

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE  
DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA**

**Curso de Engenharia Civil**

**ANDRÉ LUIZ BOCK**

**DESEMPENHO À FADIGA DE MISTURAS EM CONCRETO  
ASFÁLTICO COM DIFERENTES FORMAS DE  
INCORPORAÇÃO DE CAL**

**Ijuí/RS**

**2009**

**André Luiz Bock**

**DESEMPENHO À FADIGA DE MISTURAS EM CONCRETO  
ASFÁLTICO COM DIFERENTES FORMAS DE  
INCORPORAÇÃO DE CAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

**Ijuí**

**2009**

# **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelos membros da banca examinadora.**

---

Prof. Luciano Pivoto Specht, Dr. - Orientador  
UNIJUÍ/DeTec

Banca Examinadora

---

Prof<sup>a</sup> Raquel Maldaner Paranhos, M.Sc.  
UNIJUÍ/DeTec

*Dedico este trabalho aos meus pais Anildo e Ireci, ao meu irmão Fábio e a minha namorada Susana; pessoas de extrema importância que fizeram parte dessa caminhada, compartilhando amor, sonhos e companheirismo.*

*“Somente o conhecimento torna os cidadãos verdadeiramente livres e somente cidadãos livres tornam uma nação independente.”*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida, pela proteção e pela oportunidade de realizar este sonho.

Ao MEC, que através do PROUNI possibilitou a realização deste sonho, de freqüentar e concluir um curso superior; por acreditar que temos em nosso país jovens com grandes potencialidades e que muitas vezes faltam apenas oportunidades para demonstrá-las. Obrigado por acreditarem em um país melhor, proporcionando oportunidades para aqueles que realmente querem e podem construir uma nação melhor.

Gostaria de expressar aqui os meus agradecimentos a todos que participaram e contribuíram nesta caminhada, seja através de orientação técnica e científica, seja através de apoio, incentivo e confiança depositada.

Agradeço à minha família, pelo incentivo, compreensão e confiança que sempre me deram, ajudando-me sempre a superar as dificuldades encontradas.

A minha namorada Susana pela compreensão, determinação e paciência para sempre superar as dificuldades impostas pela distância e pela saudade, e principalmente pelo imenso amor que sempre nos ajudou a suportar a ausência física.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht, pela amizade, confiança e oportunidade, pelo incentivo e principalmente pela qualidade de formação.

Aos meus amigos e colegas de pesquisa, Diego Arthur Hartmann, Fernando Boeira e Jaelson Budny pelo apoio e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos laboratoristas e amigos Luis Donato e Tiago, pelo auxílio durante o curso na realização dos ensaios, agradeço todo o apoio, amizade e ensinamentos.

A toda equipe do Laboratório de Pavimentação da UFRGS, principalmente ao colega Diego Treichel pelo apoio e empenho na realização dos ensaios.

Enfim agradeço a todos os colegas e professores do Curso de Engenharia Civil da UNIJUÍ pelo convívio ao longo do curso, incentivo e amizade.

## RESUMO

A utilização de novos materiais e novas técnicas têm sido estudadas nos principais centros de pesquisa do mundo buscando melhorar a qualidade das misturas asfálticas e atenuar o problema da degradação prematura dos revestimentos. Devido a sua enorme importância, os pavimentos merecem uma atenção especial quanto aos estudos de sua vida útil, sempre analisando novas idéias a fim de prolongá-la. Estudos recentemente publicados nos Estados Unidos (Little *et al.*, 2006) dão conta que a incorporação de cal em misturas asfálticas, além de melhorar a adesividade agregado-ligante retarda o trincamento. Com base nestes fatores este estudo avaliou comparativamente em laboratório, o comportamento mecânico e de adesão/coesão de três misturas em concreto asfáltico (CA), denominadas de mistura de *Referência* (sem adição de cal), mistura de cal ao agregado graúdo seco “*Cal/Agregado Seco*” e mistura de cal sob a forma de calda no agregado graúdo “*Cal/Calda*”. Foi substituído 1,0% do pó-de-pedra, o qual incluía o fíler de basalto, pela mesma quantidade de cal. Com a análise dos resultados verificou-se em relação a resistência à tração que a mistura *Cal/Ag. Seco* acaba perdendo resistência no decorrer de sua vida útil (simulação com condicionamento) enquanto as outras misturas se tornam mais resistentes. Assim como no ensaio de resistência à tração, no ensaio de módulo de resiliência as amostras da mistura *Cal/Ag.Seco* apresentaram um Mr superior às outras misturas em estudo sem condicionamento; apresentando posteriormente com o condicionamento uma diminuição significativa desta propriedade em comparação com as outras misturas que tiveram uma ligeira elevação. As misturas com incorporação de cal apresentaram uma manutenção dos valores de Mr/Rt demonstrando que estas misturas mantiveram uma compatibilidade entre sua rigidez e resistência; o contrário aconteceu com as amostras da mistura de *Referência* que tornaram-se mais rígidas e mais suscetíveis ao trincamento. Em uma análise geral da vida de fadiga verificou-se que as misturas com incorporação de cal apresentaram um desempenho superior em comparação com a mistura de *Referência*, isso demonstra que a cal está agindo de forma positiva melhorando as propriedades das misturas e aumentando a sua vida útil. Para a perda de massa em todas as temperaturas de condicionamento pode-se perceber uma tendência de elevação da perda de massa, para misturas com incorporação de cal, pois as mesmas apresentam um menor teor de ligante, sendo este uma variável importante, pois proporciona um maior poder cimentante às amostras. A partir dos ensaios realizados foi possível observar as diferenças entre os métodos de incorporação de cal analisados bem como sua influência no comportamento mecânico e de adesão/coesão das misturas asfálticas. Constatou-se que a forma de incorporação mais eficiente foi a incorporação de cal sobre o agregado graúdo na forma seca (*Cal/Ag. Seco*), apresentando resultados superiores em comparação às misturas de *Referência* e *Cal/Calda*.

Palavras-chaves: Pavimentação, misturas asfálticas, incorporação de cal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento das misturas asfálticas.....	19
Figura 2 - Tensões em um pavimento .....	23
Figura 3 - Evolução da deterioração do pavimento em função do tempo .....	25
Figura 4 - Trincamento por fadiga.....	26
Figura 5 - Etapas do trincamento.....	28
Figura 6 - Modos de movimentação de uma trinca .....	29
Figura 7 - Ensaio de compressão diametral.....	30
Figura 8 - Efeito deletério da água .....	39
Figura 9 - Distribuição granulométrica .....	51
Figura 10 - Ajuste granulométrico da mistura.....	54
Figura 11 - Seqüência da dosagem.....	56
Figura 12 - Equipamento e estado de tensões gerado no ensaio brasileiro .....	57
Figura 13 - Corte esquemático e equipamento de módulo de resiliência.....	59
Figura 14 - Equipamento de módulo de resiliência ligado ao microcomputador.....	60
Figura 15 - Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência .....	60
Figura 16 - Equipamento de ensaio de fadiga .....	61
Figura 17 - Representação das tensões no centro da amostra de um.....	62
Figura 18 - Corpo-de-prova após ruptura.....	63
Figura 19 - Execução do ensaio de desgaste Cantabro.....	64
Figura 20 - Resistência à tração @ 25°C (MPa) .....	67
Figura 21 - Módulo de Resiliência @ 25°C (MPa).....	68
Figura 22 - Relação $M_r/R_t$ @ 25°C (MPa).....	69
Figura 23 - Relação entre vida de fadiga e tensões de tração.....	72
Figura 24 - Modelo genérico de estrutura analisada.....	73
Figura 25 - Vida de fadigas das misturas asfálticas .....	75
Figura 26 - $N_f/N_{f_{Ref}}$ .....	75
Figura 27 - Perda de massa (%).....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores intervenientes nas características de adesividade .....	38
Tabela 2 - Número de amostras ensaiadas.....	50
Tabela 3 - Características dos agregados utilizados .....	51
Tabela 4 - Resultado do ensaio de granulometria.....	51
Tabela 5 - Massa específica Cal .....	52
Tabela 6 - Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70) .....	53
Tabela 7 - Temperaturas de mistura e de compactação.....	53
Tabela 8 - Especificação e composição granulométrica da mistura – Faixa B DAER/RS .....	54
Tabela 9 - Resultados da Dosagem Marshall .....	55
Tabela 10 - Resultados de Resistência à Tração.....	66
Tabela 11 - Resultados de Módulo de Resiliência .....	67
Tabela 12 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura de <i>Referência</i> .....	70
Tabela 13 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura <i>Cal/Ag. Seco</i> .....	71
Tabela 14 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura <i>Cal/Calda</i> .....	71
Tabela 15 - Parâmetros dos modelos de fadiga .....	72
Tabela 16 - Variáveis dos modelos analisados.....	74
Tabela 17 - Resultados das estruturas analisadas .....	74
Tabela 18 - Resultados de Perda de massa .....	76



## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

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

**ABNT:** *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

**ANTT:** *Agência Nacional de Transporte Terrestre*

**ASTM:** *American Society of Testing and Materials*

**CA:** *Concreto Asfáltico*

**CAP:** *Cimento Asfáltico de Petróleo*

**CBUQ:** *Concreto Betuminoso Usinado à Quente*

**CEC:** *Centro de Estudios de Carreteras*

**CNT:** *Confederação Nacional de Transporte*

**d:** *diâmetro do Corpo-de-Prova*

**DAER/RS:** *Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul*

**DC:** *Deformação Controlada*

**DNER – ME:** *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio*

**DNIT:** *Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes*

**F:** *Força Aplicada*

**h:** *altura do Corpo-de-Prova*

**LAPAV:** *Laboratório de Pavimentação da UFRGS*

**LEC:** *Laboratório de Engenharia da UNIJUÍ*

**LVDT:** *Linear Variable Differential Transducer*

**Mr:** *Módulo de Resiliência*

**N:** *Vida de Fadiga*

**Nf :** *Número De Repetições do Carregamento Necessário à Ruptura Completa da Amostra*

**Pm:** *Perda de massa*

**RRt:** *Resistência Retida à Tração*

**Rt:** *Resistência à Tração por Compressão Diametral*

**TC:** *Tensão Controlada*

**TT:** *Tensão de Tração*

**UFRGS:** *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

**UNIJUÍ:** *Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul*

**$\mu$ :** *Média*

**$\sigma$ :** *Desvio Padrão*

**$\sigma_t$ :** *Tensão de tração repetida solicitante*

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1. TEMA.....	13
1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3. FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO .....	13
1.4. OBJETIVOS .....	13
1.4.1. Objetivo Geral .....	13
1.4.2. Objetivos Específicos .....	13
1.5. JUSTIFICATIVAS.....	14
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	18
2.1. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS .....	18
2.2. FADIGA EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	21
2.2.1. Caracterização da fadiga.....	22
2.2.2. Formação das trincas .....	25
2.2.3. Ensaio de fadiga .....	29
2.2.4. Fatores influentes na resistência à fadiga .....	32
2.2.4.1. Fatores de solicitação .....	32
2.2.4.2. Fatores de formulação .....	33
2.2.4.3. Fatores do meio ambiente.....	35
2.2.4.4. Considerações pertinentes .....	36
2.3. ADESIVIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS .....	36
2.3.1. Adesividade .....	36
2.3.2. Processo de Perda de Adesividade .....	38
2.3.3. Classificação dos Métodos de Avaliação de Adesividade Ligante/Agregado .....	42
2.3.4. Melhoradores de Adesividade .....	43
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	49
3.1. CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO .....	49
3.2. PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	49
3.3. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	50
3.3.1. Agregados Minerais.....	50
3.3.2. Cal CH I.....	52

3.3.3. Ligante .....	53
3.3.4. Misturas Asfálticas .....	53
3.4. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	55
3.5. PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DE EQUIPAMENTOS.....	56
3.5.1. Ensaio de Resistência à Tração – DNER-ME 138/94 .....	56
3.5.2. Ensaio de Módulo de Resiliência - DNER-ME 133/94.....	58
3.5.3. Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada .....	61
3.5.4. Perda de Massa (Pm) - Metodologia Cantabro - DNER – ES 383/99.....	63
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
4.1. COMPORTAMENTO MECÂNICO .....	65
4.1.1. Ensaio de Resistência à Tração – DNER-ME 138/94 .....	65
4.1.2. Ensaio de Módulo de Resiliência - DNER-ME 133/94.....	67
4.1.3. Relação Mr/Rt .....	68
4.1.4. Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada .....	70
4.2. PROPRIEDADES DE COESÃO/ADESÃO – PERDA DE MASSA (PM) .....	76
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
5.1. CONCLUSÕES.....	79
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	81
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>82</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Tema

O tema da pesquisa é: Infra-estrutura de transporte rodoviário.

## 1.2 Delimitação do tema

Esta pesquisa limita-se a estudar a camada de revestimento de pavimentos flexíveis do tipo concreto asfáltico (CA).

## 1.3 Formulação da questão de estudo

Qual a influência que as diferentes formas de incorporação da cal exercem sobre as propriedades mecânicas e de adesão/coesão de misturas em CA?

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar as propriedades mecânicas e de adesão/coesão de misturas de CA tendo como variável as diferentes formas de incorporação de cal.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

Verificar a influência das diferentes formas de incorporação de cal (*Cal/Agregado Seco* e *Cal/Calda*) nas seguintes propriedades mecânicas e de adesão/coesão das misturas de CA:

- ✓ Resistência à Tração
- ✓ Módulo de Resiliência
- ✓ Relação  $M_r/R_t$ ;

- ✓ Vida de Fadiga;
- ✓ Perda de Massa (Pm)

### **1.5 Justificativas**

O desempenho de um pavimento está condicionado a uma complexa combinação de fatores: materiais utilizados, técnicas construtivas, ação climática e do tráfego e ao programa de manutenção e restauração. O alto custo dos materiais envolvidos tem, nos últimos anos, motivado pesquisadores a buscar e investigar novos materiais, bem como novas combinações buscando materiais que possam apresentar bom desempenho e custo relativamente baixo. (Specht, 2002). A utilização de novos materiais e novas técnicas têm sido estudadas nos principais centros de pesquisa do mundo buscando melhorar a qualidade das misturas e atenuar o problema da degradação prematura dos revestimentos.

O desempenho satisfatório do revestimento asfáltico depende da obtenção de uma mistura com graduação adequada de agregados e de um teor ideal de ligante asfáltico, de modo a proporcionar conforto e segurança ao rolamento dos veículos, durabilidade, resistência às cargas, deformações, fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego e às condições climáticas. As condições do revestimento de um pavimento revelam a capacidade de suportar as cargas provenientes do tráfego a que está submetido, além das condições de conforto e segurança oferecidas aos usuários da rodovia.

Ao analisar-se o sistema viário brasileiro, observa-se que sua matriz de transporte é predominantemente rodoviária. Esta característica faz com que a infra-estrutura viária assuma um papel fundamental na mobilidade em nosso país, visto que esta modalidade corresponde a cerca de 96,2% da matriz de transporte de passageiros e a 61,1% da matriz de transporte de cargas (CNT, 2007).

A malha rodoviária é elemento fundamental nas cadeias produtivas, pois une mercados promovendo a integração de regiões e estados e a integração entre portos, ferrovias, hidrovias e aeroportos. Os pavimentos asfálticos brasileiros têm tido seu comportamento comprometido em algumas situações onde é elevado o volume de veículos e o excesso de cargas, causando

deterioração prematura e, em consequência, aumento nos custos dos transportes (Hirsch, 2007).

Devido a sua enorme importância, os pavimentos merecem uma atenção especial quanto aos estudos de sua vida útil, sempre analisando novas idéias a fim de prolongá-la. Conforme pesquisa rodoviária de 2009 da Confederação Nacional de Transporte – CNT, em que foram pesquisados 89.552 km de rodovias em todo o país, pôde-se constatar que 69% de toda a extensão pesquisada, ou seja, 61.839 km apresentam algum grau de imperfeição (45,0% regulares, 16,9% ruins, 7,1% péssimos), os trechos com afundamentos, ondulações ou buracos acumulam 4,6% destas rodovias (CNT, 2009).

A degradação de pavimentos está associada a varias patologias, dentre elas: deformações permanentes excessivas, fissuras de fadiga e de retração térmica e desagregação. As duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto as duas últimas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes (Specht, 2004).

O crescimento do tráfego comercial rodoviário, no Brasil e em quase todos os países, impõe o desafio de aumentar-se a vida útil de pavimentos; torna-se cada vez mais importante que um pavimento atenda aos requisitos de alta durabilidade e segurança, proporcionando segurança e conforto ao usuário. Além disso, a relação custo-benefício é um fator que exerce forte influência na escolha do revestimento asfáltico. A opção por uma alternativa de alta durabilidade reduz os custos de manutenção e de operação das vias durante o tempo de serviço.

Uma das soluções para o prolongamento da vida útil dos pavimentos que vem sendo aplicadas durante as últimas décadas é a utilização de asfaltos modificados por polímeros, que elevam a resistência à fadiga e reduzem as deformações permanentes, mas em contrapartida possuem custos muito elevados, dificuldades de transportes, armazenamento e incorporação na mistura (Núñez, 2007).

Com o aumento do custo dos materiais de construção, entre eles os derivados de petróleo, a redução da disponibilidade de materiais naturais, aliado às novas exigências/limitações ambientais impostas na construção e manutenção de pavimentos, é

imprescindível que os pesquisadores procurem materiais que possam apresentar bom desempenho com custo relativamente baixo. Assim, muitos modificadores têm sido desenvolvidos para melhorar as propriedades dos ligantes, gerando grandes benefícios para a engenharia rodoviária e aos usuários.

Contudo, o uso de ligantes especiais implica em maiores custos iniciais, apresentando ainda dificuldades de transporte, armazenamento e incorporação à mistura. Além disso, o crescente preço do petróleo tem enfatizado a importância do estudo de materiais de pavimentos que possam atender situações específicas e apresentar uma relação custo/benefício atrativa. As novas exigências de desempenho dos pavimentos flexíveis, tanto funcionais quanto estruturais, têm motivado pesquisas a respeito da utilização de modificadores em ligantes asfálticos. Dentre as frações minerais que compõem as misturas asfálticas a fração filer tem merecido destaque, dada sua influência sobre as propriedades do mástique. (Specht, 2008).

Estudos recentemente publicados nos Estados Unidos (Little *et. al*, 2006) dão conta que a incorporação de cal em misturas asfálticas, além de melhorar a adesividade agregado-ligante e enrijecer o ligante asfáltico e a própria mistura (o que a torna mais resistente às deformações permanentes), retarda o trincamento (seja este ocasionado por fadiga ou por baixas temperaturas), altera favoravelmente a cinética da oxidação e interage com produtos da oxidação, reduzindo seus efeitos deletérios.

A cal hidratada melhora substancialmente cada uma dessas propriedades tanto se usada sozinha, quanto em conjunto com modificadores poliméricos, contribuindo na formação de pavimentos que apresentarão elevado desempenho por muitos anos. Assim, análises de custo de ciclo de vida, como a realizada por Hicks e Scholz (2001) demonstram que a cal também é economicamente vantajosa.

Em pesquisa realizada por Bock *et. al* (2009) para avaliação mecânica de misturas asfálticas com diferentes formas de adição de cal demonstrou-se que um dos fatores importantes a ser considerado é a forma como a cal é incorporada na mistura asfáltica. Nesta pesquisa foram avaliadas cinco diferentes formas de incorporação de cal, e foi constatado que a melhor forma de incorporação, segundo as propriedades coeso-adesivas, é a forma na qual se faz a mistura de cal ao agregado graúdo seco “*Cal/Agregado Seco*”; a forma de



incorporação como calda de cal sobre o agregado graúdo “*Cal/Calda*” foi a segunda melhor forma de incorporação neste quesito de avaliação. Constatou-se dessa forma que as amostras com adição de cal sobre agregado graúdo apresentaram melhores resultados.

Todas as misturas com incorporação de cal apresentam uma redução significativa no teor de ligante, onde a maior redução em relação à amostra de *Referência* (sem adição de cal) ocorreu com a mistura *Cal/Calda* (14,28%). Essa redução proporciona uma grande economia, levando em consideração que na mistura, o ligante asfáltico é o componente de maior custo financeiro.

Com base nestes estudos anteriormente realizados, esta pesquisa visa contribuir para a melhoria da técnica de pavimentação brasileira, onde reforça-se a importância da conservação do sistema viário devido a sua importância socioeconômica. Uma adequada infra-estrutura viária com revestimento asfáltico em bom estado de conservação além de proporcionar benefícios diretos aos usuários como a melhoria dos níveis de conforto e segurança, ainda possibilita a redução dos custos operacionais dos veículos, incrementa o progresso sócio-econômico do país, repercutindo positivamente na qualidade de vida, estruturação espacial das comunidades, além de promover o escoamento da produção agrícola e industrial, incrementando assim às riquezas nacionais.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Segundo Birman (1982), concreto asfáltico (CA) é uma mistura realizada à quente composta de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Seu preparo deve ser executado em usina apropriada, de forma que o CAP faça o recobrimento total das partículas dos agregados. Após a usinagem, a mesma deve ser espalhada e compactada à quente de forma a atender as exigências constantes da especificação.

As misturas de CA são freqüentemente utilizadas nos pavimentos como camadas de revestimentos. Os mais severos defeitos que ocorrem em estruturas flexíveis, se refletem no revestimento e permitem identificar dois modos distintos de solicitação mecânica: flexão repetida, responsável pela fadiga do material (associada ao trincamento do revestimento ou de camadas cimentadas) e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes (Specht, 2004).

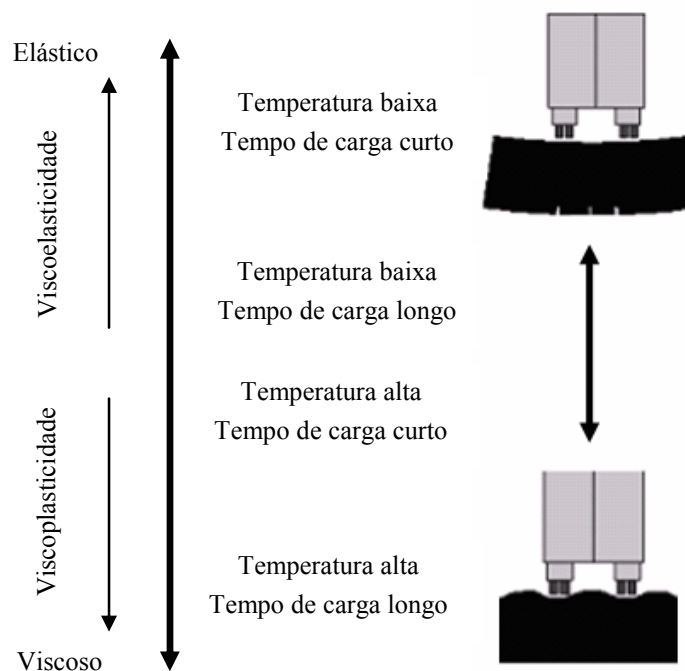
O sucesso do revestimento asfáltico depende da obtenção de uma mistura com graduação adequada de agregados e de um teor ideal de ligante asfáltico, de modo a proporcionar conforto e segurança ao rolamento dos veículos, durabilidade, resistência às cargas, deformações, fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego e às condições climáticas.

O pavimento rodoviário, quando em serviço, está sujeito às solicitações do tráfego e variações climáticas que podem influenciar o seu desempenho. É importante assegurar as propriedades adequadas do ligante asfáltico, ou mesmo melhorá-las, procurando evitar que ocorram defeitos prematuros no revestimento.

Os pavimentos são concebidos para durarem um determinado período. Durante cada um desses períodos ou ciclos de vida, o pavimento inicia numa condição ótima até alcançar uma condição ruim. Com o aumento do volume de tráfego, da carga por eixo e da pressão de pneus, muitos pavimentos têm apresentado falência prematura.

O decréscimo da condição ou da serventia do pavimento ao longo do tempo é conhecido como deterioração do pavimento. Dentre os principais defeitos que afetam o desempenho de um pavimento, dois requerem atenção especial, devido à magnitude que ocorrem e, principalmente, porque são problemas estruturais: o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, que normalmente ocorre nos primeiros anos de vida do pavimento, devido à consolidação e tensões cisalhantes, e a fadiga da capa asfáltica, que geralmente ocorre em pavimentos mais envelhecidos (Roberts *et. al*, 1991).

No estudo do comportamento das misturas betuminosas como materiais viscoelásticos é necessário considerar que fatores principais que influenciam as características (mais ou menos próximas de um comportamento elástico ou de um comportamento viscoso), são a temperatura e a duração do tempo de aplicação da carga, tal como se ilustra esquematicamente na Figura 1.



**Figura 1** - Comportamento das misturas asfálticas

Assim para temperaturas altas e/ou elevados tempos de aplicação de carga (velocidade dos veículos muito reduzida ou nula), o comportamento das misturas pode considerar-se mais próximo de um fluido viscoso. No entanto, a mesma mistura, apresentará um comportamento mais próximo de um sólido elástico, para temperaturas baixas e/ou tempos de aplicação da

carga reduzidos (circulação dos veículos a velocidades mais altas), sofrendo alterações entre estas duas condições em função da variação dos parâmetros envolvidos.

Considerando a variação dos parâmetros envolvidos no comportamento das misturas asfálticas distinguem-se quatro mecanismos de degradação associados ao comportamento das misturas betuminosas na estrutura do pavimento:

### **1) Fendilhamento que ocorre sob baixas temperaturas ou sob tempos de aplicação de carga reduzidos**

Quando a temperatura é muito baixa e, em particular, no caso do tempo de aplicação de carga ser reduzido, a mistura pode ser considerada como um material elástico, com um elevado módulo, mas com um comportamento frágil. Se a tensão de tração induzida pela ação do tráfego for demasiada, formar-se-ão as fendas.

### **2) Fendilhamento por contração sob ações devidas a variações térmicas**

Quando há temperatura baixa, as misturas tendem a sofrer uma diminuição de volume, ou seja, movimento de retração. Uma vez que as misturas, ao serem colocadas sem juntas, se encontram impedidas de movimentos horizontais, as variações térmicas conduzem a tensões de tração. Por outro lado, o módulo das misturas betuminosas aumenta à medida que a temperatura é reduzida, o que conduz a tensões mais elevadas em resultado dessas deformações. Sendo estas tensões elevadas, poderão ocorrer fendas de contração. A importância deste aspecto depende da sensibilidade da mistura a variações térmicas e das condições climáticas a que a mistura está sujeita.

### **3) Trincamento por fadiga sob ação do tráfego**

Quando as temperaturas de serviço são baixas e médias, a mistura comporta-se como um material viscoelástico em que domina o aspecto elástico. A mistura apresenta, nestas condições, um comportamento menos frágil, sendo capaz de suportar tensões de tração repetidas. No entanto, a repetida instalação de tensões de tração devido à passagem de veículos pesados, conduz ao fim de um certo número de ciclos de carga-e-descarga a perda de resistência da mistura por fadiga, e conseqüentemente, o trincamento da camada.

#### **4) Deformações permanentes sob a ação do tráfego**

Com o aumento da temperatura, o módulo das misturas betuminosas diminui, havendo uma predominância da parcela viscosa no seu comportamento. Estas condições proporcionam o aparecimento de deformações permanentes na zona de passagem dos veículos sob a aplicação repetida das cargas, contribuindo para a formação de trilhas de roda.

O trincamento por fadiga e as deformações permanentes são os mecanismos de degradação que apresentam maior relevância principalmente em função das condições climáticas existentes no Brasil (Fernandes Junior, 1994).

Sendo assim, os fenômenos de fadiga ocorrem essencialmente para temperaturas moderadas/baixas, quando o pavimento apresenta um comportamento praticamente elástico. Por esta razão os ensaios para caracterização da resistência à fadiga são geralmente realizados a temperaturas abaixo de 30° C (Huang, 2004 *apud* Rosso, 2007).

As deformações permanentes ocorrem essencialmente para temperaturas elevadas quando o pavimento apresenta um comportamento entre viscoplástico e o viscoelástico, com a componente viscosa preponderante (Rosso, 2007).

## **2.2. FADIGA EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Os materiais constituintes de um pavimento obedecem, em geral, a leis de comportamento mecânico intrínseco, cuja descrição completa permite fornecer os parâmetros necessários ao cálculo na previsão dos fenômenos mecânicos. Uma simples observação dos principais tipos de defeitos que ocorrem num pavimento flexível permite identificar os dois mais importantes modos de sollicitação mecânica que podem provocar deteriorações: a flexão alternada, que conduz às trincas por fadiga, e a compressão, responsável pelo aparecimento das deformações permanentes.

O comportamento dos materiais sob tais tipos de sollicitação pode ser caracterizado qualitativamente por leis fenomenológicas próprias: lei de fadiga e lei de deformação permanente, dois fatores a se ter em conta no dimensionamento de pavimentos. Sendo assim, a concepção racional de pavimentos e a descrição satisfatória das propriedades mecânicas de

seus materiais constituintes e das solicitações transmitidas e experimentadas pelas diferentes camadas, fizeram progressos consideráveis, mas ainda há muito a ser explorado e consolidado neste âmbito (Santos, 2005).

A estrutura de um pavimento, escolhida em função de critérios técnicos e econômicos, é dimensionada em relação a cinco parâmetros (LCPC, 1997 *apud* Momm, 1998):

- ✓ A natureza e a qualidade dos materiais;
- ✓ O tráfego previsto;
- ✓ O solo de suporte;
- ✓ O clima;
- ✓ A qualidade atendida pela rodovia.

Em geral, os métodos de dimensionamento de pavimentos avaliam as estruturas em função dos cinco parâmetros acima, e, após os cálculos das tensões e das deformações nos maciços de multicamadas elásticas e isotrópicas, comparam os resultados obtidos com as solicitações e deformações admissíveis que os materiais são capazes de resistir.

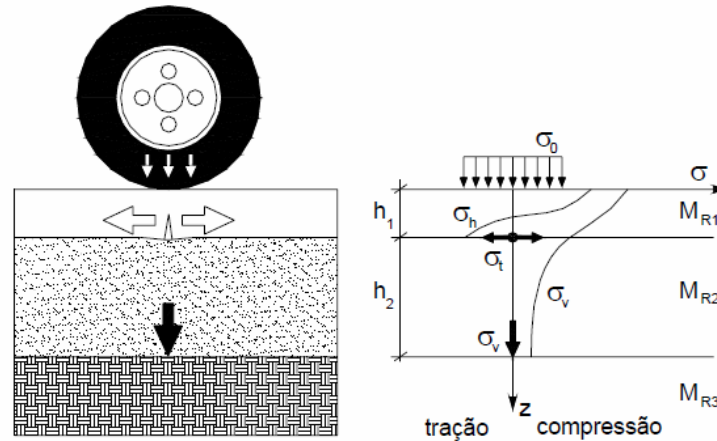
Isto é, as deformações dos cálculos devem ser inferiores àquelas para as quais os materiais resistem nos ensaios de fadiga, e o dimensionamento está correto desde que as deformações calculadas sejam menores que as deformações admissíveis ( $\epsilon$  calculada <  $\epsilon$  admissível).

### **2.2.1. Caracterização da fadiga**

As camadas do pavimento de concreto asfáltico são submetidas a solicitações de flexão às passagens das cargas rolantes. Mesmo que as deformações provocadas sejam pequenas, as repetições das solicitações causam danos por fissuração progressiva do material.

A Figura 2 ilustra as solicitações sofridas pelo pavimento quando da repetição das cargas dos veículos. Na superfície do pavimento é aplicada uma carga vertical de compressão, e nas fibras inferiores da camada asfáltica surgem tensões de tração e de compressão devido ao carregamento e descarregamento repetido (Santos, 2005).

O fenômeno de fadiga de um material caracteriza-se por sua ruptura após a aplicação repetida de um grande número de solicitações com amplitude de deformação inferior à amplitude que o levaria à ruptura com uma só aplicação da solicitação.



**Figura 2** - Tensões em um pavimento

Fonte: Medina (1997)

Fadiga é a degradação do material sob carregamento repetido, sendo reconhecida como uma das principais causas da deterioração ou degradação dos materiais de pavimentos. Ela é sempre iniciada nas regiões de máximas tensões ou deformações de tração, já que se verifica que os materiais são mais resistentes a carregamento repetidos de compressão do que de tração. Estas máximas tensões ou deformações ocorrem naturalmente na camada do pavimento com maior rigidez. Ressalta-se a importância do estudo e caracterização deste material em laboratório para que se possam utilizar ferramentas de dimensionamento mais confiáveis (Wesseling, 2002).

O ensaio que caracteriza o fenômeno de fadiga consiste em submeter corpos-de-prova do material às solicitações repetidas e anotar o número de ciclos até que entre em ruptura.

A curva que representa a vida de um material em função das solicitações aplicadas  $S$  (curva de Wöhler) é habitualmente dada pela relação da Equação 1:

$$N_f = a * \sigma_t^b \quad (1)$$

Onde:

$N_f$  = número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$\sigma_t$  = tensão de tração repetida solicitante;

$a$ ,  $b$  = constantes obtidas na regressão linear dos pares  $N_f$  e  $\sigma_t$  determinados em ensaios, em escalas logarítmicas.

A fadiga da camada de revestimento, bem como a reflexão das trincas para a camada de reforço, tem sido uma preocupação constante dos engenheiros rodoviários tanto em nível nacional quanto mundial. Esta preocupação tem levado muitos pesquisadores a buscarem a compreensão do problema, identificando causas, comportamento, leis de crescimento e métodos de remediação avaliando seus mecanismos e formas de atuação, além do incremento da vida de fadiga.

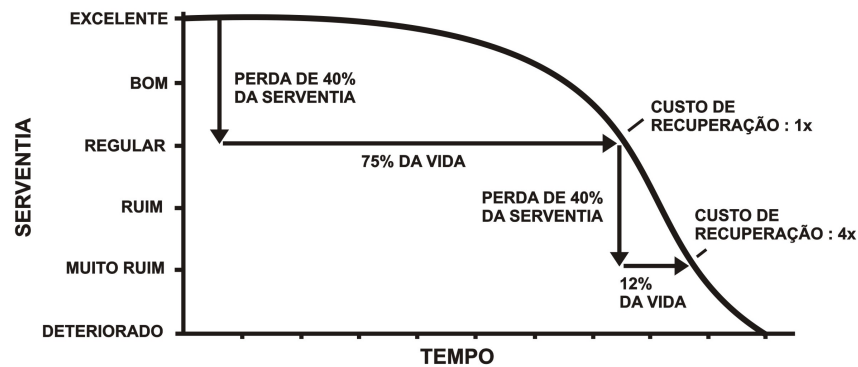
#### ✓ Vida de fadiga

A vida de fadiga da camada de revestimento de um pavimento pode ser definida como o número de passagens de uma determinada carga, normalmente denominada de “eixo padrão” necessárias para que ocorra o início do trincamento ou um determinado grau de trincamento admissível estabelecido.

Quando um pavimento apresenta as primeiras trincas, pode-se dizer que grande parte de sua vida útil já se passou, e que se não houver nenhum tipo de intervenção, em um curto espaço de tempo o pavimento estará completamente deteriorado e sua reconstrução será necessária, exigindo um montante significativo para repor as condições de conforto e segurança desejadas pelo usuário.

A Figura 3 mostra de maneira esquemática a evolução da deterioração de um pavimento em função da utilização de sua vida útil. Nela pode-se ver que o pavimento reduz 40% de sua serventia com a utilização de 75% de sua vida útil e que uma intervenção nesse ponto custa em torno de 4 vezes menos que uma intervenção após 87% da vida útil utilizada, quando o pavimento terá então perdido 80% de sua serventia (Tonial, 2001).





**Figura 3** - Evolução da deterioração do pavimento em função do tempo de utilização de sua vida útil.

Fonte: Shahin (1994)

Segundo Pinto e Motta (1995), a estimativa da vida de fadiga pode ser feita de duas formas:

- Em ensaios de placa ou pistas de simulação de tráfego que buscam a melhor representação das condições reais do pavimento ou;
- Em ensaios de laboratório, com corpos de prova que representam uma modelização das condições de trabalho.

### 2.2.2. Formação das trincas

O trincamento por fadiga tanto pode iniciar nas fibras inferiores da camada do revestimento asfáltico, propagando-se por toda a espessura até o surgimento das trincas na superfície, quanto pode iniciar pelo topo da camada do revestimento, devido ao surgimento de tensões críticas na fibra superior da camada, agravadas pelo enrijecimento ocasionado pelo envelhecimento, dependendo também da espessura da camada (Franco, 2000).

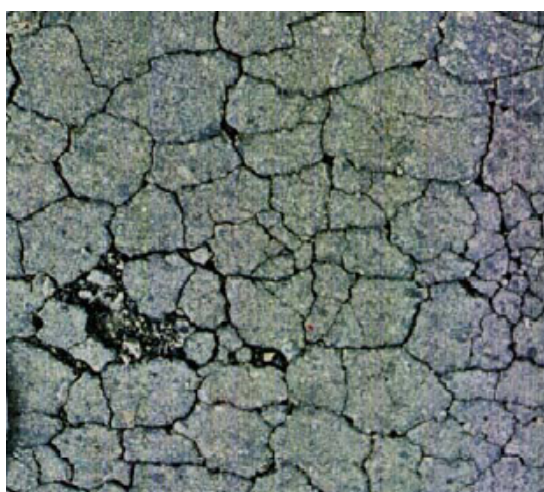
O trincamento inicia em pontos críticos, onde as tensões são maiores. Com a continuação da aplicação do carregamento, as trincas se propagam por toda a espessura da camada, permitindo a passagem de água da superfície para a estrutura do pavimento. Este fenômeno enfraquece e reduz o desempenho global do pavimento, consistindo em um dos principais processos de ruptura dos pavimentos (Ayres, 1997).

O trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões e de deformações do sistema estratificado e, assim, o seu desempenho. É importante, portanto, conhecer as características de ruptura dos materiais envolvidos na construção dos pavimentos, principalmente das camadas asfálticas de revestimento pelo seu alto custo. O comportamento dos revestimentos sob solicitações à flexão e à compressão são caracterizados por leis de fadiga e leis de deformação permanente (Specht, 2006).

O trincamento por fadiga é um conjunto de trincas, causadas por diminuição gradual da resistência da superfície do revestimento asfáltico, sob repetida ação das cargas de tráfego. Inicialmente, ocorrem trincas capilares paralelas, na direção do eixo da rodovia.

Geralmente as trincas por fadiga aparecem primeiro, na superfície inferior da capa asfáltica, onde as forças de tração e os esforços são maiores sob a carga de roda. Essas fendas se propagam para a superfície, inicialmente como uma ou mais trincas longitudinais paralelas. As trincas se conectam, depois de repetida ação das cargas do tráfego, formando peças que lembram a pele de um jacaré (Figura 4). O trincamento por fadiga, no seu estágio final de evolução, dá origem ao defeito denominado “panela”.

As condições ambientais (temperatura e umidade) podem acelerar o início e a propagação do trincamento. A água superficial penetra pelas fendas, enfraquecendo as camadas inferiores e o solo. Se a drenagem lateral for insuficientemente, o trincamento por fadiga aparecerá primeiro na trilha de roda externa (Rozek, 2008).



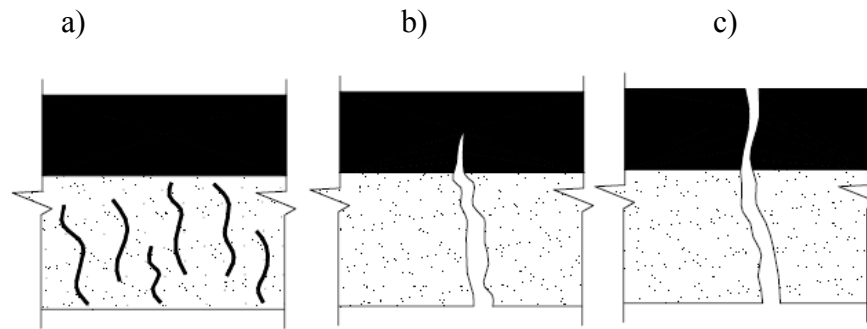
**Figura 4** - Trincamento por fadiga

Segundo Colombier (1989) *apud* Pereira 2002, o aparecimento das trincas em pavimentos asfálticos (Figura 4) é decorrente dos seguintes fatores:

- **Fadiga:** ruptura da camada pela passagem de cargas repetidas após um determinado número de ciclos;
- **Retração:** em locais com temperaturas muito baixas combinadas com a utilização de camadas estabilizadas com ligantes hidráulicos (cimento, cal, etc.) surge a retração das camadas do pavimento, favorecendo a formação de trincas;
- **Movimentação do Subleito:** movimento vertical diferencial entre os bordos das trincas, provocados pelo aumento de umidade, recalques, retração hidráulica;
- **Defeitos Construtivos:** gerados por uma composição inadequada das camadas do pavimento, má execução de juntas longitudinais e deslocamento das camadas.

A propagação das trincas é o resultado de três etapas com diferentes mecanismos e dependentes dos tipos de solicitação atuantes na camada de revestimento. Estes mecanismos são (Tosticarelli e Godoy, 1993):

- **Início do fissuramento** - Corresponde ao momento do início da fissura na camada de revestimento, a partir de defeitos pré-existentes na camada de revestimento antigo. (Figura 5 a);
- **Crescimento estável da trinca** - É o crescimento lento da fissura e corresponde ao crescimento vertical na camada de revestimento a partir da concentração de tensões que provocam a abertura da trinca devido às solicitações do tráfego e da temperatura. (Figura 5 b);
- **Propagação instável da trinca** (aparecimento e propagação na superfície, ruptura). É a fase final e corresponde ao aparecimento da trinca na superfície do revestimento. (Figura 5 c).



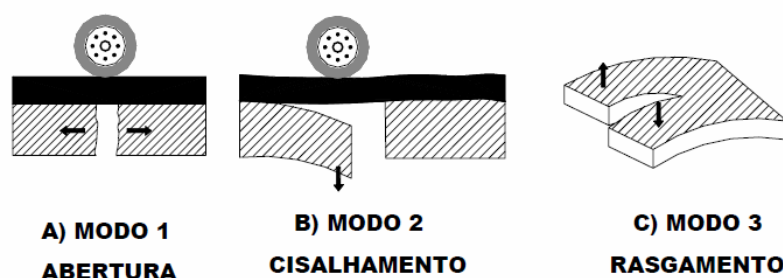
**Figura 5 - Etapas do trincamento**

Se o material em torno da trinca for capaz de absorver a variação da energia de deformação associada a altas deformações sem ruptura, então o crescimento da trinca será inibido. Isto é, se a resistência do material em torno da trinca for alta, a trinca poderá não se propagar com a aplicação das cargas.

O crescimento das trincas pode ser provocado pelo tipo de movimento imposto às faces das trincas. Três são os tipos de movimentos de bordos existentes.

Estes modos de movimentação são necessários e suficientes para descrever todos os modos possíveis de comportamento da trinca no estado mais geral de tensões elásticas (Irwin, 1957 *apud* Rodrigues, 1991) e estão indicados na Figura 6:

- ✓ **Modo I:** Abertura da trinca provocada pela retração térmica ou por ressecamento de um ligante hidráulico. As duas superfícies são separadas na direção  $y$ , mas as deformações são simétricas em relação aos planos  $xz$  e  $xy$ ;
- ✓ **Modo II:** Cisalhamento da camada sob efeito de uma carga de roda. As superfícies escorregam uma sobre a outra na direção  $x$  e as deformações são simétricas em relação ao plano  $xy$  e anti-simétricas em relação ao plano  $xz$ ;
- ✓ **Modo III:** Rasgamento da extremidade da trinca por solicitações de carga de roda sobre a trinca longitudinal em camadas de revestimento. As superfícies escorregam uma sobre a outra na direção  $z$  e as deformações são anti-simétricas em relação aos planos  $xy$  e  $xz$ .



**Figura 6 - Modos de movimentação de uma trinca**

### 2.2.3. Ensaios de fadiga

O ensaio de fadiga visa a obtenção de um número de solicitações que uma determinada carga levaria a mistura asfáltica a uma condição de ruptura.

O critério de ruptura pode ser:

- ✓ Redução da rigidez inicial da mistura asfáltica a um certo nível (por exemplo 50%). Neste caso, a vida de fadiga da mistura é definida em termos de vida de serviço ( $N_s$ );
- ✓ Aparecimento da primeira fissura; e,
- ✓ Ruptura total do corpo-de-prova. Neste caso, a vida de fadiga da mistura é definida em termos de vida de fratura ( $N_f$ ).

Dependendo do critério adotado, tem-se a respectiva curva de fadiga. Usualmente tem-se adotado no Brasil, o critério de ruptura total do corpo-de-prova, e este é o critério que será empregado nos ensaios deste trabalho.

No grupo de ensaios que procuram simular as condições do tráfego, estão aqueles que são executados em placas ou vigas apoiadas em suporte que visam representar as camadas adjacente são revestimento. No outro grupo, dos ensaios laboratoriais que procuram uma aproximação fundamentada, estão os que são executados em corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos, submetidos a níveis de tensões ou deformações de modo a simular a condição de solicitação no campo (Santos, 2005).

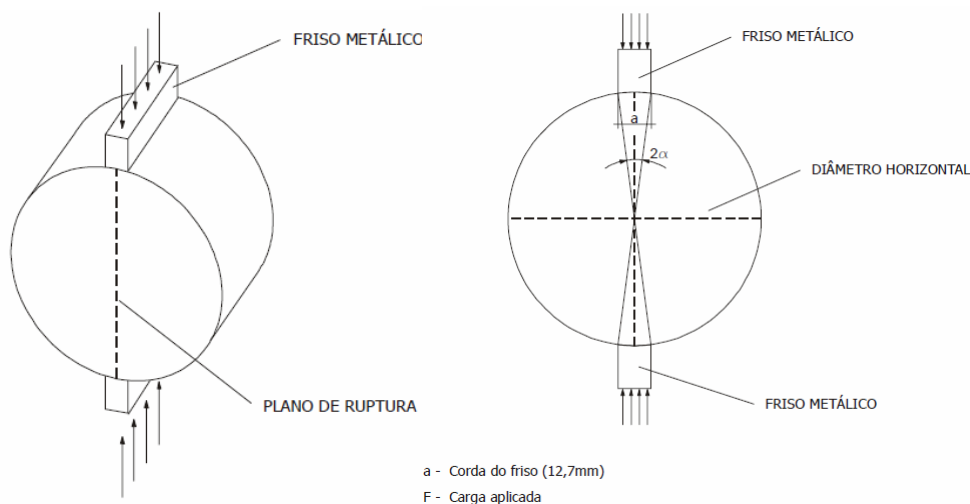
Os ensaios dinâmicos distinguem-se quanto ao tipo de esforço empregado (flexão, torção, tração direta e indireta) e quanto à geometria das amostras (cilíndricas, retangular, vigota retangular, trapezoidal). Também são distintos quanto à forma do carregamento e aos estados de tensões produzidos na amostra (Preussler, 1983, apud Morilha Junior, 2004).

#### ➤ Ensaio de fadiga por compressão diametral

Devido a facilidade de execução, principalmente na moldagem dos corpos-de-prova no sistema de carregamento e até mesmo pela utilização e operação mais simples do equipamento de carga repetida, a realização dos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada são os mais usuais em nosso país, sendo este também o tipo de ensaio utilizado neste trabalho. As cargas solicitantes devem induzir tensões normais horizontais de 10 a 50% da tensão de ruptura estática (Morilha Junior, 2004).

O ensaio de compressão diametral para fadiga de misturas asfálticas é um ensaio de tração indireta conduzido com cargas repetidas em um corpo-de-prova cilíndrico. São aplicadas cargas de compressão diametralmente ao corpo-de-prova. Na Figura 8 é ilustrado um esquema do ensaio de compressão diametral, indicando os frisos de aplicação e carga, no plano de ruptura e a aplicação da carga.

O corpo-de-prova é submetido a um estado biaxial de tensões, sendo que seções verticais do corpo-de-prova ficam sujeitas a esforços de compressão e seções horizontais, por sua vez, a esforços de tração (Balbo, 2000, *apud* Santos, 2005).



**Figura 7 - Ensaio de compressão diametral**

Além do estado biaxial de tensões existentes na compressão diametral, Monismith *et al.* (1990, *apud* Santos, 2005) citam outras duas diferenças importantes entre os ensaios de flexão e de compressão diametral:

- ✓ Deformação permanente, usualmente proibida na flexão é permitida nos ensaios de compressão diametral, configurando até como parâmetro para encerramento do ensaio;
- ✓ Aplicação de tensões reversas (tração) é impraticável na compressão diametral.

O efeito destas diferenças é uma menor vida de fadiga na compressão diametral (Monismith *et al.*, 1990, *apud* Santos 2005).

As principais vantagens do ensaio de compressão diametral são (Monismith *et al.*, 1990; Balbo, 2000 e Pinto, 1991, *apud* Santos 2005):

- ✓ Execução do ensaio é simples;
- ✓ A ruptura é iniciada em uma região de tensões de tração relativamente uniformes;
- ✓ O equipamento pode ser utilizado para outros ensaios, como módulo de resiliência e resistência à tração;
- ✓ Existe um estado biaxial de tensões, que possivelmente representa melhor o estado de tensões em campo;
- ✓ Os ensaios podem ser realizados em corpos-de-prova confeccionados em laboratório ou extraídos do pavimento;

Como desvantagens podemos destacar:

- ✓ Embora exista um estado de tensões biaxial no centro do corpo-de-prova, é impossível variar a proporção entre as componentes vertical e horizontal e, conseqüentemente, reproduzir o estado de tensões em locais críticos dentro do pavimento;

- ✓ Este método subestima significativamente a vida de fadiga se a tensão de tração principal é usada como determinante do dano. Mesmo quando a diferença de tensões  $\Delta\sigma = (\sigma_t - \sigma_c)$  é usada para prever a vida de fadiga, este método subestima a vida de fadiga, em relação a outros ensaios como flexão simples.

#### **2.2.4. Fatores influentes na resistência à fadiga**

O comportamento à fadiga das misturas asfálticas é influenciado por vários parâmetros. A resistência à fadiga é dependente de fatores ligados às características e tipos de corpos-de-prova, às condições do ensaio e às condições ambientais (Santos, 2005).

A fim de incorporar o fenômeno de fadiga dos concretos asfálticos nos dimensionamentos de pavimentos é importante conhecer os fatores que afetam seu comportamento que podem ser agrupados em três famílias (Momm, 1998):

- Fatores de solicitação;
- Fatores de formulação do concreto asfáltico;
- Fatores do meio ambiente.

##### **2.2.4.1. Fatores de solicitação**

Os principais fatores que influenciam a fadiga inerentes à solicitação imposta aos concretos asfálticos estão relacionados às particularidades dos ensaios:

Os resultados de fadiga são diferentes para ensaios nos quais a tensão é controlada ou a deformação é controlada.

Algumas tendências são observadas:

- Durante a evolução do teste de fadiga à tensão controlada a deformação cresce continuamente até a ruptura e no teste à deformação controlada a tensão reduz progressivamente;



- Os concretos asfálticos tendem à duração de vida menores nos ensaios com tensão controlada que com deformação controlada;
- Os resultados de duração de vida nos testes de tensão controlada, em geral, são menos dispersos que nos ensaios de deformação controlada;
- Os módulos de rigidez mais altos tendem a produzir duração de vida maior nos ensaios de tensão controlada do que nos ensaios de deformação controlada;
- Nos ensaios de tensão controlada a deterioração do corpo-de-prova é forte e a propagação das fissuras é rápida, enquanto que nos ensaios de deformação controlada a deterioração é moderada e mais longa.

#### **2.2.4.2. Fatores de formulação**

Existem muitos fatores de formulação que influenciam a fadiga dos concretos asfálticos, a seguir são apresentados os mais importantes:

##### **✓ Natureza do Cimento Asfáltico**

A susceptibilidade térmica do cimento asfáltico é um fator fortemente influente no comportamento à fadiga dos concretos asfálticos em razão do aquecimento que se produz durante o ensaio.

Os concretos asfálticos produzidos com cimentos asfálticos mais rígidos, nesta condição serão menos susceptíveis às variações de temperatura e frequência e por consequência terão vida mais longa. Por outro lado, os cimentos asfálticos moles tornam os concretos asfálticos mais susceptíveis às variações de temperatura e frequência, por esta razão menos interessantes sob o ponto de vista da fadiga.

##### **✓ Teor de Cimento Asfáltico**

O teor de cimento asfáltico na formulação dos concretos asfálticos é o parâmetro que mais influencia os resultados em fadiga. Para um cimento asfáltico dado, o teor de cimento asfáltico apresenta uma percentagem de ótimo:

- Para valores de percentagem de cimento asfáltico abaixo do ótimo, a resistência mecânica e à fadiga aumentam com o aumento do teor de cimento asfáltico.
- Para valores de percentagem de cimento asfáltico acima do ótimo, há uma queda das características mecânicas do concreto asfáltico, inclusive com aumento do risco de deformação permanente.

#### ✓ **Tempo de Repouso**

A introdução de período de repouso pode traduzir-se num ganho em duração de vida dos corpos-de-prova em parte pela limitação do aquecimento e graças à “cicatrização” das fissuras que se produz por causa do ligante de hidrocarbonetos. Contudo, o tempo de repouso aumenta o tempo de duração dos ensaios (Riviere, 1996 *apud* Momm, 1998).

#### ✓ **Compacidade ou Percentagem de Vazios.**

O volume de vazios assume particular importância no comportamento das misturas asfálticas, independente do tipo de ensaio que seja realizado para determinação da vida de fadiga da mistura (TC ou DC). Misturas com elevados volumes de vazios apresentam menores resistências à fadiga, quando ensaiados à tensão controlada (TC) (Santos, 2005).

#### ✓ **Granulometria**

Embora a influência do tamanho máximo não seja tão forte quanto a do teor de cimento asfáltico, contudo, a curva granulométrica pode agir através de dois fatores: o tamanho máximo e o tipo de curva (contínua ou descontínua) na influência sobre a compacidade por consequência sobre a fadiga. A percentagem de vazios do esqueleto mineral varia em função da forma da curva granulométrica. Para curva granulométrica mais próxima da linha de potência 0,45 a percentagem de vazios é mais fraca e a compacidade mais forte. A compacidade afeta o comportamento mecânico e a resistência à fadiga (Momm, 1998).

## ✓ A Forma e a Textura dos Granulares

A forma e a textura dos granulares dos concretos asfálticos são fatores que influenciam na compactação. Os granulares angulosos, tendo superfícies rugosas, são freqüentemente mais difíceis de serem compactados, o que leva a uma menor compactação para a mesma energia de compactação (módulo de rigidez mais fraco e vida mais curta). Para uma mesma energia de compactação e mesma granulometria, os concretos asfálticos constituídos de granulares arredondados e lisos apresentam menor percentagem de vazios (são facilmente compactados) e os concretos asfálticos de granulares britados resultam com maior percentagem de vazios.

### 2.2.4.3. Fatores do meio ambiente

Os dois principais fatores do meio ambiente que afetam a resistência à fadiga dos concretos asfálticos são a temperatura e a velocidade da aplicação da carga (ou freqüência).

#### ✓ Temperatura

A temperatura afeta de modo muito forte a duração da vida dos concretos asfálticos face a redução da rigidez com o aumento da temperatura. À baixa temperatura, compreendida entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $+10^{\circ}\text{C}$ , e freqüência de 50 Hz, os concretos asfálticos podem apresentar deformações no domínio praticamente elástico. Por outro lado, para temperaturas de ensaio acima de  $20^{\circ}\text{C}$  e freqüências de 30 Hz a 50 Hz, o aquecimento impõe ângulo de fase acima de  $22^{\circ}$ , podendo atingir a ordem de grandeza de  $45^{\circ}$  e forte dissipação de energia, produzindo um comportamento viscoelástico não linear (Momm, 1998).

#### ✓ Freqüência

Embora existam menos estudos sobre a influência da freqüência da solitação sobre a duração da vida dos concretos asfálticos que sobre a temperatura, uma tendência é evidenciada. O efeito é simétrico à variação da temperatura, isto é, com aumento da freqüência aumenta a duração da vida para os ensaios de tensão controlada e uma diminuição da duração da vida para ensaios de deformação controlada. Entretanto, o efeito da variação da duração da vida não pode ser considerado proporcional à variação do módulo em função da freqüência para os ensaios de deformação controlada (Momm, 1998).

#### **2.2.4.4. Considerações pertinentes**

A análise tradicional da fadiga ainda não permite explicar todo o comportamento dos concretos asfálticos no fenômeno da fadiga.

##### **✓ Auto-reparação**

A explicação das divergências entre as previsões de comportamento à fadiga dos concretos asfálticos em laboratório e a vida real dos concretos asfálticos nos pavimentos pode estar ligado ao fenômeno da auto-reparação. Este fenômeno corresponde à “cicatrização” das fissuras dos pavimentos observadas em períodos quentes nas faixas de tráfego pesado. O intervalo de repouso entre as solicitações sucessivas permite que as fissuras sejam recuperadas. No laboratório, os ensaios contínuos não avaliam este fenômeno que altera a vida do concreto asfáltico. Uma possibilidade de estudar o fenômeno é adotar períodos de repouso nos ensaios (descontínuos) (Momm, 1998).

##### **✓ Dissipação Térmica**

Os concretos asfálticos por seu caráter viscoelástico apresentam um aquecimento que leva a aumentar a temperatura. Aliado à dificuldade de condução térmica do material a temperatura interna do corpo-de-prova durante o ensaio pode-se elevar de modo tão acentuado que a alteração do módulo não pode ser negligenciada. Este fenômeno parasita interage com o critério de ruptura adotado nos ensaios de fadiga, uma vez que a diminuição do módulo, que é independente da deterioração do corpo-de-prova, interfere no critério de fim de ensaio (Momm, 1998).

### **2.3. ADESIVIDADE EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

#### **2.3.1. Adesividade**

Misturas asfálticas, empregadas como camada de rolamento, devem possuir flexibilidade suficiente, mesmo em baixas temperaturas, para minimizar trincas devido a variações térmicas, e em contrapartida ter rigidez suficiente para suportar as solicitações do tráfego. É

de longa data a preocupação dos técnicos na obtenção e utilização de materiais mais duráveis para serem empregados em pavimentos.

Além da qualidade dos materiais empregados, é importante que esses materiais possuam uma boa interação quando colocados em íntimo contato. Um dos aspectos importantes em misturas asfálticas é a propriedade da adesividade ligante asfáltico/agregado. Embora essa propriedade tenha sido negligenciada ou mesmo simplificada, ela responde por boa parte da qualidade da mistura asfáltica.

A verificação da adesividade ligante/agregado é fundamental para garantir a resistência à desagregação e ao descolamento das misturas asfálticas. Ensaio muito simples, geralmente visuais, têm sido recomendados, podendo ser citados os ensaios de avaliação visual da capacidade de recobrimento do agregado pelo ligante asfáltico e também o ensaio de equivalente de areia, para quantificar o material de dimensões excessivamente fina, sendo essa parcela prejudicial à adesividade do ligante asfáltico à superfície do agregado (Moura, 2001).

A adesividade em misturas asfálticas pode ser entendida como a propriedade que garante a união entre o cimento asfáltico e o agregado sob a ação do tráfego e da água. Pinilla (1965) define a aderência entre um ligante asfáltico e o agregado pétreo como a resistência que opõe o ligante a ser afastado do sólido pela ação das forças exteriores. Segundo Martinho (1992), a adesividade do CAP ao agregado é a medida de intensidade enérgica da ligação da película de CAP ao longo da superfície do agregado.

Inúmeros fatores influenciam a adesividade ou o dano induzido pela umidade. Hicks (1991) resumiu e classificou estes fatores que estão apresentados na Tabela 1. Um dos fatores importantes é o volume de vazios; misturas com volume de vazios entre 6 e 13% (aproximadamente) não são nem impermeáveis nem drenantes e são as mais susceptíveis ao dano por umidade induzida. Outro fator que deve ser mencionado é a eficiência do sistema de drenagem de um pavimento, capaz de evitar o acúmulo de água junto ao revestimento e a umidade ascendente por capilaridade (Specht *et al*, 2005).

A desagregação do pavimento pode afetar o conforto ao rolamento e em maiores proporções, com abertura de panelas, compromete a segurança do usuário. Nestas condições,

as intervenções, em geral, são mais onerosas exigindo uma manutenção que pode até levar à remoção da camada de revestimento. Este custo poderia ser bem menor, se os problemas de adesividade ligante/agregado fossem corrigidos no projeto de dosagem das misturas asfálticas ou precocemente detectados em pista. Neste último caso, para evitar a desagregação acelerada da mistura asfáltica pela ação deletéria da água, pode-se recobri-la com uma camada esbelta e impermeável de revestimento asfáltico, como lama asfáltica, micro-concreto asfáltico ou camadas super delgadas.

**Tabela 1** - Fatores intervenientes nas características de adesividade

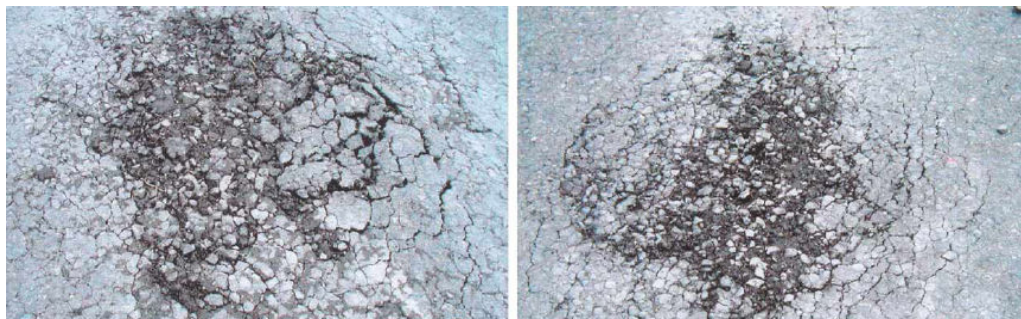
<i>Fator</i>	<i>Característica Desejável</i>
<b>1. Agregados</b>	
a) textura superficial	áspero
b) porosidade	depende do tamanho do poro
c) mineralogia	agregados básicos são mais resistentes
d) cobertura do agregado por pó	limpo
e) umidade superficial	seco
f) composição química superficial	capaz de formar pontes de hidrogênio
g) filer mineral	aumenta a viscosidade do ligante
<b>2. Cimento Asfáltico</b>	
a) viscosidade	alta
b) química	nitrogênio e fenóis
c) espessura filme	alta
<b>3. Tipo de Mistura</b>	
a) vazios	muito baixo ou muito alto
b) granulometria	muito aberta ou muito densa
c) teor de ligante	alto
<b>4. Condições Climáticas</b>	
a) temperatura	quente
b) precipitações durante construção	nenhuma
c) precipitações após construção	mínima
d) ciclos de gelo/degelo	mínimo
<b>5. Tráfego</b>	
a) volume de tráfego	baixo tráfego

Fonte: Hicks 1991

### 2.3.2. Processo de Perda de Adesividade

Percebe-se, que os problemas decorrentes à falha de adesividade estão sempre relacionados à presença e ação da água. Pode-se afirmar que a água é, sem dúvida alguma, fator preponderante e decisivo a ser considerado quando se avalia o desempenho de um revestimento betuminoso no que se refere à adesividade (Neves Filho, 2007).

A perda de adesividade em misturas asfálticas é um problema comum nas nossas rodovias, conforme representado na Figura 9, sendo assim um fator importante e que devemos levar em consideração na realização de um projeto de misturas asfálticas.



**Figura 8** - Efeito deletério da água  
Fonte: Mallick (2005)

A perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados de uma mistura betuminosa pode ser associada a dois mecanismos: perda de adesão e perda de coesão. A perda de adesão está ligada à entrada de água entre o ligante e o agregado e ao descolamento do filme asfáltico da superfície do agregado. A perda de coesão está ligada à redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações ligante/agregado. Estes dois mecanismos estão intimamente relacionados e, então, o dano causado pela umidade em misturas asfálticas é a combinação entre estes dois fatores (Specht *et. al*, 2005).

Segundo o Asphalt Institute (1987), a adesão é definida como sendo a força de atração entre moléculas dessemelhantes que tendem a manter os corpos unidos. A adesão de um material a outro é um fenômeno de superfície. Ela depende de um contato estreito entre dois materiais e da atração mútua entre suas superfícies.

Em misturas asfálticas, a adesividade é a capacidade do ligante asfáltico de aderir à superfície do agregado, sendo que vários fatores influenciam este fenômeno, com grau de importância e intensidades diferentes. O contato mais íntimo possível entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado é uma propriedade que vem sendo denominada de “poder molhante” pelo *Asphalt Institute*, e quanto menor for a viscosidade do ligante asfáltico maior seu “poder molhante”.

“A Coesão é a propriedade resultante da ação das forças atrativas existentes entre as partículas (moléculas, átomos, íons) constituídas de um corpo” (De Holanda, 1986). Em

misturas asfálticas, a coesão é a propriedade responsável por deixar os materiais em contato, “ligados” ou coesos uns aos outros, até que forças externas perturbem ou rompam estas ligações.

Como aplicação em engenharia, a coesão é responsável por uma parcela da estabilidade (de resistência) da mistura asfáltica, pelo fato do ligante asfáltico agir como elemento de ligação entre diferentes tipos e tamanhos de agregados, que por sua vez, estão recobertos por ligante asfáltico graças à adesão. Geralmente, a coesão de uma mistura asfáltica, pode ser detectada através de ensaios laboratoriais, tais como: estabilidade Marshall, módulo de resiliência e resistência à tração (Moura, 2001).

Segundo Terrel & Al-Swailmi (1993, *apud* Moura, 2001), os valores de coesão são influenciados pela viscosidade do material formado pelo conjunto filer-ligante. O ensaio de módulo de resiliência, segundo esses autores, detectaria um problema de adesividade em uma dada mistura asfáltica, caso esse problema fosse bastante acentuado, sendo que a adesão e a coesão agem conjuntamente, tornando complexa a atribuição dos resultados mecânicos à adesão ou à coesão separadamente.

Misturas asfálticas que possuem má adesividade do ligante ao agregado, quando aplicadas em pista, podem resultar numa camada susceptível à desagregação e ao descolamento. Com a desagregação da mistura asfáltica pode ocorrer a penetração de água e atingir, camadas inferiores do pavimento, danificando a estrutura do pavimento. Dependendo do caso, pode-se formar inclusive afundamento em trilhas de roda.

O valor de serventia da via é diretamente afetado caso ocorra a desagregação da camada de rolamento, diminuindo o conforto ao rolamento e, em proporções maiores, com a abertura de buracos, a segurança do usuário fica comprometida. Nestas condições, as intervenções, em geral, são mais onerosas exigindo uma manutenção que pode até levar a remoção da camada de revestimento (Moura 2001).

O Asphalt Institute (1987) relata que existem seis formas da película de ligante asfáltico se separar da superfície do agregado:



**1. Emulsificação:** presença de glóbulos de água dispersos em ligante asfáltico. Isto pode ocorrer devido à utilização de alguns tipos de aditivos químicos, com o objetivo de inicialmente corrigir a má adesividade ligante/agregado, mas que entretanto, depois de um certo período, propiciam a emulsificação do ligante asfáltico. A presença de argilas na superfície dos agregados pode também ser agenciadores de emulsificação.

**2. Desprendimento:** separação do ligante asfáltico da superfície do agregado, devido à presença de uma fina película de água existente na superfície do agregado, antes desse ser envolvido pelo filme de ligante asfáltico, sem necessariamente provocar a ruptura da camada de ligante asfáltico.

**3. Descolamento:** ocorre quando a película de ligante asfáltico é removida da superfície do agregado pela ação da água. A água alcança a superfície do agregado devido à existência de fissuras na camada de ligante asfáltico que recobre o agregado, gerando assim uma forma de *stripping*.

**4. Ruptura da película de asfalto:** a ruptura pode ser considerada uma forma de *stripping* mas, na realidade, ela inicia o *stripping*. A ruptura da camada de ligante asfáltico pode ocorrer por tensões geradas pelo tráfego, principalmente nas arestas dos agregados onde a espessura do filme de ligante asfáltico é pouco espessa.

**5. Pressão nos poros:** provoca também o *stripping*. Essa ocorrência é devido ao aprisionamento de água dentro dos poros, que se deu por problemas de projeto da mistura ou por redução de volume de vazios pela ação do tráfego; a água pode ficar oclusa nesses vazios da camada, com dificuldade de percolação rápida, e frente à ação do tráfego, pode sofrer um aumento da pressão intersticial, descolando a película de ligante asfáltico da superfície do agregado.

**6. Lavagem hidráulica:** este tipo de *stripping* ocorre mais na superfície da camada de rolamento, devido à ação dos pneus, quando a mesma encontra-se saturada; a água ao ser removida da superfície é pressionada e expulsa. Isto ocasiona um tipo de abrasão na superfície, criando uma falha na superfície, descobrindo parte do agregado. Deve-se citar também o efeito abrasivo da poeira depositada na superfície dos pavimentos quando misturada à água de chuva.

Os problemas de adesividade ligante asfáltico/agregado podem comprometer o bom desempenho de misturas asfálticas a curto, médio e longo prazo. O fenômeno envolvido na perda da adesividade é complexo e dependente simultaneamente de vários fatores. Além disso, o processo de perda de adesividade e conseqüente ocorrência de problemas nas camadas de revestimento asfálticos também é um fenômeno complexo.

### **2.3.3. Classificação dos Métodos de Avaliação de Adesividade Ligante/Agregado**

De maneira geral, as metodologias para a avaliação de adesividade podem ser divididas em dois grupos. No primeiro grupo enquadram-se os ensaios que utilizam misturas “soltas” ou “não compactadas”, enquanto no segundo grupo encontram-se os procedimentos que utilizam corpos-de-prova compactados.

Estes ensaios buscam identificar problemas de adesividade entre o ligante e o agregado em misturas asfálticas, tendo como objetivo prever problemas que possam ocorrer durante a vida útil do revestimento. (Neves Filho, 2007).

#### **✓ Métodos de avaliação de adesividade por análise visual**

São métodos que avaliam a susceptibilidade à água, de agregados recobertos por um filme de ligante asfáltico, quando submetidos a um banho em ebulição. Nesses métodos podem-se variar tanto a temperatura do banho como também o período em que a amostra de agregado recoberto por ligante asfáltico fica imersa. O resultado obtido normalmente é feito por avaliação visual e indiretamente procura-se correlacionar o resultado com um possível desempenho da mistura asfáltica em campo.

Dentre as várias metodologias aplicáveis à verificação das características de adesividade de misturas asfálticas estão os métodos empíricos que se baseiam na análise visual onde o contato entre o ligante asfáltico e o agregado é avaliado visualmente procura-se correlacionar os resultados com o possível desempenho da mistura em campo. Exemplos são os métodos DNER – ME 78/94 e DNER – ME 79/94 (Wesseling, 2002).

✓ **Métodos de avaliação de adesividade por análise de comportamento mecânico de misturas asfálticas**

Utilizam-se corpos-de-prova de misturas asfálticas e, de maneira geral, esses corpos-de-prova são moldados no equipamento Marshall e podem ou não serem submetidos a algum processo de condicionamento posterior à compactação, para provocar de forma acelerada situações que testem a adesividade ligante/agregado. Os resultados desses métodos normalmente são obtidos pela razão do módulo de resiliência, resistência à tração, desgaste por impacto, deformação permanente, em corpos-de-prova condicionados e não condicionados. Dependendo dos resultados, alguns desses métodos apresentam diretamente correlação com o desempenho de misturas asfálticas em campo

O segundo grupo de ensaios é baseado no comportamento mecânico das misturas onde amostras de concreto asfáltico são submetidas a um condicionamento e/ou esforço mecânico para provocar de forma acelerada ou similar o que ocorre em campo. Neste grupo estão, dentre outras, as Metodologias Lottman Modificada (AASHTO T283-89) e Cantabro (CEC325/86).

Kandhal 1992 (*apud* Specht *et al*, 2002) apresenta um estudo sobre a susceptibilidade de misturas asfálticas ao dano induzido pela umidade. O autor afirma que a Metodologia Lottman Modificada (AASHTO T 283-89) tem sido recomendada em vários estados americanos para avaliar o potencial de desagregação de misturas asfálticas.

#### **2.3.4. Melhoradores de Adesividade**

A solução para os problemas de adesividade tem sido freqüentemente dada por incorporação de aditivos químicos.

Os agentes melhoradores de adesividade (*anti-stripping agents*) podem fazer-se necessários se um determinado projeto de mistura mostrar-se susceptível ao dano por umidade induzida. Os melhoradores de adesividade líquidos e a cal estão entre os tipos de agentes mais comumente usados. Nos EUA, vários aditivos são utilizados para reduzir a sensibilidade das misturas à umidade, sendo a cal hidratada o mais usado (Little *and* Epps, 2006).

Porém, comumente a quantificação do benefício da inclusão desses aditivos ao longo do tempo não tem sido contemplada. Misturas asfálticas que possuem má adesividade do ligante ao agregado, quando aplicadas em pista, podem resultar numa camada susceptível à desagregação.

São listadas a seguir algumas formas de que proporcionam uma melhor adesividade das misturas asfálticas:

#### ✓ **Ligantes Modificados**

Quando modificados com determinados tipos de polímeros, os ligantes asfálticos tornam-se mais estáveis a temperaturas elevadas, apresentando maior ponto de amolecimento, maior resistência ao envelhecimento, alta adesividade e coesão e maior elasticidade e resistência à deformação permanente.

#### ✓ **Intertravamento**

Misturas asfálticas tipo *Stone Matrix Asphalt* – SMA consistem basicamente de 2 frações de material: agregado graúdo e um elevado teor de mástique, este formado por agregado miúdo, filer mineral, ligante asfáltico e fibras. O esqueleto mineral composto por agregados graúdos em proporção superior em relação às misturas densas e contínuas fornece às misturas um elevado intertravamento entre os grãos, conferindo às mesmas maior resistência. Já o elevado teor de mástique fornece às misturas uma maior durabilidade (Vasconcelos, 2004).

#### ✓ **Dopes**

Martinho (1992) relatou que tanto os agregados ácidos como os básicos apresentam em suas superfícies ampla distribuição de cargas positivas e negativas, mas de forma desbalanceada em função de sua natureza; assim sendo, os agregados ácidos constituídos fundamentalmente por silicatos, devido ao seu alto teor de oxigênio, têm forte preponderância de pontos negativos em sua superfície, enquanto os agregados básicos constituídos fundamentalmente pelos carbonatos possuem preponderância de pontos positivos em sua superfície (Neves Filho, 2007).

Dope é a denominação corrente no meio técnico de pavimentação para os agentes melhoradores de adesividade que são substâncias tensoativas catiônicas, na maioria das vezes, aminas.

A adição do dope (composto com cabeça polar positiva) no cimento asfáltico melhora a adesão entre o ligante e o agregado ácido (com preponderância absoluta de cargas negativas). Esse aumento da adesão se dá através da forte atração entre os dois componentes de polaridades opostas e da conseqüente formação de ligações químicas iônicas e pontes de hidrogênio.

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) é composto por hidrocarbonetos que contêm alguns grupos funcionais polares nos quais estão presentes heteroátomos. Já os agregados possuem uma superfície heterogênea com uma grande variedade de sítios de diferente composição química e nível de atividade. Curtis *et al.* (1993 *apud* Neves Filho 2007) relataram que os “sítios ativos”, presentes na superfície do agregado, são muitas vezes dotados de carga elétrica, ou contêm cargas parciais, que atraem e orientam os grupos polares do asfalto. Nos pontos de contato entre os sítios ativos do agregado e o ligante, os grupos polares se ligam à superfície através de forças eletrostáticas, pontes de hidrogênio e forças de Van der Waals.

#### ✓ Cal hidratada

Para diminuir os efeitos devido à umidade em pavimentos, muitas agências de transportes nos Estados Unidos têm especificado o uso de agentes redutores de dano por umidade (*antistripping agents*) nas misturas asfálticas. Um dos agentes mais usados é a cal hidratada. Investigações laboratoriais e verificações de campo têm mostrado efeitos positivos da cal em misturas asfálticas. Juntamente com aminas e cimento portland, a cal hidratada mostrou-se mais eficaz que polímeros no combate ao dano por umidade (Hicks, 1991).

A cal hidratada é um agente que melhora o desempenho de misturas asfálticas de várias maneiras. Hicks e Scholz, 2001 afirmam que as modificações produzidas pela adição de cal hidratada podem acrescentar anos à vida das misturas asfálticas. Essas modificações podem

melhorar a adesividade ligante-agregado, reduzir a formação de afundamentos de trilhas de roda, bem como reduzir o trincamento e o envelhecimento (oxidação) da camada asfáltica.

A cal hidratada melhora substancialmente cada uma dessas propriedades tanto se usada sozinha, quanto em conjunto com modificadores poliméricos, contribuindo na formação de pavimentos que apresentarão elevado desempenho por muitos anos. Assim, análises de custo de ciclo de vida, como a realizada por Hicks e Scholz, 2001 demonstram que a cal também é economicamente vantajosa.

Epps *et al.* (2003) afirmaram, com base em pesquisas, que a ocorrência de reações químicas entre a cal e vários cimentos asfálticos contribui para a redução do descolamento nas misturas asfálticas. Além disso, a cal hidratada reage pozolanicamente com a argila eventualmente presente na superfície dos agregados impedindo que ocorra a emulsificação do asfalto, fator que poderia comprometer a adesividade. Os mesmos autores verificaram que a cal hidratada, produto alcalino, ao recobrir a superfície dos agregados ácidos, melhora as condições para uma ligação mais efetiva entre o ligante-agregado.

Ao ser acrescentada a uma mistura asfáltica, a cal hidratada reage com os agregados, reforçando a ligação entre o ligante e o material pétreo. Ao mesmo tempo em que age sobre o agregado, a cal também reage com as partículas polarizadas do ligante asfáltico, evitando que estas formem sabões solúveis em água, o que causaria a perda de adesividade. Segundo Petersen *et al.* 1987 (*apud* Núñez, 2007) as moléculas polarizadas, ao reagirem com a cal, formam sais insolúveis que se tornam hidrófobas. Além disso, a dispersão de pequenas partículas de cal hidratada na mistura torna-a mais rígida e dura, reduzindo a possibilidade de ruptura mecânica da ligação entre o CAP e o agregado, mesmo na ausência de água

Little e Epps (2001) concluíram que, além da melhoria na adesividade, a adição de cal gera outros efeitos benéficos nas misturas asfálticas a quente. A cal hidratada age como filer mineral, enrijecendo o ligante e a mistura asfáltica. Em condições de baixas temperaturas, a cal melhora a resistência ao crescimento de fissuras. Adicionalmente, a cal interage com os produtos da oxidação reduzindo seus efeitos deletérios e altera as propriedades plásticas da argila aumentando a resistência à ação da água e a durabilidade das misturas asfálticas.

Petersen (2002, *apud* Neves Filho, 2007) observou, além dos efeitos já apresentados, que a cal neutraliza grupos de ácidos carboxílicos do ligante que impedem a ligação de bases nitrogenadas com a superfície dos agregados. Dessa forma, a cal contribui para a formação de ligações mais resistentes à ação da água entre a superfície do agregado e o CAP.

O enrijecimento resultante da adição de cal hidratada melhora o desempenho dos ligantes a temperaturas elevadas, sem tornar a mistura asfáltica mais frágil a temperaturas muito baixas. De fato, a baixas temperaturas, a cal hidratada se torna menos ativa quimicamente e se comporta com qualquer outro fíler inerte.

A cal reduz o trincamento mais do que os fíleres inativos porque as reações entre a cal e as moléculas polarizadas do cimento asfáltico aumentam o volume efetivo das partículas de cal, rodeando-as com grandes cadeias orgânicas (Lesueur e Little, 1999 *apud* Núñez, 2007). Desta maneira, as partículas de cal conseguem, mais eficientemente, interceptar e desviar as micro-fissuras, evitando que as mesmas se agrupem em grandes trincas, que causem a ruptura do pavimento.

As melhorias nessas propriedades mecânicas dependem significativamente da qualidade da cal. Cales com baixos teores de  $\text{Ca(OH)}_2$  não produzirão tais efeitos benéficos. Um teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  da ordem de 90% parece suficiente para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade (Núñez, 2007).

A partir dos ensaios realizados e do conjunto de dados analisados por Bock (2009) foi possível chegar às seguintes conclusões sobre a adição de cal em misturas asfáltica:

- todas as misturas com incorporação de cal apresentaram uma redução significativa no teor de ligante, onde a maior redução em relação à amostra de *Referência* (sem adição de cal) ocorreu com a mistura *Cal/Calda* (14,28%);
- as misturas mantiveram a Resistência à Tração ( $R_t$ ) praticamente inalterada e apresentaram de forma geral uma redução do Módulo de Resiliência ( $M_r$ ) em relação à amostra de *Referência*, isso demonstra que a incorporação de cal torna as misturas mais elásticas mantendo sua resistência à ruptura, mesmo com um teor inferior de ligante.

- em relação à perda de massa todas as misturas apresentam-se dentro das especificações, o valor máximo atingido foi de 10,96% na mistura *Cal/Ag. Seco*, sendo o valor máximo aceitável 25%.

- na avaliação da adesividade apesar das amostras de Referência apresentar um bom desempenho, as misturas com adição de cal sobre agregado graúdo apresentaram melhores resultados, elevando substancialmente os valores de Resistência Retida à Tração (RRt). Os valores médios indicam que a mistura com maior valor foi a de adição sob a forma de *Cal/Ag. Seco*, com 94,54% enquanto a mistura de *Referência* apresentou 85,34%, uma variação percentual de 10,78%.

Observa-se dessa forma que a adição de cal calcítica, com elevado teor de hidróxido de cálcio, altera de maneira substantiva e positiva as propriedades das misturas tipo concreto asfáltico; as formas de incorporação que tratam com cal o agregado graúdo são as mais eficientes. A prática atual de adição de cal como melhorador de adesividade na forma de filer, prática corrente no Brasil, não foi a forma mais satisfatória de adição.



### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Classificação do Estudo

Esta pesquisa é laboratorial e de ordem quantitativa, uma vez que serão moldadas as amostras, cujos resultados serão tabelados e graficados, para realizar a análise dos resultados.

#### 3.2. Planejamento da Pesquisa

Esta pesquisa refere-se ao estudo de revestimentos asfálticos do tipo concreto asfáltico (CA), levando em consideração diferentes formas de adição de cal. A utilização da cal nesse estudo tem dupla função: como filer e como agente melhorador de adesividade ligante asfáltico/agregado.

O planejamento do experimento contempla uma análise mecânica e de adesão/coesão de três misturas em concreto asfáltico, denominadas “*Cal Agregado Seco*” mistura com adição de cal sob a forma seca sobre o agregado graúdo, “*Cal Calda*” mistura com adição de cal sob a forma de calda sobre o agregado graúdo além de uma mistura de *Referência* (sem adição de cal). Foi substituído 1,0 % do pó-de-pedra, o qual incluía o filer de basalto, pela mesma quantidade de cal.

Os métodos de adição de cal utilizados, “*Cal Agregado Seco*” e “*Cal Calda*”, deve-se à constatação de as mesmas apresentarem melhores resultados em comparação com outras formas de incorporação (Bock, 2009).

A partir da dosagem Marshall destas três misturas de CA foram moldadas as amostras para a verificação do comportamento mecânico (ensaio de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência com e sem condicionamento; Fadiga por compressão diametral à tensão controlada) e para verificação das propriedades de abrasão das misturas (ensaio Cantabro).

Foram moldados um total de 96 amostras tendo suas respectivas quantidades e ensaios a que serão submetidos descritas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Número de amostras ensaiadas

<i>Mistura</i>	<i>Nº de Amostras / Ensaio</i>			
	<i>Rt Cond</i>	<i>Mr Cond</i>	<i>Fadiga</i>	<i>Perda de Massa</i>
<i>Referência</i>	8	6	12	12
<i>Cal/Ag. Seco</i>	8	6	12	12
<i>Cal/Calda</i>	8	6	12	12
<i>Total/Ensaio</i>	24	18	36	36
<i>Total de Amostras</i>	96			

As atividades práticas deste trabalho foram realizadas no LEC - Laboratório de Engenharia Civil do curso de Engenharia Civil da UNIJUI – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, e no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### 3.3. Materiais Utilizados na Pesquisa

Todos os materiais utilizados na pesquisa são representativos da realidade regional, ou seja, são aqueles disponíveis para execução de obras nesta região do estado.

#### 3.3.1 Agregados Minerai

O material a ser utilizado como agregado pétreo é o usado comumente em obras de pavimentação na cidade de Ijuí e consiste de brita de basalto provenientes da pedreira Tabille da cidade de Ijuí-RS, sendo sua jazida localizada na cidade de Coronel Barros-RS e areia de várzea proveniente da região de Santa Maria.

Os agregados coletados na pedreira foram submetidos a ensaios laboratoriais no LEC da Unijuí para comprovar sua qualidade. Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados na Tabela 3. Os resultados dos ensaios de análise granulométrica (média de duas determinações) estão apresentados na Tabela 4 e graficados na Figura 9.

Tabela 3 - Características dos agregados utilizados

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Agregado Graúdo (&gt;2mm)</i>	<i>Agregado Miúdo (&lt;2mm)</i>
<i>Absorção</i>	DAER/RS – EL 105/01	1,228%	---
<i>Massa Específica Real do Grão</i>	DAER/RS – EL 105/01	3,033kN/m <sup>3</sup>	2,973 kN/m <sup>3</sup>
<i>Massa Específica Ap. do Grão</i>	DAER/RS – EL 105/01	2,924 kN/m <sup>3</sup>	---
<i>Índice de Lamelaridade</i>	DAER/RS – EL 108/01	21,8	---
<i>Desgaste ou Perda à Abrasão<sup>1</sup></i>	DAER/RS – EL 103/01	28%	---

Nota: <sup>1</sup> Ensaio realizado no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS

Tabela 4 - Resultado do ensaio de granulometria

<i>Peneira</i>	<i>mm</i>	<i>Brita ¾</i>	<i>Pedrisco</i>	<i>Pó-de-Pedra</i>	<i>Areia</i>	<i>Cal</i>
<i>3/4"</i>	19,1	97,4	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>1/2"</i>	12,7	43,5	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>3/8"</i>	9,5	18,4	100,0	100,0	99,9	100,0
<i>1/4"</i>	6,35	5,0	78,0	100,0	99,9	100,0
<i>n 4</i>	4,76	1,4	61,1	91,2	99,9	100,0
<i>n 8</i>	2,38	1,1	17,8	65,1	99,2	100,0
<i>n 30</i>	0,59	1,0	4,8	26,5	91,5	100,0
<i>n 50</i>	0,297	0,9	4,1	18,8	21,9	99,94
<i>n 100</i>	0,149	0,8	3,6	14,3	2,4	99,51
<i>n 200</i>	0,074	0,7	3,0	10,7	0,8	95,56

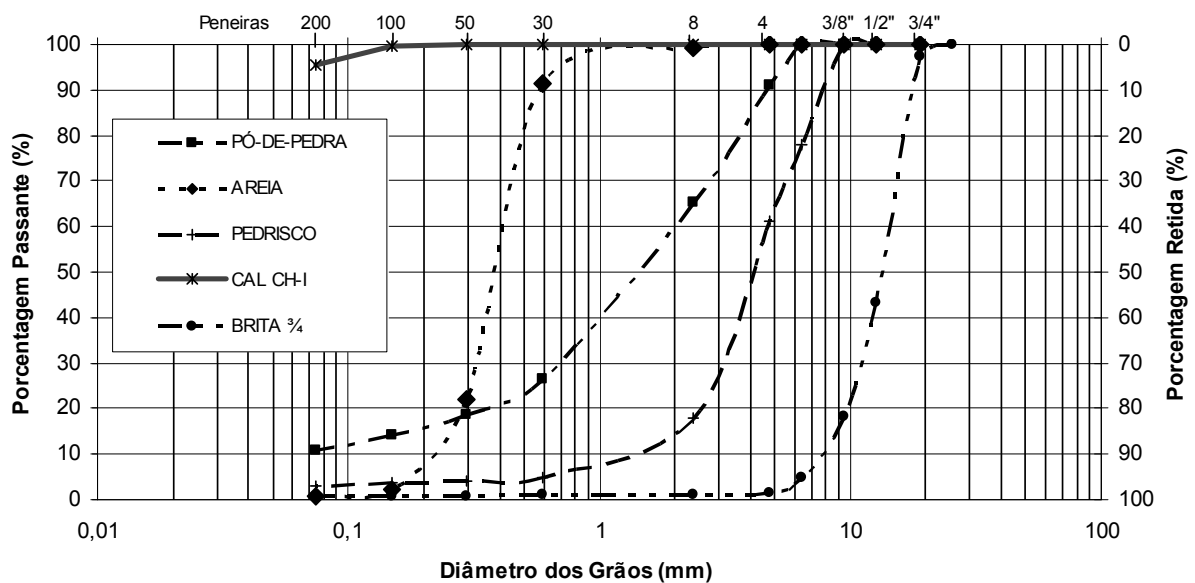


Figura 9 - Distribuição granulométrica

### 3.3.2. Cal CHI

Para a realização deste estudo será utilizada uma cal calcítica produzida no estado de Minas Gerais. Esta escolha fundamentou-se no fato de que no Rio Grande do Sul apenas são produzidas cales dolomíticas, com baixos teores de  $\text{Ca(OH)}_2$  (Núñez, 2007). A bibliografia internacional, especialmente a estadunidense, indica sempre o emprego de cales com elevados teores de hidróxido de cálcio para a obtenção de melhores resultados referentes à melhoria de adesividade das misturas asfálticas.

As melhorias nessas propriedades mecânicas dependem significativamente da qualidade da cal. Cales com baixos teores de  $\text{Ca(OH)}_2$  não produzirão tais efeitos benéficos. A julgar pelos resultados deste estudo, e de outros relatados na bibliografia internacional, um teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  da ordem de 90% parece suficiente para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade.

Na Tabela 5 está o resultado do ensaio de massa específica da cal utilizada neste estudo.

**Tabela 5 - Massa específica Cal**

<i>Cal Hidratada CHI</i>			<i>Temperatura ambiente: 22,5°C</i>		
<i>Peso (g)</i>	<i>Temperatura do frasco (°C)</i>		<i>Volume (cm³)</i>	<i>Massa específica (g/cm³)</i>	<i>Massa específica média (g/cm³)</i>
50	Inicial:	24	0,5	2,294	2,294
	Final:	24	22,3		
50	Inicial:	24	0,7	2,294	
	Final:	24	22,5		

Os resultados dos ensaios de análise granulométrica da cal (média de duas determinações) estão apresentados na Tabela 4 e graficados na Figura 9.

### 3.3.3 Ligante

O ligante asfáltico a ser utilizado neste estudo será o CAP 50/70, produzido na Refinaria Alberto Pasqualini, em Canoas (RS). Esse é o tipo de ligante asfáltico convencionalmente empregado em obras de pavimentação no Rio Grande do Sul.

As propriedades do ligante estão descritas na Tabela 6.

**Tabela 6 - Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70)**

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>CAP 50/70</i>	
		<i>Especificação</i>	<i>Resultado</i>
<i>Ponto de amolecimento (°C)</i>	<i>NBR 6560</i>	46 min.	48,6
<i>Penetração (0,1 mm)</i>	<i>NBR 6576</i>	50 - 70	51
<i>Visc. Brookfiel 135°C (cp)</i>	<i>MB 517</i>	274 min.	317
<i>Visc. Brookfiel 150°C (cp)</i>	<i>MB 517</i>	112 min.	164
<i>Visc. Brookfiel 175°C (cp)</i>	<i>MB 517</i>	57 a 285	69
<i>Ductibilidade (cm)</i>	<i>NBR 6293</i>	60 min.	>150
<i>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>DNER – M 16/64</i>	---	1,009
<i>Ponto de Fulgor (°C)</i>	<i>NBR 11341</i>	235 min.	>296

As temperaturas de mistura e compactação são apresentadas na Tabela 7:

**Tabela 7 - Temperaturas de mistura e de compactação**

<i>Tipo de Ligante</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	
	<i>Mistura</i>	<i>Compactação</i>
CAP 50/70	149 - 155	137 - 142

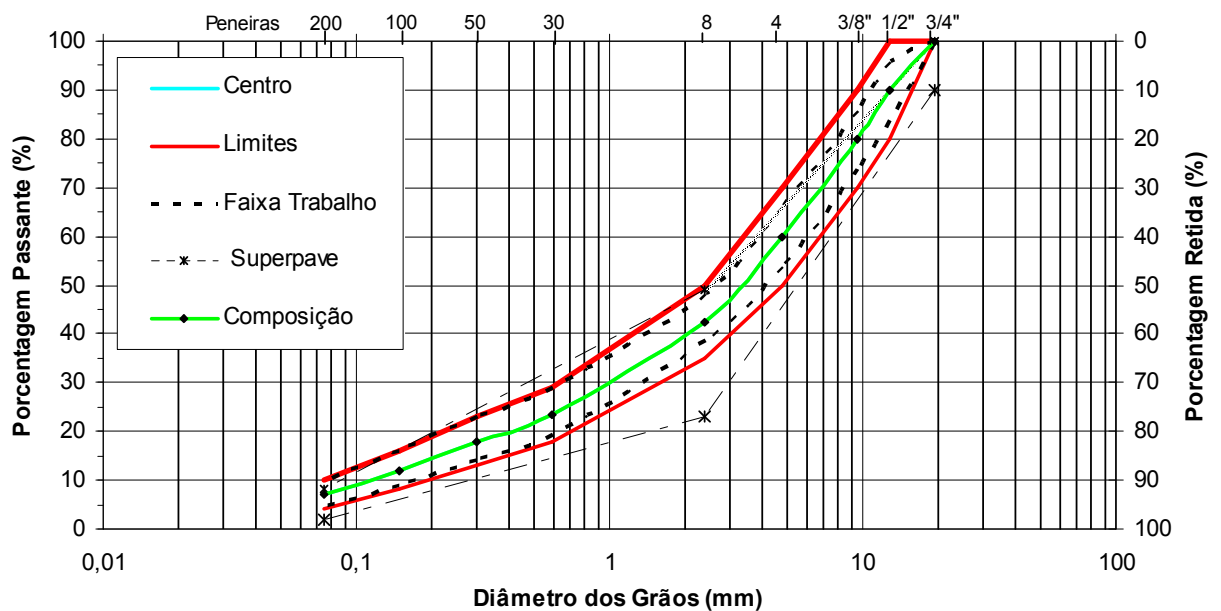
### 3.3.4 Misturas Asfálticas

A dosagem das misturas asfálticas e a moldagem das amostras, juntamente com a obtenção dos parâmetros de dosagem Marshall (DNER – ME 043/95 e DAER/RS – ES – 16/98) foram realizadas no LEC – Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ. O concreto asfáltico foi projetado seguindo as recomendações do Asphalt Institute (1995a) e de acordo com ASTM D6926-04 e ASTM D 6927-05, nota-se que o volume de vazios (VV) adotado foi de 4% como critério de dosagem.

Na Tabela 8 está apresentada a composição granulométrica da mistura que foi ajustada de tal forma que a mistura ficou no centro da faixa “B” do DAER/RS (especificação) ou na faixa IV B do Instituto do Asfalto, com tamanho máximo de granulares de 19 mm, devido ser esta a mais utilizada no Estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 10 está apresentado o ajuste granulométrico da mistura.

**Tabela 8** - Especificação e composição granulométrica da mistura – Faixa B DAER/RS

<i>Peneira</i>	<i>mm</i>	<i>Limite</i>	<i>Centro faixa</i>	<i>Faixa de Trabalho</i>	<i>Mistura</i>
<i>3/4"</i>	<i>19,1</i>	100,0	100,0	100,0 - 100	100,00
<i>1/2"</i>	<i>12,7</i>	80 - 100	90,0	84,0 - 96,0	90,00
<i>3/8"</i>	<i>9,5</i>	70 - 90	80,0	74,0 - 86,0	80,00
<i>n 4</i>	<i>4,76</i>	50 - 70	60,0	54,0 - 66,0	60,00
<i>n 8</i>	<i>2,38</i>	35 - 50	42,5	38,5 - 48,5	42,50
<i>n 30</i>	<i>0,59</i>	18 - 29	23,5	19,5 - 29,0	23,50
<i>n 50</i>	<i>0,297</i>	13 - 23	18,0	14,0 - 23,0	18,00
<i>n 100</i>	<i>0,149</i>	8 - 16	12,0	9,0 - 16,0	12,00
<i>n 200</i>	<i>0,074</i>	4 - 10	7,0	5,0 - 10,0	7,00



**Figura 10** - Ajuste granulométrico da mistura

Os resultados da dosagem das três misturas estão apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9 - Resultados da Dosagem Marshall**

<i>Propriedade</i>	<i>Mistura</i>	<i>Referência</i>	<i>Cal/Ag. Seco</i>	<i>Cal/Calda</i>
	<i>ESP 16/91 DAER</i>			
<i>Teor de Betume (%)</i>	--	5,46	4,72	4,67
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	4,00	4,00	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	76,36	75,38	72,70
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>16	16,34	16,14	16,65
<i>Massa Esp. Máx. Teórica (g/cm<sup>3</sup>)</i>	--	2,69	2,69	2,69
<i>Massa Esp. Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</i>	97% (mínimo)	2,60	2,59	2,59
<i>Estabilidade (kgf)</i>	>800	1076,00	1129,00	1043,00
<i>Fluência (1/100 in)</i>	8 a 16	9,84	7,65	5,38

### 3.4. Preparação das Amostras

Após a coleta dos agregados, este material foi separado em peneiras (retida na: # 1/2, # 3/8, # 4, # 8, # 30, # 50, # 100 e # 200), após foram lavados e pesados para compor as amostras de acordo com a Metodologia Marshall.

Em síntese, a sistemática de procedimentos do método consiste no seguinte: molda-se, por compactação à quente, uma série de corpos-de-prova com a mistura de agregados e ligante asfáltico, dentro de moldes cilíndricos metálicos que depois são armazenados, ao ar livre, durante 24 horas; em seguida, esses corpos-de-prova são desmoldados, medidos e pesados.

O tempo e a temperatura de envelhecimento utilizada tentam simular o processo de transporte da massa e seguem as sugestões do trabalho de Ayrei (2003) e da norma ASTM D 6926-04 que recomenda que a temperatura de envelhecimento esteja entre 8°C e 11°C acima da temperatura de compactação. Considerou-se o tempo de envelhecimento de duas horas.

A Figura 11 apresenta a seqüência de preparação das amostras.



**Figura 11** - Seqüência da dosagem; (a) Pesagem dos Agregados; (b) Agregados; (c) Ligante; (d) Mistura ligante/agregado; (e) Compactação da mistura; (f) Amostras Compactadas; (g) Amostras desmoldadas; (h) Pesagem e medição

Fonte: Rozek (2008)

### 3.5. Procedimentos de Ensaios e Descrição de Equipamentos

Nesta seção serão descritos os métodos de ensaio utilizados no decorrer da pesquisa.

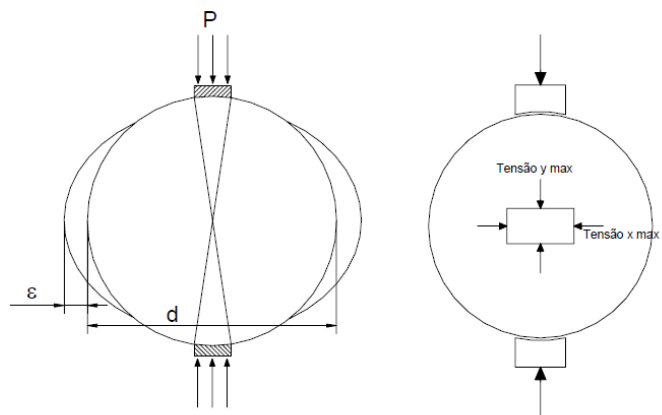
#### 3.5.1. Ensaio de Resistência à Tração – DNER-ME 138/94

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinação da resistência à tração de corpos-de-prova



cilíndricos de concreto de cimento Portland, através de solicitação estática. É conhecido em vários centros de pesquisa no exterior como “ensaio brasileiro” (Medina e Motta, 2005).

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral nas amostras com diâmetro 10,20 cm e altura variável (Figura 12 (a)), moldadas através do método Marshall, segue as prescrições da norma DNER-ME 138/94 e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga conforme Figura 12 (b). A medida resultante é a resistência à tração ( $R_t$ ).



**Figura 12** - Equipamento e estado de tensões gerado no ensaio brasileiro

Fonte: Specht (2004)

A velocidade de avanço do carregamento é de 0,8mm/s e a equação utilizada para o cálculo de  $R_t$  é a seguinte (Equação 2):

$$q_{ut} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (2)$$

onde:

F= força aplicada;

d = diâmetro do corpo-de-prova;

h = altura do corpo-de-prova;

Antes de submeter as amostras ao ensaio se realizará um condicionamento das mesmas para simulação de danos causados pela ação deletéria da água nas misturas, o processo de condicionamento a ser realizado está descrito abaixo:

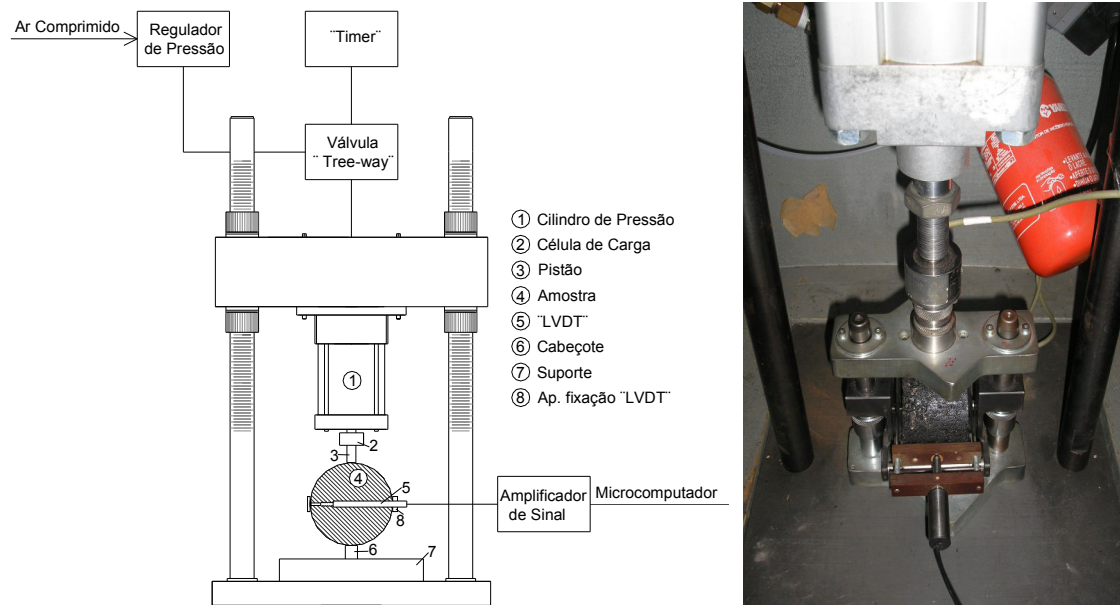
- ✓ Imersão das amostras em água à temperatura de 60°C, por um período de 96 horas;
- ✓ Estabilização das amostras à temperatura de 25° C por 12 horas.

O condicionamento realizado é considerado de baixa severidade.

### **3.5.2. Ensaio de Módulo de Resiliência - DNER-ME 133/94**

O módulo de resiliência é determinado através das prescrições do DNER-ME 133/94. O equipamento utilizado, conforme Figura 13 e 14 é composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada; isso permite ensaios em diversas temperaturas (Specht, 2004).

Para este ensaio também foi realizado o condicionamento das amostras conforme descrito acima no ensaio de Rt.



**Figura 13** - Corte esquemático e equipamento de módulo de resiliência

Fonte: Specht (2004)

Para a realização dos ensaios devem ser seguidas as seguintes etapas de montagem do conjunto:

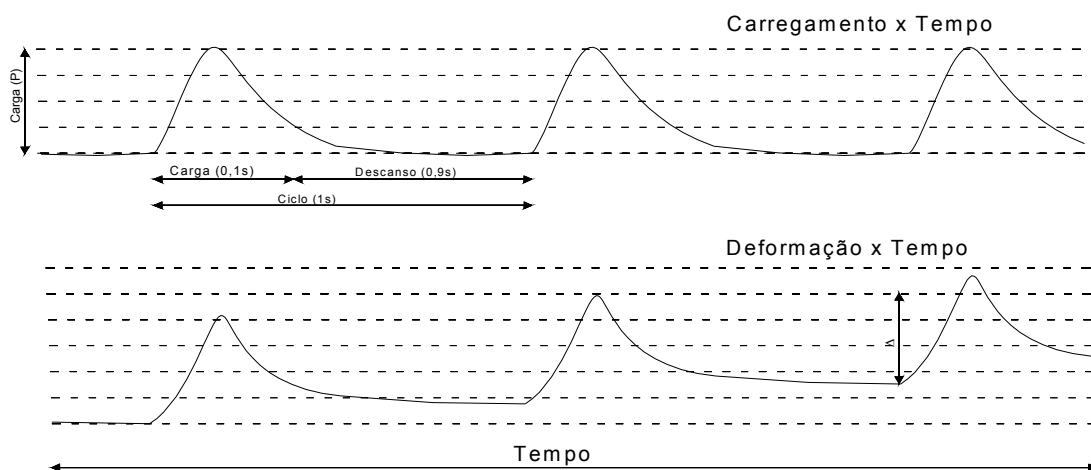
- ✓ Condicionar as amostras à 25°C por pelo menos 12 horas;
- ✓ Posicionar o corpo-de-prova no interior do suporte para fixação dos transdutores LVDT - *Linear Variable Differential Transducer*;
- ✓ Colocar o corpo-de-prova sobre a base da estrutura de suporte, entre os dois cabeçotes curvos;
- ✓ Fixar e ajustar os transdutores LVDT de modo a se obter registro no microcomputador;

A partir da aplicação do carregamento, com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT, ligado a um microcomputador (Figura 15).



**Figura 14** - Equipamento de módulo de resiliência ligado ao microcomputador

Na Figura 15 estão apresentados o pulso de carga e o pulso de deformação versus tempo, típicos dos ensaios realizados.



**Figura 15** - Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência

Fonte: Specht (2004)

A Equação 3 utilizada para determinar o módulo de resiliência é a:

$$Mr = \frac{F}{\Delta.h} \cdot (0,2692 + 0,9976.v) \quad (3)$$

onde:

$M_r$  = módulo de resiliência;

$F$  = carga aplicada;

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos de repetição de carga;

$h$  = altura do corpo-de-prova;

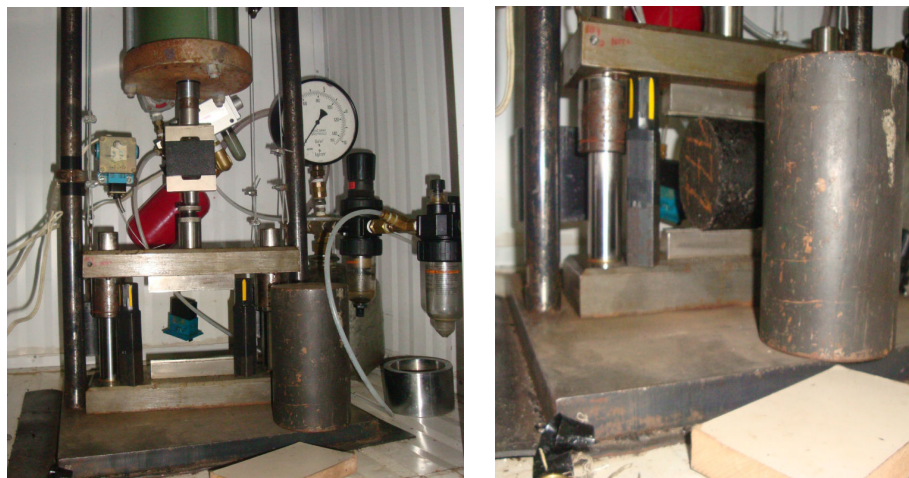
$\nu$  = coeficiente de Poisson (0,30);

### 3.5.3. Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada

Embora ainda não normatizado, o ensaio de fadiga tem sido largamente realizado no país, geralmente à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas. Como ainda não há método oficial normatizado no Brasil, o ensaio foi realizado com base na literatura nacional e na experiência de outros centros de pesquisa, como COPPE/UFRJ e UFRGS.

#### Procedimentos para a realização do ensaio

Para a realização deste ensaio é utilizado o mesmo equipamento utilizado para a realização do ensaio de Módulo de Resiliência ( $M_r$ ) (Figura 16), a determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas deste estudo foi realizado à tensão controlada onde aplica-se na amostra uma carga  $F$  que induza tensões de tração horizontais aproximadamente entre 20 e 50 % da tensão ruptura à tração ( $R_t$ ) previamente determinada.



**Figura 16** - Equipamento de ensaio de fadiga

A determinação do carregamento vertical ( $F$ ) de acordo com a  $R_t$  e o nível de tensão é realizada de acordo com a Equação 4:

$$F = \frac{100.\pi.d.h.( \%R_t)}{2} \quad (4)$$

Onde:

$F$  = Carga aplicada (N);

$R_t$  = Resistência à tração (MPa);

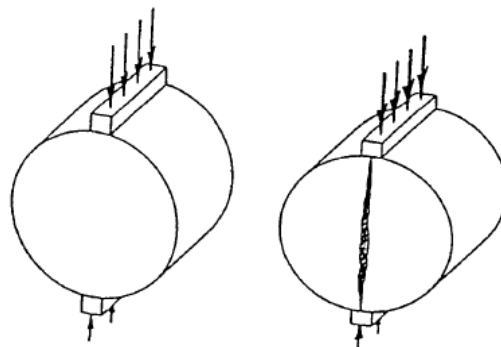
$\%R_t$  = Nível de carga em relação à  $R_t$  (MPa);

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

$h$  = Altura do corpo-de-prova (cm).

A frequência de aplicação das cargas é de 1 Hz (60 ciclos por minuto) com um tempo de carregamento de 0,1s e 0,9s de repouso. São colocados dois transdutores LVDT, para aferição dos deslocamentos horizontais durante o ensaio. O corpo-de-prova é colocado em um suporte metálico que garante a centralização do corpo-de-prova. Este suporte é o mesmo utilizado no ensaio de módulo de resiliência.

O ensaio em compressão diametral gera um estado biaxial de tensão em um corpo-de-prova cilíndrico Marshall convencional (Figura 17). No decorrer do ensaio de fadiga, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo do corpo-de-prova (Figura 18).



**Figura 17** - Representação das tensões no centro da amostra de um corpo-de-prova cilíndrico



**Figura 18** - Corpo-de-prova após ruptura

Para cada mistura ensaiada determinam-se as relações entre o número de repetições à ruptura e o nível de tensões atuantes (Equação 1).

$$N_f = a * \sigma_t^b \quad (1)$$

Onde:

$N_f$  = número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra ;

$\sigma_t$  = tensão de tração repetida solicitante;

$a, b$  = constantes obtidas na regressão linear dos pares  $N_f$  e  $\sigma_t$  determinados em ensaios, em escalas logarítmicas.

Considera-se a tensão solicitante no corpo-de-prova como constante, o que é apenas uma aproximação, uma vez que o carregamento constante ao longo do ensaio não é traduzido em uma tensão.

#### **3.5.4. Perda de Massa (Pm) - Metodologia Cantabro - DNER – ES 383/99**

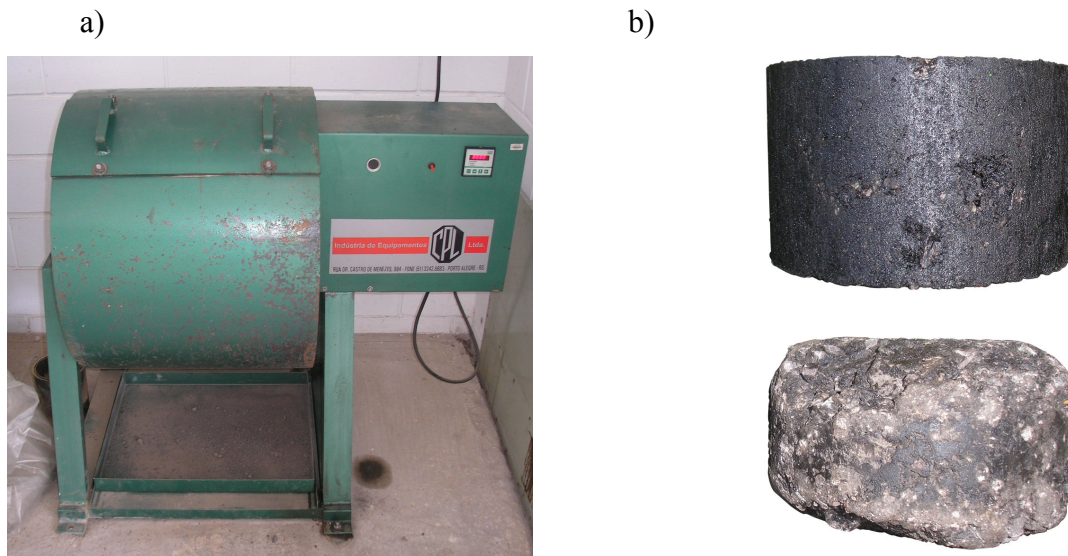
A metodologia Cantabro foi selecionada para avaliar a perda de massa por desgaste ou abrasão. Este ensaio, desenvolvido para avaliar misturas abertas, foi criado e normalizado, inicialmente, no *Centro de Estudios de Carreteras* na Espanha (CEC 325/86) e, posteriormente, normalizado no Brasil, sob a norma DNER – ES 383/99.



O ensaio consiste em submeter amostras (uma por vez) de concreto asfáltico a 300 revoluções (33rpm), dentro da máquina de abrasão *Los Angeles*, sem as esferas metálicas.

O ensaio foi realizado no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS e executado com o condicionamento prévio de 12 horas das amostras nas temperaturas de -18, 5 e 25°C.

Na Figura 19 (a) está apresentado o equipamento de abrasão *Los Angeles* utilizado para a realização do ensaio de perda de massa por desgaste. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, a resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas. A perda de massa por desgaste é calculada através da diferença de massa das amostras antes e depois do ensaio conforme Figura 19 (b).



**Figura 19** - Execução do ensaio de desgaste Cantabro  
a) Equipamento; b) Amostra antes e depois do ensaio

Após o ensaio, quantifica-se a perda de massa do corpo-de-prova. O desgaste da mistura betuminosa por abrasão, em percentagem, é dado pela Equação 6:

$$PM = \frac{P - P'}{P} * 100 \quad (6)$$

onde:

PM = perda no ensaio de desgaste Cantabro (%);

P = peso inicial do corpo-de-prova (g);

P' = peso após a realização do ensaio (g).



## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar comparativamente o desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas através de incorporação de cal. São apresentados ensaios de avaliação de comportamento mecânico e de adesão/coesão de três misturas de CA: *Referência, Cal/Agregado Seco e Cal/Calda*.

### 4.1. COMPORTAMENTO MECÂNICO

Com o objetivo de se analisar os dados dos ensaios de comportamento mecânico da misturas de forma mais objetiva foi realizada uma filtragem de dados. Determinou-se a *Média* ( $\mu$ ) dos resultados e seu *Desvio Padrão* ( $\sigma$ ) posteriormente calculou-se a *Média* menos o *Desvio Padrão* ( $\mu-\sigma$ ) e *Média* mais *Desvio Padrão* ( $\mu+\sigma$ ), os valores que não se enquadraram neste intervalo foram excluídos e foi realizado novamente o processo com os valores restantes até que todos se enquadrassem no critério adotado.

São apresentados os resultados com condicionamento prévio das amostras e sem condicionamento, além de uma tabela com os valores *Máximos* (Máx) e *Mínimos* (Min), *Média* ( $\mu$ ), *Desvio Padrão* ( $\sigma$ ), e o *Coefficiente de Variação* ( $C_v$ ) dos resultados obtidos nos ensaios.

Através do condicionamento das amostras, procurou-se verificar o efeito deletério da água com a finalidade de tentar sensibilizar as misturas asfálticas. Realizou-se o condicionamento posterior à compactação, para provocar de forma acelerada situações que testem a adesividade ligante/agregado.

#### 4.1.1. Ensaio de Resistência à Tração – DNER-ME 138/94

Para cada mistura em estudo, com diferentes formas de incorporação de cal, e teores de ligante correspondentes a cada projeto, foram moldadas 8 amostras, totalizando 24 amostras submetidas ao ensaio de Resistência à Tração ( $R_t$ ).

As 8 amostras de cada mistura foram divididas em 2 grupos, um grupo com condicionamento prévio (12 amostras) e outro grupo sem condicionamento (12 amostras).

A Tabela 10 e a Figura 20 apresentam de forma resumida os resultados obtidos através do ensaio de resistência à tração.

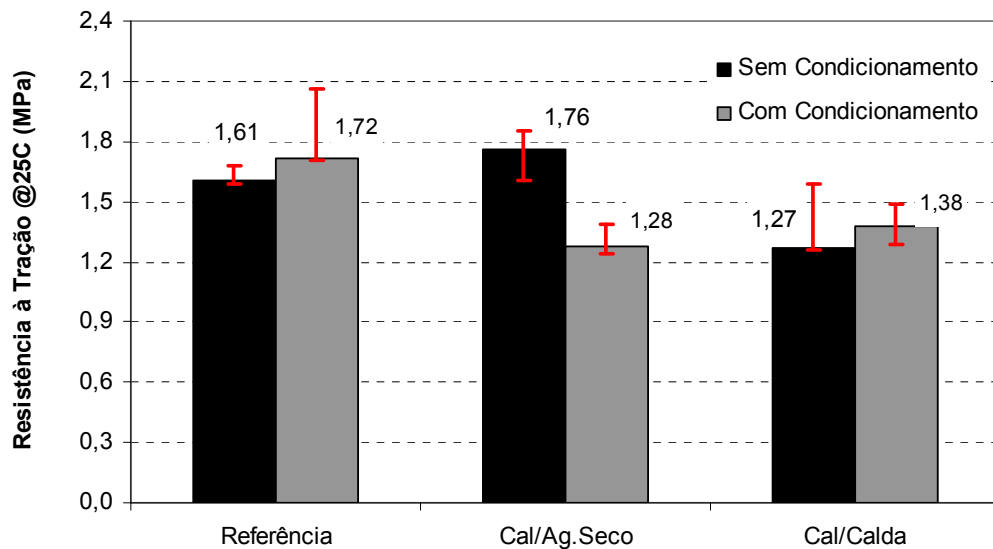
**Tabela 10 - Resultados de Resistência à Tração**

<i>Mistura</i>	<i>Situação</i>	<i>Rt Máx (MPa)</i>	<i>Rt Min (MPa)</i>	$\mu$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	<i>Cv (%)</i>
<i>Referência</i>	<i>C c<sup>1</sup></i>	2,06	1,71	1,82	0,17	9,34
	<i>S c<sup>2</sup></i>	1,68	1,59	1,63	0,04	2,45
<i>Cal/Ag.Seco</i>	<i>C c<sup>1</sup></i>	1,39	1,24	1,30	0,07	5,38
	<i>S c<sup>2</sup></i>	1,85	1,61	1,74	0,10	5,74
<i>Cal/Calda</i>	<i>C c<sup>1</sup></i>	1,49	1,29	1,39	0,08	5,75
	<i>S c<sup>2</sup></i>	1,59	1,26	1,38	0,15	10,86

Nota: <sup>1</sup> Com condicionamento; <sup>2</sup> Sem condicionamento.

Observa-se para as amostras sem condicionamento que duas das três misturas (*Referência* e *Cal/Calda*) apresentaram uma Resistência à Tração (*Rt*) ligeiramente inferior quando comparadas com as amostras que passaram pelo condicionamento prévio, a mistura *Cal/Ag. Seco* apresentou a maior *Rt* das três misturas em estudo (1,76 MPa); seguida pela mistura de *Referência* (1,61 MPa) e *Cal/Calda* (1,27 MPa).

O condicionamento das amostras provocou um aumento na Resistência à Tração (*Rt*) da mistura de *Referência* e *Cal/Calda*. As amostras da mistura *Cal/Ag. Seco*, apresentaram uma diminuição de *Rt* em comparação às outras misturas em estudo após o condicionamento apresentando a menor Resistência à Tração das três misturas em estudo (1,28 MPa); já sem condicionamento esta mistura apresentou um aumento desta propriedade em comparação com as outras misturas, sendo a mais resistente.



**Figura 20** - Resistência à tração @ 25°C (MPa)

#### 4.1.2. Ensaio de Módulo de Resiliência - DNER-ME 133/94

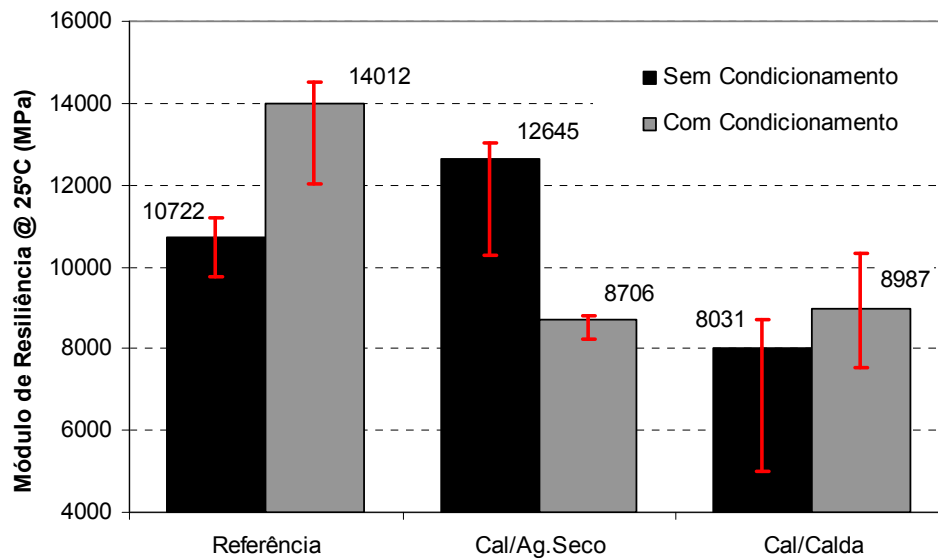
A Figura 21 apresenta o resumo dos resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência ( $M_r$ ). Para este ensaio foram moldadas 6 amostras para cada mistura em estudo, totalizando 18 amostras ensaiadas. As 6 amostras de cada mistura foram divididas em 2 grupos, um grupo com condicionamento prévio e outro grupo sem condicionamento. É apresentado na Tabela 11 o resumo dos resultados.

**Tabela 11** - Resultados de Módulo de Resiliência

Mistura	Situação	$M_r$ Máx (MPa)	$M_r$ Min (MPa)	$\mu$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	$C_v$ (%)
Referência	$C c^1$	14573	12050	13358	1248	9,34
	$S c^2$	11219	9777	10722	818	7,62
Cal/Ag.Seco	$C c^1$	8809	8215	8542	302	3,53
	$S c^2$	13052	10305	11865	1411	11,89
Cal/Calda	$C c^1$	10342	7552	8509	1588	18,66
	$S c^2$	8720	5011	7024	1875	26,69

Nota: <sup>1</sup> Com condicionamento; <sup>2</sup> Sem condicionamento.

Observa-se também neste conjunto de dados a mesma tendência do ensaio de  $R_t$ , duas das três misturas sem condicionamento (*Referência* e *Cal/Calda*) apresentaram  $M_r$  ligeiramente superior quando comparadas com as amostras que passaram pelo condicionamento prévio.



**Figura 21** - Módulo de Resiliência @ 25°C (MPa)

Sem o condicionamento das amostras, a mistura *Cal/Ag. Seco* apresentou um Mr superior às outras misturas em estudo (12645 MPa); já após o condicionamento esta mistura apresentou uma diminuição significativa desta propriedade em comparação com as outras misturas que tiveram uma ligeira elevação do Mr após o condicionamento.

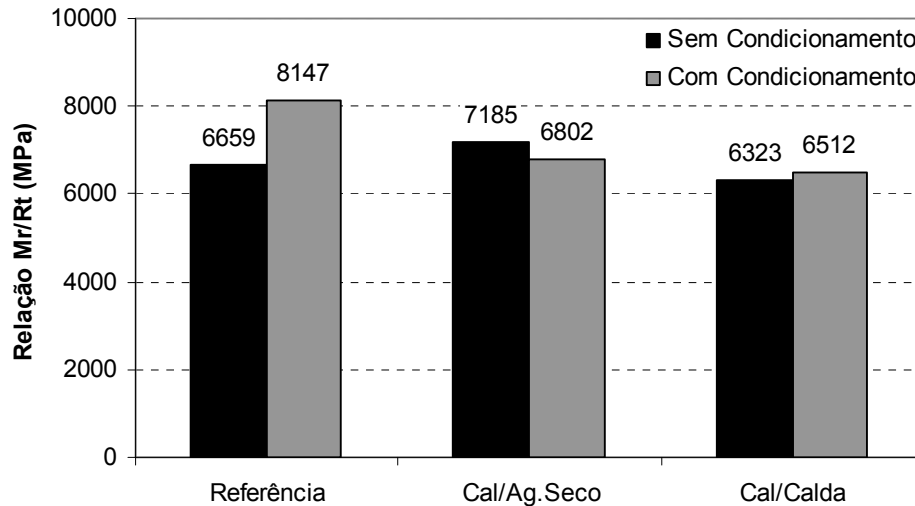
O condicionamento das amostras provocou um aumento no Módulo de Resiliência (Mr) da mistura de *Referência* e *Cal/Calda*. As amostras da mistura *Cal/Ag. Seco*, apresentaram uma diminuição do Mr em comparação às outras misturas em estudo após o condicionamento apresentando o menor Módulo de Resiliência das três misturas em estudo (8706 MPa); já sem condicionamento esta mistura apresentou um aumento desta propriedade em comparação com as outras misturas, sendo a mais rígida.

Com condicionamento prévio as amostras, a mistura de *Referência* apresentou o maior Mr das três misturas em estudo (14012 MPa); seguida pela mistura de *Cal/Calda* (8987 MPa) e *Cal/Ag. Seco* (8706 MPa).

#### 4.1.3. Relação Mr/Rt

A relação Mr/Rt nos dá uma idéia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura; misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido a

concentração de esforços em seu interior. Os valores destas relações estão apresentados na Figura 22.



**Figura 22** - Relação Mr/Rt @ 25°C (MPa)

Sem o condicionamento das amostras, as misturas que apresentaram os maiores valores de Mr/Rt foram: *Cal/Ag. Seco* (7185 MPa) e *Referência* (6659 MPa) seguidos da mistura *Cal/Calda* (6323 MPa) que novamente apresentou o menor valor.

Com o condicionamento das amostras, as misturas de *Referência* (8147 MPa) e *Cal/Ag. Seco* (6802 MPa) apresentaram os maiores valores de Mr/Rt; A mistura *Cal/Calda* (6512 MPa) foi a mistura que teve o menor valor.

Após o condicionamento das amostras, as misturas de *Referência* e *Cal/Calda* foram as misturas que apresentaram aumento da relação Mr/Rt; somente a mistura *Cal/Ag. Seco* apresentou uma diminuição desta relação após o condicionamento.

De uma forma geral as misturas com incorporação de cal (*Cal/Ag. Seco* e *Cal/Calda*) apresentaram uma manutenção dos valores de Mr/Rt demonstrando que ao longo do tempo, com a submissão do revestimento do pavimento aos danos provocados pela umidade e o próprio envelhecimento da mistura (condicionamento), estas misturas mantiveram uma compatibilidade entre sua rigidez e resistência; o contrário aconteceu com as amostras da mistura de *Referência*, onde após passar pelo processo de condicionamento apresentaram um

aumento significativo do módulo de resiliência, mas não apresentaram aumento de resistência tão significativo. Dessa forma tornaram-se misturas mais rígidas e mais suscetíveis ao trincamento do que as misturas com incorporação de cal.

Ressalta-se que estas misturas com incorporação de cal apresentam um menor teor de ligante em comparação às amostras da mistura de *Referência*, isso demonstra que a cal está agindo de forma positiva nestas misturas, tornando-as mais elástica sem perder a compatibilidade entre o módulo de resiliência e a resistência à tração.

#### 4.1.4. Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada

Dentre os principais defeitos que afetam o desempenho de um pavimento, o trincamento por fadiga do revestimento asfáltico é um dos que apresentam maior relevância principalmente em função das condições climáticas existentes no Brasil. Observa-se que os fenômenos de fadiga ocorrem essencialmente em temperaturas moderadas/baixas, quando o pavimento apresenta um comportamento praticamente elástico. Por esta razão os ensaios para caracterização da resistência à fadiga são geralmente realizados com temperaturas abaixo de 30° C.

Neste estudo foram analisadas comparativamente três misturas em CA e os resultados dos ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada são apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14. Os ensaios foram realizados à temperatura de 25°C, e o critério de finalização do ensaio foi o de ruptura completa da amostra.

**Tabela 12** - Resultados do ensaio de fadiga da mistura de *Referência*

N° CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (N)	Def. Inicial (cm/cm)	N° Ciclos
156	6,01	10,20	20%	0,33	1,32	3178	2,96E-05	31230
161	5,98	10,20	25%	0,41	1,65	3952	4,20E-05	84393
164	6,05	10,20	30%	0,50	1,98	4798	4,16E-05	3610
168	6,04	10,20	33%	0,54	2,18	5269	5,38E-05	4232
169	5,99	10,20	37%	0,61	2,44	5859	6,54E-05	3852
171	6,09	10,20	40%	0,66	2,64	6440	7,67E-05	1796
172	5,98	10,20	45%	0,74	2,97	7114	9,69E-05	593
176	5,93	10,20	50%	0,83	3,30	7838	7,02E-05	954

**Tabela 13** - Resultados do ensaio de fadiga da mistura *Cal/Ag. Seco*

N° CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (N)	Def. Inicial (cm/cm)	N° Ciclos
200	6,07	10,20	20%	0,31	1,23	2995	2,19E-05	178712
203	6,09	10,20	25%	0,39	1,54	3757	3,44E-05	44023
204	6,10	10,20	30%	0,46	1,85	4515	3,26E-05	8020
206	6,10	10,20	33%	0,51	2,03	4967	3,71E-05	12445
208	6,11	10,20	37%	0,57	2,28	5578	5,97E-05	1989
213	6,10	10,20	40%	0,62	2,46	6020	5,40E-05	1670
214	6,10	10,20	45%	0,69	2,77	6773	7,27E-05	2424
219	6,12	10,20	50%	0,77	3,08	7550	7,68E-05	527

**Tabela 14** - Resultados do ensaio de fadiga da mistura *Cal/Calda*

N° CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (N)	Def. Inicial (cm/cm)	N° Ciclos
190	6,03	10,20	20%	0,29	1,15	2782	2,90E-05	86607
230	6,10	10,20	25%	0,36	1,44	3518	4,33E-05	15137
232	6,16	10,20	30%	0,43	1,73	4264	6,01E-05	3187
234	6,13	10,20	33%	0,48	1,90	4667	5,29E-05	2876
235	6,16	10,20	37%	0,53	2,13	5259	6,30E-05	1902
236	6,06	10,20	40%	0,58	2,30	5593	6,30E-05	600
239	6,16	10,20	45%	0,65	2,59	6396	9,15E-05	1513
243	6,08	10,20	50%	0,72	2,88	7014	5,28E-05	966

Na Figura 23 são apresentadas as relação entre vida de fadiga e tensões de tração das misturas estudadas. A curva que representa a vida de fadiga é representada pelo modelo:

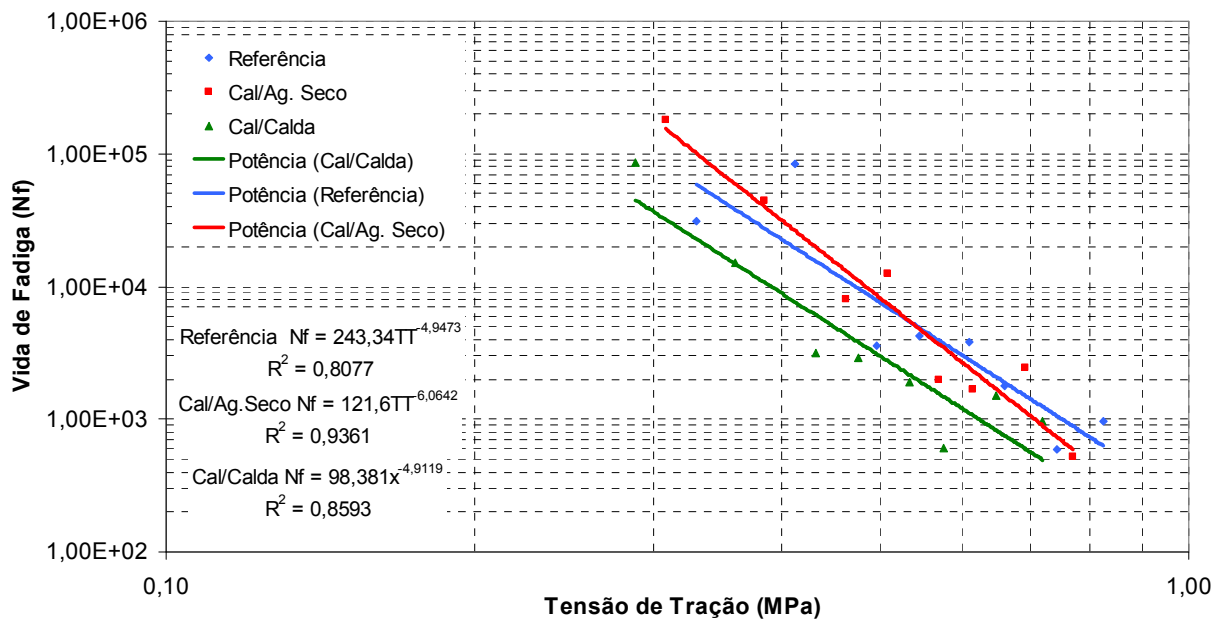
$$N_f = a * \sigma_t^b \quad (1)$$

Onde:

$N_f$  = número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$\sigma_t$  = tensão de tração repetida solicitante;

$a$ ,  $b$  = constantes obtidas na regressão linear dos pares  $N_f$  e  $\sigma_t$  determinados em ensaios, em escalas logarítmicas.



**Figura 23** - Relação entre vida de fadiga e tensões de tração

A Tabela 15 apresenta as constantes dos modelos de fadiga gerados em função das tensões de tração solicitantes.

**Tabela 15** - Parâmetros dos modelos de fadiga

Mistura	Parâmetros do modelo		
	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$
Referência	243,34	-4,9473	0,8077
Cal/Ag.Seco	121,60	-6,0642	0,9361
Cal/Calda	98,381	-4,9119	0,8593

Para análise da vida de fadiga de cada mistura foi utilizado o software EVERSTRESS - *Layered Elastic Analysis*, versão 5.0 disponível em <http://www.wsdot.wa.gov>. O EVERSTRESS é um software integrante do *Everseries* que é um grupo de programas desenvolvidos pelo *Washington State Department of Transportation* (WSDOT), a partir de programa do WESLEA – *Watersways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers*. Este software determina as tensões, deformações e deslocamentos em um sistema de camadas elásticas semi-infinitas abaixo da superfície de cargas circulares.

O carregamento utilizado neste estudo foi de um eixo simples de rodas duplas, com carga total de 82 kN. Foram verificadas as tensões de tração na fibra inferior do revestimento



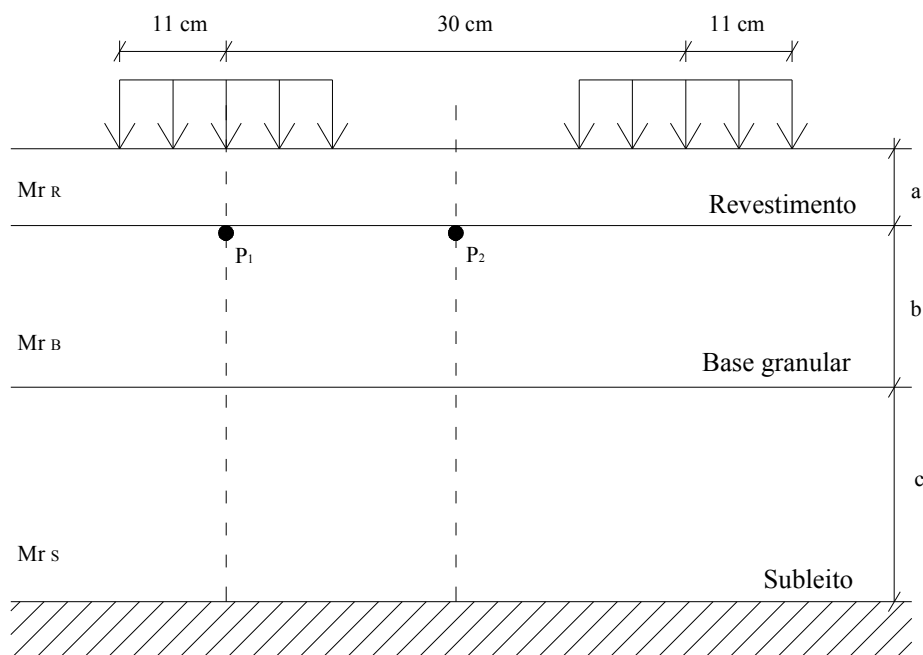
em dois pontos, o primeiro embaixo da roda ( $P_1$ ) e o segundo no eixo entre duas rodas ( $P_2$ ), conforme mostrado na Figura 24.

Geralmente as trincas por fadiga aparecem primeiro na fibra inferior da capa asfáltica, onde as forças de tração e os esforços são maiores sob a carga de roda. O trincamento inicia em pontos críticos, onde as tensões são maiores, devido a este fato foram analisados somente os pontos com maior tensão de tração e analisado somente o ponto mais crítico, embaixo da roda ( $P_1$ ).

Neste caso foram adotadas para a análise duas estruturas de pavimentos, conforme a Figura 25, que apresenta o modelo genérico, e na Tabela 16 são apresentadas as variáveis analisadas.

onde:

- a** é a espessura do revestimento asfáltico;
- b** é a espessura da base granular; e,
- c** é a espessura do subleito;
- $\nu$**  é o coeficiente de Poisson.



**Figura 24** - Modelo genérico de estrutura analisada

Tabela 16 - Variáveis dos modelos analisados

Estrutura	Base			Subleito		
	b (cm)	v (adm.)	Mr (MPa)	c (cm)	v (adm.)	Mr (MPa)
E I	0,30	0,35	500	Semi-infinito	0,35	200
EII	0,30	0,40	300	Semi-infinito	0,40	100

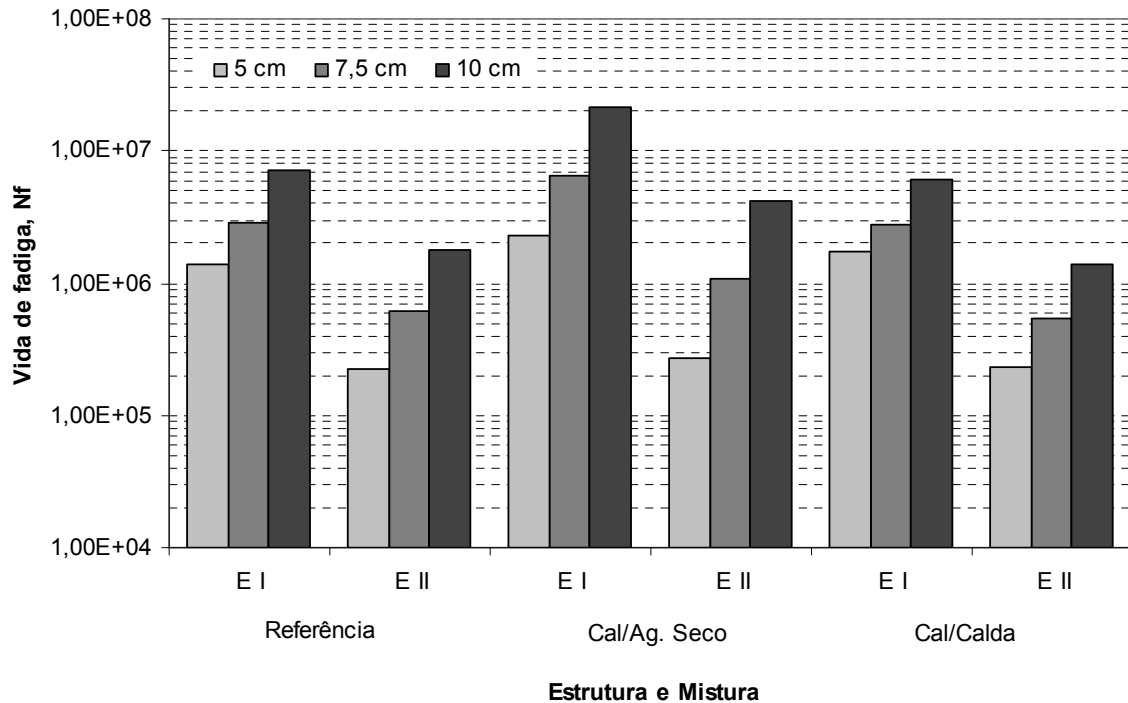
Sobre estas duas estruturas (EI e EII) forma lançadas camadas com espessuras de 5 cm, 7,5 cm e 10 cm de revestimento com as três misturas em estudo como demonstrado na Tabela 17, foram realizadas 18 combinações de parâmetros para avaliação do desempenho das misturas.

Tabela 17 - Resultados das estruturas analisadas

Estrutura		Mistura	Espessura CA (cm)	Módulo CA (MPa)	T T (MPa)	Nf	Nf/Nf_Ref
E I	Base Mr: 500 MPa Subleito Mr:200 MPa	Referência	5,0	10722	0,174	1,39E+06	1,00
		Cal/Ag. Seco	5,0	8031	0,197	2,30E+06	1,65
		Cal Calda	5,0	12645	0,137	1,71E+06	1,23
E II	Base Mr: 300 MPa Subleito Mr:100 MPa	Referência	5,0	10722	0,252	2,22E+05	1,00
		Cal/Ag. Seco	5,0	8031	0,281	2,70E+05	1,22
		Cal Calda	5,0	12645	0,206	2,29E+05	1,03
E I	Base Mr: 500 MPa Subleito Mr:200 MPa	Referência	7,5	10722	0,150	2,89E+06	1,00
		Cal/Ag. Seco	7,5	8031	0,166	6,51E+06	2,25
		Cal Calda	7,5	12645	0,124	2,78E+06	0,96
E II	Base Mr: 300 MPa Subleito Mr:100 MPa	Referência	7,5	10722	0,205	6,24E+05	1,00
		Cal/Ag. Seco	7,5	8031	0,223	1,08E+06	1,73
		Cal Calda	7,5	12645	0,174	5,33E+05	0,86
E I	Base Mr: 500 MPa Subleito Mr:200 MPa	Referência	10,0	10722	0,125	7,13E+06	1,00
		Cal/Ag. Seco	10,0	8031	0,137	2,12E+07	2,98
		Cal Calda	10,0	12645	0,106	6,09E+06	0,85
E II	Base Mr: 300 MPa Subleito Mr:100 MPa	Referência	10,0	10722	0,165	1,81E+06	1,00
		Cal/Ag. Seco	10,0	8031	0,178	4,24E+06	2,35
		Cal Calda	10,0	12645	0,143	1,39E+06	0,77

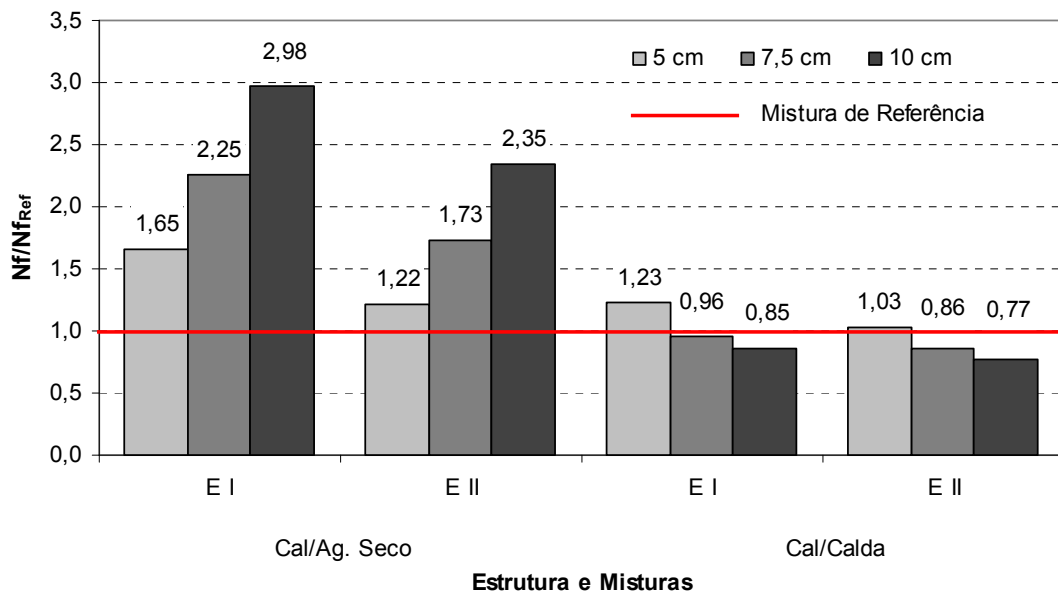
Para todas as espessuras de revestimento analisadas nas duas estruturas, as misturas com incorporação de cal na forma seca (*Cal/Ag.Seco*) apresentaram desempenho superior às amostras da mistura de *Referência e Cal/Calda* (Figuras 25 e 26). Para a espessura de 5 cm de revestimento, a mistura do tipo *Cal/Calda* apresentou desempenho ligeiramente superior à mistura de *Referência* para as duas estruturas analisadas, já para as espessuras de 7 cm e 10

cm apresentou desempenho inferior. Quando comparadas as três misturas, a mistura *Cal/Ag.Seco* apresentou-se mais eficiente, gerando um pavimento com maior vida útil.



**Figura 25** - Vida de fadigas das misturas asfálticas

Na estrutura E II em que adotou-se um  $M_r$  inferior em relação a EII, observou-se a mesma tendência de comportamento do revestimento, somente teve-se uma vida útil menor devido à diminuição do módulo destas camadas. Este fato demonstra a importância das camadas inferiores ao revestimento na vida útil do pavimento.



**Figura 26** -  $N_f/N_{fRef}$

Para a mistura *Cal/Ag. Seco* aumentando-se a espessura do revestimento tem-se também um aumento de relação  $nf/nf_{Ref}$ . O contrário acontece para a mistura *Cal/Calda* em que se teve uma diminuição desta relação quando se aumenta a espessura do revestimento.

Em uma análise geral constata-se que as amostras da mistura com incorporação de cal sobre o agregado graúdo na forma seca (*Cal/Ag. Seco*) apresentaram um desempenho superior em comparação com a mistura de *Referência* (sem incorporação de cal) e incorporação de cal sob a forma de calda de cal (*Cal/Calda*) isso demonstra que esta forma de incorporação de cal está agindo de forma positiva melhorando as propriedades das misturas e aumentando a sua vida útil. Observa-se que a incorporação de cal sob a forma de calda ao o agregado graúdo (*Cal/Calda*) apresenta desempenho inferior à mistura de *Referência* para duas das três espessuras de revestimento analisadas (7 cm e 10 cm), apresentando praticamente o mesmo desempenho para a espessura de 5 cm.

#### 4.2. PROPRIEDADES DE COESÃO/ADESÃO – PERDA DE MASSA (Pm)

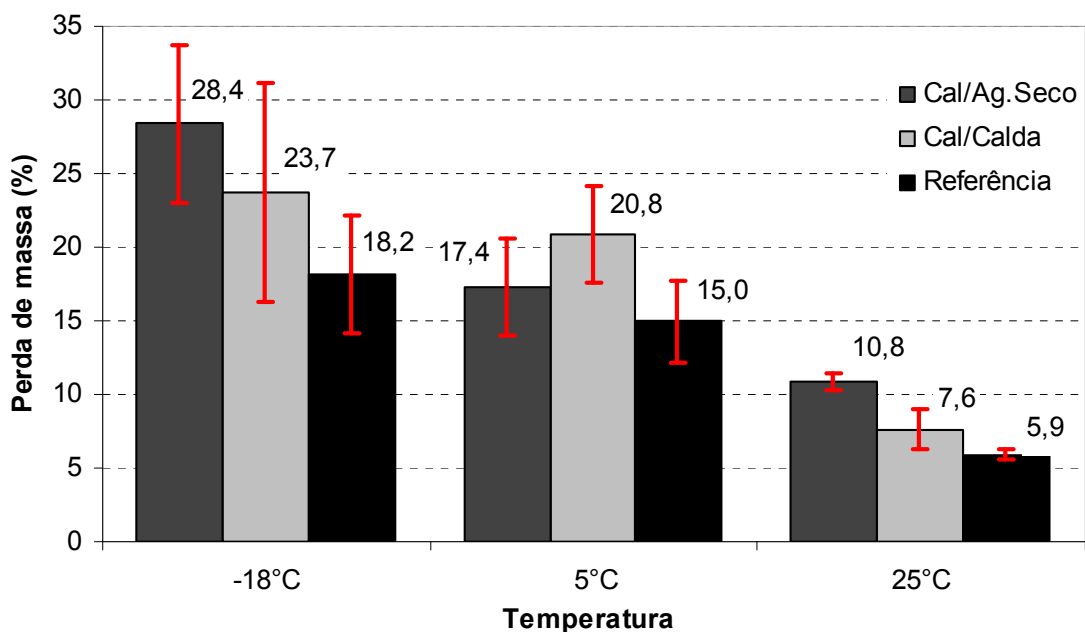
Para a análise dos resultados da caracterização das propriedades de coesão/adesão foi utilizado o mesmo método de filtragem de dados utilizado nos ensaios de caracterização mecânica descritos acima.

A Tabela 18 apresenta o resumo dos resultados para o ensaio de perda de Massa (Pm) - Metodologia Cantabro preconizado pela norma DNER – ES 383/99.

**Tabela 18 - Resultados de Perda de massa**

Mistura	Temp.(°C)	Pm Máx (%)	Pm Min (%)	$\mu$ (%)	$\sigma$ (%)	Cv (%)
Referência	-18	23,57	15,14	18,15	3,95	21,76
	5	19,02	12,87	14,96	2,77	18,51
	25	6,41	5,65	5,89	0,35	5,94
Cal/Ag. Seco	-18	35,01	22,99	28,38	5,37	18,92
	5	20,43	15,22	17,35	3,29	18,96
	25	11,35	10,06	10,83	0,55	5,08
Cal/Calda	-18	32,23	14,19	23,74	7,39	31,13
	5	25,66	18,54	20,84	3,28	15,74
	25	9,61	5,45	7,62	1,35	17,72

A Figura 27 apresenta os valores de perda de massa (PM) para cada mistura, realizado com condicionamento prévio a três temperaturas:  $-18^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  e  $25^{\circ}\text{C}$ . Estas temperaturas de condicionamento foram adotadas para simular as condições que o pavimento pode estar submetido; A temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  foi adotada em conformidade ao condicionamento a que são submetidas as amostras no condicionamento para o ensaio da Metodologia Lottman Modificado; A temperatura de  $5^{\circ}\text{C}$  foi adotada pois representa as temperaturas a que chegam os pavimentos no sul do país em épocas de inverno; A temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  é a temperatura preconizada em norma para execução do ensaio.



**Figura 27** - Perda de massa (%)

De uma maneira geral, em todas as temperaturas de condicionamento pode-se perceber que existe uma tendência de elevação da perda de massa, para misturas com menor teor de ligante. As amostras da mistura de *Referência* que apresentam maior teor de ligante consequentemente apresentaram menor perda de massa.

Porém para a mistura com incorporação de cal sob a forma de calda de cal sobre o agregado graúdo (*Cal/Calda*) que apresenta o menor teor de ligante (Bock, 2009) observou-se que, mesmo possuindo um teor de ligante menor que a mistura com incorporação de cal sobre o agregado graúdo seco (*Cal/Ag. Seco*) não se teve uma perda de massa tão acentuada; isso reforça a eficiência deste método de adição de cal.

Nota-se ainda um aumento na perda de massa e uma diminuição da precisão do ensaio com a diminuição da temperatura de condicionamento.

Verifica-se uma perda de massa mais acentuada para as amostras com adição do tipo *Cal/Ag. Seco* (10,8 % à 25°C; 28,4% à -18°C) seguido das amostras com adição do tipo *Cal/Calda* (20,8% à 5°C), as amostras de *Referência* foram as que menos tiveram perda de massa (5,9% à 25°C; 15% à 5°C e 18,2% à -18°C).

Segundo prescrições da norma DNER – ES 386/99 o valor máximo de perda de massa aceitável é de 25%, o que demonstra que as amostras da mistura *Cal Ag. Seco* pra a temperatura de condicionamento de -18°C não estão dentro das especificações, tendo atingido um valor máximo de 28,4 %.

## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, que teve como objetivo geral avaliar comparativamente as propriedades mecânicas e de adesão/coesão de misturas em CA com diferentes formas de incorporação de cal.

Também são feitas sugestões para trabalhos futuros, visando à continuidade da pesquisa.

### 5.1. Conclusões

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados e dos dados analisados foi possível chegar às seguintes conclusões:

✓ **Quanto às propriedades mecânicas das misturas:**

**a) Resistência à tração ( $R_t$ ):**

Sem condicionamento a mistura *Cal/Ag. Seco* apresentou a maior  $R_t$  das três misturas em estudo (1,76 MPa); já após o condicionamento a mistura apresentou a menor  $R_t$  das três misturas em estudo (1,28 MPa);

Com o condicionamento teve-se um aumento na  $R_t$  das misturas (*Referência e Cal/Calda*) quando comparadas com a mistura *Cal/Ag. Seco*; Conclui-se com estes dados que esta mistura acaba perdendo resistência no decorrer de sua vida útil enquanto as outras misturas se tornam mais resistentes.

**b) Módulo de Resiliência ( $M_r$ ):**

No ensaio de  $M_r$  a mistura *Cal/Ag. Seco* apresentou um  $M_r$  superior às outras misturas em estudo (12645 MPa) sem condicionamento; o condicionamento provocou uma diminuição significativa desta propriedade em comparação com as outras misturas que tiveram uma ligeira elevação, apresentando o menor valor das três misturas em estudo (8706 MPa);

Com condicionamento as amostras da mistura de *Referência* apresentaram o maior Mr das três misturas em estudo (14012 MPa) configurando-se em misturas bastante rígidas.

**c) Relação Mr/Rt:**

Podemos verificar que a mistura de *Referência*, após passar pelo processo de condicionamento apresentou um aumento significativo do módulo de resiliência, mas não apresentou aumento de resistência tão significativo;

A incorporação de cal está influenciando de forma positiva nas misturas, tornando-as mais elásticas demonstrando dessa forma que ao longo do tempo, com a submissão do revestimento aos danos provocados pela umidade e o próprio envelhecimento da mistura (condicionamento), estas misturas mantiveram uma compatibilidade entre sua rigidez e resistência;

**d) Fadiga:**

Pôde-se verificar que as amostras da mistura com incorporação de cal sobre o agregado graúdo na forma seca (*Cal/Ag. Seco*) apresentaram um desempenho superior em comparação com a mistura de *Referência* (sem incorporação de cal) e incorporação de cal sob a forma de calda de cal (*Cal/Calda*) isso demonstra que esta forma de incorporação de cal está agindo de forma positiva melhorando as propriedades das misturas e aumentando a sua vida útil.

Reduz-se com a incorporação de cal o trincamento do revestimento decorrente da fadiga. Outros autores já haviam feito esta constatação, porém a análise realizada neste estudo é pioneira na região de inserção e para os materiais utilizados (agregados e ligante).

✓ **Quanto às propriedades de adesão/coesão - Perda de massa (Pm):**

Na avaliação da perda de massa somente as amostras da mistura *Cal/Ag.Seco* para a temperatura de condicionamento de  $-18^{\circ}\text{C}$  não estão dentro das especificações, tendo atingido



um valor máximo de 28,4 %, sendo o máximo tolerável segunda a norma DNER – ES 386/99 25%;

Em todas as temperaturas de condicionamento pode-se perceber uma tendência de elevação da perda de massa, para misturas com incorporação de cal, pois as mesmas apresentam um menor teor de ligante, sendo esta uma variável importante, pois proporciona um maior poder cimentante às misturas.

Para a mistura *Cal/Calda*, que apresenta o menor teor de ligante (Bock, 2009), observou-se que mesmo possuindo um teor de ligante menor do que a mistura *Cal/Ag. Seco* não apresentou uma perda de massa tão acentuada; isso demonstra uma maior eficiência deste método de adição de cal nas propriedades em questão.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- ✓ Realização de ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada com condicionamento das amostras para a realização de uma avaliação comparativa de desempenho antes e depois do condicionamento;
- ✓ Comparar o desempenho de misturas com adição de cal hidratada e misturas modificadas com adição de melhoradores químicos de adesividade (Dopes);
- ✓ Estudo técnico de implementação de dispositivos em usinas de CBUQ que proporcionem a incorporação de cal na forma de calda de cal e na forma seca aos agregados graúdos;
- ✓ Realização de uma análise de desempenho das misturas em escala real através da construção e monitoramento de pistas experimentais para uma melhor caracterização do desempenho destas misturas em serviço;

## REFERÊNCIAS

AASHTO T 283-89. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.** In: American Association of State Highway Transportation Officials, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Preparation of Bituminous Using Marshall Apparatus.** D 6926-04. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures.** D 6927-05. In: ASTM...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2005.

ANTT - Agência nacional de transportes terrestres. **Boletim Estatístico. Abril 2008.** 1p.

ASPHALT INSTITUTE. **Cause and Prevention of Stripping in Asphalt Pavements,** Asphalt Institute Building, - Educational Serie ES-10, USA, 1987.

ASPHALT INSTITUTE. **Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types.** Lexington, Manual Series N°2 (MS-2), 6 ed. 1995a, 141p.

AYREI, G. D. **State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials.** *International Journal of Pavement Engineering.* v4. p.165-176, 2003.

AYRES JR., M. **Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis.** Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, USA, 1997.

BIRMAN, S. **Concreto asfáltico.** 2. ed. reimp. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), 1982, 32 p.

BOCK, A. L., HARTMANN, D., BUDNY, J., SPECHT, L. P., CERATTI, J. A. P. **Avaliação de diferentes métodos de adição de cal em misturas de concreto asfáltico.** In: IV SINAPRE - Simpósio Internacional de avaliação de pavimentos e projeto de reforço. Fortaleza – CE. UFC, 2009. v.1. p.1 – 14

BOCK, A.L. **Estudo de diferentes métodos de incorporação de cal em misturas de concreto asfáltico**. Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica PIBIC/CNPq - Relatório Parcial. Universidade regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2009.

CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS (CEC). **Propuesta de norma de ensayo – determinacion de la perdida por desgaste de mezeclas bituminosas mediante el empleo de la maquina de Los Angeles (Ensayo Cantabro)**. NLT – 325/86. Madri, 1986, 3p.

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. **Uma pesquisa a favor do Brasil**. Disponível em <http://www.cnt.org.br/informacoes/revista.asp> (acessado em 18/12/2008).

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa Rodoviária 2009**. Disponível em [http://www.cnt.org.br/informacoes/pesquisas/rodoviaria/2009/arquivos/pdf/boletim\\_02.pdf](http://www.cnt.org.br/informacoes/pesquisas/rodoviaria/2009/arquivos/pdf/boletim_02.pdf) (acessado em 08/11/20089).

DE HOLANDA. **Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**, Aurélio Buarque de Holanda Ferreira, Editora Nova Fronteira, 1986.

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Concreto Asfáltico: DAER/RS – ES 16/98**. Porto Alegre, 1998, 21p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**. DNER – ME 138/94. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com Asfalto-Polímero – Ensaio Cantabro**. DNER – ME 383/99. Rio de Janeiro, 1999, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Misturas Betuminosas à Quente – Ensaio Marshall**. DNER – ME 043/95. Rio de Janeiro, 1995, 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência**. DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro, 1994, 5p.

EPPS, J.; BERGER, E.; ANAGNOS, J.N.; **Treatments** - Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements – A National Seminar; Transportation Research Board, 2003.

FERNANDES JUNIOR, J.L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. São Carlos, 1994. Tese (Doutorado em Engenharia dos Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 313 p.

FRANCO, F. A. **Um sistema para análise mecânica de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 171 p.

HICKS, R. P. Moisture damage in asphalt concrete. **National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175**, Transportation Research Board, Washington, 1991, 91p.

HICKS, R.G. & SCHOLZ, T.V. **Life Cycle Cost for Lime in Hot Mix Asphalt**. Report and Software for National Lime Association, 2001.

HIRSCH, F. **Estudo do Comportamento de Misturas Asfálticas Preparadas com Diferentes Tipos de Ligantes**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2007.

HIRSH, F. *et al.* **Estudo do comportamento de misturas asfálticas preparadas com diferentes tipos de ligantes**. ABPv - 38ª Reunião Anual de Pavimentação – Manaus, 2007, 12p.

LITTLE, D. & EPPS, J. **The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt**. Report for National Lime Association, 2001. Updated by Peter Sebaaly, in 2006.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. A.; SEBAALY, P. E. The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt. Report for National Lime Association, 2006. 80p.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. A.; SEBAALY, P. E. The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt. Report for National Lime Association, 2006. 80p.

MALLICK, R. B.; PELLAND, R.; HUGO, F. **Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt.** *The International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 6, Nº 2, p. 125-136. 2005.

MALLICK, R. B.; PELLAND, R.; HUGO, F. **Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt.** *The International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 6, Nº 2, p. 125-136, 2005.

MARTINHO, F.G., **Adesividade**. 26ª Reunião Anual de Pavimentação. Vol 1, Aracaju – Sergipe, 1992. p. 60 – 81.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura M. G.; **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574p. 2005.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. São Paulo, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 259p.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, 165p.

MOURA, E. de. **Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas**. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 259p.

NEVES FILHO, A. S. **Influência da adição de dopes na adesividade em misturas asfálticas a quente**. ABPv - 38ª Reunião Anual de Pavimentação – Manaus, 2007, 12p.

NÚÑEZ, W. P., CERATTI, J. A. P., PERAÇA, V., TSUKUDA, R. S. **Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada**. ABPv - 38ª Reunião Anual de Pavimentação – Manaus, 2007, 15p.

PEREIRA, A de S. **Utilização de Geotêxteis em Reforço de Pavimento aplicado em um Trecho Experimental**. Rio de Janeiro, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 195 p.

PINILLA, A. **Aderência Entre Betumes Asfálticos e Agregados Pétreos**. Conselho Nacional de Pesquisas – IPR Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 1965.

PINTO, S. e MOTTA, L. M. G. **Catálogo de curvas de fadiga**. Boletim técnico número 16. Associação Brasileira de Pavimentação - ABPv, Rio de Janeiro, 1995.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y.; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction**. 1. ed. Napa Education Foundation. Lenham, Maryland, 1991.

RODRIGUES, R. M. **Performance Prediction Model for Asphalt Overlays With Geotextile Interlayers on Cracked Pavements**, Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, U.S.A, p. 973-976. 1998.

ROSSO, J.A. **Análise do comportamento à fadiga de misturas asfálticas densas usadas a frio**. São José dos Campos, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica. 143p.

ROZEK, T. de M. **Estudo laboratorial do envelhecimento de misturas em concreto asfáltico preparadas com diferentes tipos e teores de ligantes**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2008.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. São Carlos, 2005. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 123p.

SANTOS, C. R. G. *et al.* **Estudo laboratorial sobre o desempenho à fadiga de misturas asfálticas com asfaltos modificados.** ABPv – 36ª Reunião Anual de Pavimentação – Curitiba, 2005, 10p.

SPECHT L. P.; CERATTI J. A. P.; BRITO L. A. **Avaliação da adesividade e do desgaste de misturas asfálticas preparadas com Ligantes Asfalto-Borracha.** Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes. v.2. p.1173-1183. Recife, 2005.

SPECHT, L. P. ; CERATTI, J. A. P. . **Estudo das propriedades à fadiga de misturas asfálticas preparadas através do processo seco de incorporação de borracha reciclada.** Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online), Rio Grande, v. 8, p. 53-62, 2006.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus,** Porto Alegre, 2004. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 279p.

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P.; PALUDO, I. **Estudo laboratorial da adesividade e do desgaste de misturas asfálticas com borracha.** In: XVI Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes. Panorama Nacional da Pesquisa em Transporte. Natal/RN, 2002, p. 1-12.

SPECHT, L. P.; ROZEK, T.; HIRSCH, F.; CERATTI, J. A. P. **Avaliação mecânica e de adesividade de misturas asfálticas considerando o teor de filer adicionado.** Revista Estradas (Porto Alegre), v. 13, p. 68-73, 2008.

TONIAL, I. A.. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos.** Rio de Janeiro, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 244p.

TOSCARELLI, J., GODOY, S. **Uso de geotextiles para prevenir reflexion de fisuras en la rehabilitacion de pavimentos,** 7º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Venezuela, T3-04. 1993.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias marshall e superpave com diferentes granulometrias.** Fortaleza, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, 149p.

WESSELING, D. H. **Avaliação laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2002.