	49
3.3.2	Absorção do Asfalto pelo Agregado	51
3.4	Moldagem dos Corpos de Prova e Programa Experimental	52
3.5	Métodos	54
3.5.1	Métodos de Moldagem	54
3.5.2	Resistência à Tração	54
3.5.3	Módulo de Resiliência	55
3.5.4	Ensaio de Fadiga a Tensão Controlada	56
3.5.5	Análise Mecânica dos Pavimentos com ELSYM 5	59
CAPÍTULO 4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
4.1	Considerações Iniciais	61
4.2	Módulo de Resiliência	61
4.3	Resistência à Tração	64
4.4	Relação MR / RT	66
4.5	Fadiga a Tensão Controlada	69
4.5.1	Análise da Variação do Tipo de Moldagem no Comportamento das Misturas	71
4.5.2	Análise da Variação do Tipo de Ligante no Comportamento das Misturas	83
4.5.3	Análise da Variação do Tipo de Agregado no Comportamento das Misturas	86

4.5.4	Análise da Adição de Cal Hidratada como Material de Preenchimento no Comportamento das Misturas	89
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO		95
5.1	Conclusão	95
5.2	Recomendações para Trabalhos Futuros	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		99
ANEXO 1 – Características dos corpos-de-prova		105
ANEXO 2 – Ensaio de Fadiga		109
ANEXO 3 – Tabela de Simulações		117



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Gráfico do ensaio de vida de fadiga a tensão controlada	33
Figura 2.2: Ensaio de fadiga realizado por flexão de viga a deformação controlada	37
Figura 2.3: Ensaio de fadiga realizado em amostra trapezoidais	38
Figura 2.4: Ensaio de tração indireta por compressão diametral	39
Figura 3.1: Faixa granulométrica dos agregados	45
Figura 3.2: Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o CAP 20	48
Figura 3.3: Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o CAP 40	48
Figura 3.4: Procedimento de Mistura e Condicionamento do Material.	53
Figura 3.5: Exemplo de Modelo de Curva de Fadiga	58
Figura 4.1: Variação do MR das Misturas de Basalto	62
Figura 4.2: Variação do MR das Misturas de Granito	62
Figura 4.3: Variação do MR das misturas de Granito CAP 20 com Cal	63
Figura 4.4: Variação do MR das misturas ASTM, CAP 20 com Cal	63
Figura 4.5: Variação do RT das misturas de Basalto	64
Figura 4.6: Variação do RT das misturas de Granito	65
Figura 4.7: Variação do RT das misturas de Granito com Cal	65
Figura 4.8: Variação da RT das misturas ASTM, CAP 20 e com Cal	66
Figura 4.9: Variação de MR / RT das misturas de Basalto	67
Figura 4.10: Variação de MR / RT das misturas de Granito	67
Figura 4.11: Variação de MR / RT das misturas de Granito CAP 20 com Cal	68
Figura 4.12: Variação da MR/RT das misturas ASTM, CAP 20 e com Cal	69
Figura 4.13: Carregamento e pontos para cálculo das tensões e deformações para a análise das vidas de fadiga das misturas	70
Figura 4.14: Estruturas para análise no programa ELSYM5	71
Figura 4.15: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) do basalto CAP 20 em função da diferença de moldagem	73
Figura 4.16: Curvas de fadiga ( $E_i$ ) do basalto CAP 20 em função da diferença de moldagem	73
Figura 4.17: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) do basalto CAP 40 em função da diferença de moldagem	76

Figura 4.18: Curvas de fadiga ( $E_i$ ) do basalto CAP 40 em função da diferença de moldagem	76
Figura 4.19: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) do granito CAP 20 em função da diferença de moldagem	78
Figura 4.20: Curvas de fadiga ( $E_i$ ) do granito CAP 20 em função da diferença de moldagem	79
Figura 4.21: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) do granito CAP 40 em função da diferença de moldagem	81
Figura 4.22: Curvas de fadiga ( $E_i$ ) do granito CAP 40 em função da diferença de moldagem	81
Figura 4.23: Desempenho a fadiga das misturas de granito e basalto	83
Figura 4.24: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) para a moldagem Marshall	83
Figura 4.25: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) para a moldagem ASTM	84
Figura 4.26: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) para a moldagem AASHTO	84
Figura 4.27: Desempenho a fadiga das misturas com CAP 20 e CAP 40	86
Figura 4.28: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) do Gabro CAP 20 para a moldagem ASTM	87
Figura 4.29: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) para a moldagem Marshall	88
Figura 4.30: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) para a moldagem ASTM	88
Figura 4.31: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) para a moldagem AASHTO	88
Figura 4.32: Desempenho a fadiga das misturas com Granito e Basalto	89
Figura 4.33: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) do Granito com Cal	92
Figura 4.34: Curvas de fadiga ( $\Delta\sigma$ ) para moldagem ASTM com Cal	92
Figura 4.35: Desempenho a fadiga das misturas com adição de Cal Hidratada	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Influência de alguns fatores na vida de fadiga de misturas asfálticas	21
Tabela 2.2: Efeito de algumas variáveis nos ensaios de tensão controlada e deformação controlada	32
Tabela 3.1: Composição Granulométrica pelo Método de Ruthfucks	45
Tabela 3.2: Características dos Agregados	46
Tabela 3.3: Características dos Asfaltos	47
Tabela 3.4: Características do Fíler Cal	49
Tabela 3.5: Parâmetros Marshall das misturas asfálticas com CAP 20	50
Tabela 3.6: Taxa de Absorção do Asfalto pelo Agregado	51
Tabela 3.7: Características e quantidades dos CPs ensaiados	52
Tabela 4.1: Ensaio de Fadiga Basalto CAP 20 Moldagem Marshall	71
Tabela 4.2: Ensaio de Fadiga Basalto CAP 20 Moldagem ASTM	72
Tabela 4.3: Ensaio de Fadiga Basalto CAP 20 Moldagem AASHTO	72
Tabela 4.4: Vida de Fadiga Basalto CAP 20	74
Tabela 4.5: Ensaio de Fadiga Basalto CAP 40 Moldagem Marshall	74
Tabela 4.6: Ensaio de Fadiga Basalto CAP 40 Moldagem ASTM	75
Tabela 4.7: Ensaio de Fadiga Basalto CAP 40 Moldagem AASHTO	75
Tabela 4.8: Vida de Fadiga Basalto CAP 40	77
Tabela 4.9: Ensaio de Fadiga Granito CAP 20 Moldagem Marshall	77
Tabela 4.10: Ensaio de Fadiga Granito CAP 20 Moldagem ASTM	77
Tabela 4.11: Ensaio de Fadiga Granito CAP 20 Moldagem AASHTO	78
Tabela 4.12: Vida de fadiga Granito CAP 20	79
Tabela 4.13: Ensaio de fadiga Granito moldagem Marshall CAP 40	80
Tabela 4.14: Ensaio de fadiga Granito moldagem ASTM CAP 40	80
Tabela 4.15: Ensaio de fadiga Granito moldagem AASHTO CAP 40	80
Tabela 4.16: Vida de fadiga Granito CAP 40	82
Tabela 4.17: Vida de fadiga para moldagem Marshall	85
Tabela 4.18: Vida de fadiga para moldagem ASTM	85
Tabela 4.19: Vida de fadiga para moldagem AASHTO	85
Tabela 4.20: Ensaio de fadiga Gabro moldagem ASTM CAP 20	86
Tabela 4.21: Vida de fadiga do Gabro com CAP 20 para moldagem ASTM	87

Tabela 4.22: Ensaio de fadiga Granito moldagem Marshall com Cal	90
Tabela 4.23: Ensaio de fadiga Granito moldagem ASTM com Cal	90
Tabela 4.24: Ensaio de fadiga Granito moldagem AASHTO com Cal	90
Tabela 4.25: Ensaio de fadiga Basalto moldagem ASTM com Cal	91
Tabela 4.26: Ensaio de fadiga Gabro moldagem ASTM com Cal	91
Tabela 4.27: Vida de fadiga do Granito com adição de Cal	93
Tabela 4.28: Vida de fadiga dos agregados com adição de Cal	93



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobrás
CP	Corpo-de-Prova
DC	Deformação Controlada
DMM	Densidade Máxima Medida
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DSR	Dynamic Shear Rheometer
EESC-USP	Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo
FLC	Fator Laboratório Campo
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MR	Módulo de Resiliência
N	Numero de Repetições do ensaio de fadiga
NBR	Norma Brasileira
RBV	Relação Betume Vazios
REDUC	Refinaria de Duque de Caxias
RT	Resistência à Tração
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement System
TC	Tensão Controlada
VAM	Vazios no Agregado Mineral

## Capítulo 1 – Introdução

---

### 1.1 Considerações Iniciais

No Brasil, mais da metade da carga transportada é realizada através de rodovias, embora dada esta importância na matriz de transporte, pouco tem sido feito para a melhoria da infraestrutura viária, uma das principais responsáveis pelo aumento dos custos logísticos no país, que conta com uma malha rodoviária insuficiente e degradada.

A atual degradação da malha viária tem refletido no aumento dos custos operacionais dos veículos, do tempo de viagem e do risco de acidentes. Com o intuito de melhorar a eficiência das rodovias brasileiras, vários estudos estão sendo realizados para o desenvolvimento de novas técnicas e novos materiais para um melhor dimensionamento e manutenção das rodovias.

Devido ao constante aumento da carga transportada em tonelada-quilômetro, e o conseqüente aumento do peso operacional dos veículos, a degradação das vias torna-se cada vez mais rápida, devido a vários tipos de defeitos, dos quais os mais comuns são as trilhas de roda, o desgaste e as trincas por fadiga, que serão o foco desta pesquisa.

Trincas por fadiga são geralmente causadas por carregamentos muito pesados para a estrutura do pavimento ou repetições de carga maiores do que as o projeto. O problema se torna ainda maior nos pavimentos com drenagem inadequada, pois a saturação das camadas inferiores e causando a diminuição da resistência. Trincas por fadiga prematuras também podem ser causadas por excesso de peso nos caminhões e falta de controle de qualidade durante a construção (BROWN *et al*, 2001).

A vida de fadiga de um revestimento asfáltico depende de vários fatores externos relacionados com as características do tráfego, as características próprias do pavimento e as

condições climáticas, e fatores da própria mistura como a viscosidade do ligante, o teor de ligante, a distribuição granulométrica do agregado e o volume de vazios.

Embora muitos fatores influenciem a vida de fadiga de um pavimento, nessa pesquisa foram considerados apenas os fatores relacionados às características das misturas, avaliando o desempenho à fadiga dos agregados mais utilizados em misturas asfálticas no estado de São Paulo: os agregados graníticos, gábricos e basálticos, os ligantes CAP 20 e CAP 40, e uso da cal hidratada como material de preenchimento. Também foi avaliada a influência do tipo de moldagem no desempenho das misturas à luz do ensaio de fadiga com tensão controlada.

## **1.2 Objetivos**

### **⇒ Geral**

O objetivo principal deste trabalho foi compreender melhor as características do revestimento asfáltico e a influência de alguns fatores quando comparado o seu desempenho à luz do ensaio laboratorial de fadiga por compressão diametral com tensão controlada.

### **⇒ Específicos**

Na pesquisa foram comparados dezoito tipos de misturas asfálticas, sendo utilizados para compô-las: três tipos de agregados (basalto, gabro e granito) no centro da faixa C do DNER, dois tipos de asfalto (CAP 20 e CAP 40) e o aditivo cal hidratada como material de preenchimento (fíler). Portanto os objetivos específicos foram avaliar a influência dos seguintes fatores na vida de fadiga das misturas:

1. Tipo de agregado;
2. Tipo de material ligante;
3. Metodologia utilizada na compactação dos corpos-de-prova;
4. Tipo de material de preenchimento.

### **1.3 Organização do Trabalho**

Este trabalho é composto por 5 capítulos, sendo que o Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o trabalho e os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 trás uma revisão bibliográfica acerca dos mecanismos de fadiga, os principais fatores que influenciam a vida de fadiga, assim como os métodos de ensaio mais utilizados para estimar a vida de fadiga das misturas betuminosas.

O Capítulo 3 foi dividido em quatro partes, Na primeira parte são mostrados os materiais utilizados na pesquisa e sua caracterização. Na segunda parte tem-se a caracterização das misturas asfálticas. Na terceira parte são mostrados os procedimentos de moldagem dos corpos-de-prova e o programa experimental desenvolvido para a pesquisa. Na última parte temos a apresentação dos métodos de moldagem dos corpos-de-prova e os ensaios utilizados para a caracterização mecânica das misturas.

No Capítulo 4 são analisados os resultados dos ensaios realizados na pesquisa laboratorial, identificando os fatores que influíram em cada propriedade estudada e a construção dos modelos de comportamento, comparando a influência do tipo de agregado, ligante, método de moldagem e adição de aditivo na vida de fadiga das misturas, sendo separados em cinco partes: análise do módulo de resiliência, análise da resistência à tração, análise da relação MR/RT, da vida de fadiga à luz do ensaio de compressão diametral e da análise do critério de ruptura do ensaio de fadiga.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras nesta mesma linha.



## Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

---

### 2.1 Considerações Iniciais

O fenômeno de Fadiga pode ser descrito como a diminuição gradual da resistência de um material por efeito de solicitações repetidas. Quando o tráfego circula sobre a estrutura de um pavimento, num curto espaço de tempo é aplicado um grande número de solicitações nas diferentes camadas pela passagem dos eixos dos veículos. A sucessiva aplicação de cargas pode dar origem à ocorrência de fadiga nos materiais, conduzindo ao desenvolvimento de trincas motivadas pela diminuição da capacidade do material suportar as cargas ante a ação contínua de tensões de tração (CAPITÃO, 2004).

Para estimar o número de ciclos que um material pode suportar até apresentar fadiga, ou estimar o fator de segurança para vida infinita, ou não ocorrência de fadiga, pode-se utilizar a lei de Miner, a qual estabelece que os danos de fadiga são lineares, acumulativos e proporcionais à razão entre o número de ciclos aplicados e o número máximo de ciclos de fadiga que o material pode suportar numa dada tensão de solicitação (GORNI 2003, CORRÊA 2001). A Lei de Miner pode ser representada pela Equação 1:

$$\frac{\eta_1}{N_1} + \frac{\eta_2}{N_2} + \dots + \frac{\eta_i}{N_i} = C \quad (1)$$

Em que:

$\eta_i$  = número de ciclos de tensão  $\sigma_i$  aplicados ao corpo-de-prova;

$N_i$  = vida estimada correspondente à tensão  $\sigma_i$ .

Quando diversas séries de tensões de valor constante, repetidas um número  $n$  de vezes, são aplicadas, verifica-se um consumo progressivo da resistência à fadiga do material, que estaria completamente consumida quando se verificasse que a soma do número de ciclos pela vida estimada correspondente àquela tensão fosse igual a 1 (SANTOS, 2005).

## **2.2 Fatores que Influenciam o Comportamento à Fadiga das Misturas Asfálticas**

### **2.2.1 Considerações Iniciais**

O comportamento à fadiga das misturas asfálticas é influenciados por vários parâmetros, sendo os mais importantes as características do tráfego, da mistura asfáltica e as condições climáticas.

O desempenho à fadiga das misturas asfálticas é diferente quando avaliado em serviço ou em laboratório, uma vez que, em serviço, as misturas asfálticas são submetidas a condições diferentes das de laboratório, como variação da temperatura, presença de cargas estocásticas e a ocorrência do fenômeno de recuperação de trincas em virtude da ausência de cargas em alguns períodos de sua vida útil (PINTO, 1991). Outro fator importante é o envelhecimento do ligante, que altera as propriedades mecânicas da camada asfáltica, causando, conseqüentemente, modificações nas tensões e deformações que ocorrem no pavimento, podendo causar a degradação de uma estrutura que foi projetada adequadamente para suportar outras tensões e deformações (TONIAL *et al.*, 2001).

A temperatura de serviço do pavimento é um fator de grande influência no desempenho das misturas asfálticas, uma vez que o asfalto é um material termo-sensível, onde temperaturas elevadas aumentam sua flexibilidade e temperaturas mais baixas tornam a camada asfáltica mais rígida e com maior tendência a se tornar quebradiça. Com a diminuição da temperatura, as tensões de tração que se desenvolvem na superfície inferior do revestimento também aumentam (GRECO, 2004).

Segundo Pinto (1991), os ensaios laboratoriais não representam a vida de fadiga da mistura em serviço; para tanto tem-se que utilizar um fator laboratório/campo (FLC), cujo valor varia entre  $10^3$  e  $10^4$ , e que também é função do tipo de ensaio realizado em laboratório, quer sejam ensaios de flexão ou de compressão diametral.

Em laboratório, os fatores de maior influência no desempenho à fadiga são as condições de carregamento, temperatura de ensaio e as características do corpo-de-prova. Das características da mistura, as que mais influenciam o seu desempenho da mistura são: viscosidade, tipo e teor de ligante, tipo e distribuição granulométrica do agregado e volume de vazios da mistura.

A Tabela 2.1, desenvolvida por Tangella *et al.*(1991), mostra o efeito de alguns fatores no comportamento de misturas asfálticas.

**Tabela 2.1:** Influência de alguns fatores na vida de fadiga de misturas asfálticas

(TANGELLA *et al.*, 1991)

Fator	Variação	Efeito da Variação do Fator		
		Rigidez	Fadiga a Tensao Controlada	Fadiga a Deformação Controlada
Viscosidade	Aumento	Aumento	Aumento	Diminuição
Teor de ligante	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento
Distribuição granulometrica	Aberta para Continua	Aumento	Aumento	Diminuição
Volume de Vazios	Diminuição	Aumento	Aumento	Aumento



### 2.2.2 Tipo e Teor de Ligante

Dentre as características que mais influenciam o desempenho das misturas asfálticas, o tipo e o teor de ligante são os fatores que mais alteram o desempenho das misturas, tendo ganhado maior importância com os estudos de viabilidade do uso de materiais alternativos como os polímeros em sua composição.

Vários estudos mostraram que o aumento do teor de asfalto até um determinado limite, há uma melhora considerável no desempenho à fadiga; Harvey *et al.* (1995) em seu estudo apontam que com um teor mais alto de asfalto os vazios são preenchidos, melhorando seu desempenho. Capitão (2004) também apresenta que misturas com teor um pouco maior que o ótimo apresentam melhor desempenho à fadiga, mas que não se pode ultrapassar um determinado limite, além do qual há uma redução no módulo de rigidez da mistura asfáltica.

Outro ponto importante é o tipo de asfalto utilizado na mistura; Santos (2005), Khattak e Baladi (2001), Raad *et al.* (2001), Taira (2001) e Souza *et al.* (2000), fizeram importantes estudos sobre a influência de asfaltos modificados com polímeros nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Os asfaltos modificados produzem misturas mais flexíveis, que apresentam à luz do ensaio de fadiga à tensão controlada um desempenho melhor que o das misturas com ligantes convencionais. Com relação à consistência do asfalto, Soares (2000) aponta que ligantes mais consistentes (CAP 40) apresentam maior vida de fadiga do que os menos viscosos (CAP 20).

### 2.2.3 Temperatura

Devido à grande susceptibilidade térmica das misturas asfálticas, a temperatura é outro fator de destaque na vida de fadiga, pois a resistência à fadiga varia conforme a variação da rigidez em diferentes temperaturas, sendo que para temperaturas muito altas a vida de fadiga tende a diminuir (PINTO, 1991). Raad (2001) realizou ensaios de fadiga com deformação

controlada de misturas asfálticas variando a temperatura de 22 a  $-2^{\circ}\text{C}$  e verificou que a vida de fadiga das misturas a  $-2^{\circ}\text{C}$  diminuiu drasticamente.

A temperatura de compactação também pode influenciar o comportamento da mistura à fadiga; Albuquerque (2004), em sua pesquisa, mostra que a vida de fadiga de misturas compactadas entre 30 e  $90^{\circ}\text{C}$  apresentaram-se significativamente menores que as compactadas entre 90 e  $140^{\circ}\text{C}$ . Isto pode ser justificado pela dificuldade de compactação de misturas mais frias, com menor trabalhabilidade, que dificulta a densificação, aumentando o volume de vazios.

#### **2.2.4 Volume de Vazios**

O volume de vazios assume particular influência no comportamento das misturas asfálticas, sendo que no comportamento à fadiga essa influência pode ser explicada pelos seus efeitos na rigidez e nas tensões de tração que se desenvolvem ou no ligante ou na combinação ligante-filer da mistura (SANTOS, 2005).

Segundo Deacon (1965), o acréscimo de rigidez da mistura é proporcional ao acréscimo de densidade e decréscimo do volume de vazios, e que a redução deste índice é responsável por uma redução nas tensões que atuam na combinação ligante-filer, provocando um aumento na resistência à fadiga do material.

Segundo Harvey (1995), o volume de vazios afeta mais o desempenho à fadiga das misturas asfálticas do que o teor de asfalto. Nesta pesquisa, foram comparadas misturas asfálticas com teores de asfalto variando de 4 a 6% e volumes de vazios entre 2 e 8%. Concluiu-se que uma variação de 1% no teor de vazios é mais significativa que 1% no teor de asfalto.

Santos (2005), Albuquerque (2004) e Capitão (2004) também avaliaram a influência do volume de vazios em misturas asfálticas e verificaram que as com menores volumes de vazios (da ordem de 2,5%) apresentavam melhor desempenho à fadiga, diminuindo as tensões que atuam na combinação ligante/filer.

### **2.2.5 Propriedades dos Agregados e Distribuição Granulométrica**

O desempenho das misturas asfálticas é significativamente influenciado pelas propriedades dos agregados e de suas combinações. Kim (1992) menciona que agregados mais rugosos produzem misturas asfálticas com maior resistência à fadiga devido à maior adesividade ao ligante asfáltico; na mesma linha, materiais angulares apresentam melhor desempenho que os arredondados, nos quais as falhas normalmente ocorrem na ligação do asfalto. Vasconcelos (2004) observou uma maior vida de fadiga para misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com relação às dosadas pelo método Marshall, o que pode ter sido ocasionado pela melhor distribuição dos agregados, obtida durante o processo de compactação pelo compactador giratório.

Faixas granulométricas mais finas tendem a apresentar um desempenho melhor. Soares *et al.* (2000) apresentaram um estudo avaliando a influência das faixas A, B e C do DNER-ES 313/97, no comportamento das misturas asfálticas e verificou que as misturas da faixa C apresentaram melhores resultados que as misturas da faixa B e A respectivamente.

Segundo Momm (2001), agregados maiores suportam deformações menores tornando os concretos asfálticos mais rígidos e apresentando uma vida de fadiga menor.

### **2.2.6 Envelhecimento do Ligante**

O envelhecimento é outro fator importante para o desempenho dos materiais asfálticos, entretanto, nos procedimentos de dimensionamento não tem sido levado em conta. Segundo Raad (2001), a influência do envelhecimento na previsão da vida de fadiga não depende somente da rigidez da mistura e de suas propriedades de fadiga, mas também dos módulos de resiliência dos componentes do pavimento. Sousa *et al.* (2000) avaliou misturas com asfalto-borracha e asfalto convencional e mostrou que com o envelhecimento, a vida de fadiga diminui, sendo mais afetada a mistura com asfalto convencional.

De acordo com Tonial (2001), os principais fatores que influenciam no envelhecimento do ligante são a temperatura e a exposição ao ar, que leva à oxidação do ligante e conseqüentemente, ao aumento de consistência, que causa uma redução da vida de fadiga do material. O envelhecimento é mais rápido para temperaturas altas e altas superfícies específicas, porém para as condições encontradas em campo que apresentam temperaturas baixas e exposição ao ar alta, o envelhecimento é baixo.

## **2.2.7 Formas de Aplicação do Carregamento em Ensaio Laboratoriais**

As formas de carregamento utilizadas nos ensaios para determinação dos modelos de fadiga podem ser divididas em dois tipos básicos: Tensão Controlada (TC) e Deformação Controlada (DC).

### **2.2.7.1 Ensaio com Tensão Controlada**

O ensaio de fadiga com TC caracteriza-se por uma tensão gerada por um carregamento pneumático, hidráulico ou eletromagnético que solicita um corpo-de-prova cilíndrico ou prismático. Procura-se, com a frequência de aplicação de carga, simular a passagem da roda de um veículo em uma determinada seção do pavimento em campo.

Nesse método o carregamento permanece constante durante todo o ensaio e a vida de fadiga é definida como ao número total de aplicações de carga necessárias à ruptura completa da amostra.

O ensaio é mais adequado para pavimentos com revestimentos com espessuras superiores a 15 cm, pois a mistura asfáltica vai perdendo sua rigidez com o número de aplicações de carga e, portanto, sofrendo maiores deformações com o tempo. A deformação aumenta fortemente no início do ensaio, estabiliza-se ao longo do seu transcurso do ensaio com um aumento lento e

progressivo e nos instantes que antecedem a ruptura, ocorre um aumento forte da deformação até a ruptura. Os ensaios dão resultados mais pessimistas que os de deformação controlada e com resultados menos dispersos (MOMM, 2001).

A formulação dos resultados destes ensaios tem sido representada na forma das equações 2 e 3:

$$N = K_1 \left( \frac{1}{\sigma} \right)^n \quad (2)$$

$$N = K_2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (3)$$

Em que:

$N$  = vida de fadiga expressa em número de solicitações da carga;

$\sigma$  = tensão de tração repetida atuante;

$\Delta\sigma$  = diferença algébrica entre as tensões verticais (de compressão) e horizontais (de tração), no centro da amostra;

$K_1, K_2, n$  = constantes obtidas na regressão linear dos pares  $N$  e  $\sigma$  determinados a partir de ensaios de laboratório em escalas logarítmicas.

### 2.2.7.2 Ensaio a Deformação Controlada

Diferentemente do ensaio de fadiga à TC, onde a tensão aplicada é constante, o ensaio à DC se baseia na manutenção da mesma deformação até o final do ensaio. Neste segundo, precisa-se estabelecer um critério de ruptura específico já que o ensaio é caracterizado por um decréscimo na tensão solicitante e, portanto, não existe claramente um momento de ruína completa do corpo-de-prova.

Os critérios de ruptura mais utilizados tem sido a redução em 40% e 50% da carga inicial aplicada, 50% do módulo de rigidez inicial por flexão ( $S_0$ ) ou da tensão inicial. Esse tipo de ensaio é mais aplicável a pavimentos com revestimentos com espessuras inferiores a 5 cm pois as deformações são regidas pelas camadas subjacentes e a diminuição no módulo de rigidez do revestimento não é considerável no dimensionamento.

A formulação dos resultados destes ensaios tem sido representada na forma da Equação 4:

$$N = K_3 \left( \frac{1}{Eti} \right)^n \quad (4)$$

Em que:

$N$  = vida de fadiga expressa em número de solicitações da carga;

$Eti$  = deformação de tração inicial, e;

$K_3, n$  = constantes obtidas na regressão linear dos pares  $N$  e  $Eti$

A Tabela 2.2 mostra uma comparação entre os dois tipos de ensaios de fadiga, com tensão controlada (TC) e com deformação controlada (DC), no comportamento de algumas variáveis, elaborado por Monismith *et al.* (1990) para o programa SHRP.

**Tabela 2.2:** Efeito de algumas variáveis nos ensaios de tensão controlada e deformação controlada (MONISMITH *et al.*, 1990)

VARIÁVEIS	TENSÃO CONTROLADA (TC)	DEFORMAÇÃO CONTROLADA (DC)
Espessura da camada de concreto asfáltico	Indicadas para camadas mais espessas e rígidas em relação ao seu suporte	Indicadas para camadas menos espessas e menos rígidas em relação ao seu suporte
Definição de ruptura; número de ciclos	Bem definida já que a amostra rompe	Arbitrário, o ensaio é interrompido quando o nível de carga é reduzido a 50% da inicial
Dispersão dos resultados	Menor Dispersão	Maior dispersão
Número de Amostras	Menor	Maior
Simulação de influências a longo prazo	Envelhecimento leva a um aumento da rigidez e um aumento da vida de fadiga	Aumentando a rigidez, provoca uma diminuição na vida de fadiga
Magnitude da Vida de Fadiga (N)	Menor	Maior
Efeito de Variáveis na Mistura	Mais sensível	Menos sensível
Taxa de dissipação de energia	Mais rápida	Mais lenta
Taxa de propagação de fissuras	Mais rápida do que ocorre in situ	Mais representativas das condições in situ
Efeitos benéficos de períodos de repouso	Maiores efeitos benéficos	Menores efeitos benéficos

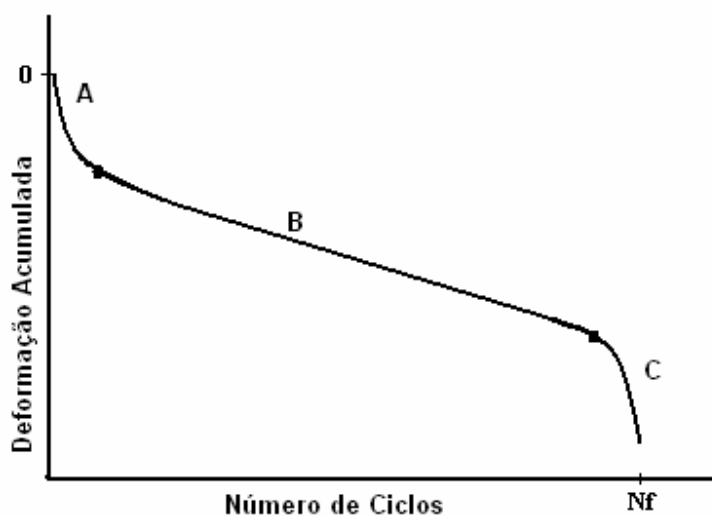
### 2.3 Critério de Ruptura

O ensaio de fadiga visa obter o número de solicitações, sob uma determinada carga que levaria o corpo-de-prova à ruptura. Este critério, segundo Carpenter (2003), deveria indicar quando a mistura asfáltica começa a apresentar micro-trincas.

O critério de ruptura das misturas pode ser a redução da rigidez inicial da mistura asfáltica a um certo nível (50% para o ensaio de deformação controlada), o aparecimento da primeira

fissura ou a ruptura completa do corpo-de-prova (utilizada no ensaio com tensão controlada, no qual a vida de fadiga da mistura é definida em termos de vida de fratura ).

A Figura 2.1 apresenta o gráfico do número de ciclos em função da deformação acumulada no ensaio de fadiga com tensão controlada. O primeiro trecho do ensaio (A) corresponde a, aproximadamente, 5% da vida de fadiga e representa a fase de condicionamento do ensaio. O segundo trecho (B), aproximadamente 70% da vida total, representa a fase estável, que se caracteriza pela primeira trinca visível na parte externa dos corpos-de-prova. O último trecho (C) é considerado a fase de ruptura, correspondendo a 25% da vida de fadiga e se caracteriza por um crescimento acelerado das deformações elásticas e plásticas até a ruptura total do corpo-de-prova (PINTO, 1991). A ruptura, que indica o final do ensaio, ainda não é padronizada, sendo que no Brasil os laboratórios adotam uma deformação acumulada de 3 a 6 mm.



**Figura 2.1:** Gráfico do ensaio de vida de fadiga com tensão controlada

## 2.4 Métodos para Avaliar Fadiga

O principal objetivo dos métodos que avaliam e caracterizam as propriedades mecânicas e a fadiga das misturas asfálticas é a obtenção de parâmetros para a aplicação no dimensionamento



racional do pavimento; esses parâmetros podem ser obtidos de três formas: através de pistas experimentais (experimento em verdadeira grandeza), simuladores de tráfego e ensaios laboratoriais em que corpos-de-prova são submetidos a cargas cíclicas (MORILHA, 2004).

Para a avaliação da suscetibilidade de misturas asfálticas à fadiga, diferentes procedimentos têm sido desenvolvidos, desde os mais complexos que utilizam simuladores de tráfego, até os mais simples como os que se utilizam de ensaios de compressão diametral. Todos procuram, por diferentes maneiras, reproduzir as tensões e deformações que solicitam o pavimento; em laboratório, a vida de fadiga é obtida usando um critério baseado na medida do acúmulo de deformações plásticas em função do número de ciclos (KHATTAK e BALADI, 2001).

#### **2.4.1 Simuladores de Tráfego**

Segundo Ceratti *et al.* (1993), experimentos realizados em laboratórios em escala reduzida, normalmente, não representam de forma adequada o desempenho do pavimento devido ao efeito escala, que modificam a influência dos fatores e afastam o experimento das condições em escala real.

Uma das formas de solucionar o problema de escala sem a utilização de seções-teste, que têm como inconveniente o longo tempo necessário para sua análise, são os Simuladores de Tráfego. Com eles se podem testar pequenas seções com aplicação de cargas definidas, obtendo resultados mais precisos em um curto período de tempo, porém não reproduzem os fatores climáticos como chuva, temperatura, umidade e insolação. Simuladores de Tráfego são agrupados de acordo com seu tamanho em: simuladores grandes, simuladores médios e simuladores pequenos.

Simuladores grandes de tráfego são os que operam a céu aberto e no interior de grandes laboratórios. No Brasil, o DNER possui um simulador de tráfego com diâmetro de aproximadamente 25m e capacidade de velocidade de até 80 km/h. Os simuladores médios, embora a maioria operem a céu aberto, apresentam dimensões menores que as dos grandes

simuladores; como exemplo pode-se citar o equipamento existente na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que consiste em duas vigas paralelas de 15 metros de comprimento e 2,5 metros de largura, que suportam uma plataforma móvel que alcança velocidades de até 20 km/h, aplicando cargas entre 8 e 13 toneladas. Simuladores pequenos são equipamentos instalados em laboratórios capazes de estimar em poucas horas o comportamento de uma mistura de concreto asfáltico, simulando algumas características do tráfego e consequentemente produzindo resultados limitados. Dentre os pequenos simuladores mais utilizados destacam-se o *Laboratoire Central Dês Ponts Et Chausees* (LCPC), Analisador de Pavimentos Asfálticos (APA) e o *Wheel Tracking Test*.

O simulador Francês tipo LCPC é um equipamento desenvolvido para ensaios de deformação permanente. Ele ensaia simultaneamente um par de placas (para cada mistura asfáltica), sendo que cada placa apresenta 180 mm de largura, 500 mm de comprimento e 50 mm de altura. O equipamento é munido de um sistema de aquecimento que possibilita ensaios de 20°C a 70°C com pressão do pneu e cargas a serem aplicadas reguláveis, onde a passagem das rodas é feita em ciclos de ida e vinda sobre a parte central da placa com frequência de 1 Hz no ciclo completo até o aparecimento das primeiras trincas (AMARAL,2004).

O APA é um simulador que se encontrava instalado no laboratório de misturas asfálticas do CENPES/PETROBRAS até 2004. O simulador era utilizado para avaliar a deformação permanente, o trincamento por fadiga e a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas moldadas à quente e à frio. O experimento é realizado em vigotas tanto retangulares quanto cilíndricas moldadas em laboratório, as quais são solicitadas por um tubo de borracha que se move sobre a amostra com uma pressão superior a 800 kPa. O fim do ensaio é determinado por uma deformação máxima de 7 mm ou um total de 8000 ciclos.

O *Wheel Tracking Test* é um equipamento composto por uma roda acoplada a uma máquina que aplica um carregamento em uma placa produzida com mistura asfáltica. O alcance da passagem do pneu é de 60 cm e a largura da placa é de 50 cm enquanto que a espessura pode variar entre 5 e 12 cm. Duas câmeras fotográficas são colocadas nos dois lados da placa para que

se possa estabelecer uma correlação entre o início da propagação das trincas e o nível das deformações em função do número de passagens do pneu (LOUREIRO,2003).

#### **2.4.2 Flexão Alternada**

O ensaio dinâmico à flexão alternada é um dos ensaios utilizados no Brasil para a avaliação da fadiga. Consiste em submeter uma vigota de concreto asfáltico simplesmente apoiada à uma carga vertical nos dois terços médios da viga, produzindo um estado de tração uniforme na parte central do corpo-de-prova, acima da linha neutra entre os dois pontos de carga, zona onde o momento fletor é constante e não se tem tensões de cisalhamento. A trinca que surge na vigota é geralmente única, formando-se na região onde o momento é constante, o que reduz a dispersão dos ensaios (MONTETRUSQUE, 1995). Os ensaios podem ser realizados tanto com deformação controlada quanto com tensão controlada, aplicando cargas senoidais que variam de 1Hz a 25Hz de frequência (MOMM, 2001).

Os corpos-de-prova prismáticos apresentam 30,48 cm de comprimento, 7,62 cm de espessura e 7,62cm de altura e são confeccionados em moldes de mesma dimensão (LOUREIRO, 2003), onde são compactados utilizando um dos seguintes métodos: compactação estática, compactação por impacto, compactação por amassamento, compactação no compactador giratório ou compactação por rolamento, sendo os três últimos os que melhor reproduzem a compactação real de campo.

O ensaio de flexão alternada demonstra uma relação direta entre a vida de fadiga e tensão/deformação desenvolvidas em um corpo-de-prova de forma prismática, submetido a cargas pulsantes ou senoidais até a ruptura (MONTETRUSQUE *et al.*, 1995).

O ensaio pode ser realizado com tensão controlada, no qual conta-se o número de golpes até a ruptura completa da viga, ou com deformação controlada, no qual o critério de ruptura mais utilizado é o de redução em 50% da tensão de tração inicial.

A leitura dos valores de deslocamento de compressão e de tração é feita através de transdutores do tipo *strain gages* colocados nas faces inferior e superior da amostra enquanto que a leitura de deflexão pode ser feita através de um *Linear Variable Differential Transformers* (LVDT) acoplado no centro médio superior do corpo-de-prova.

O ensaio de fadiga realizado por Flexão de Viga está representado na Figura 2.2:



**Figura 2.2:** Ensaio de fadiga por flexão de viga à deformação controlada (LOUREIRO, 2003)

### 2.4.3 Flexão em Amostras Trapezoidais

O ensaio de fadiga através da flexão em amostras trapezoidais foi desenvolvido na França e normalizado pela NF P 98-261-1 (1993). Consiste na aplicação de uma força na base menor do corpo-de-prova através de um sistema eletromagnético capaz de gerar uma deformação elástica constante.

O corpo-de-prova trapezoidal apresenta dimensões: 70 mm na base maior, 25 mm na base menor, 250 mm de altura e 25 mm de espessura. São aplicadas cargas com frequência de 25 Hz, podendo ser realizado sob regime de tensão controlada ou deformação controlada. Para a confecção dos corpos-de-prova, primeiramente se faz a moldagem de uma placa de 120 mm x 400 mm x 600 mm, compactada em regime de compactação forte conforme a norma NF P 98-250-2 (1993) e tendo os teores de cimento asfáltico determinados pelo critério de 4% de vazios na compactação Marshall. Os corpos-de-prova trapezoidais são obtidos através da serragem das placas de concreto asfáltico obtendo-se vinte corpos-de-prova por placa (MOMM, 2001).

O modelo de fadiga é definido pelo gráfico gerado pelo número de solicitações por nível de deformação de tração. A norma especifica ainda que se devam colocar no gráfico os valores de deformação relativos a  $10^6$  solicitações e que se deve usar como critério de aceitação dos resultados o valor de 95% de intervalo de confiança para a variância do número de golpes em cada ensaio (LOUREIRO, 2003). O equipamento de ensaio está representado na Figura 2.3:

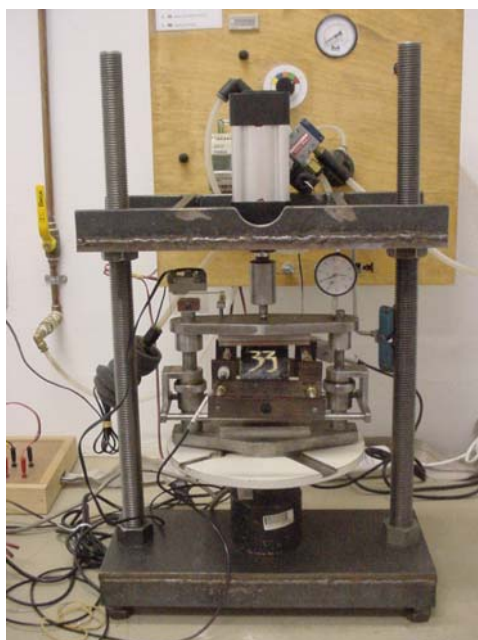


**Figura 2.3:** Ensaio de fadiga realizado em amostra trapezoidais  
(MAGALHÃES, 2004)

#### 2.4.4 Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral ou “Ensaio Brasileiro”, foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para a determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland (MEDINA, 1997). Devido à maior facilidade de execução, tanto na moldagem do corpo-de-prova quanto no carregamento, o ensaio de compressão diametral tornou-se o mais usual na avaliação da vida de fadiga de misturas asfálticas.

O ensaio consiste na aplicação de cargas dinâmicas diametralmente em corpos-de-prova moldados pelo método Marshall. A carga é aplicada em um friso estreito que está apoiado no corpo-de-prova, causando compressão na direção vertical e tração na direção horizontal. Normalmente o carregamento tem duração de 0,1s e é seguido de um período de repouso de 0,9s, perfazendo um ciclo de 1,0s. Nesse tipo de ensaio a frequência pode variar entre 1 e 15 Hz. O equipamento de ensaio está representado na Figura 2.4:



**Figura 2.4:** Ensaio de tração indireta por compressão diametral

## **2.5 Análise Mecânica dos Pavimentos**

Os ensaios laboratoriais apenas fornecem modelos de comportamento dos materiais em determinada condição experimental, não permitindo uma comparação direta entre os resultados. Para comparar o desempenho de misturas em uma situação real de carregamento, se utilizam métodos mecânicos, que usam teorias para prever as tensões e deformações provenientes do carregamento na estrutura do pavimento, procurando compará-las com as tensões resistentes dos materiais, tendo assim um panorama de funcionamento da estrutura quando solicitada (BEZERRA NETO, 2004).

Modernamente, esse tipo de análise estrutural é realizada por programas computacionais que permitem, com grande precisão, definir o estado de tensões em sistemas de camadas elásticas submetidos à esforços das rodas de veículos, sendo que sua aplicação exige o conhecimento dos parâmetros elásticos dos materiais que compõem as camadas dos pavimentos, que devem ser determinados em laboratório ou em campo ou estimados pela experiência do analista.

O método mecânico é necessário para a análise dos resultados dos ensaios laboratoriais de vida de fadiga das misturas asfálticas, pois através dele podem-se verificar as tensões e deformações críticas para cada tipo de pavimento, comparando os diferentes tipos de misturas sob o mesmo referencial.

## **2.6 Uso da Cal Hidratada como Fíler**

O fíler, ou material de enchimento, tem recebido dos pesquisadores uma atenção especial devido à importância que essa fração tem demonstrado ter nas características das misturas, e conseqüentemente, no desempenho dos concretos asfálticos. É um material que possui a maior parte de suas partículas (no mínimo 65%) com dimensão nominal inferior a 0,075 mm (WESSELING, 2003).

Os materiais de preenchimento agem nos vazios dos agregados graúdos alterando a propriedade dos ligantes, fazendo parte integral do masticue (ligante+fíler+vazios). A qualidade do masticue influencia todo o desempenho da mistura, tanto a trabalhabilidade quanto a resistência mecânica. Segundo Kim *et al.* (2003) o fíler contribui para o desempenho à fadiga da mistura, aumentando a resistência às microfissuras. Em decorrência do pequeno tamanho de partícula e de suas características de superfície, o fíler age como material ativo, manifestando-se nas propriedades da interface fíler/cimento asfáltico. Sua adição aumenta a viscosidade do meio coesivo (resistência à deformação), conforme Mourão (2003).

O uso da cal hidratada como fíler tem um efeito mais significativo, em comparação com o cimento ou com o pó de pedra. Isso porque a cal hidratada tem em geral 80% de partículas de tamanho menor ou igual a 20  $\mu\text{m}$ ; por outro lado, o cimento tem uma distribuição muito mais contínua, com diâmetro médio de aproximadamente 60  $\mu\text{m}$ , o pó de pedra por sua vez possui graduação mais grossa, com grande proporção de partículas maiores que 40  $\mu\text{m}$  (MOURÃO, 2003).

WESSELING (2004) avaliou o comportamento mecânico de concreto asfáltico com a adição de fíler do tipo cal. O agregado utilizado foi o basalto, sendo que a mistura de referência utilizou apenas o fíler do próprio material e na mistura com cal, foi substituído 1,5% de fíler basalto por cal hidratada tipo CH II. Na dosagem para um teor de ligante de projeto (considerando  $V_v = 4,0\%$ ) a mistura de referência apresentou um maior consumo de ligante (5,95%), enquanto que a mistura com a cal teve um consumo menor (5,20%), o que se deve ao fato do fíler ativo ser incorporado ao ligante, aumentando seu volume. A relação betume/vazios (RBV) apresentou valores de 79% para a de referência e 75% para a com cal. Tanto para estabilidade (1050 e 1120kgf), Resistência a Tração (1,08 e 1,19MPa) quanto para o módulo de resiliência (2724 e 3652MPa), a mistura com adição de cal apresentou valores superiores, mostrando que o fíler atuou como enrijecedor. Quanto à relação entre a resistência à tração e o módulo de resiliência (2522 e 3069), concluiu-se que a adição de cal levaria à uma mistura com uma combinação de módulo de resiliência e resistência à tração mais adequadas para utilização como camada de revestimento sobre camadas granulares, pois do ponto de vista estrutural, deve haver



compatibilidade entre a rigidez e a resistência da mistura, uma vez que um aumento do módulo de resiliência deixa o material mais suscetível ao trincamento por fadiga.

CAVALCANTE (2001) utilizou o mesmo teor de asfalto, para diferentes teores de fíler cal (2% e 5%). Foi verificado que o volume de vazios da mistura aumentou 22% com o aumento da porcentagem de cal de 2 para 5%. A resistência à tração também aumentou em 69% com o aumento da cal, já que partículas pequenas de fíler tendem a se unir com o ligante aumentando a sua consistência e conseqüentemente tornando a mistura mais rígida.

O fíler cal também pode ser empregado como melhorador de adesividade, pois a cal influi na viscosidade do ligante, tornando-o mais viscoso e assim melhorando a ancoragem na superfície do agregado. MOURA (2001) fez um estudo onde avaliou a influência da cal hidratada na adesividade, para proporções em peso de 1% e 2% de cal. Foram realizados ensaios para previsão do desempenho de misturas asfálticas face à propriedade de adesividade ligante/asfalto, utilizando o método AASHTO T283/89 e o método ASTM D4867/96. Após a realização dos ensaios concluiu-se que, pelo método umidade induzida da AASHTO, a mistura de 2% de cal apresentou melhoras na propriedade de adesividade (retenção da resistência à tração), enquanto que para 1% não foi tão significativa. Já pelo método da ASTM não foram notadas diferenças entre as misturas, sendo que nenhuma apresentou problemas de adesividade a curto prazo.

Os danos por fadiga se iniciam com micro fissuras nas propriedades de coesão e adesividade. Kim *et al.* (2003) fizeram um estudo das propriedades da cal hidratada na vida de fadiga da mistura fíler-ligante utilizando o *Dinamic Shear Reometer* (DSR) e mostraram que a interação da cal hidratada com o ligante contribui para o aumento da vida de fadiga frente a outros tipos de fíler, pois ela melhora tanto a coesão quanto a adesividade da mistura.

A vida de fadiga com tensão controlada por compressão diametral com a adição de cal hidratada também foi avaliada por Mourão (2003), sendo que a mistura com adição de 1,5% de cal em substituição ao material de preenchimento apresentou desempenho melhor que as misturas sem a adição de cal com ligante CAP 50/60 e que as misturas com ligante modificado com polímero SBS.

## Capítulo 3 – Materiais e Métodos

---

### 3.1 Considerações Iniciais

O programa experimental foi desenvolvido para avaliar a influência do tipo de agregado, do tipo de asfalto, da presença ou não de cal e do tipo de moldagem na flexibilidade e na vida de fadiga de diferentes misturas asfálticas. Para a pesquisa foram utilizados três tipos de agregados, dois tipos de asfalto e dois tipos de fíler (pó de pedra e a presença de cal substituindo parcialmente o pó de pedra), moldados em três diferentes métodos de moldagem (AASHTO, ASTM e Marshall), o que totalizou 18 condições diferentes de misturas asfálticas. Para a realização desta pesquisa, os 18 tipos de misturas foram divididos em três programas experimentais, que resultaram em 198 corpos-de-prova.

Para cada uma das 18 condições foram moldados 11 corpos-de-prova, sendo realizado o ensaio de Módulo de Resiliência em todos os corpos-de-prova para posteriormente escolher os que seriam utilizados no ensaio de Resistência a Tração (3 corpos-de-prova) e os para o ensaio de Fadiga com Tensão Controlada (8 corpos-de-prova).

O primeiro programa experimental visou à análise do tipo de agregado, asfalto e moldagem na flexibilidade e na vida de fadiga das misturas. Para essa análise foram utilizados dois agregados (basalto e granito), dois asfaltos (CAP 20 e CAP 40) e três tipos de moldagem (Marshall, ASTM D 4867 e AASHTO T 283), resultando em 132 corpos-de-prova.

O segundo programa experimental visou à análise da influência do fíler cal para diferentes tipos de moldagem. Para essa análise foi utilizado o granito como agregado e o CAP 20 como ligante, sendo realizadas moldagens nos três métodos diferentes, resultando em 33 corpos-de-prova.

O terceiro programa experimental visou à análise da influência do fíler cal para diferentes tipos de agregados. Para essa análise foram utilizados três agregados (basalto, granito e gabro), CAP 20 como ligante e moldagem segundo o método ASTM D 4867, resultando em 33 corpos-de-prova.

## **3.2 MATERIAIS**

### **3.2.1 Agregados**

Nesse estudo foram empregados três tipos de agregados:

- GRANITO – Proveniente da Pedreira São Jerônimo, situada na cidade de Valinhos;
- BASALTO – Proveniente da Pedreira Bandeirantes, situada na cidade de São Carlos;
- GABRO – Proveniente da Pedreira Santa Isabel da cidade de Limeira.

Os materiais foram escolhidos por apresentarem boas características físicas e mecânicas, além de um uso intensivo nas regiões de origem.

Os agregados foram coletados direto do estoque das pedreiras a partir de diversos pontos da pilha de modo a se obter uma amostra representativa do material, selecionando três frações: pedra 1, pedrisco e pó de pedra para a composição da faixa granulométrica.

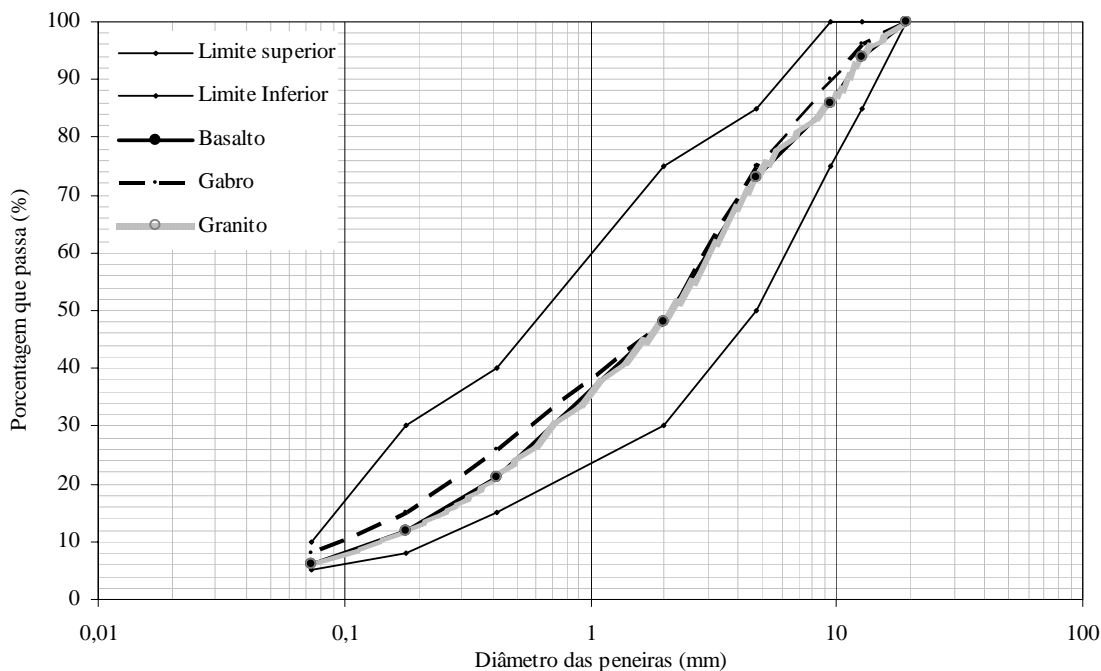
Os agregados com diâmetro maior que 0,42 mm (#40) foram lavados em água corrente até a eliminação do material fino aderido às partículas. Após esse procedimento, o material foi levado à estufa a uma temperatura média de 120°C para secagem.

Após a determinação da distribuição granulométrica de cada fração dos materiais, foi utilizado o método de Ruthfucks para enquadrá-los nos limites da faixa C do DNER-ES 313/97, conforme apresentado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Composições granulométricas para enquadramento na faixa C do DNER

	Combinação das Frações para		
	Basalto (%)	Gabro (%)	Granito (%)
Pedra 1	15	10	12
Pedrisco	35	15	23
Pó de Pedra 1	50	61	65
Pó de Pedra 2		14	

Na Figura 3.1 são apresentadas as distribuições granulométricas das composições dos três agregados enquadrados na faixa C do DNER

**Figura 3.1:** Distribuições granulométricas dos diferentes agregados

Os agregados foram submetidos a ensaios de caracterização. Primeiramente foram realizados os ensaios de Abrasão Los Angeles (DNER-ME35/98) e os resultados indicaram que os agregados atendiam às especificações, já que apresentaram desgastes inferiores a 40% (tabela 3.2).

Também foram realizados ensaios de adesividade do agregado ao ligante betuminoso para agregado graúdo (DNER-ME 78/94) e para agregado miúdo (DNER-ME 79/94), e todos os agregados apresentaram adesividade “má” e “adesividade não satisfatória”, respectivamente.

Os ensaios de densidade aparente e real para agregados finos e grossos foram utilizados os procedimentos das normas ASTM C-127 e ASTM C-128, cujos resultados indicaram que agregados de mesma composição mineralógica, basalto e gabro, possuem maior densidade que os agregados de granito. A Tabela 3.2 apresenta os resultados desses ensaios.

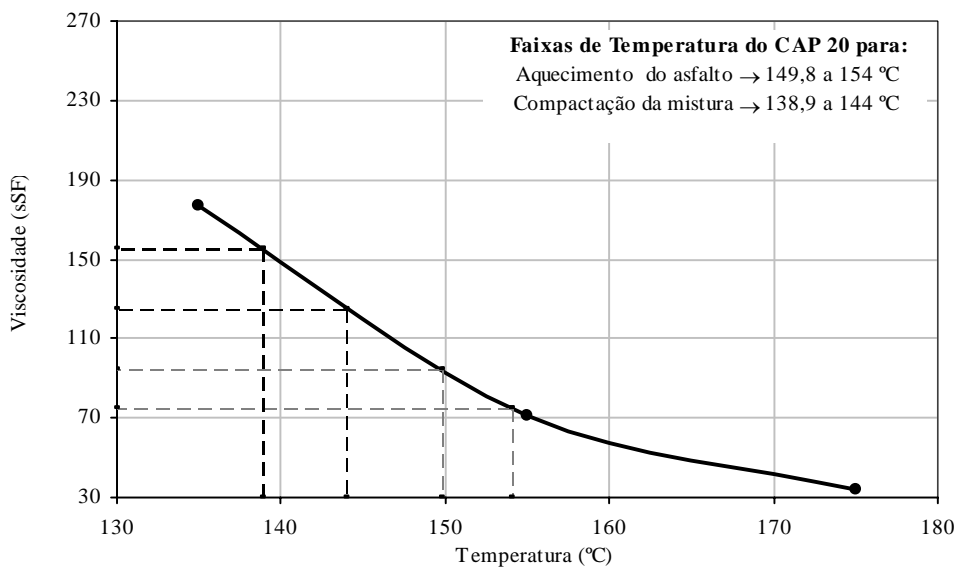
**Tabela 3.2:** Características dos agregados

<b>Parâmetro</b>	<b>Basalto</b>	<b>Gabro</b>	<b>Granito</b>
Adesividade (Riedel Weber)	Má	Má	Má
Adesividade (RRL Modificado)	Não satisfatória	Não satisfatória	Não satisfatória
Abrasão Los Angeles	25%	25%	20%
Densidade Real	2,872	2,832	2.608

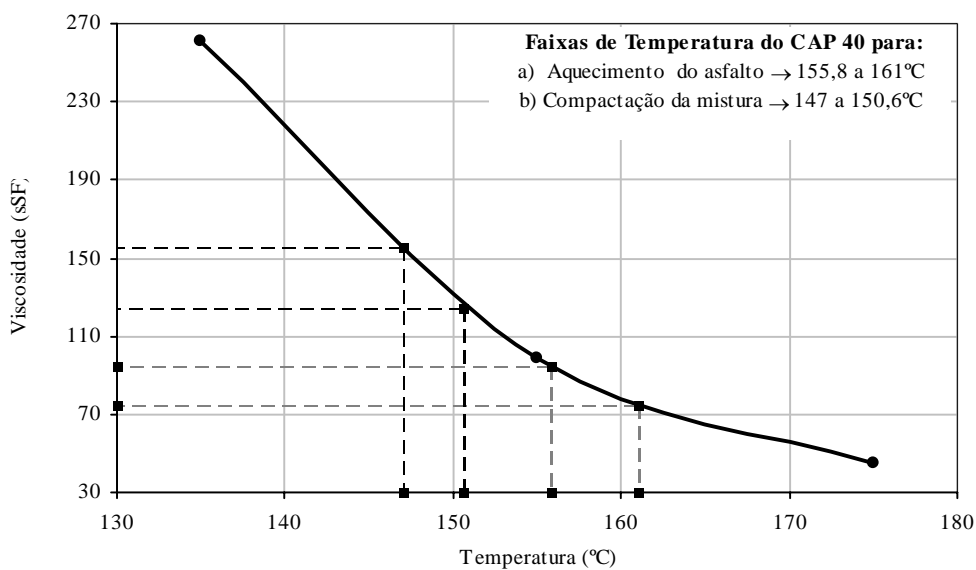
### 3.2.2 Ligante Asfáltico

Para o desenvolvimento da pesquisa foram considerados dois tipos de ligantes asfálticos: CAP 20 e CAP 40, sendo ambos fornecidos pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobrás (CENPES), localizado na Refinaria Duque de Caxias (REDUC) do Rio de Janeiro. Foram realizados ensaios de caracterização nos asfaltos e os resultados são apresentados na Tabela 3.3.





**Figura 3.2:** Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o CAP 20



**Figura 3.3:** Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura para o CAP 40

### 3.2.4 Fíler

Fíler é todo o material mineral finamente dividido que passe pelo menos 65% na peneira de nº 200. Nessa pesquisa foram utilizados fíleres minerais obtidos dos próprios agregados e o

fíler de cal hidratada CH-1, proveniente da indústria SUPERCAL, situada na cidade de São José do Rio Preto. Nesse trabalho a cal teve como função atuar como fíler na mistura asfáltica, sendo adicionada à mistura substituindo 1% em peso do material passante na peneira nº 200. Na Tabela 3.4 são apresentadas as características da cal utilizada no trabalho.

**Tabela 3.4:** Características da cal

<b>Cal Hidratada Cálcica</b>	
CaO (%)	70 a 74
MgO (%)	0,1 a 1,4
Insolúvel em HCl (%)	0,5 a 2,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,2 a 0,8
Perda ao Fogo (%)	23 a 27
CO <sub>2</sub> (%)	1,5 a 3,5
SO <sub>3</sub> (%)	0,1 a 0,0
CaO + MgO Base de não volátil (%)	-
MgO Não hidratado (%)	0,5 a 1,8
MI/HCl/4N Reatividade (10 min)	-

### 3.3 Misturas Asfálticas

#### 3.3.1 Dosagem Marshall

As misturas foram realizadas utilizando três tipos de agregados, dois tipos de asfaltos e dois tipos de materiais de preenchimento. Para a definição dos teores ótimos de asfalto de cada mistura foi utilizado o método da superfície específica, que permitiu a estimativa do consumo de asfalto para o recobrimento dos agregados.

A partir desses dados foram realizadas as dosagens Marshall (NBR 12891 da ABNT) para os três agregados com CAP 20, sendo moldados três corpos-de-prova para cada um dos cinco teores de ligante fixados em função das estimativas iniciais.

Os resultados obtidos nas dosagens Marshall para os três agregados com ligante tipo CAP 20 são mostrados na Tabela 3.5.



**Tabela 3.5:** Parâmetros Marshall das misturas asfálticas com CAP 20

<b>Basalto</b>					
Teor de asfalto (%)	Densidade Aparente	Estabilidade	Fluência	V <sub>v</sub> (%)	RBV (%)
4,50	2,496	1893	9,7	5,98	64,81
5,00	2,507	2017	11,0	4,77	72,08
5,50	2,512	2023	11,7	3,80	78,11
6,00	2,512	1847	12,7	3,01	83,06
6,50	2,509	1590	14,7	2,34	87,24
<b>Gabro</b>					
Teor de asfalto (%)	Densidade Aparente	Estabilidade	Fluência	V <sub>v</sub> (%)	RBV (%)
4,50	2,395	1859	10,7	8,65	54,98
5,00	2,436	2145	12,7	6,35	65,27
5,50	2,467	2297	13,0	4,38	75,25
6,00	2,465	2259	14,0	3,68	79,75
6,50	2,452	2200	15,0	3,41	82,11
<b>Granito</b>					
Teor de asfalto (%)	Densidade Aparente	Estabilidade	Fluência	V <sub>v</sub> (%)	RBV (%)
4,50	2,2691	1398	10,7	6,90	59,21
5,00	2,2805	1436	12,0	5,75	66,04
5,50	2,2961	1521	12,7	4,42	73,73
6,00	2,2925	1489	13,3	3,89	77,62
6,50	2,2861	1321	14,3	3,47	80,77

O teor ótimo de asfalto resultante das dosagens Marshall para as três misturas asfálticas com CAP 20 foi de 5.5%. O critério adotado para a definição final dos teores de trabalho foi a obtenção de volume de vazios próximo a 4%. Em todas as misturas esse valor levou a valores de estabilidade e densidade próximos aos valores máximos das curvas.

Os teores ótimos de asfalto das misturas com CAP 40 foram assumidos como sendo iguais aos das misturas com CAP 20 por duas razões:

- a) as características das curvas granulométricas e conseqüentemente as superfícies específicas, mantiveram-se as mesmas, podendo-se esperar consumo similar de asfalto;
- b) as temperaturas normalizadas para os procedimentos de preparação, mistura e compactação (DNER-ME 043/95) implicaram em faixas de viscosidade similares para os dois asfaltos.

### 3.3.2 Absorção de Asfalto pelos Agregados

A pesquisa foi realizada utilizando três diferentes tipos de agregados, sendo que cada um deles apresenta uma taxa de absorção de asfalto diferente, influenciada por um grande número de fatores tais como composição e porosidade do agregado, viscosidade e composição do ligante, temperatura e tempo utilizados nos procedimentos. Esses fatores levam à necessidade de corrigir o teor de asfalto em relação ao obtido na moldagem Marshall (compactação do corpo-de-prova logo após a mistura) para as moldagens segundo o método ASTM D 4867 (duas horas na estufa na temperatura de compactação) e segundo o método AASHTO T 283 (duas fases: 16 horas na estufa ventilada a 60°C e depois duas horas em estufa na temperatura de compactação).

Para a determinação da absorção de asfalto pelo agregado foi utilizado o método ASTM D 4021 (Método Rice). Esse método é utilizado para determinar a densidade máxima medida (DMM) e, a partir dela, determinar a densidade efetiva do agregado e a taxa absorção de asfalto. Para as misturas moldadas pelo método Marshall, não foi considerada a absorção do asfalto pelo agregado, devido a compactação do corpo-de-prova acontecer logo após a mistura com o ligante. Os resultados de absorção para os métodos de moldagem da ASTM D 4867 e AASHTO T 283 são apresentados na Tabela 3.6:

**Tabela 3.6:** Taxa de absorção (%) de asfalto pelo agregado

<b>BASALTO</b>					
<b>Método de Moldagem</b>	Densidade Máxima Medida	Densidade Efetiva do Agregado	Densidade Aparente do Agregado	Absorção de CAP 20	Absorção de CAP 40
ASTM D 4867	2.596	2.853	2.808	0.6	0.6
AASHTO T 283	2.609	2.869		0.8	0.8
<b>GABRO</b>					
<b>Método de Moldagem</b>	Densidade Máxima Medida	Densidade Efetiva do Agregado	Densidade Aparente do Agregado	Absorção de CAP 20	Absorção de CAP 40
ASTM D 4867	2.559	2.806	2.742	0.8	0.9
AASHTO T 283	2.556	2.802		0.8	0.9
<b>GRANITO</b>					
<b>Método de Moldagem</b>	Densidade Máxima Medida	Densidade Efetiva do Agregado	Densidade Aparente do Agregado	Absorção de CAP 20	Absorção de CAP 40
ASTM D 4867	2.396	2.600	2.593	0.1	0.2
AASHTO T 283	2.401	2.606		0.2	0.3



Com o objetivo de homogeneizar as réplicas, na preparação das misturas, foi utilizado um equipamento adaptado que tornou possível a mistura de todos os corpos-de-prova de mesma característica simultaneamente. No equipamento, a quantidade de corpos-de-prova produzida variava de um mínimo de seis até um máximo de vinte. Após o término da homogeneização do material, as misturas que seriam moldadas pelos métodos da ASTM e da AASHTO foram colocadas em bandejas e levadas para a estufa na temperatura determinada pelo método. A Figura 3.4 ilustra o equipamento e a mistura na estufa ventilada.



**Figura 3.4:** Equipamentos utilizados na preparação e no condicionamento das misturas asfálticas

Para cada condição de ensaio foram preparados 11 corpos-de-prova, sendo determinado o módulo de resiliência (MR) em todos eles segundo a norma DNER-ME 133/94. Após a determinação do MR, foram escolhidos os três corpos-de-prova que apresentavam módulos de resiliência representativos do grupo para o ensaio de resistência a tração (RT) segundo a norma DNER-ME 138/94, sendo dentro do grupo um corpo-de-prova com módulo um pouco acima da média, outro com valor médio e um com módulo de resiliência pouco abaixo da média.

Os oito corpos-de-prova restantes foram submetidos aos ensaios de fadiga por compressão diametral sob quatro diferentes níveis de tensão, correspondentes a 40%, 30%, 20% e 10% da tensão de ruptura estática à tração, sendo que para cada nível de tensão foram feitas duas réplicas. Para cada nível de tensão os corpos-de-prova foram escolhidos em função do módulo de resiliência, de modo que todos os níveis de tensão apresentassem corpos-de-prova com características mecânicas semelhantes.

Os ensaios de fadiga à compressão diametral foram realizados à temperatura de 25°C, sob tensão controlada, sendo o término do ensaio determinado quando a deformação vertical do corpo-de-prova atingisse 6 mm ou ocorresse a ruptura completa. Durante a execução dos ensaios foram registrados valores de deslocamento vertical acumulado nos corpo-de-prova.

### **3.5 Métodos**

#### **3.5.1 Métodos de Moldagem**

Na pesquisa foram utilizados três métodos de moldagem diferentes: Marshall, ASTM D 4867 e AASHTO T 283:

- No método de moldagem Marshall (NBR 12891 da ABNT), a compactação é realizada sistematicamente após a mistura do agregado ao ligante;
- No método de moldagem ASTM D 4867, após a mistura do agregado ao ligante, a mistura asfáltica não compactada permanece em estufa na temperatura de compactação por um período de 2 h antes do procedimento de compactação;
- No método de moldagem AASHTO T 283, após a mistura do agregado ao ligante, a mistura asfáltica não compactada passa por um processo de cura, onde permanece resfriando por um período de 2 h à temperatura ambiente e depois é mantida por 16 h em estufa ventilada à temperatura de 60°C. Finalizada a cura, a mistura é aquecida na temperatura de compactação por 2 h e então compactada.

#### **3.5.2 Resistência a Tração**

O ensaio de resistência à tração (RT) foi realizado através de compressão diametral estática, em conformidade com os procedimentos da norma DNER-ME 138/94.

Os corpos-de-prova foram mantidos em sala climatizada à temperatura de 25°C por um período mínimo de 2 h antes do ensaio, que foi realizado utilizando uma prensa aplicando a carga progressivamente com velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s até que se desse a ruptura do corpo-de-prova. Com o valor da carga de ruptura  $F$ , calculou-se a resistência à tração conforme a Expressão (5):

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi\phi H} \quad (5)$$

Em que:

$\sigma_t$  = resistência à tração, kgf/cm<sup>2</sup>;

$F$  = carga de ruptura, kgf;

$\phi$  = diâmetro do corpo-de-prova, cm;

$H$  = altura do corpo-de-prova, cm.

### 3.5.3 Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência por compressão diametral dinâmica foi realizado em conformidade com os procedimentos da norma DNER-ME 133/94.

Os corpos-de-prova foram ensaiados à temperatura de 25°C com a aplicação de 100 ciclos de carregamento de mesma carga controlados para obter uma deformação entre 0,0020 a 0,0030mm em cada ciclo de carga, com 0,1 segundos de carregamento e 0,9 segundos de recuperação.

Para este ensaio foram considerados os primeiros 30 ciclos como período de condicionamento, sendo calculado o ensaio nos 70 ciclos restantes, utilizando a Expressão (6).

$$MR = \left( \frac{F}{100 \cdot \Delta H} \right) \cdot (0,9976 \cdot \gamma + 0,2692) \quad (6)$$

Em que:

$MR$  = módulo de resiliência (MPa);

$F$  = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova (N);

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente;

$H$  = altura do corpo-de-prova (cm);

$\mu$  = coeficiente de Poisson (adimensional).

### 3.5.4 Ensaio de Fadiga com Tensão Controlada

No ensaio de Fadiga com Tensão Controlada, a carga aplicada é mantida constante e as deformações resultantes aumentam no decorrer do ensaio (PINTO, 1991). As cargas que foram aplicadas corresponderam a valores de tensão de 10, 20, 30 e 40% da Resistência à Tração. O valor da carga aplicada é calculado de acordo com a Expressão (7):

$$F = \frac{100 \cdot \pi \cdot d \cdot h \cdot (\% RT)}{2} \quad (7)$$

Em que:

$F$  = carga aplicada (N);

$RT$  = resistência a tração (MPa);

$(\%RT)$  = nível de carga em relação à resistência à tração (MPa);

$d$  = diâmetro do corpo-de-prova (cm)

$h$  = altura do corpo-de-prova (cm)

Como no ensaio de módulo de resiliência, o ensaio de fadiga com tensão controlada consiste na aplicação de cargas cíclicas com duração de 0,1 segundos e recuperação de 0,9 segundos. O critério adotado para o fim do ensaio é quando ocorre a divisão do corpo-de-prova em duas partes, ou quando ocorrem deslocamentos maiores ou iguais a 6 mm. Terminado o ensaio anota-se o número de aplicações de carga necessário para o fim do ensaio e calcula-se a diferença de Tensões ( $\Delta\sigma$ ) e a deformação resiliente ( $\varepsilon_i$ ), segundo as expressões (8) e (9), respectivamente:

$$\Delta\sigma = \frac{8.F}{100.\pi.d.h} \quad (8)$$

$$\varepsilon_i = \frac{(\% RT)}{MR} \quad (9)$$

Em que:

$\Delta\sigma$  = diferença de tensões no centro do corpo-de-prova (MPa);

$F$  = carga aplicada (N);

$d$  = diâmetro do corpo-de-prova (cm);

$h$  = altura do corpo-de-prova (cm);

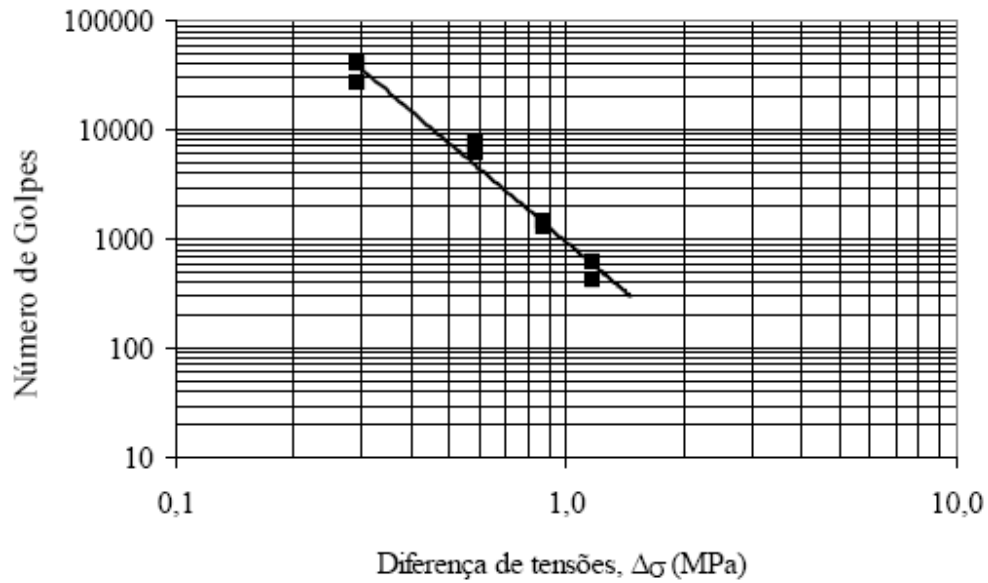
$\varepsilon_i$  = deformação resiliente;

$RT$  = resistência à tração (MPa);

$MR$  = módulo de resiliência (MPa).

Os resultados são apresentados através de uma curva de fadiga traçada em um gráfico *di-log*, onde podem ser lançadas curvas de  $\Delta\sigma \times N$  ou de  $\varepsilon_i \times N$ , conforme o exemplo mostrado na Figura 3.5:





**Figura 3.5:** Exemplo de curva de fadiga obtido do ensaio por compressão diametral

As curvas de fadiga podem ser aproximadas pelas expressões (10) ou (11), conforme a propriedade considerada:

$$N = K_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{k_1} \quad (10)$$

$$N = K_2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad (11)$$

Em que:

$N$  = número de aplicações de carga para ruptura do corpo-de-prova;

$\Delta\sigma$  = diferença de tensões no centro do corpo-de-prova (MPa);

$\varepsilon_i$  = deformação resiliente;

$K_1$  e  $k_1$  = parâmetros determinados no ensaio;

$K_2$  e  $k_2$  = parâmetros determinados no ensaio.

### 3.5.5 Análise Mecânica dos Pavimentos com ELSYM5

Nessa pesquisa foi utilizado o programa computacional ELSYM5, desenvolvido originalmente pelo Instituto de Transportes e Engenharia de Tráfego da Universidade da Califórnia (Berkeley) em FORTRAN, sendo um programa que busca a solução a partir da Teoria Elástica de Sistemas de Camadas, idealizando o pavimento como um sistema elástico tridimensional de camadas sobrepostas (o programa admite até 5 camadas), semi-infinito no plano horizontal. Os materiais são assumidos como sendo isotrópicos e homogêneos, com comportamento elástico-linear, obedecendo à lei de Hooke generalizada. Para o cômputo de tensões e deformações ocasionadas por múltiplas rodas, é utilizado o princípio da superposição de efeitos, sendo que as cargas sobre a superfície do pavimento são admitidas como circulares.

São utilizadas as coordenadas retangulares do sistema cartesiano XYZ, tendo como plano XY e  $Z=0$ , a parte superior onde as cargas são aplicadas, com o eixo Z estendendo-se verticalmente da superfície do sistema para baixo. As camadas são numeradas a partir do revestimento. O programa permite que ao se conhecerem entre as cargas aplicadas dois dos três itens seguintes: cargas em kgf; tensão em  $\text{kgf/cm}^2$  e o raio da área carregada em cm, calcular o terceiro.

Os dados de entrada são: carga, pressão dos pneus, nº de cargas, coordenadas (x, y) por carga, nº de camadas, espessura, coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade de cada camada, posição na superfície (x, y) dos pontos de análise e a profundidade z destes pontos. Os dados de saída calculados por ponto, são: tensões normais, cisalhantes e principais; deslocamentos e deformações normais, cisalhantes e principais.



## **Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados**

---

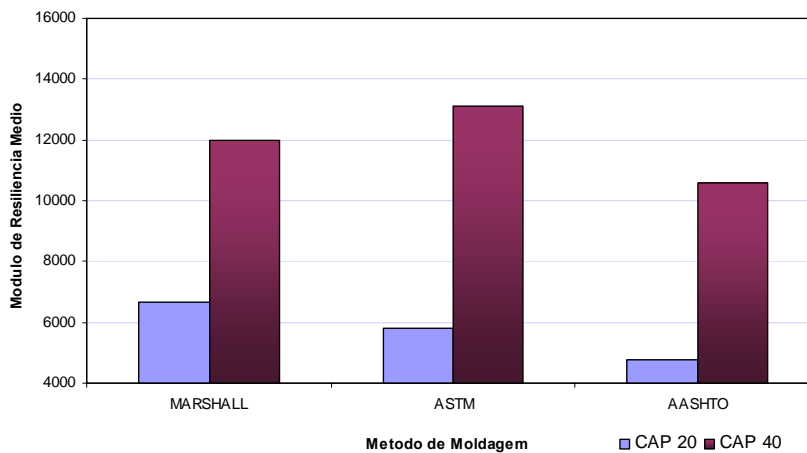
### **4.1 Considerações Iniciais**

Nesse Capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios laboratoriais de Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR) e Fadiga com Tensão Controlada por Compressão Diametral dos corpos-de-prova das 18 condições experimentais do projeto. Também é apresentada uma análise mecânica de pavimentos tipo, feita com o auxílio do programa ELSYM5, onde são comparadas as características das misturas quanto à fadiga ao serem consideradas condições similares às reais de campo.

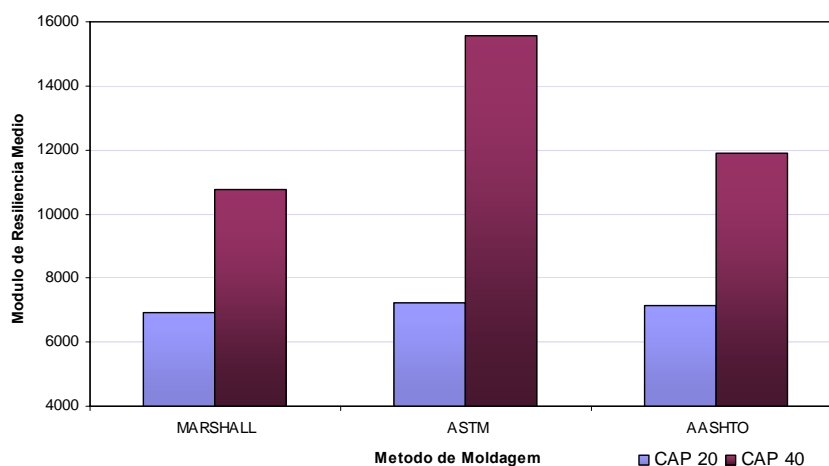
### **4.2 Módulo de Resiliência**

Os ensaios de módulo de resiliência (MR) foram realizados em todos os corpos-de-prova, totalizando 206 ensaios. Para cada ensaio de módulo foi utilizada a menor carga possível que apresentasse uma leitura satisfatória dos deslocamentos ( $\pm 0,0030\text{mm}$ ).

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados do MR das misturas com agregados de basalto e agregados de granito em função do tipo de ligante e tipo de moldagem. Nelas percebe-se a maior rigidez das misturas com CAP 40 e também uma tendência de módulos mais altos nas misturas moldadas pela ASTM quando considerado o asfalto tipo CAP 40.

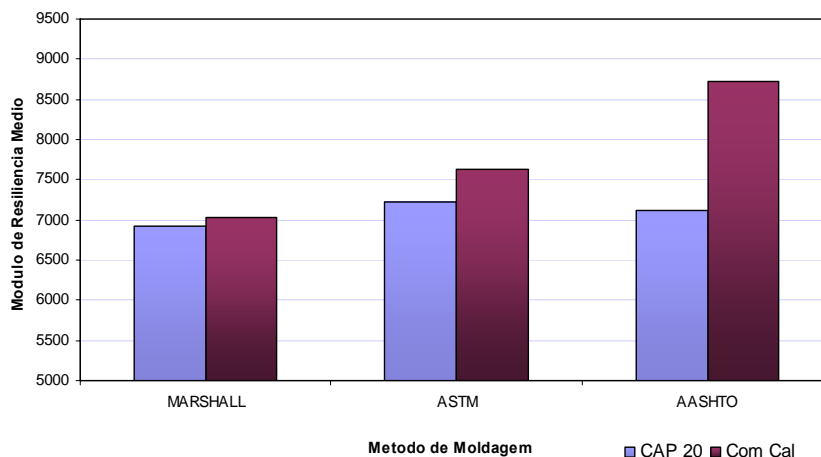


**Figura 4.1:** Módulos de resiliência das misturas de Basalto em função dos tipos de moldagem e de asfalto



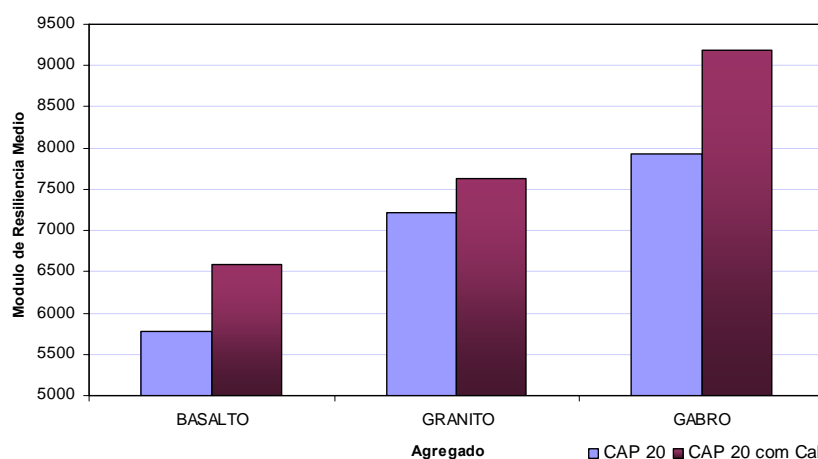
**Figura 4.2:** Módulos de resiliência das misturas de Granito em função dos tipo de moldagem e de asfalto

Na Figura 4.3 são apresentados os resultados de MR das misturas de granito para os três métodos de moldagem, com e sem a adição da cal hidratada como material de preenchimento. Nela verifica-se a influência do filer cal no enrijecimento da mistura, sendo que essa influência aumenta conforme o tempo de “cura” da mistura antes da compactação, chegando a apresentar um aumento de 22% para a mistura moldada pelo método da AASHTO.



**Figura 4.3:** Influência do método de moldagem e da presença de cal nos valores dos módulos de resiliência das misturas com Granito e CAP 20

Na Figura 4.4 são mostrados os resultados de MR das misturas para os três tipos de agregados, moldadas segundo o método da ASTM, com CAP 20 e com adição de cal como material de preenchimento. Nela nota-se que tanto para a mistura com filer do próprio material, quanto para a com o filer cal, as misturas com gabro apresentaram os maiores valores de MR, cerca de 15% maiores que as com granito e 35% maiores que as com basalto, sendo que a cal proporcionou um aumento médio da ordem de 12% no MR das misturas para os três diferentes tipos de agregados.

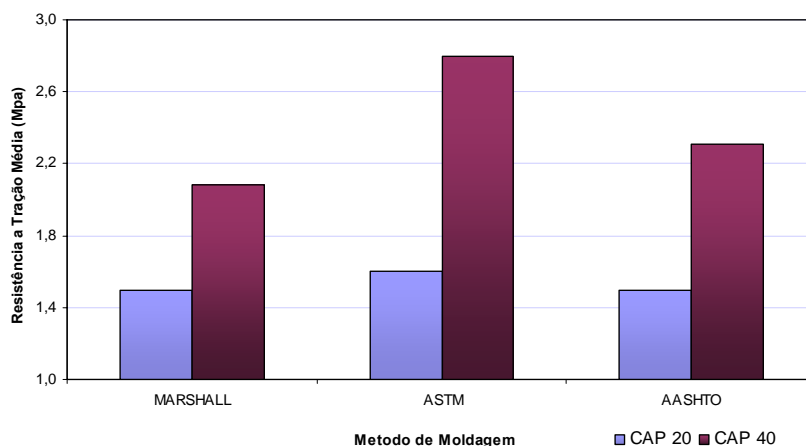


**Figura 4.4:** Influências do tipo de agregado e da cal nos valores de módulo de resiliência das misturas moldadas pelo método da ASTM, com CAP 20

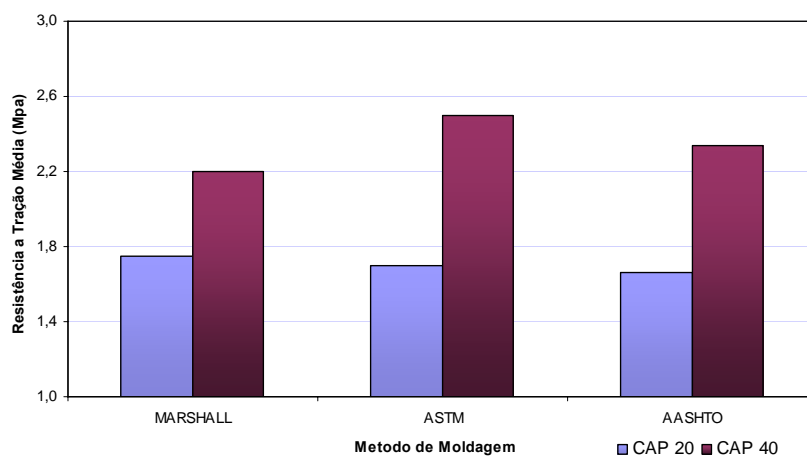
### 4.3 Resistência à Tração

Os ensaios de resistência à tração (RT) foram realizados em três corpos-de-prova de cada grupo, resultando em 54 corpos-de-prova. Para cada grupo de corpos-de-prova, foram selecionado a partir do módulo de resiliência, escolhendo os três corpos-de-prova mais representativos do grupo.

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são apresentados os resultados de RT das misturas de basalto e de granito em função do tipo de ligante e do tipo de moldagem. Nelas se nota uma tendência de resistência à tração mais alta para as misturas moldadas segundo o método da ASTM, como observado para o módulo de resiliência anteriormente.

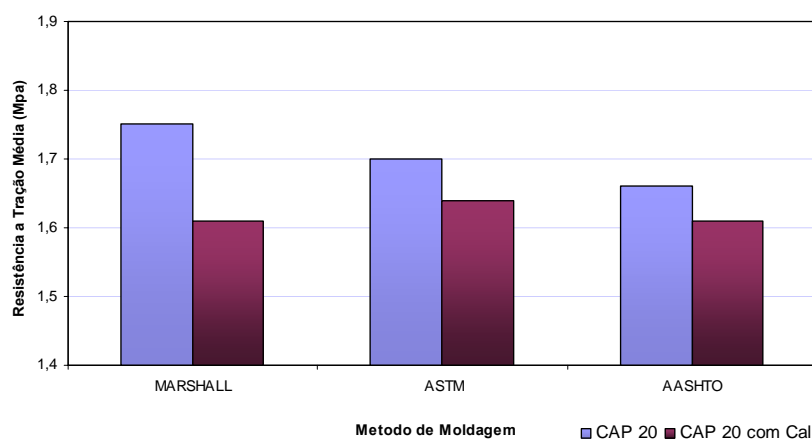


**Figura 4.5:** Variação da resistência à tração das misturas com Basalto em função do tipo de asfalto



**Figura 4.6:** Variação da resistência à tração das misturas com granito em função do tipo de asfalto

Na figura 4.7 são mostrados os resultados de RT das misturas de granito para os três métodos de moldagem com e sem a adição da cal hidratada como material de preenchimento. Nela verifica-se que, ao contrário do que ocorreu com módulo de resiliência, as misturas com cal apresentaram resistências à tração, em média, 4,5% menores que as sem cal (com fileres naturais).

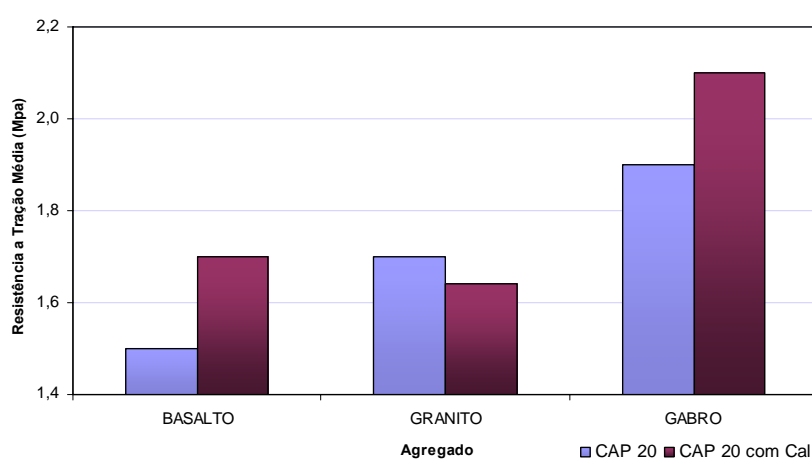


**Figura 4.7:** Variação da resistência à tração das misturas com granito em função do tipo de moldagem e da presença de cal



Na Figura 4.8 são mostrados os resultados de RT das misturas para os três tipos de agregados moldadas segundo o método da ASTM com CAP 20 e com e sem a adição de cal hidratada como material de preenchimento.

Nota-se que somente para o granito a adição da cal hidratada não aumentou a resistência à tração, enquanto que para os outros materiais, como no módulo de resiliência, houve um aumento de aproximadamente 10% na resistência à tração.

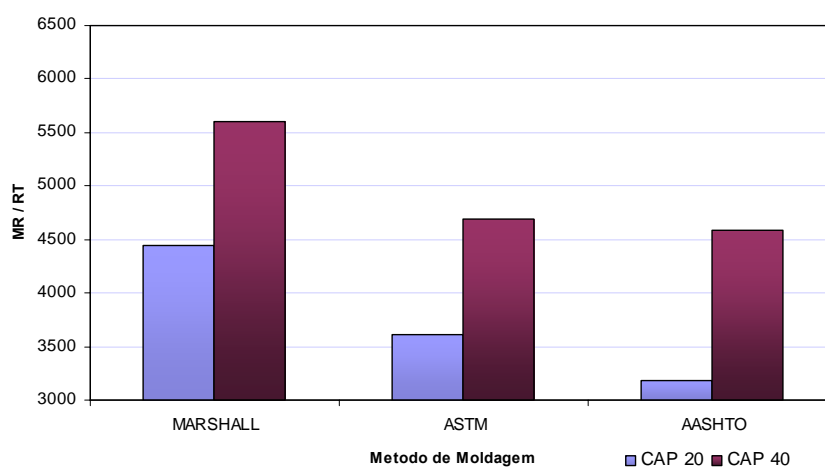


**Figura 4.8:** Variação da resistência à tração das misturas moldadas segundo a ASTM, com CAP 20 e com e sem cal

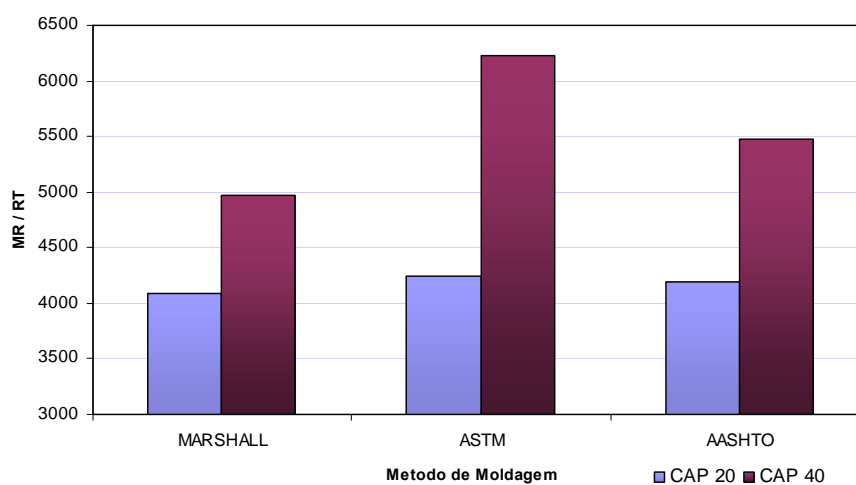
#### 4.4 Relação MR/RT

A relação entre MR/RT tem sido apresentada como um parâmetro de comparação entre as misturas no que diz respeito ao comportamento à fadiga. A relação indica uma tendência de compatibilidade entre a rigidez e a resistência à tração da mistura asfáltica. Misturas muito rígidas, com MR elevado, necessitam de altos valores de RT devido a concentração de esforços no seu interior (MORILHA, 2004). Estudos mostram que valores da ordem de 3000 apresentam um bom comportamento estrutural, sendo flexíveis enquanto possuem boa resistência à tração, apresentando uma maior vida de fadiga (SANTOS, 2005).

Nas Figuras 4.9 e 4.10 são mostradas as relações entre MR / RT das misturas de basalto e granito em função do ligante e do tipo de moldagem. Nota-se que para o basalto, na moldagem pelo método Marshall as relações MR/RT apresentaram-se entre 30% e 50% maiores que as outras, o que não ocorreu nas misturas com granito, onde há uma tendência de valores maiores para a moldagem pelo método da ASTM, principalmente nas com CAP 40. As misturas com CAP 20 se mostraram as mais flexíveis, com valores da relação MR/RT entre 3100 e 4500 para as com basalto e em torno de 4000 para as com granito.

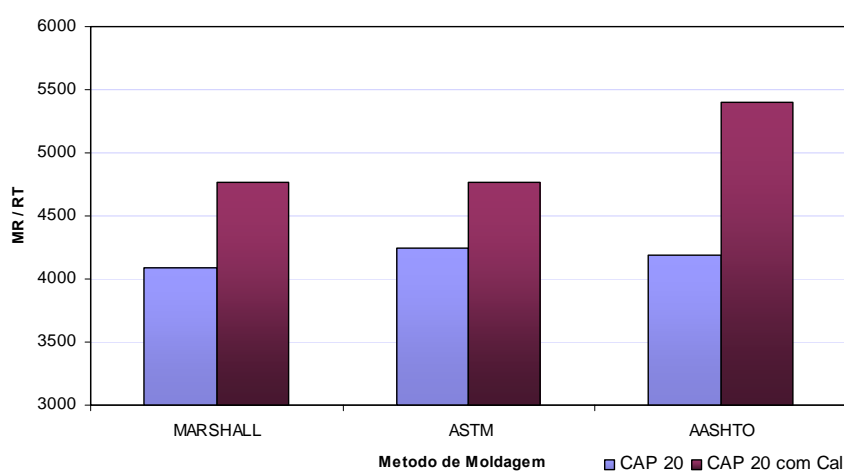


**Figura 4.9:** Variação de MR / RT das misturas de Basalto



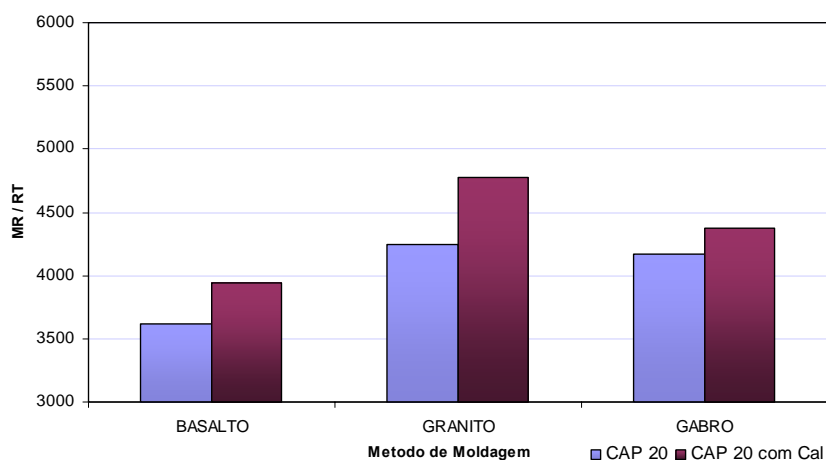
**Figura 4.10:** Variação de MR / RT das misturas de Granito

Na Figura 4.11 são mostrados os resultados das relações MR/RT das misturas de granito pelos três métodos de moldagem com e sem adição da cal hidratada como material de preenchimento. Nela pode-se verificar um maior enrijecimento das misturas com adição do filer cal, com as moldadas pelo método da AASHTO, apresentando os maiores valores (cerca de 30% maiores que os das outras duas).



**Figura 4.11:** Valores de MR / RT para as misturas de Granito com CAP 20, com e sem cal

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados das relações MR/RT das misturas com os três tipos de agregados com CAP 20, pelo método de moldagem da ASTM, com e sem a adição da cal hidratada. Nota-se que o aumento da relação MR/RT devido à presença da cal é aproximadamente igual para os três agregados, sendo que o basalto é o que produziu misturas mais flexíveis, com valores próximos de 3500.



**Figura 4.12:** Valores de MR/RT para as misturas moldadas pela ASTM com CAP 20, com e sem cal

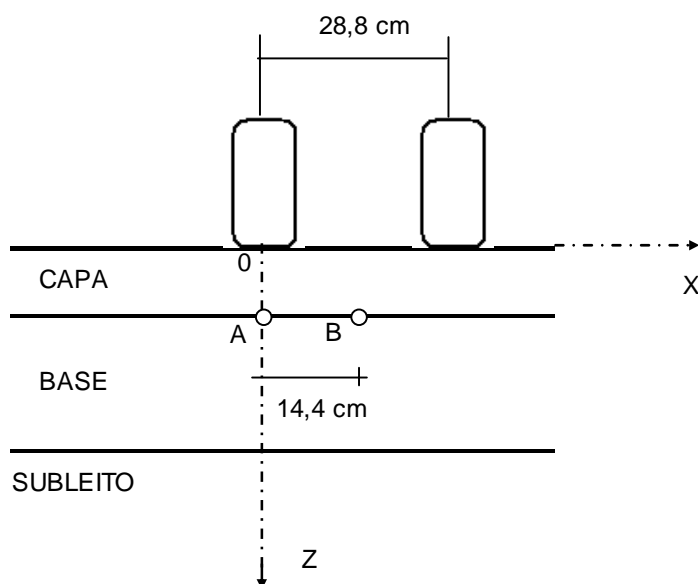
#### 4.5 Fadiga com Tensão Controlada

O modelo de vida de fadiga das misturas foi determinado através do ensaio de compressão diametral com tensão controlada e o critério de ruptura considerado foi quando o deslocamento vertical acumulado no corpo-de-prova ultrapassasse 6 mm. O modelo de vida de fadiga de cada tipo de mistura foi expresso tanto em função da diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) (entre a tensão de tração e de compressão), quanto em função do parâmetro  $\epsilon_i$  (deformação resiliente).

Para analisar a vida de fadiga das misturas, elas foram comparadas sob um mesmo referencial. Com o auxílio do programa ELSYM5 foram realizadas análises mecânicas para avaliar o comportamento das misturas em três tipos de pavimentos, determinando as diferenças de tensões e as deformações resilientes em dois pontos na fibra inferior da camada de revestimento.

A Figura 4.13 representa as características e localização do carregamento do eixo padrão com pressão de inflação dos pneus de  $5,6 \text{ kgf/cm}^2$  aplicada em uma área circular de raio igual a 10,8 cm. Também são representados os pontos onde foram determinadas as tensões e

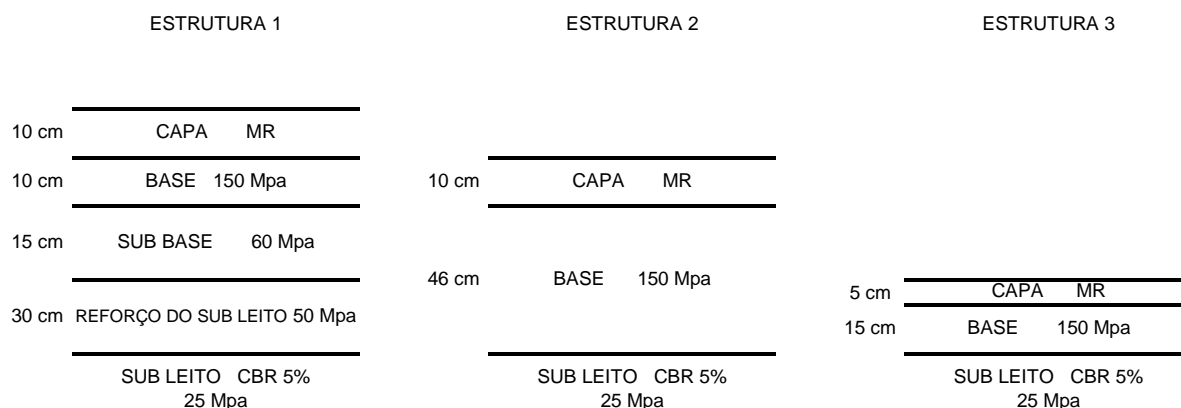
deformações críticas, que se encontram sob o carregamento a esquerda e no centro, entre as duas cargas de 2,05 ton.



**Figura 4.13:** Esquema do carregamento e dos pontos para cálculo das tensões e deformações para análise das vidas de fadiga das misturas

Das três estruturas escolhidas, uma é formada por um pavimento invertido com uma camada rígida de sub-base, a segunda é um pavimento flexível com a base espessa e a terceira é um pavimento com a base delgada onde o subleito é mais solicitado. Para a simulação o coeficiente de Poisson foi arbitrado para as camadas, sendo considerado  $\mu = 0,35$  para a capa asfáltica e  $\mu = 0,45$  para a base, sub-base e subleito.

A Figura 4.14 ilustra as características das estruturas utilizadas na análise das tensões e deformações com o programa ELSYM5.



**Figura 4.14:** Estruturas para análise no programa ELSYM5

#### 4.5.1 Análise da influência do tipo de moldagem no comportamento à fadiga das misturas

Para analisar a influência dos três tipos de moldagem no comportamento à fadiga, foram feitas misturas com granito e com basalto, moldadas com CAP 20 e CAP 40. As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os resultados dos ensaios de fadiga e os modelos de fadiga para as misturas de basalto moldadas com CAP 20, pelos métodos Marshall, ASTM e AASHTO, respectivamente. Em cada tabela são representados dois modelos de fadiga, um em função da diferença de tensões, e outro em função da deformação resiliente calculada.

**Tabela 4.1:** Ensaios de fadiga, basalto com CAP 20, moldagem Marshall

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
98	558	40	7570	8,56	5,28E-05	1037
97	558	40	6236	8,57	6,41E-05	1189
102	419	30	7011	6,62	4,28E-05	3483
101	419	30	6115	6,39	4,91E-05	3549
99	279	20	6973	4,32	2,87E-05	9000
96	279	20	6318	4,27	3,17E-05	10692
95	210	15	6807	2,13	1,47E-05	54040
100	210	15	6329	2,15	1,58E-05	61457
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 7 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,7872}$ $N = 3 \times 10^{13} (1/Ei)^{3,5118}$		

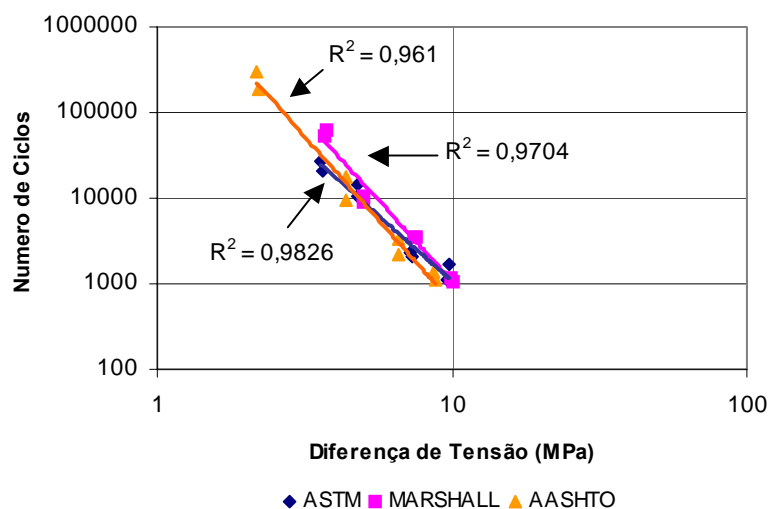
**Tabela 4.2:** Ensaios de fadiga, basalto com CAP 20, moldagem ASTM

<b>BASALTO - ASTM CAP 20</b>						
<b>CP</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>%RT</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_i</math></b>	<b>N</b>
13	623,6	40	6584	9,76	6,08E-05	1679
15	623,6	40	5458	9,58	7,33E-05	1128
14	467,7	30	6291	7,31	4,77E-05	2041
17	467,7	30	5043	7,22	5,95E-05	2300
18	311,8	20	5998	4,78	3,33E-05	14414
16	311,8	20	5998	4,78	3,33E-05	10314
19	234,0	15	5783	2,42	1,73E-05	20784
20	234,0	15	5743	2,40	1,74E-05	26835
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 1 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{3,0717}$		
				$N = 1 \times 10^{-9} (1/ \epsilon_i)^{2,8681}$		

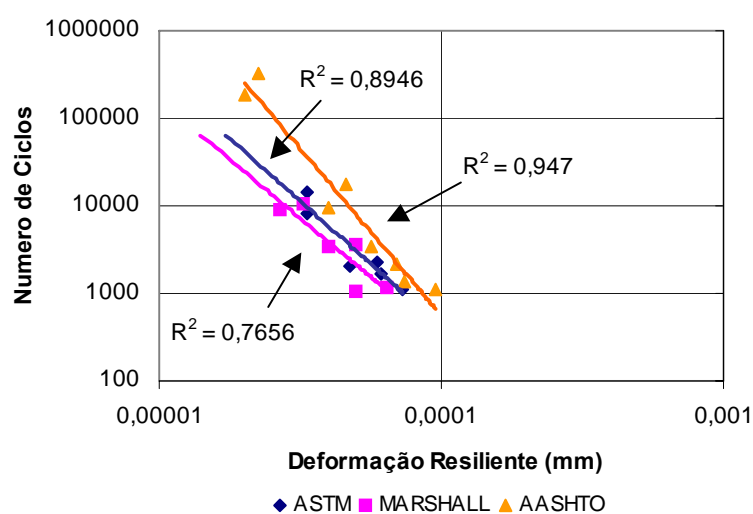
**Tabela 4.3:** Ensaios de fadiga, basalto com CAP 20, moldagem AASHTO

<b>CP</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>%RT</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_i</math></b>	<b>N</b>
128	570	40	5429	8,70	7,37E-05	1348
132	570	40	4193	8,73	9,54E-05	1130
131	428	30	5349	6,54	5,61E-05	3351
130	428	30	4318	6,59	6,95E-05	2137
126	285	20	5047	4,36	3,96E-05	9547
127	285	20	4384	4,36	4,56E-05	17890
129	143	10	4958	2,19	2,02E-05	189041
133	143	10	4443	2,19	2,25E-05	305024
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 3 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{3,6672}$		
				$N = 1 \times 10^{-11} (1/ \epsilon_i)^{3,4539}$		

As Figuras 4.15 e 4.16 ilustram os três modelos de curvas de fadiga do Basalto com CAP 20 para os três diferentes tipos de moldagens, sendo a primeira para a diferença de tensões e a segunda para as deformações resilientes. Também são apresentados nas figuras os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) correspondentes aos ajustes dos modelos de regressão.



**Figura 4.15:** Curvas de fadiga do basalto com CAP 20, em função do tipo de moldagem, para diferenças de tensões



**Figura 4.16:** Curvas de fadiga do basalto com CAP 20, em função do tipo de moldagem, para deformações

A Tabela 4.4 apresenta as estimativas das vidas de fadiga obtidas da simulação dos pavimentos, para o basalto moldado com CAP 20, segundo os três tipos de moldagem. Na apresentação dos resultados da avaliação mecanística, como as três estruturas apresentaram a



mesma tendência para todas as misturas, optou-se por discutir somente os resultados da estrutura com pavimento invertido, por apresentar uma melhor representatividade na análise mecânica (resultados apresentados no Anexo 3). Nas três estruturas, o ponto da maior diferença de tensões foi sob uma das rodas (ponto A) e o de maior deformação foi entre as duas rodas (ponto B).

**Tabela 4.4:** Vidas de fadiga das misturas com basalto e CAP 20

Método de Moldagem	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Vida de Fadiga N ( $\Delta\sigma$ )	Ei	Vida de Fadiga N (Ei)
Marshall	1,43	400000	0,00016	77
ASTM	1,36	660000	0,00015	8
AASHTO	1,26	1300000	0,00018	86

As Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os resultados dos ensaios de fadiga e os modelos de fadiga para as misturas de basalto moldadas com CAP 40, pelos métodos Marshall, ASTM e AASHTO, respectivamente.

**Tabela 4.5:** Ensaios de fadiga, basalto com CAP 40, moldagem Marshall

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
114	794	40	13776	12,44	2,90E-05	1806
116	794	40	10288	12,20	3,89E-05	1841
110	595	30	13338	9,20	2,25E-05	3611
111	595	30	10911	9,35	2,75E-05	4529
117	397	20	11832	6,12	1,69E-05	14989
118	397	20	11335	6,21	1,76E-05	24576
113	198	10	11707	3,10	8,54E-06	173812
119	198	10	11633	3,10	8,60E-06	325024
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 1 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,4779}$		
				$N = 3 \times 10^{-13} (1/Ei)^{3,5118}$		

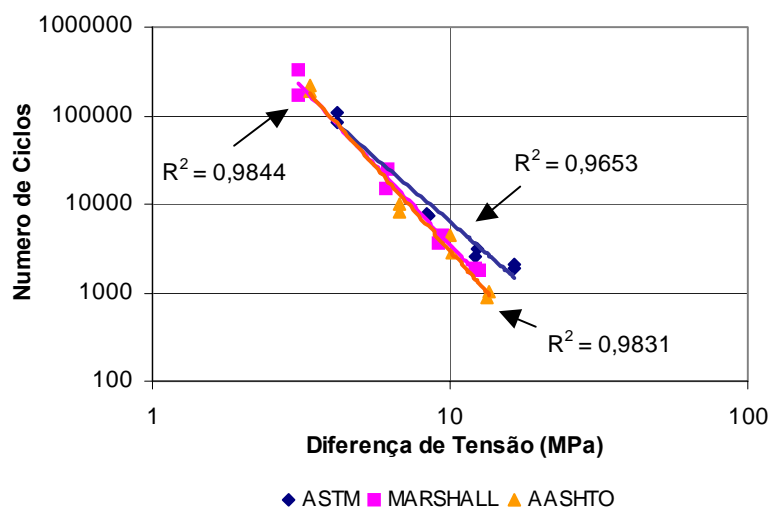
**Tabela 4.6:** Ensaio de fadiga, basalto com CAP 40, moldagem ASTM

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
64	1079	40	15490	16,55	2,58E-05	2090
61	1079	40	11751	16,51	3,40E-05	1900
60	809	30	14418	12,25	2,08E-05	2542
63	809	30	10072	12,36	2,98E-05	3164
59	539	20	13817	8,43	1,45E-05	7400
62	539	20	12214	8,33	1,64E-05	7810
57	270	10	13473	4,18	7,42E-06	81734
58	270	10	13705	4,20	7,30E-06	110111
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 5 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,9125}$		
				$N = 2 \times 10^9 (1/Ei)^{2,6485}$		

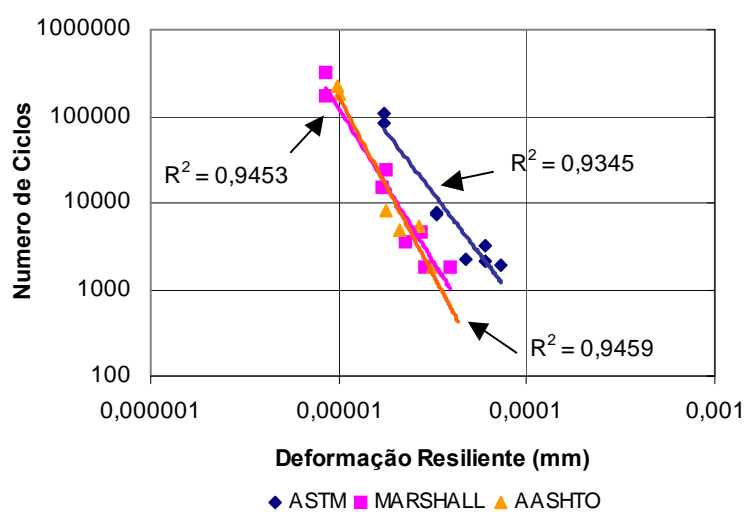
**Tabela 4.7:** Ensaio de fadiga, basalto com CAP 40, moldagem AASHTO

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
147	880	40	11772	13,41	3,40E-05	900
150	880	40	9322	13,58	4,29E-05	1050
144	660	30	11313	10,03	2,65E-05	4444
146	660	30	9556	10,14	3,14E-05	2847
143	440	20	11210	6,78	1,78E-05	8191
149	440	20	9560	6,77	2,09E-05	9873
141	220	10	10136	3,40	9,87E-06	222599
148	220	10	9855	3,38	1,01E-05	184112
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 2 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,7741}$		
				$N = 2 \times 10^{15} (1/Ei)^{3,9704}$		

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os modelos das curvas de fadiga em função das diferenças de tensões e das deformações resilientes para basalto moldado com CAP 40.



**Figura 4.17:** Curvas de fadiga do basalto com CAP 40, em função do tipo de moldagem, para diferenças de tensões



**Figura 4.18:** Curvas de fadiga do basalto com CAP 40, em função do tipo de moldagem, para deformações

A Tabela 4.8 apresenta as estimativas das vidas de fadiga obtidas pelo método mecanístico na simulação do pavimento invertido para as misturas com basalto, moldadas com CAP 40, para os três tipos de moldagem.

**Tabela 4.8:** Vida de Fadiga, basalto com CAP 40

Método de Moldagem	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Vida de Fadiga N ( $\Delta\sigma$ )	Ei	Vida de Fadiga N (Ei)
Marshall	1,82	1245942	0,00011	24
ASTM	1,89	783024	0,0001	79
AASHTO	1,72	2518526	0,00012	7

As tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam os resultados dos ensaios de fadiga e os modelos de fadiga para as misturas de granito moldadas com CAP 20, segundo os métodos de moldagem Marshall, ASTM e AASHTO, respectivamente.

**Tabela 4.9:** Ensaio de fadiga, granito com CAP 20, moldagem Marshall

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
277	699	40	7888	11,93	5,07E-05	993
279	699	40	6001	11,70	6,67E-05	724
281	524	30	7869	8,79	3,81E-05	1342
282	524	30	6284	8,88	4,77E-05	1092
284	349	20	7401	5,94	2,70E-05	5140
B	349	20	7035	5,90	2,84E-05	9008
283	175	10	7153	2,98	1,40E-05	41378
280	175	10	7030	2,93	1,42E-05	47595
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 1 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{2,9969}$		
				$N = 5 \times 10^{-10} (1/ Ei)^{2,8746}$		

**Tabela 4.10:** Ensaio de fadiga, granito com CAP 20, moldagem ASTM

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
169	719	40	7994	12,16	5,00E-05	1245
173	719	40	6370	12,31	6,28E-05	1082
171	539	30	7776	9,21	3,86E-05	2692
170	539	30	6424	9,13	4,67E-05	2912
176	359	20	7655	6,13	2,61E-05	5198
175	359	20	7081	6,15	2,82E-05	5163
172	180	10	7297	3,07	1,37E-05	77443
174	180	10	7143	3,05	1,40E-05	53164
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 1 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{2,7428}$		
				$N = 6 \times 10^{-9} (1/ Ei)^{2,6464}$		

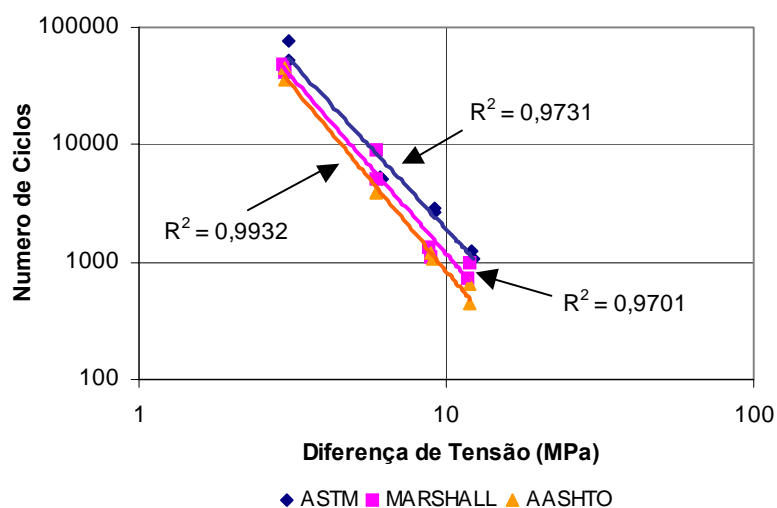
**Tabela 4.11:** Ensaio de fadiga, granito com CAP 20, moldagem AASHTO

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
323	702	40	9213	11,88	4,34E-05	644
318	702	40	5898	11,94	6,78E-05	439
316	527	30	8058	8,91	3,72E-05	1198
319	527	30	5647	8,99	5,31E-05	1064
322	351	20	7527	5,93	2,66E-05	3888
321	351	20	6158	5,94	3,25E-05	3882
320	176	10	7319	2,98	1,37E-05	44855
317	176	10	7189	3,00	1,39E-05	35681

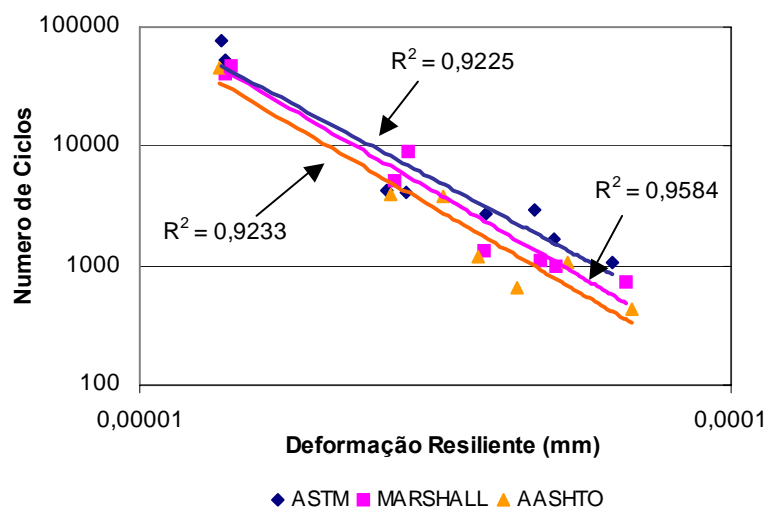
  

Modelos de Fadiga	
	$N = 3 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,3659}$
	$N = 5 \times 10^{10} (1/Ei)^{2,8746}$

As Figuras 4.19 e 4.20 representam os modelos de curvas de fadiga em função das diferenças de tensões e de deformações resilientes para o Granito moldado com CAP 20.



**Figura 4.19:** Curvas de fadiga do granito com CAP 20, em função do tipo de moldagem, para diferenças de tensões



**Figura 4.20:** Curvas de fadiga do granito com CAP 20, em função do tipo de moldagem, para deformações

A Tabela 4.12 apresenta as estimativas das vidas de fadiga obtidas pelo método mecanístico para a simulação do pavimento invertido para as misturas com granito moldado com CAP 20, para os três tipos de moldagem.

**Tabela 4.12:** Vidas de fadiga das misturas com granito e CAP 20

Método de Moldagem	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Vida de Fadiga N ( $\Delta\sigma$ )	Ei	Vida de Fadiga N (Ei)
Marshall	1,47	315186	0,00014	60
ASTM	1,49	334954	0,00014	95
AASHTO	1,48	801747	0,00014	60

As Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam os resultados dos ensaios de fadiga e os modelos de fadiga para as misturas de granito moldadas com CAP 40, segundo os métodos de moldagem Marshall, ASTM e AASHTO, respectivamente.

**Tabela 4.13:** Ensaio de fadiga, granito com CAP 40, moldagem Marshall

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
303	935	40	12491	16,28	3,20E-05	866
300	935	40	9661	15,97	4,14E-05	1194
299	701	30	12375	12,02	2,42E-05	2534
308	701	30	10617	12,00	2,83E-05	2498
304	467	20	11879	8,07	1,68E-05	7399
301	467	20	10976	8,01	1,82E-05	8588
309	234	10	11752	4,02	8,51E-06	60268
305	234	10	11463	3,99	8,72E-06	57495
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 3 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{2,9056}$		
				$N = 4 \times 10^{-10} (1/ E_i)^{2,7982}$		

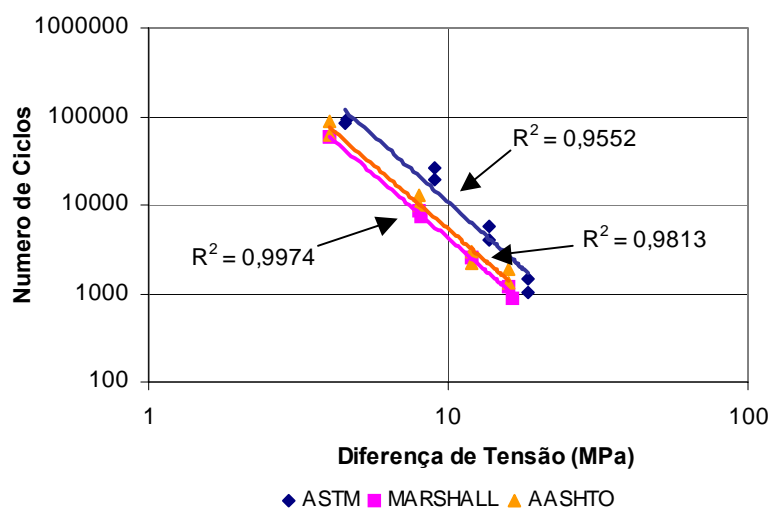
**Tabela 4.14:** Ensaio de fadiga, granito com CAP 40, moldagem ASTM

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
236	1064	40	17797	18,46	2,25E-05	1474
235	1064	40	13177	18,40	3,04E-05	1041
239	798	30	17186	13,62	1,75E-05	4035
233	798	30	14123	13,71	2,12E-05	5679
238	532	20	16564	9,04	1,21E-05	25759
240	532	20	14756	9,07	1,36E-05	24730
234	266	10	15795	4,58	6,33E-06	94717
237	266	10	15110	4,53	6,62E-06	83640
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 1 \times 10^7 (1/ \Delta\sigma)^{3,4186}$		
				$N = 3 \times 10^{-5} (1/ E_i)^{1,8308}$		

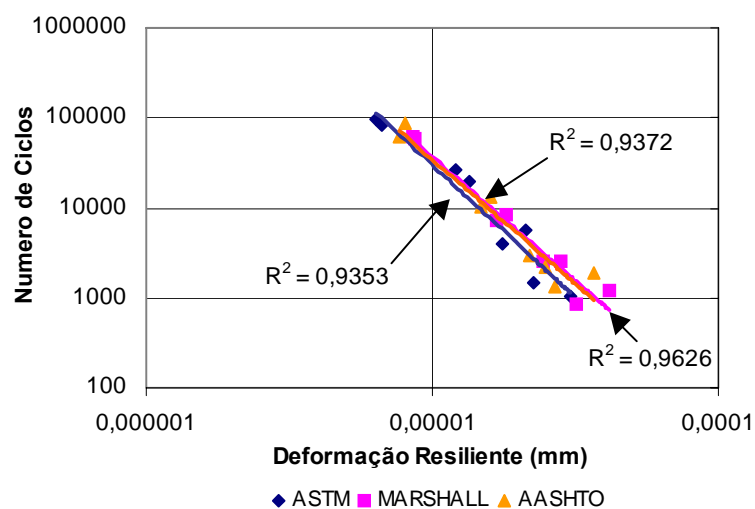
**Tabela 4.15:** Ensaio de fadiga, granito com CAP 40, moldagem AASHTO

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
345	936	40	14895	15,95	2,69E-05	1300
344	936	40	10822	15,95	3,70E-05	1850
343	702	30	13705	11,97	2,19E-05	2934
342	702	30	12182	11,96	2,46E-05	2210
341	468	20	13434	8,00	1,49E-05	10175
347	468	20	12453	7,95	1,61E-05	13093
348	234	10	13111	4,01	7,63E-06	61704
346	234	10	12519	4,00	7,99E-06	87745
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 4 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{2,8849}$		
				$N = 3 \times 10^{-11} (1/ E_i)^{3,0186}$		

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam as curvas de fadiga em função das diferenças de tensões e de deformações resilientes para as misturas com granito moldadas com CAP 40.



**Figura 4.21:** Curvas de fadiga do granito com CAP 40, em função do tipo de moldagem, para diferenças de tensões



**Figura 4.22:** Curvas de fadiga do granito com CAP 40, em função do tipo de moldagem, para deformações



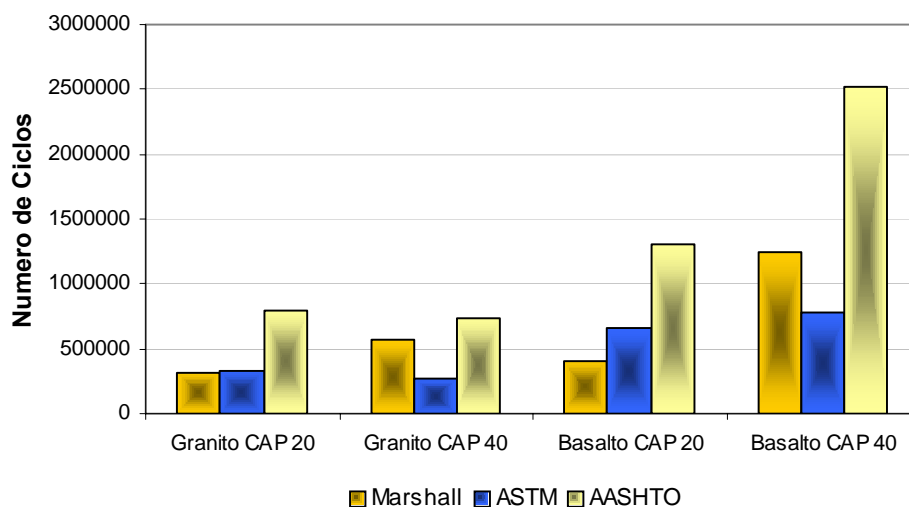
A Tabela 4.16 apresenta a estimativa da vida de fadiga obtida da aplicação do método mecanístico para a simulação do pavimento invertido para o agregado de basalto moldado com CAP 40, segundo os três tipos de moldagem.

**Tabela 4.16:** Vidas de fadiga para as misturas de granito com CAP 40

Método de Moldagem	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Vida de Fadiga N ( $\Delta\sigma$ )	Ei	Vida de Fadiga N (Ei)
Marshall	1,79	563904	0,00011	48
ASTM	2,03	273375	0,000093	721
AASHTO	1,88	735993	0,0001	36

Com os resultados obtidos da avaliação pelo método mecanístico foi elaborada a Figura 4.23, que apresenta as estimativas de vidas de fadiga obtidas nas simulações do pavimento invertido para as misturas de basalto e granito moldadas com CAP 20 e CAP 40, segundo os três tipos de moldagem.

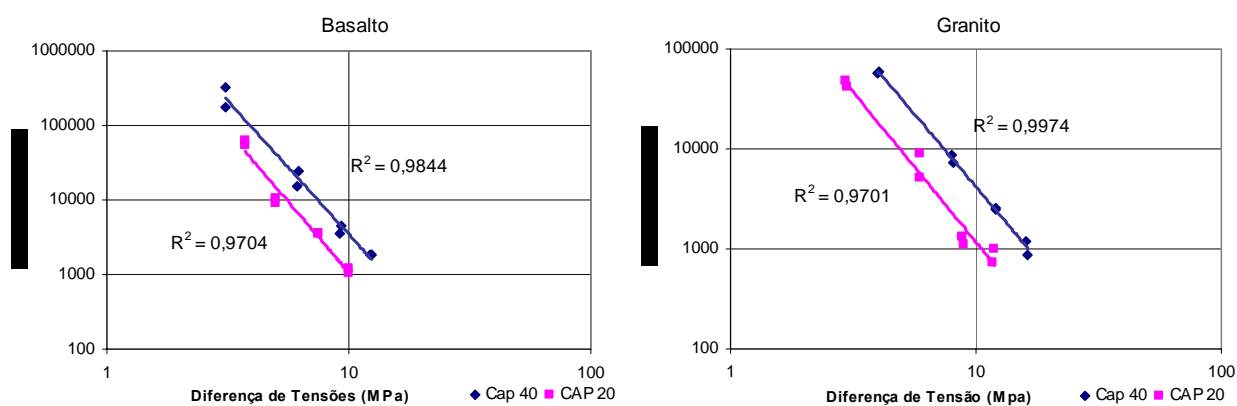
Nota-se que a moldagem pelo método da AASHTO leva a vidas de fadiga maiores que os outros métodos de moldagem, para os quatro tipos de misturas. Já as moldagens Marshall apresentam desempenhos melhores que as ASTM para as misturas com CAP 40 enquanto que as ASTM apresentam desempenhos melhores que as Marshall para as misturas com CAP 20.



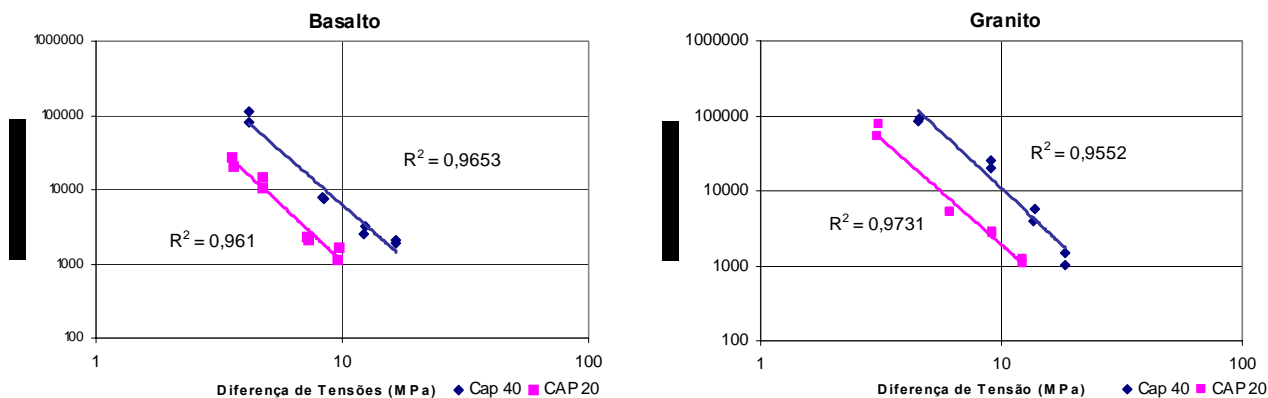
**Figura 4.23:** Desempenhos à fadiga das misturas de granito e basalto segundo o método de moldagem e o tipo de asfalto

#### 4.5.2 Análise do efeito da variação do tipo de ligante no comportamento das misturas

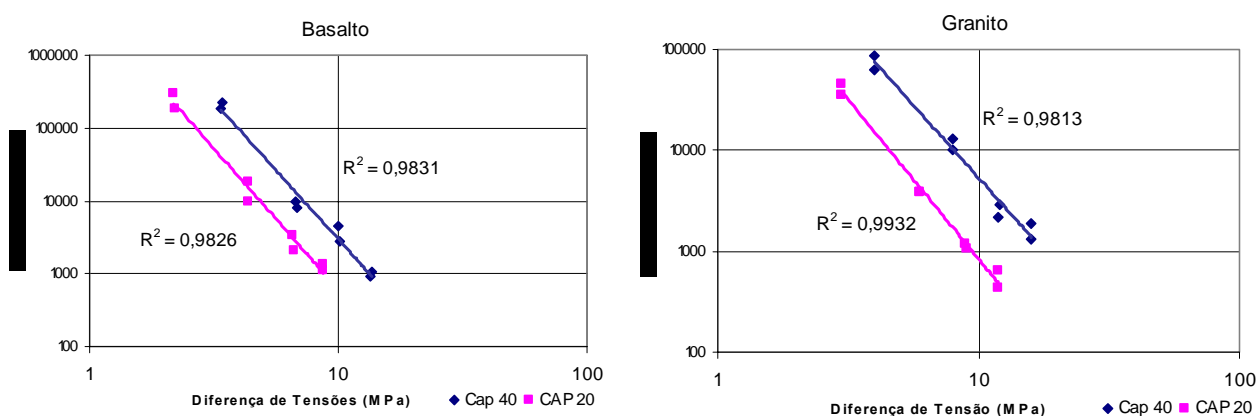
Para a análise do efeito do tipo de ligante no comportamento à fadiga, foram moldados corpos-de-prova de basalto e granito para os três tipos de moldagens. Os modelos de fadiga obtidos dos ensaios dos corpos-de-prova são apresentados nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26, segundo as diferenças de tensões (MPa) e o número de ciclos.



**Figura 4.24:** Curvas de fadiga obtidas para a moldagem Marshall em função do tipo de asfalto



**Figura 4.25:** Curvas de fadiga obtidas para a moldagem ASTM em função do tipo de asfalto



**Figura 4.26:** Curvas de fadiga obtidas para a moldagem AASHTO em função do tipo de asfalto

A partir dos resultados obtidos da análise mecânica, efetuada para os modelos de fadiga apresentados anteriormente, foram elaboradas as Tabelas 4.17, 4.18, 4.19 e a Figura 4.27, que apresentam as estimativas de vidas de fadiga para o pavimento invertido utilizando como revestimento as misturas de basalto e granito moldados com CAP 20 e CAP 40 segundo os três tipos de moldagem.

Analisando-se os resultados para as vidas de fadiga obtidas para as diferenças de tensões nota-se que para a moldagem pelo método Marshall, tanto o granito quanto o basalto apresentaram vidas de fadiga maiores quando utilizado o CAP 40. Para as misturas moldadas

pelos métodos ASTM e AASHTO, o basalto apresentou o mesmo desempenho, sendo mais resistente à fadiga quando usado o CAP 40, enquanto que o granito apresentou-se mais resistente para as misturas com CAP 20.

**Tabela 4.17:** Vida de fadiga para moldagem Marshall

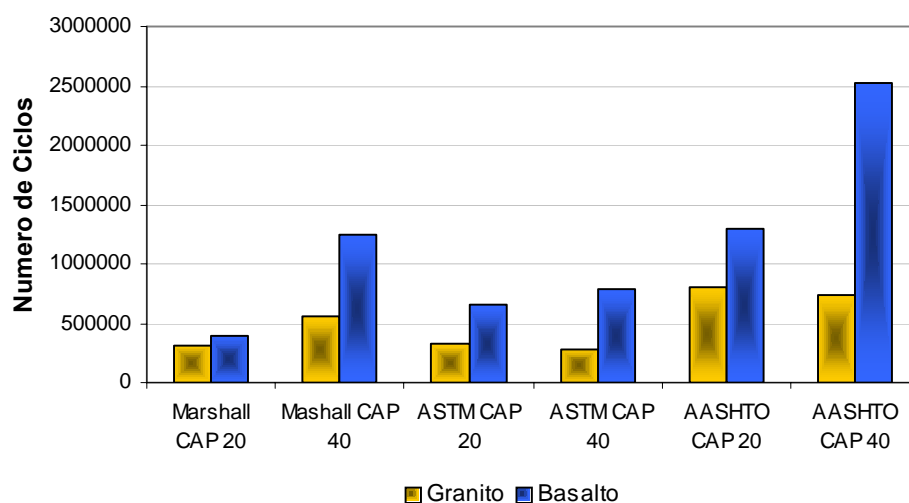
<b>Agregado / Ligante</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> (Mpa)</b>	<b>Vida de Fadiga N (<math>\Delta\sigma</math>)</b>	<b>Ei</b>	<b>Vida de Fadiga N (Ei)</b>
Granito CAP 20	1,47	315186	0,00014	60
Basalto CAP 20	1,43	400000	0,00016	77
Granito CAP 40	1,79	563904	0,00011	48
Basalto CAP 40	1,82	1245942	0,00011	24

**Tabela 4.18:** Vida de fadiga para moldagem ASTM

<b>Agregado / Ligante</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> (Mpa)</b>	<b>Vida de Fadiga N (<math>\Delta\sigma</math>)</b>	<b>Ei</b>	<b>Vida de Fadiga N (Ei)</b>
Granito CAP 20	1,49	334954	0,00014	95
Basalto CAP 20	1,36	660000	0,00015	8
Granito CAP 40	2,03	273375	0,000093	721
Basalto CAP 40	1,89	783024	0,0001	79

**Tabela 4.19:** Vida de fadiga para moldagem AASHTO

<b>Agregado / Ligante</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> (Mpa)</b>	<b>Vida de Fadiga N (<math>\Delta\sigma</math>)</b>	<b>Ei</b>	<b>Vida de Fadiga N (Ei)</b>
Granito CAP 20	1,48	801747	0,00014	60
Basalto CAP 20	1,26	1300000	0,00018	86
Granito CAP 40	1,88	735993	0,0001	36
Basalto CAP 40	1,72	2518526	0,00012	7



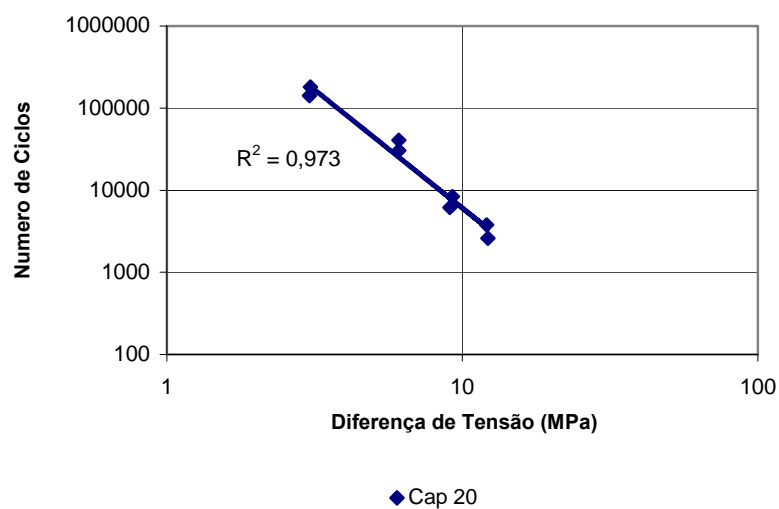
**Figura 4.27:** Desempenho a fadiga das misturas com CAP 20 e CAP 40

### 4.5.3 Análise da variação do tipo de agregado no comportamento das misturas

Para avaliar a influência do tipo de agregado no comportamento à fadiga, foram moldados corpos-de-prova de basalto e granito segundo os três métodos de moldagens, com CAP 20 e CAP 40. Também para essa parte da pesquisa, foram moldados corpos-de-prova de gabro com CAP 20 segundo o método de moldagem da ASTM, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.17; o modelo de vida de fadiga para diferença de tensões ilustrado na Figura 4.28 e a vida de fadiga obtida da simulação com o programa ELSYM5 para o pavimento invertido mostrada na Tabela 4.21.

**Tabela 4.20:** Ensaio de fadiga, gabro com CAP 20, moldagem ASTM

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
422	759	40	8353	12,10	4,79E-05	3766
415	759	40	7014	12,21	5,70E-05	2591
423	569	30	8263	9,25	3,63E-05	8385
419	569	30	7367	9,08	4,07E-05	6138
420	379	20	8078	6,09	2,48E-05	40546
418	379	20	7658	6,09	2,61E-05	30425
421	190	10	7849	3,06	1,27E-05	180943
417	190	10	7610	3,04	1,31E-05	141977
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 5 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{2,8819}$		
				$N = 2 \times 10^{-14} (1/ E_i)^{3,9714}$		

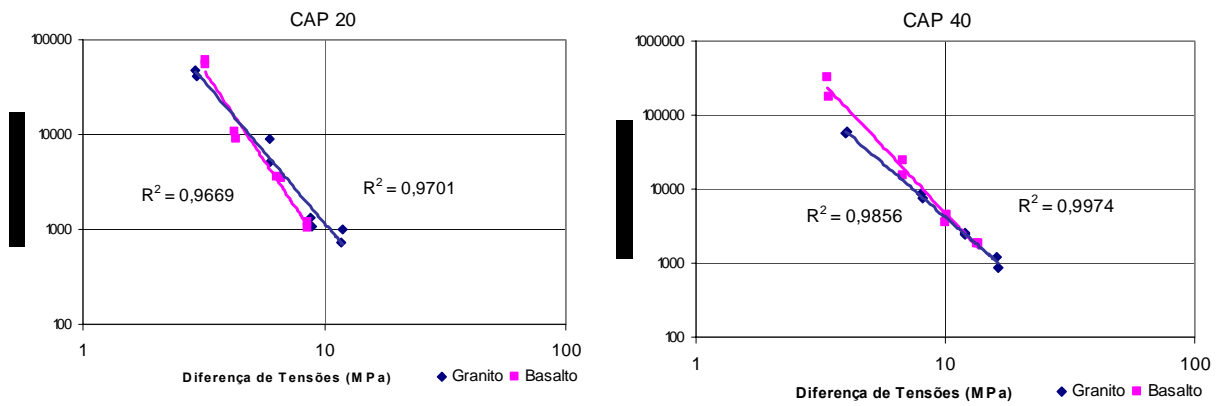


**Figura 4.28:** Curva de fadiga da mistura com gabro e CAP 20, para a moldagem ASTM

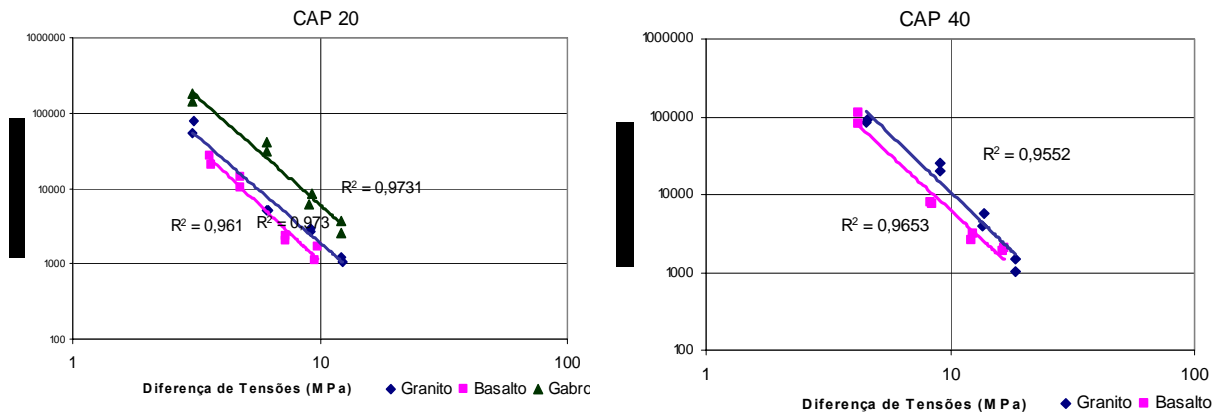
**Tabela 4.21:** Vida de fadiga do Gabro com CAP 20 para moldagem ASTM

Agregado	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Vida de Fadiga N ( $\Delta\sigma$ )	Ei	Vida de Fadiga N (Ei)
Gabro	1,53	8982715	0,00014	40

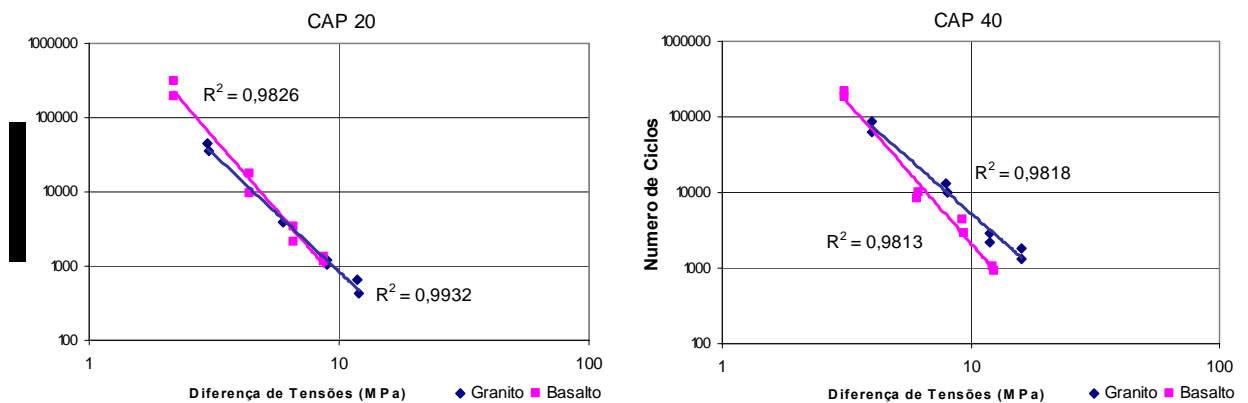
As Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 apresentam a influência do tipo de agregado nos modelos de fadiga das misturas moldadas com os dois tipos de ligante segundo os três tipos de moldagem, para diferenças de tensões. Para o método de moldagem da ASTM com CAP 20 também foi avaliada a influência do gabro como agregado. Os gráficos estão apresentados em função da Diferença de Tensão (MPa) e o numero de ciclos.



**Figura 4.29:** Curvas de fadiga para a moldagem Marshall

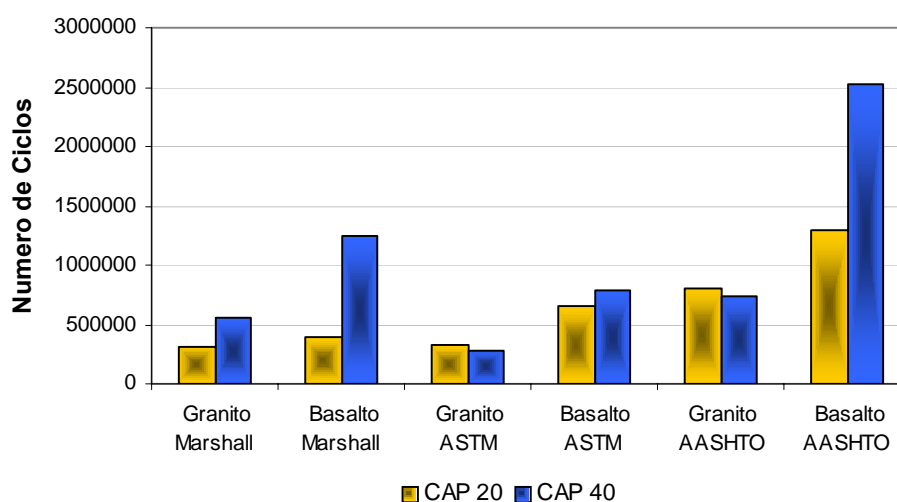


**Figura 4.30:** Curvas de fadiga para a moldagem ASTM



**Figura 4.31:** Curvas de fadiga para a moldagem AASHTO

A partir dos resultados obtidos da análise mecânica, efetuada para os modelos de fadiga apresentados anteriormente, foi elaborada a Figura 4.32, que apresenta as estimativas de vidas de fadiga obtidas das simulações do pavimento invertido para as misturas de basalto e granito moldados com CAP 20 e CAP 40, segundo os três métodos de moldagem. Nota-se que o desempenho das misturas com basalto é superior às com granítico, principalmente para as misturas com CAP 40. Outro ponto interessante é o desempenho da mistura de gábro com CAP 20, que apresentou uma vida de fadiga 13 vezes maior que a do basalto, mas para evitar distorções na escala não foi representada na Figura 4.32.



**Figura 4.32:** Desempenho à fadiga das misturas com granito e basalto

#### 4.5.4 Análise do efeito da adição de cal hidratada no comportamento das misturas

Para se fazer uma avaliação da influência do filler cal hidratada no desempenho à fadiga das misturas, todos os corpos-de-prova foram moldados com CAP 20, sendo que para analisar a influência no tipo de moldagem foram realizados ensaios com granito segundo os três métodos de moldagens. Também foi testado o efeito dos diferentes tipos de agregados, sendo realizado uma moldagem pelo método da ASTM para os três tipos de agregados. Nas Tabelas 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 e 4.26 estão as vidas de fadiga e outras características de interesse dos corpos-de-prova moldados com a adição de cal.



**Tabela 4.22:** Ensaio de fadiga, granito com cal e CAP 20, moldagem Marshall

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
291	684	40	7993	11,69	5,00E-05	950
295	684	40	6328	11,70	6,32E-05	961
292	513	30	7830	8,78	3,83E-05	2448
293	513	30	6337	8,71	4,73E-05	2373
297	342	20	7337	5,84	2,73E-05	8637
296	342	20	6371	5,85	3,14E-05	8622
298	171	10	7053	2,92	1,42E-05	59538
294	171	10	6926	2,89	1,44E-05	45901
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 1 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{2,8679}$		
				$N = 1 \times 10^9 (1/ E_i)^{2,8354}$		

**Tabela 4.23:** Ensaio de fadiga, granito com cal e CAP 20, moldagem ASTM

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
195	692	40	9713	11,69	4,12E-05	2157
191	692	40	6705	11,71	5,97E-05	2207
193	519	30	8816	8,90	3,40E-05	7221
189	519	30	6313	8,84	4,75E-05	3518
194	346	20	7907	5,85	2,53E-05	23362
190	346	20	6836	5,87	2,93E-05	10028
192	173	10	7603	2,94	1,32E-05	103615
196	173	10	7172	2,92	1,39E-05	352250
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 6 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{3,2221}$		
				$N = 3 \times 10^{11} (1/ E_i)^{3,2454}$		

**Tabela 4.24:** Ensaio de fadiga, granito com cal e CAP 20, moldagem AASHTO

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
334	682	40	9583	11,61	4,17E-05	857
337	682	40	7504	11,59	5,33E-05	966
331	512	30	9296	8,68	3,23E-05	1867
330	512	30	7570	8,77	3,96E-05	1592
332	341	20	9108	5,82	2,20E-05	7254
D	341	20	8011	5,79	2,50E-05	5351
335	171	10	8527	2,89	1,17E-05	94484
336	171	10	8173	2,89	1,22E-05	87745
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 3 \times 10^6 (1/ \Delta\sigma)^{3,3659}$		
				$N = 3 \times 10^{10} (1/ E_i)^{2,8915}$		

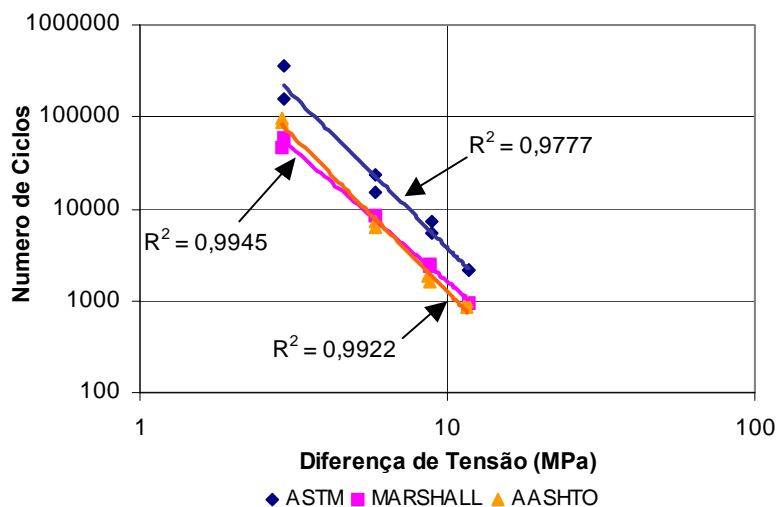
**Tabela 4.25:** Ensaio de fadiga, basalto com cal e CAP 20, moldagem ASTM

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
435	649	40	8083	10,06	4,95E-05	1466
439	649	40	6214	9,99	6,44E-05	1310
438	487	30	7591	7,50	3,95E-05	1871
434	487	30	6007	7,46	4,99E-05	2559
441	325	20	7480	4,99	2,67E-05	35270
436	325	20	6131	5,02	3,26E-05	29142
437	243	15	7163	2,48	1,40E-05	123694
440	243	15	7097	2,49	1,41E-05	106832
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 6 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{4,7782}$		
				$N = 1 \times 10^{17} (1/Ei)^{4,6822}$		

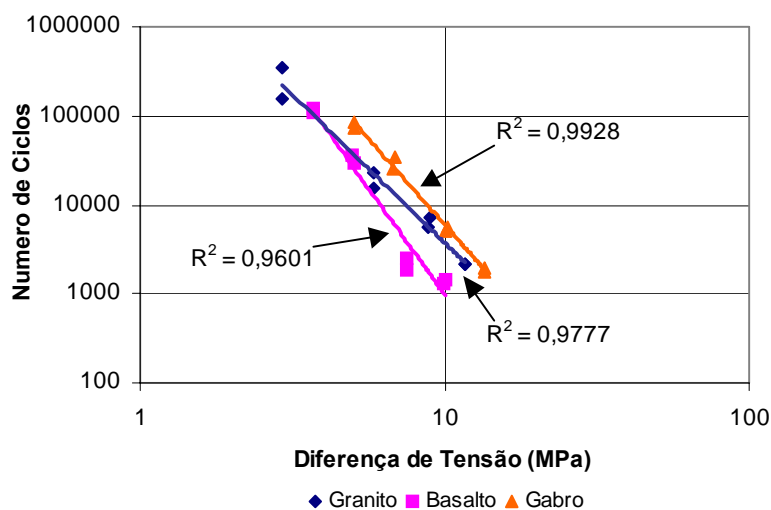
**Tabela 4.26:** Ensaio de fadiga, gabro com cal e CAP 20, moldagem ASTM

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
429	846	40	9946	13,54	4,02E-05	1901
427	846	40	8724	13,61	4,59E-05	1770
426	634	30	9633	10,15	3,11E-05	5613
430	634	30	8952	10,09	3,35E-05	5139
428	423	20	9392	6,82	2,13E-05	25949
425	423	20	9042	6,84	2,21E-05	34625
424	316	15	9403	3,37	1,06E-05	83459
431	316	15	9339	3,37	1,07E-05	72396
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 4 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,8549}$		
				$N = 3 \times 10^{17} (1/Ei)^{4,5027}$		

As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam as influências dos tipos de agregados nos modelos de fadiga das misturas moldadas com os dois tipos de ligante segundo os três tipos de moldagem. Para a moldagem tipo ASTM com CAP 20 também foi avaliada a influência do uso da cal com o agregado gabro.



**Figura 4.33:** Curvas de fadiga do granito com cal e CAP 20



**Figura 4.34:** Curvas de fadiga para o método de moldagem ASTM, com cal e CAP 20

A partir dos resultados obtidos da análise mecânica, efetuada para os modelos de fadiga apresentados anteriormente, foi elaborada a Tabela 4.27, que apresenta a estimativa de vida de fadiga obtida da simulação do pavimento invertido para as misturas de granito com CAP 20 segundo os três tipos de moldagens. Também foi elaborada a Tabela 4.28, que apresenta a simulação para os três tipos de agregados com CAP 20, moldados pelo método da ASTM. A Figura 4.28 apresenta a comparação entre as vidas de fadiga para diferenças de tensões, para as misturas com o filer do próprio material e com a adição de cal.

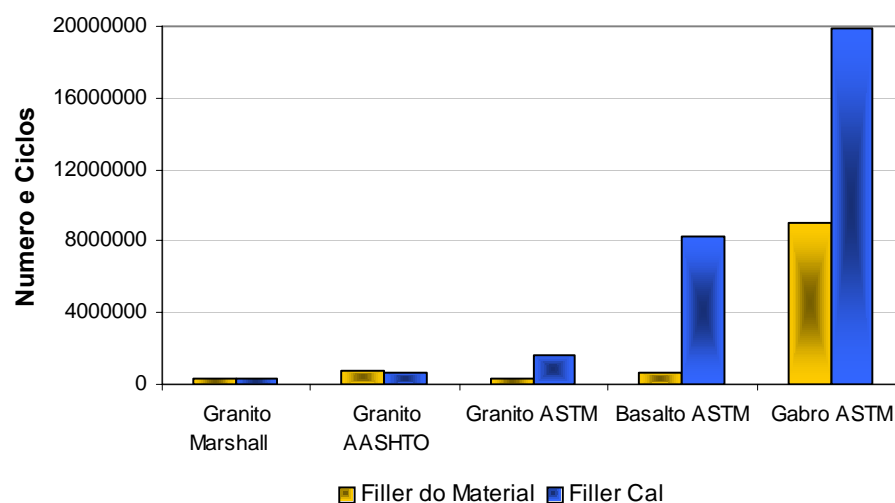
**Tabela 4.27:** Vida de fadiga do Granito com e sem adição de cal

Metodo de Moldagem	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Vida de Fadiga N ( $\Delta\sigma$ )	Ei	Vida de Fadiga N (Ei)
Marshall	1,47	315186	0,00014	60
Marshall com Cal	1,47	331246	0,00014	85
ASTM	1,49	334954	0,00014	95
ASTM com Cal	1,51	1590265	0,00014	96
AASHTO	1,48	801747	0,00014	60
AASHTO com Cal	1,59	629852	0,00013	52

**Tabela 4.28:** Vida de fadiga dos agregados com e sem adição de cal

Agregado	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Vida de Fadiga N ( $\Delta\sigma$ )	Ei	Vida de Fadiga N (Ei)
Granito	1,49	334954	0,00014	95
Granito com Cal	1,51	1590265	0,00014	96
Basalto	1,36	660000	0,00015	8
Basalto com Cal	1,46	8225358	0,00015	8
Gabro	1,53	8982715	0,00014	40
Gabro com Cal	1,64	19862389	0,00013	9

Nota-se que o desempenho dos materiais graníticos moldados pelos métodos Marshall e AASHTO apresentam uma estimativa de vida de fadiga um pouco maior para as misturas sem a adição de cal, enquanto que para as misturas moldadas pelo método da ASTM o desempenho com adição de cal foi muito superior.



**Figura 4.35:** Desempenho a fadiga das misturas com adição de cal hidratada

Observando-se os resultados apresentados nas tabelas e figuras anteriores nota-se que o desempenho dos materiais graníticos moldados pelos métodos Marshall e AASHTO apresentaram uma estimativa de vida de fadiga um pouco maior para as misturas sem a adição de cal, enquanto que para as misturas moldadas pelo método da ASTM o desempenho com adição de cal foi muito superior.

## Capítulo 5 – Conclusões e recomendações

---

### 5.1 Conclusões

O objetivo principal desse trabalho foi analisar a influência de alguns fatores (tipo de agregado, tipo de asfalto, método de moldagem e o material de preenchimento) na vida de fadiga de misturas asfálticas à luz do ensaio de compressão diametral com tensão controlada. Para avaliação do comportamento mecânico, foram realizados os ensaios de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR).

Para a análise da vida de fadiga das misturas foram utilizadas as equações provenientes do cálculo das diferenças de tensões, pois as equações provenientes das deformações específicas não foram adequadas para a avaliação da mistura, devido à má representatividade na análise mecanística. O que pode ser justificado pelo fato do parâmetro depender diretamente dos resultados de módulo de resiliência, que apresentaram resultados dispersos.

A partir dos resultados apresentados nesta dissertação pode-se concluir:

⇒ Quanto à resistência à tração (RT), se for considerado que maiores valores de RT são desejáveis, as misturas com CAP 40 apresentaram melhor desempenho que as misturas com CAP 20, sendo que as misturas moldadas pelo método da ASTM apresentaram, para os dois tipos de ligante, melhor desempenho que as moldadas pelos métodos Marshall e AASHTO. Analisando a influência do tipo de agregado, os materiais gábricos apresentaram um desempenho melhor, seguido dos materiais graníticos e basálticos. Quanto à adição de cal, para os materiais graníticos, as misturas moldadas com cal pelos métodos Marshall e AASHTO apresentaram melhor desempenho que as misturas sem a adição de cal, enquanto que as moldadas pela ASTM apresentaram melhor desempenho para as misturas sem a adição de cal. Diferentemente do que ocorreu para o granito, as

misturas com gábre e basalto apresentaram desempenhos melhores com a adição de cal para o método de moldagem da ASTM;

- ⇒ Quanto ao Módulo de Resiliência (MR), as misturas feitas com CAP 40 apresentaram enrijecimento maior que as com CAP 20, em torno de 50% maiores (para a moldagem ASTM, o valor foi 100% maior). À semelhança do que ocorreu com os resultados dos ensaios de Resistência a Tração (RT), as misturas moldadas pelo método da ASTM apresentam uma tendência de serem mais rígidas, com valores de MR mais altos. Avaliando a influência do tipo de agregado, as misturas gábricas apresentaram os módulos de resiliência mais altos, seguidas pelas com materiais graníticos e basálticos. Quanto à adição da cal, as misturas sofreram um enrijecimento, apresentando módulos de resiliência 11% mais altos, em média, que os das misturas sem adição da cal;
- ⇒ Na pesquisa, a maioria das misturas apresentaram módulos de resiliência elevados, fazendo com que a relação MR/RT ficasse na faixa de 3000 a 5500, um pouco distante do valor de 3000 que, segundo a literatura, seria um valor indicativo de bom desempenho à fadiga (LEITE *et al.*, 2000). Verificando os valores das relações MR/RT obtidos, notou-se uma dispersão muito grande com relação aos resultados de análise da vida de fadiga obtida através do ensaio de compressão diametral cíclico. Na grande maioria dos casos, as misturas com relação MR/RT maiores que 4000 apresentaram melhor desempenho à fadiga do que as misturas com MR/RT próximos a 3000, portanto é um índice que dificilmente pode ser utilizado para avaliar o comportamento de uma mistura a fadiga.
- ⇒ Analisando-se a vida de fadiga em função da diferença de tensões e do tipo de moldagem, notou-se uma superioridade das misturas moldadas pelo método da AASHTO, que apresentaram ganhos médios de 150% em relação às outras misturas. Avaliando somente as moldagens Marshall e ASTM, notou-se que elas apresentaram resultados diferentes para os dois tipos de ligantes; para o CAP 20 as misturas moldadas pelo método da ASTM apresentaram resultados até 50% melhores que as moldadas pelo método Marshall, enquanto que para o CAP 40 o resultado se inverte, as misturas moldadas pelo

método Marshall apresentam resultados até 100% melhores do que as misturas moldadas pelo método da ASTM;

- ⇒ Analisando-se a vida de fadiga em função da diferença de tensões e do tipo de agregado, notou-se uma superioridade dos agregados gábricos, apresentando um desempenho até 13 vezes melhor que as com basalto, o que pode ser justificado pela diferença de forma entre os agregados, já que os materiais gábricos apresentam formas cúbicas, enquanto que os basálticos e graníticos são lamelares. Dentre os materiais mais comumente utilizados (basalto e granito), as misturas com basalto apresentaram desempenho melhor para todos os tipos de moldagem e ligantes, com valores, em média, 100% melhores que os materiais graníticos. Isso pode ser eventualmente justificado pela baixa qualidade da adesividade desenvolvida entre o ligante e os materiais graníticos.
- ⇒ Analisando-se a vida de fadiga em função da diferença de tensões e do tipo de ligante, notou-se que todas as misturas de basalto apresentaram melhor desempenho para o CAP 40 (independentemente do método de moldagem). As misturas de granito apresentaram melhor desempenho para o CAP 40 somente para a moldagem pelo método Marshall, enquanto que as moldagens pelos métodos ASTM e AASHTO apresentaram valores, em média, 15% maiores para as misturas com CAP 20.
- ⇒ Analisando-se a vida de fadiga em função da diferença de tensões e da influência da cal hidratada, notou-se que somente as misturas graníticas moldadas pelo método da ASTM apresentaram resultados inferiores de vida de fadiga quando da substituição do fíler pela cal. As misturas graníticas moldadas pelos métodos Marshall e AASHTO e as misturas basálticas e gábricas moldadas pelos três métodos apresentaram resultados melhores quando da utilização da cal, chegando a apresentar desempenho 2,2 vezes maior para as gábricas e de até 12 vezes para as basálticas, ambas moldadas pelo método da ASTM. Talvez essa melhora no desempenho das misturas com adição de cal nas misturas possa ser justificada pela melhora da adesividade do agregado ao ligante, tornando a mistura mais rígida e resistente.



Outro ponto importante a se destacar na pesquisa foi com relação ao critério de ruptura dos corpos-de-prova. O critério adotado para essa pesquisa foi de 6 mm de deslocamento acumulado no ensaio de compressão diametral. A grande maioria dos corpos-de-prova rompeu com um deslocamento acumulado entre 2 e 4 mm, sendo observado também que para as cargas mais altas os corpos-de-prova rompiam com deslocamentos acumulados maiores que para as cargas mais baixas.

Finalizando, os modelos de fadiga apresentados nesse trabalho foram feitos à luz dos ensaios laboratoriais de compressão diametral, portanto não devem ser utilizados para a previsão da vida de fadiga dessas misturas em serviço devido à falta de fatores de ajuste laboratório/campo.

## 5.2 **Recomendações para Trabalhos Futuros**

- ⇒ A realização de um estudo para propor a normalização do valor do deslocamento acumulado que define a ruptura do corpo-de-prova, uma vez que a adoção de diferentes valores de deslocamento acumulado leva a diferentes valores de vidas de fadiga. Vale lembrar que nesta pesquisa foi adotada ruptura quando o acúmulo de deslocamento vertical do corpo-de-prova fosse maior que 6 mm, mas notou-se que a grande maioria dos ensaios chegavam à ruptura com 2 a 4 mm de deslocamento acumulado;

## Referências Bibliográficas

---

**American Association of State Highway Transportation Officials (1999). AASHTO T 283. Standard Method of Test Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage**, Washington, DC.

**American Society for Testing and Materials (1992). ASTM D 4867. Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures**, Philadelphia.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT (1993). NBR 12891/93. Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall**. Rio de Janeiro, RJ.

ALBUQUERQUE A.P.F., PINTO S., VIEIRA A., VENORINI L.A., LOPES L.A.S., 2004. “Influência da energia de Compactação e da Temperatura de Moldagem nas Propriedades Mecânicas de Corpos-de-Prova de Concreto Asfáltico”. **In: 35º Reunião anual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ.

AMARAL S.C., 2004, “**Estudo de Mistura Laterita-Asfalto da Região Metropolitana de Belém-PA para Revestimentos de Pavimento**”. Tese (doutorado), Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil.

BEZERRA NETO, R. S. (2004) “**Análise Comparativa de Pavimentos Dimensionados Através dos Métodos Empíricos do DNER e Mecânico e Proposta de um Catálogo Simplificado de Pavimentos Para a Região de Campo Grande (MS)**”. Dissertação (Mestrado). EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil.

BROWN E. R., KANDHAL P. S., ZHANG J., 2001, “Performance Testing for Hot Mix Asphalt”. **In: National Center for Asphalt Technology, 2001.**

CAPITÃO S.D., SANTOS L.P., 2004, “Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade Utilizadas em Portugal”. **In: XIII Panamericam Conference of Traffic na Transportation Engineering, 2004.**

CAVALCANTE V.T.F., SOARES J.B., 2001, “Efeito do Tipo e do Teor de Fíler nas Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas“. **In: 33º Reunião Anual de Pavimentação.** Florianópolis, Santa Catarina

CARPENTER, S. H., GHUZLAN K. A., SHEN S., 2003, “Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements“. **In: Transportation Research Record, 2003.**

CERATTI J. A. e OLIVEIRA J. A., 1993, “Equipamento Simulador de Tráfego Desenvolvido pelo DAER/RS e UFRGS“. **In: 27ª Reunião Anual de Pavimentação.** Teresina, Piauí.

CORREIA V. F., 2001, “Órgãos de Maquinas – M27 ”. **Texto de Apoio da Disciplina Engenharia de Maquinas Marítimas, da Escola Náutica Infante Dom Henrique.**

DNER (1994a). Método de ensaio DNER-ME 138/94. “**Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNER (1994b). Método de ensaio DNER-ME 133/94. “**Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência**”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

FROTA C. A., ALENCAR C. L. S., SILVA C. P. L., 2004. “Influência do Tipo de Agregado na Qualidade Técnica de Misturas Asfálticas”. **In: 35º Reunião anual de Pavimentação.** Rio de Janeiro, RJ.

FURLAN A. P., 2006, **“Considerações Acerca da Adesão e da Suscetibilidade Térmica à Umidade de Misturas Asfálticas Densas à Luz de Algumas Propriedades Mecânicas”**. Tese (doutorado), EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil.

GORNI A. A., 2003, “Calculo da Profundidade de Retificação de Cilindros de Encosto em Laminadores de Produtos Planos”. **REM, Rem Escola de Minas. Ouro Preto, 2003.**

GRECO J. A. S., 2004, **“Avaliação da Influência de alguns Fatores nas Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Densas. À Luz da Técnica de Planejamento e Análise de Experimentos Fatoriais Fracionários Assimétricos”**. Tese (doutorado), EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil.

HARVEY J.T., DEACON J.A., TSAI B.W., MONISMITH C.L., 1995. “Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and Its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California”. **In: Asphalt Research Program, Berkeley, California, USA.**

KHATTAK M. J. e BALADI G. Y., 2001. “Fatigue and Permanent Deformation Models for Polymer-Modified Asphalt Mixtures“. **In: Transportation Research Record, 2001.**

KIM Y.R., KIM N., KHOSLA P., 1992. “Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and Permanent Deformation of Asphalt Concrete”. **In: ASTM STP 1147**

KIM Y. R., LITTLE D. N., SONG I., 2003, “Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics“. **In: Transportation Research Record, 2003.**

LOUREIRO T. G., 2004, **“Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas”**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

MAGALHÃES S. T., 2004 **“Misturas Asfálticas de Modulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho“**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEDINA J. , 1997, “**Mecânica dos pavimentos**”. 1º edição, 380p, Rio de Janeiro, Editora da UFRJ.

MOMM L., 2001, “Fadiga à Deformação Controlada em Modo Contínuo do Concreto Asfáltico “. **In: 33º Reunião anual de Pavimentação**. Florianópolis, Santa Catarina.

MOMM L., 2004, “Abordagem da Fadiga dos Concretos Asfálticos”. **In: 35º Reunião anual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ.

MONISMITH, C. L., DEACON, J.A., CRAUS, J., TANGELA, S.C.S.R. (1990). “Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures”. Prepared for Strategic Highway Research Program, Project A-003-A. **In: Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, USA.**

MONESTRUQUE G. E. e RODRIGUES, R.M., 1995, “Fadiga de revestimentos asfálticos com Camada Intermediária de Geotêxtil”. In: **29ª Reunião Anual de Pavimentação**. Cuiabá, Mato Grosso.

MORILHA A. J. (2004) “**Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**“. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil.

MOTTA L. M. G., MEDINA J., SOUZA A. M., 2002, “Características de Fadiga e Resiliência de Concretos Asfálticos Brasileiros”. **In: 16ª Encontro de Asfalto**. Rio de Janeiro.

MOURA, E. (2001) “**Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas**”. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo / Escola Politécnica. São Paulo, SP, Brasil.

MOURA E., BERNUCCI L. B., CERATTI J.A. P., CHAVES J. M., 2001, “Estudo do Efeito da Adição de Melhoradores de Adesividade em Concretos Asfálticos“. **In: 33º Reunião Anual de Pavimentação**. Florianópolis, Santa Catarina.

MOURÃO, F. A. L. (2003) “**Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA**“. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PINTO S. (1991) “**Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural dos Pavimentos**“. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RAAD L., SABOUNDJIAN S., MINASSIAN G., 2001, “Field aging Effects on Fatigue of Asphalt Concret and Asphalt Rubber Concrete“. **In: Transportation Research Record, 2001**.

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

SEVERI A. A., BALBO J. T., RODOLFO M. P., SESTINI V. M., PRIETO V. “Verificação a Fadiga de Revestimentos Asfálticos e Bases Cimentadas”, **In: 3º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, Belém, 1999**.

SOARES, J.B., MOTTA L.M.G., PAIVA J.A., BRANCO J.V.C., 2000, “Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com variação de Granulometria e de CAP”, **In: 15º Encontro de Asfalto – IBP**.

SOUSA J.B., FONSECA P. FREIRE A., PAIS J., 2000, “Comparação da Vida de Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Boracha Reciclada de Pneus Convencionais”, **In: Congresso Ibero Latino-americano de Asfalto, Sevilla, Espanha**.

TAIRA C. (2001). **“Avaliação do Desempenho em Laboratório de Misturas Asfálticas Densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX 65/60)”**. Dissertação (Mestrado), EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil

TONIAL I.A., MOTTA L.M.G., MEDINA J., SOUSA A.M., 2001 “Características de Fadiga e Resiliência de Concretos Asfálticos Brasileiros”. **In: 33º Reunião Anual de Pavimentação**. Florianópolis, Santa Catarina.

WESSELING D. H., SPECHT L. P., CERATTI J. P., 2003, “Estudo Laboratorial do Comportamento de misturas em Concreto Asfáltico com Diferentes Tipos de Fíleres“. **In: 34º Reunião Anual de Pavimentação**. Campinas, São Paulo.

## ANEXO 1

### CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA

---

⇒ Nesta seção são apresentadas as tabelas referentes às características dos corpos-de-prova utilizados para os ensaios de fadiga a tensão controlada moldados através dos métodos Marshall, ASTM e AASHTO.



## CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA

Condição	CP	VV (%)	Teor CAP	H (cm)	D (cm)	MR (Mpa)	RT (Mpa)
BASALTO ASTM CAP 20	13	3,76	5,5	6,13	10,15	6584	1,6
	14	4,07		6,02	10,16	6291	
	15	4,03		6,13	10,16	5458	
	16	4,03		6,05	10,16	5374	
	17	4,06		6,00	10,16	5043	
	18	3,79		6,00	10,16	5998	
	19	3,79		6,07	10,16	5783	
	20	3,91		6,02	10,16	5743	
BASALTO ASTM CAP 40	57	3,84	5,5	6,01	10,16	13473	2,8
	58	3,92		5,99	10,17	13705	
	59	3,85		5,92	10,18	13817	
	60	3,72		5,98	10,17	14418	
	61	3,96		6,10	10,19	11751	
	62	3,84		6,04	10,17	12214	
	63	3,80		6,07	10,16	10072	
	64	4,04		6,10	10,17	15490	
BASALTO ASTM CAP 20 COM CAL	434	4,10	5,5	6,07	10,16	6007	1,7
	435	3,91		6,02	10,17	8083	
	436	3,99		6,03	10,17	6131	
	437	3,91		6,00	10,16	7163	
	438	3,87		6,02	10,17	7591	
	439	4,14		6,06	10,16	6214	
	440	4,03		5,99	10,16	7097	
	441	4,03		6,01	10,15	7480	
BASALTO MARSHALL CAP 20	95	3,90	5,5	6,00	10,17	6807	1,5
	96	4,03		6,01	10,17	6318	
	97	3,90		6,2	10,16	6236	
	98	4,03		5,98	10,16	7570	
	99	3,83		6,06	10,16	6973	
	100	4,02		6,00	10,16	6329	
	101	3,85		5,98	10,16	6115	
	102	3,83		6,03	10,16	7011	
BASALTO MARSHALL CAP 40	109	3,96	5,5	6,14	10,16	9759	2,08
	110	3,79		6,02	10,16	13338	
	111	3,88		6,05	10,17	10911	
	112	4,00		6,15	10,16	13846	
	113	3,92		6,04	10,16	11707	
	114	4,00		6,12	10,17	13776	
	115	3,84		6,12	10,17	9775	
	116	4,03		6,12	10,16	10288	
BASALTO AASHTO CAP 20	126	3,87	5,5	5,98	10,15	5047	1,5
	127	3,83		6,00	10,15	4384	
	128	3,98		5,99	10,15	5429	
	129	3,82		6,03	10,17	4958	
	130	4,02		5,99	10,16	4318	
	131	3,90		6,00	10,15	5349	
	132	3,98		6,02	10,16	4193	
	133	3,98		6,00	10,17	4443	

**CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA**

<b>Condição</b>	<b>CP</b>	<b>VV (%)</b>	<b>Teor CAP</b>	<b>H (cm)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>MR (Mpa)</b>	<b>RT (Mpa)</b>
BASALTO AASHTO CAP 40	140	3,80	5,5	5,98	10,14	9094	2,3
	141	3,96		6,05	10,15	10136	
	142	3,92		5,95	10,16	12075	
	143	3,84		6,01	10,17	11210	
	144	3,88		6,04	10,16	11313	
	145	3,96		6,03	10,15	12708	
	146	3,84		6,04	10,17	9556	
	147	3,80		6,01	10,16	11772	
GRANITO ASTM CAP 20	169	3,92	5,5	6,62	10,17	7994	1,7
	170	3,97		6,69	10,19	6424	
	171	3,81		6,68	10,18	7776	
	172	4,15		6,63	10,17	7297	
	173	4,15		6,67	10,18	6370	
	174	4,10		6,70	10,16	7143	
	175	4,16		6,69	10,17	7081	
	176	4,05		6,64	10,18	7655	
GRANITO ASTM CAP 20 COM CAL	189	4,04	5,5	6,60	10,19	6313	1,64
	190	4,23		6,62	10,18	6836	
	191	4,12		6,72	10,16	6705	
	192	4,20		6,67	10,17	7603	
	193	3,96		6,62	10,17	8816	
	194	3,84		6,64	10,18	7907	
	195	4,41		6,66	10,17	9713	
	196	3,81		6,60	10,18	7172	
GRANITO ASTM CAP 40	233	4,20	5,5	6,79	10,17	14123	2,5
	234	3,97		6,77	10,17	15795	
	235	4,09		6,69	10,16	13177	
	236	4,02		6,72	10,18	17797	
	237	3,89		6,65	10,17	15110	
	238	3,89		6,66	10,19	16564	
	239	4,20		6,74	10,17	17186	
	240	4,17		6,66	10,17	14756	
GRANITO MARSHALL CAP 20	277	4,20	5,5	6,68	10,17	7888	1,75
	279	4,09		6,54	10,19	6001	
	280	4,02		6,55	10,19	7030	
	281	3,89		6,63	10,17	7869	
	282	3,89		6,65	10,17	6284	
	283	4,20		6,61	10,17	7153	
	284	4,17		6,68	10,16	7401	
	B	3,95		6,56	10,17	7035	
GRANITO MARSHALL CAP 20 COM CAL	291	4,36	5,5	6,68	10,18	7993	1,6
	292	4,05		6,69	10,17	7830	
	293	3,87		6,69	10,17	6337	
	294	3,90		6,63	10,19	6926	
	295	4,15		6,69	10,16	6328	
	296	4,28		6,68	10,18	6371	
	297	4,05		6,67	10,18	7337	
	298	4,08		6,62	10,17	7053	

**CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA**

Condição	CP	VV (%)	Teor CAP	H (cm)	D (cm)	MR (Mpa)	RT (Mpa)
GRANITO MARSHALL CAP 40	299	4,27	5,5	6,82	10,16	12375	2,2
	300	4,41		6,69	10,16	9661	
	301	4,30		6,70	10,18	10976	
	303	3,94		6,70	10,17	12491	
	304	4,10		6,75	10,18	11879	
	305	4,23		6,70	10,18	11463	
	308	4,35		6,72	10,18	10617	
	309	4,41		6,68	10,18	11752	
GRANITO AASHTO CAP 20	316	4,23	5,5	6,61	10,19	8058	1,66
	317	4,45		6,65	10,18	7189	
	318	4,27		6,61	10,19	5898	
	319	3,84		6,68	10,17	5647	
	320	4,17		6,61	10,18	7319	
	321	3,99		6,63	10,16	6158	
	322	4,13		6,63	10,18	7527	
	323	3,91		6,70	10,16	9213	
GRANITO AASHTO CAP 20 COM CAL	330	3,88	5,5	6,66	10,17	7570	1,61
	331	3,94		6,64	10,18	9296	
	332	4,07		6,64	10,16	9108	
	334	3,97		6,72	10,15	9583	
	335	4,09		6,68	10,16	8527	
	336	3,84		6,65	10,16	8173	
	337	3,99		6,64	10,17	7504	
	D	3,95		6,62	10,17	8011	
GRANITO AASHTO CAP 40	341	4,27	5,5	6,66	10,18	13434	2,34
	342	4,33		6,66	10,18	12182	
	343	4,33		6,67	10,17	13705	
	344	4,35		6,66	10,18	10822	
	345	4,35		6,69	10,17	14895	
	346	4,43		6,64	10,18	12519	
	347	4,33		6,70	10,18	12453	
	348	4,43		6,68	10,19	13111	
GABRO ASTM CAP 20	415	4,15	5,5	6,25	10,15	7014	1,9
	417	4,01		6,29	10,18	7610	
	418	4,10		6,36	10,17	7658	
	419	4,11		6,24	10,17	7367	
	420	4,00		6,29	10,16	8078	
	421	4,15		6,28	10,18	7849	
	422	4,12		6,31	10,17	8353	
	423	4,16		6,27	10,17	8263	
GABRO CAP 20 CAL	424	4,11	5,5	6,27	10,16	9403	2,1
	425	4,42		6,30	10,17	9042	
	426	4,30		6,27	10,16	9633	
	427	4,26		6,23	10,16	8724	
	428	4,27		6,31	10,17	9392	
	429	4,19		6,34	10,15	9946	
	430	3,99		6,24	10,16	8952	
	431	4,07		6,23	10,17	9339	

## ANEXO 2

### ENSAIOS DE FADIGA

---

⇒ Nesta seção são apresentadas as tabelas referentes aos resultados dos ensaios de fadiga a deformação controlada dos corpos-de-prova utilizados nessa pesquisa.

**BASALTO - ASTM CAP 20**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
13	623,6	40	6583,80	9,76	6,08E-05	1679
15	623,6	40	5457,70	9,58	7,33E-05	1128
14	467,7	30	6291,30	7,31	4,77E-05	2041
17	467,7	30	5043,30	7,22	5,95E-05	2300
18	311,8	20	5997,50	4,78	3,33E-05	14414
16	311,8	20	5997,50	4,78	3,33E-05	10314
19	234,0	15	5782,90	2,42	1,73E-05	20784
20	234,0	15	5743,40	2,40	1,74E-05	26835

**Modelos de Fadiga**

$$N = 1 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,0717}$$

$$N = 1 \times 10^9 (1/E_i)^{2,8681}$$

**BASALTO - ASTM CAP 40**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
64	1079	40	15490	16,55	2,58E-05	2090
61	1079	40	11751	16,51	3,40E-05	1900
60	809	30	14418	12,25	2,08E-05	2542
63	809	30	10072	12,36	2,98E-05	3164
59	539	20	13817	8,43	1,45E-05	7400
62	539	20	12214	8,33	1,64E-05	7810
57	270	10	13473	4,18	7,42E-06	81734
58	270	10	13705	4,20	7,30E-06	110111

**Modelos de Fadiga**

$$N = 5 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,9125}$$

$$N = 2 \times 10^9 (1/E_i)^{2,6485}$$

**BASALTO - MARSHALL CAP 40**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
114	794	40	13776	12,44	2,90E-05	1806
116	794	40	10288	12,20	3,89E-05	1841
110	595	30	13338	9,20	2,25E-05	3611
111	595	30	10911	9,35	2,75E-05	4529
117	397	20	11832	6,12	1,69E-05	14989
118	397	20	11335	6,21	1,76E-05	24576
113	198	10	11707	3,10	8,54E-06	173812
119	198	10	11633	3,10	8,60E-06	325024

**Modelos de Fadiga**

$$N = 1 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,4779}$$

$$N = 3 \times 10^{13} (1/E_i)^{3,5118}$$

**BASALTO - ASTM CAP 20 com Cal**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
435	649	40	8083	10,06	4,95E-05	1466
439	649	40	6214	9,99	6,44E-05	1310
438	487	30	7591	7,50	3,95E-05	1871
434	487	30	6007	7,46	4,99E-05	2559
441	325	20	7480	4,99	2,67E-05	35270
436	325	20	6131	5,02	3,26E-05	29142
437	243	15	7163	2,48	1,40E-05	123694
440	243	15	7097	2,49	1,41E-05	106832
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 6 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{4,7782}$		
				$N = 1 \times 10^{-17} (1/Ei)^{4,6822}$		

**BASALTO - MARSHALL CAP 20**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
98	558	40	7570	8,56	5,28E-05	1037
97	558	40	6236	8,57	6,41E-05	1189
102	419	30	7011	6,62	4,28E-05	3483
101	419	30	6115	6,39	4,91E-05	3549
99	279	20	6973	4,32	2,87E-05	9000
96	279	20	6318	4,27	3,17E-05	10692
95	210	15	6807	2,13	1,47E-05	54040
100	210	15	6329	2,15	1,58E-05	61457
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 7 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,7872}$		
				$N = 3 \times 10^{-13} (1/Ei)^{3,5118}$		

**BASALTO - AASHTO CAP 40**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
147	880	40	11772	13,41	3,40E-05	900
150	880	40	9322	13,58	4,29E-05	1050
144	660	30	11313	10,03	2,65E-05	4444
146	660	30	9556	10,14	3,14E-05	2847
143	440	20	11210	6,78	1,78E-05	8191
149	440	20	9560	6,77	2,09E-05	9873
141	220	10	10136	3,40	9,87E-06	222599
148	220	10	9855	3,38	1,01E-05	184112
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 2 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,7741}$		
				$N = 2 \times 10^{-15} (1/Ei)^{3,9704}$		

**BASALTO - AASHTO CAP 20**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
128	570	40	5429	8,70	7,37E-05	1348
132	570	40	4193	8,73	9,54E-05	1130
131	428	30	5349	6,54	5,61E-05	3351
130	428	30	4318	6,59	6,95E-05	2137
126	285	20	5047	4,36	3,96E-05	9547
127	285	20	4384	4,36	4,56E-05	17890
129	143	10	4958	2,19	2,02E-05	189041
133	143	10	4443	2,19	2,25E-05	305024

**Modelos de Fadiga**

$$N = 3 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,6672}$$

$$N = 1 \times 10^{-11} (1/Ei)^{3,4539}$$

**GRANITO - ASTM CAP 40**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
236	1064	40	17797	18,46	2,25E-05	1474
235	1064	40	13177	18,40	3,04E-05	1041
239	798	30	17186	13,62	1,75E-05	4035
233	798	30	14123	13,71	2,12E-05	5679
238	532	20	16564	9,04	1,21E-05	25759
240	532	20	14756	9,07	1,36E-05	24730
234	266	10	15795	4,58	6,33E-06	94717
237	266	10	15110	4,53	6,62E-06	83640

**Modelos de Fadiga**

$$N = 1 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,4186}$$

$$N = 3 \times 10^{-5} (1/Ei)^{1,8308}$$

**GRANITO - MARSHALL CAP 20**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
277	699	40	7888	11,93	5,07E-05	993
279	699	40	6001	11,70	6,67E-05	724
281	524	30	7869	8,79	3,81E-05	1342
282	524	30	6284	8,88	4,77E-05	1092
284	349	20	7401	5,94	2,70E-05	5140
B	349	20	7035	5,90	2,84E-05	9008
283	175	10	7153	2,98	1,40E-05	41378
280	175	10	7030	2,93	1,42E-05	47595

**Modelos de Fadiga**

$$N = 1 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,9969}$$

$$N = 5 \times 10^{-10} (1/Ei)^{2,8746}$$

**GRANITO - ASTM CAP 20**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
169	719	40	7994	12,16	5,00E-05	1245
173	719	40	6370	12,31	6,28E-05	1082
171	539	30	7776	9,21	3,86E-05	2692
170	539	30	6424	9,13	4,67E-05	2912
176	359	20	7655	6,13	2,61E-05	5198
175	359	20	7081	6,15	2,82E-05	5163
172	180	10	7297	3,07	1,37E-05	77443
174	180	10	7143	3,05	1,40E-05	53164

**Modelos de Fadiga**

$$N = 1 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,7428}$$

$$N = 6 \times 10^9 (1/Ei)^{2,6464}$$

**GRANITO - ASTM CAP 20 com Cal**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
195	692	40	9713	11,69	4,12E-05	2157
191	692	40	6705	11,71	5,97E-05	2207
193	519	30	8816	8,90	3,40E-05	7221
189	519	30	6313	8,84	4,75E-05	5518
194	346	20	7907	5,85	2,53E-05	23362
190	346	20	6836	5,87	2,93E-05	15028
192	173	10	7603	2,94	1,32E-05	153615
196	173	10	7172	2,92	1,39E-05	352250

**Modelos de Fadiga**

$$N = 6 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,2221}$$

$$N = 3 \times 10^{11} (1/Ei)^{3,2454}$$

**GRANITO - MARSHALL CAP 20 com Cal**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
291	684	40	7993	11,69	5,00E-05	950
295	684	40	6328	11,70	6,32E-05	961
292	513	30	7830	8,78	3,83E-05	2448
293	513	30	6337	8,71	4,73E-05	2373
297	342	20	7337	5,84	2,73E-05	8637
296	342	20	6371	5,85	3,14E-05	8622
298	171	10	7053	2,92	1,42E-05	59538
294	171	10	6926	2,89	1,44E-05	45901

**Modelos de Fadiga**

$$N = 1 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,8679}$$

$$N = 1 \times 10^9 (1/Ei)^{2,8354}$$



## GRANITO - AASHTO CAP 20

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
323	702	40	9213	11,88	4,34E-05	644
318	702	40	5898	11,94	6,78E-05	439
316	527	30	8058	8,91	3,72E-05	1198
319	527	30	5647	8,99	5,31E-05	1064
322	351	20	7527	5,93	2,66E-05	3888
321	351	20	6158	5,94	3,25E-05	3882
320	176	10	7319	2,98	1,37E-05	44855
317	176	10	7189	3,00	1,39E-05	35681
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 3 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,3659}$		
				$N = 5 \times 10^{-10} (1/Ei)^{2,8746}$		

## GRANITO - AASHTO CAP 40

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
345	936	40	14895	15,95	2,69E-05	1300
344	936	40	10822	15,95	3,70E-05	1850
343	702	30	13705	11,97	2,19E-05	2934
342	702	30	12182	11,96	2,46E-05	2210
341	468	20	13434	8,00	1,49E-05	10175
347	468	20	12453	7,95	1,61E-05	13093
348	234	10	13111	4,01	7,63E-06	61704
346	234	10	12519	4,00	7,99E-06	87745
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 4 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,8849}$		
				$N = 3 \times 10^{-11} (1/Ei)^{3,0186}$		

## GRANITO - MARSHALL CAP 40

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
303	935	40	12491	16,28	3,20E-05	866
300	935	40	9661	15,97	4,14E-05	1194
299	701	30	12375	12,02	2,42E-05	2534
308	701	30	10617	12,00	2,83E-05	2498
304	467	20	11879	8,07	1,68E-05	7399
301	467	20	10976	8,01	1,82E-05	8588
309	234	10	11752	4,02	8,51E-06	60268
305	234	10	11463	3,99	8,72E-06	57495
<b>Modelos de Fadiga</b>				$N = 3 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,9056}$		
				$N = 4 \times 10^{-10} (1/Ei)^{2,7982}$		

**GRANITO - AASHTO CAP 20 com Cal**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
334	682	40	9583	11,61	4,17E-05	857
337	682	40	7504	11,59	5,33E-05	966
331	512	30	9296	8,68	3,23E-05	1867
330	512	30	7570	8,77	3,96E-05	1592
332	341	20	9108	5,82	2,20E-05	7254
D	341	20	8011	5,79	2,50E-05	6351
335	171	10	8527	2,89	1,17E-05	94484
336	171	10	8173	2,89	1,22E-05	87745

**Modelos de Fadiga**

$$N = 3 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,3659}$$

$$N = 3 \times 10^{10} (1/E_i)^{2,8915}$$

**GABRO - ASTM CAP 20**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
422	759	40	8353	12,10	4,79E-05	3766
415	759	40	7014	12,21	5,70E-05	2591
423	569	30	8263	9,25	3,63E-05	8385
419	569	30	7367	9,08	4,07E-05	6138
420	379	20	8078	6,09	2,48E-05	40546
418	379	20	7658	6,09	2,61E-05	30425
421	190	10	7849	3,06	1,27E-05	180943
417	190	10	7610	3,04	1,31E-05	141977

**Modelos de Fadiga**

$$N = 5 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,8819}$$

$$N = 2 \times 10^{14} (1/E_i)^{3,9714}$$

**GABRO - ASTM CAP 20 com Cal**

CP	Carga (N)	%RT	MR (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
429	846	40	9946	13,54	4,02E-05	1901
427	846	40	8724	13,61	4,59E-05	1770
426	634	30	9633	10,15	3,11E-05	5613
430	634	30	8952	10,09	3,35E-05	5139
428	423	20	9392	6,82	2,13E-05	25949
425	423	20	9042	6,84	2,21E-05	34625
424	316	15	9403	3,37	1,06E-05	83459
431	316	15	9339	3,37	1,07E-05	72396

**Modelos de Fadiga**

$$N = 4 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,8549}$$

$$N = 3 \times 10^{17} (1/E_i)^{4,5027}$$



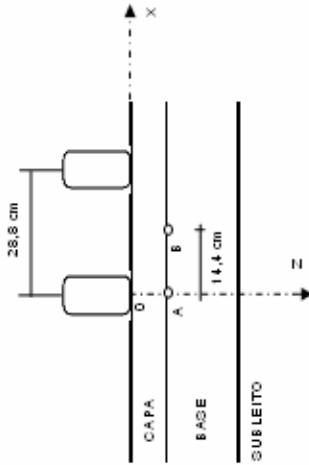
## ANEXO 3

### TABELA DE SIMULAÇÕES

---

Nesta seção são apresentadas as tabelas referentes às respostas dos 3 tipos de pavimentos e o desempenho de cada mistura, obtida nas simulações com o programa ELSYM5

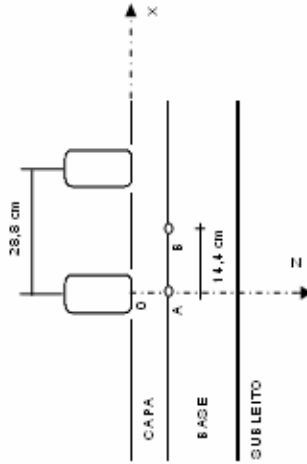
ESTRUTURA 1



10 cm	CAPA	MR
10 cm	BASE	150 Mpa
15 cm	SUB BASE	60000 Mpa
30 cm	LEITO	50 Mpa
SUB LEITO C6R 5%		
25 Mpa		

Tipo	Características da Mistura										Estrutura 1 Ponto A					Estrutura 1 Ponto B					
	MR	n1	K1	n2	K2	$\Delta\sigma$	Ei	M1	M2	$\Delta\sigma$	Ei	M1	M2	$\Delta\sigma$	Ei	M1	M2	$\Delta\sigma$	Ei	M1	M2
Bas ASTM 20	5862	1000000	3,0007	0,0000000001	2,8681	1,36	1,6E-04	4,0E+05	7,7E+01	1,16	1,6E-04	6,4E+05	7,7E+01	1,16	1,6E-04	6,4E+05	7,7E+01	1,16	1,6E-04	6,4E+05	7,7E+01
Bas ASTM 20c	6971	5000000	4,7691	1E-17	4,6822	1,46	1,4E-04	8,2E+06	1,1E+01	1,27	1,5E-04	1,6E+07	8,0E+00	1,27	1,5E-04	1,6E+07	8,0E+00	1,27	1,5E-04	1,6E+07	8,0E+00
Bas ASTM 40	13117	5000000	2,9125	0,0000000002	2,6485	1,89	1,0E-04	7,8E+05	7,9E+01	1,72	1,0E-04	1,0E+06	7,9E+01	1,72	1,0E-04	1,0E+06	7,9E+01	1,72	1,0E-04	1,0E+06	7,9E+01
Bas Marshall 20	6670	2000000	3,1042	3E-13	3,5118	1,43	1,5E-04	6,6E+05	8,1E+00	1,24	1,5E-04	1,0E+06	8,1E+00	1,24	1,5E-04	1,0E+06	8,1E+00	1,24	1,5E-04	1,0E+06	8,1E+00
Bas Marshall 40	11853	10000000	3,4779	3E-13	3,5118	1,82	1,1E-04	1,2E+06	2,4E+01	1,64	1,1E-04	1,8E+06	2,4E+01	1,64	1,1E-04	1,8E+06	2,4E+01	1,64	1,1E-04	1,8E+06	2,4E+01
Bas AASHTO 40	10340	20000000	3,8207	2E-15	3,9704	1,72	1,2E-04	2,5E+06	7,4E+00	1,54	1,2E-04	3,8E+06	7,4E+00	1,54	1,2E-04	3,8E+06	7,4E+00	1,54	1,2E-04	3,8E+06	7,4E+00
Bas AASHTO 20	4765	3000000	3,6672	1E-11	3,4539	1,26	1,8E-04	1,3E+06	8,6E+01	1,04	1,8E-04	2,6E+06	8,6E+01	1,04	1,8E-04	2,6E+06	8,6E+01	1,04	1,8E-04	2,6E+06	8,6E+01
GRA ASTM 20	7217	1000000	2,7428	0,0000000006	2,6464	1,49	1,4E-04	3,3E+05	9,5E+01	1,29	1,4E-04	5,0E+05	9,5E+01	1,29	1,4E-04	5,0E+05	9,5E+01	1,29	1,4E-04	5,0E+05	9,5E+01
GRA ASTM 40	15564	1000000	1,8317	3E-05	1,8308	2,03	9,1E-05	2,7E+05	7,5E+02	1,87	9,3E-05	3,2E+05	7,5E+02	1,87	9,3E-05	3,2E+05	7,5E+02	1,87	9,3E-05	3,2E+05	7,5E+02
GRA ASTM 20 c	7633	6000000	3,2221	3E-11	3,2454	1,51	1,4E-04	1,6E+06	9,6E+01	1,32	1,4E-04	2,5E+06	9,6E+01	1,32	1,4E-04	2,5E+06	9,6E+01	1,32	1,4E-04	2,5E+06	9,6E+01
GRA Marshall 20	7083	1000000	2,9969	5E-10	2,8746	1,47	1,4E-04	3,2E+05	6,0E+01	1,28	1,4E-04	4,8E+05	6,0E+01	1,28	1,4E-04	4,8E+05	6,0E+01	1,28	1,4E-04	4,8E+05	6,0E+01
GRA Marshall 20c	7022	1000000	2,8679	0,0000000001	2,8354	1,47	1,4E-04	3,3E+05	8,5E+01	1,26	1,4E-04	5,2E+05	8,5E+01	1,26	1,4E-04	5,2E+05	8,5E+01	1,26	1,4E-04	5,2E+05	8,5E+01
GRA Marshall 40	11402	3000000	2,8709	4E-10	2,7982	1,79	1,1E-04	5,6E+05	4,8E+01	1,61	1,1E-04	7,6E+05	4,8E+01	1,61	1,1E-04	7,6E+05	4,8E+01	1,61	1,1E-04	7,6E+05	4,8E+01
GRA AASHTO 20	7126	3000000	3,3659	5E-10	2,8746	1,48	1,4E-04	8,0E+05	6,0E+01	1,28	1,4E-04	1,3E+06	6,0E+01	1,28	1,4E-04	1,3E+06	6,0E+01	1,28	1,4E-04	1,3E+06	6,0E+01
GRA AASHTO 20c	8472	3000000	3,3659	3E-10	2,8915	1,59	1,3E-04	6,3E+05	5,2E+01	1,40	1,3E-04	9,7E+05	5,2E+01	1,40	1,3E-04	9,7E+05	5,2E+01	1,40	1,3E-04	9,7E+05	5,2E+01
GRA AASHTO 40	12890	5000000	3,0351	3E-11	3,0186	1,88	1,0E-04	7,4E+05	3,6E+01	1,71	1,0E-04	9,8E+05	3,6E+01	1,71	1,0E-04	9,8E+05	3,6E+01	1,71	1,0E-04	9,8E+05	3,6E+01
GAB ASTM 20	7774	50000000	4,0368	2E-14	3,9714	1,53	1,4E-04	9,0E+06	4,0E+01	1,33	1,4E-04	1,6E+07	4,0E+01	1,33	1,4E-04	1,6E+07	4,0E+01	1,33	1,4E-04	1,6E+07	4,0E+01
GAB ASTM 20c	9304	2E+08	4,6685	3E-17	4,5027	1,84	1,2E-04	2,0E+07	1,4E+01	1,46	1,2E-04	3,4E+07	1,4E+01	1,46	1,2E-04	3,4E+07	1,4E+01	1,46	1,2E-04	3,4E+07	1,4E+01

ESTRUTURA 2



Tipo	Características da Mistura										Estrutura 2 Ponto A					Estrutura 2 Ponto B				
	MR	n1	K1	n2	K2	$\Delta\sigma$	Ei	N1	N2	$\Delta\sigma$	Ei	N1	N2	$\Delta\sigma$	Ei	N1	N2			
Bas ASTM 20	5862	1000000	3,0007	0,0000000001	2,8681	1,28	2,1E-04	4,8E+05	3,5E+01	1,82	2,4E-04	1,7E+05	2,4E+01	1,82	2,4E-04	1,7E+05	2,4E+01			
Bas ASTM 20c	6971	5000000	4,7691	1E-17	4,6822	1,89	1,9E-04	2,4E+06	2,7E+00	1,97	2,2E-04	2,0E+06	1,3E+00	1,97	2,2E-04	2,0E+06	1,3E+00			
Bas ASTM 40	13117	5000000	2,9125	0,0000000002	2,6485	2,30	1,2E-04	4,4E+05	4,8E+01	2,56	1,5E-04	3,2E+05	2,7E+01	2,56	1,5E-04	3,2E+05	2,7E+01			
Bas Marshall 20	6670	2000000	3,1042	3E-13	3,5118	1,87	1,9E-04	2,9E+05	3,5E+00	1,93	2,2E-04	2,6E+05	2,1E+00	1,93	2,2E-04	2,6E+05	2,1E+00			
Bas Marshall 40	11853	1000000	3,4779	3E-13	3,5118	2,23	1,3E-04	6,1E+05	1,3E+01	2,47	1,6E-04	4,3E+05	6,4E+00	2,47	1,6E-04	4,3E+05	6,4E+00			
Bas AASHTO 40	10340	2000000	3,8207	2E-15	3,9704	2,15	1,5E-04	1,1E+06	3,0E+00	2,33	1,7E-04	7,9E+05	1,9E+00	2,33	1,7E-04	7,9E+05	1,9E+00			
Bas AASHTO 20	4765	3000000	3,6672	1E-11	3,4539	1,66	2,4E-04	4,7E+05	3,2E+01	1,65	2,7E-04	4,8E+05	2,1E+01	1,65	2,7E-04	4,8E+05	2,1E+01			
GRA ASTM 20	7217	1000000	2,7428	0,0000000006	2,6464	1,91	1,9E-04	1,7E+05	4,2E+01	2,00	2,1E-04	1,5E+05	3,2E+01	2,00	2,1E-04	1,5E+05	3,2E+01			
GRA ASTM 40	15564	1000000	1,8317	0,000003	1,8308	2,42	1,1E-04	2,0E+05	5,3E+02	2,74	1,3E-04	1,6E+05	3,9E+02	2,74	1,3E-04	1,6E+05	3,9E+02			
GRA ASTM 20 c	7633	6000000	3,2221	3E-11	3,2454	1,95	1,8E-04	7,0E+05	4,3E+01	2,05	2,1E-04	5,9E+05	2,6E+01	2,05	2,1E-04	5,9E+05	2,6E+01			
GRA Marshall 20	7083	1000000	2,9969	5E-10	2,8746	1,90	1,9E-04	1,5E+05	2,5E+01	1,98	2,2E-04	1,3E+05	1,8E+01	1,98	2,2E-04	1,3E+05	1,8E+01			
GRA Marshall 20c	7022	1000000	2,8679	0,0000000001	2,8354	1,89	1,9E-04	1,6E+05	3,6E+01	1,98	2,2E-04	1,4E+05	2,3E+01	1,98	2,2E-04	1,4E+05	2,3E+01			
GRA Marshall 40	11402	3000000	2,8709	4E-10	2,7982	2,21	1,4E-04	3,1E+05	2,4E+01	2,43	1,6E-04	2,3E+05	1,7E+01	2,43	1,6E-04	2,3E+05	1,7E+01			
GRA AASHTO 20	7126	3000000	3,3659	5E-10	2,8746	1,90	1,9E-04	3,5E+05	2,5E+01	1,99	2,1E-04	3,0E+05	1,9E+01	1,99	2,1E-04	3,0E+05	1,9E+01			
GRA AASHTO 20c	8472	3000000	3,3659	3E-10	2,8915	2,01	1,7E-04	2,9E+05	2,4E+01	2,14	1,9E-04	2,3E+05	1,7E+01	2,14	1,9E-04	2,3E+05	1,7E+01			
GRA AASHTO 40	12890	5000000	3,0351	3E-11	3,0186	2,29	1,3E-04	4,0E+05	1,6E+01	2,54	1,5E-04	3,0E+05	1,0E+01	2,54	1,5E-04	3,0E+05	1,0E+01			
GAB ASTM 20	7774	5000000	4,0368	2E-14	3,9714	1,96	1,8E-04	3,3E+06	1,5E+01	2,07	2,0E-04	2,7E+06	9,8E+00	2,07	2,0E-04	2,7E+06	9,8E+00			
GAB ASTM 20c	9304	2E+08	4,6685	3E-17	4,5027	2,07	1,6E-04	6,7E+06	3,7E+00	2,24	1,8E-04	4,6E+06	2,2E+00	2,24	1,8E-04	4,6E+06	2,2E+00			

SUB LEITO C6 R5%  
25 MPa

ESTRUTURA 3



Características da Mistura										Estrutura 3 Ponto A				Estrutura 3 Ponto B			
Tipo	MR	n1	K1	n2	K2	$\Delta\sigma$	Ei	N1	N2	$\Delta\sigma$	Ei	N1	N2	$\Delta\sigma$	Ei	N1	N2
Bas ASTM 20	5862	1000000	3,0007	0,0000000001	2,8681	4,09	4,8E-04	1,5E+04	3,3	3,33	4,9E-04	2,7E+04	3,1E+00	3,33	4,9E-04	2,7E+04	3,1E+00
Bas ASTM 20c	6971	50000000	4,7691	1E-17	4,6822	4,51	4,5E-04	3,8E+04	0,0	3,78	4,6E-04	8,8E+04	4,2E-02	3,78	4,6E-04	8,8E+04	4,2E-02
Bas ASTM 40	13117	5000000	2,9125	0,0000000002	2,6485	6,28	3,4E-04	2,4E+04	3,1	5,65	3,5E-04	3,2E+04	2,8E+00	5,65	3,5E-04	3,2E+04	2,8E+00
Bas Marshall 20	6670	2000000	3,1042	3E-13	3,5118	4,39	4,6E-04	2,0E+04	0,2	3,66	4,7E-04	3,6E+04	1,5E-01	3,66	4,7E-04	3,6E+04	1,5E-01
Bas Marshall 40	11853	10000000	3,4779	3E-13	3,5118	5,97	3,6E-04	2,0E+04	0,4	5,33	3,7E-04	3,0E+04	3,4E-01	5,33	3,7E-04	3,0E+04	3,4E-01
Bas AASHTO 40	10340	20000000	3,8207	2E-15	3,9704	5,42	3,8E-04	3,1E+04	0,1	4,90	3,9E-04	4,6E+04	6,9E-02	4,90	3,9E-04	4,6E+04	6,9E-02
Bas AASHTO 20	4765	3000000	3,6672	1E-11	3,4539	3,61	5,2E-04	2,7E+04	2,2	2,84	5,2E-04	6,5E+04	2,2E+00	2,84	5,2E-04	6,5E+04	2,2E+00
GRA ASTM 20	7217	1000000	2,7428	0,0000000006	2,6464	4,60	4,5E-04	1,5E+04	4,3	3,87	4,5E-04	2,4E+04	4,3E+00	3,87	4,5E-04	2,4E+04	4,3E+00
GRA ASTM 40	15564	1000000	1,8317	0,000003	1,8308	6,80	3,1E-04	3,0E+04	79,6	6,21	3,2E-04	3,5E+04	7,5E+01	6,21	3,2E-04	3,5E+04	7,5E+01
GRA ASTM 20 c	7633	6000000	3,2221	3E-11	3,2454	4,74	4,4E-04	4,0E+04	2,3	4,03	4,4E-04	6,7E+04	2,3E+00	4,03	4,4E-04	6,7E+04	2,3E+00
GRA Marshall 20	7083	1000000	2,9969	5E-10	2,8746	4,55	4,5E-04	1,1E+04	2,1	3,81	4,6E-04	1,8E+04	2,0E+00	3,81	4,6E-04	1,8E+04	2,0E+00
GRA Marshall 20c	7022	1000000	2,8679	0,0000000001	2,8354	4,53	4,5E-04	1,3E+04	3,1	3,78	4,6E-04	2,2E+04	2,9E+00	3,78	4,6E-04	2,2E+04	2,9E+00
GRA Marshall 40	11402	3000000	2,8709	4E-10	2,7982	5,86	3,6E-04	1,9E+04	1,7	5,20	3,7E-04	2,6E+04	1,6E+00	5,20	3,7E-04	2,6E+04	1,6E+00
GRA AASHTO 20	7126	3000000	3,3659	5E-10	2,8746	4,57	4,5E-04	1,8E+04	2,1	3,84	4,5E-04	3,2E+04	2,1E+00	3,84	4,5E-04	3,2E+04	2,1E+00
GRA AASHTO 20c	8472	3000000	3,3659	3E-10	2,8915	5,02	4,3E-04	1,3E+04	1,6	4,31	4,3E-04	2,2E+04	1,6E+00	4,31	4,3E-04	2,2E+04	1,6E+00
GRA AASHTO 40	12890	5000000	3,0351	3E-11	3,0186	6,22	3,5E-04	1,9E+04	0,8	5,60	3,5E-04	2,7E+04	8,1E-01	5,60	3,5E-04	2,7E+04	8,1E-01
GAB ASTM 20	7774	50000000	4,0368	2E-14	3,9714	4,79	4,4E-04	9,0E+04	0,4	4,07	4,4E-04	1,7E+05	4,3E-01	4,07	4,4E-04	1,7E+05	4,3E-01
GAB ASTM 20c	9304	2E+08	4,6685	3E-17	4,5027	5,27	4,1E-04	8,5E+04	0,1	4,60	4,1E-04	1,6E+05	5,4E-02	4,60	4,1E-04	1,6E+05	5,4E-02