

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

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA**

**Curso de Engenharia Civil**

**Fernando Dekeper Boeira**

**ESTUDO LABORATORIAL DO DESEMPENHO DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS COM DIFERENTES TIPOS E  
TEORES DE CAL**

**Ijuí/RS**

**2011**

**Fernando Dekeper Boeira**

**ESTUDO LABORATORIAL DO DESEMPENHO DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS COM DIFERENTES TIPOS E  
TEORES DE CAL**

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

**Ijuí  
2011**

# **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. Gustavo Cantarelli, Msc.  
UNIJUÍ/DeTec

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
José Antonio Borges Boeira e Maria Dekeper  
Boeira, pois sem eles não conseguiria nada do  
que conquistei até hoje.*

## **AGRADESCIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer profundamente os meus pais, pelo incentivo e pela confiança que depositaram, pois sem eles essa conquista não teria se realizado.

Ao Professor Luciano P. Specht, pela eximia orientação prestada, pela disponibilidade que teve, mesmo não estando mais na UNIJUI sempre esteve pronto a atender e a incentivar, e principalmente pelo exemplo de competência que me serviu.

A todos os amigos que estiveram presentes no decorrer do curso, agradeço a amizade e a compreensão, tenho certeza de que todos contribuíram de alguma forma: Diego Arthur Hartmann, Fernando Cronst, Ricardo Forgiarini Rupp, Carlos Filipe Santos Correia e Silva, Jaelson Budny, André Luiz Bock e Ricardo Klein Novroth.

Aos amigos e colegas de pesquisa, que sem a sua ajuda deles, não teria consegui realizar sozinho esse trabalho: Alex Granich, Eduardo Pasche e Gustavo M. Pires.

Aos laboratoristas e amigos do LEC Luis Donato e Tiago, pelo auxilio durante o curso e pela realização dos ensaios, agradeço todo o apoio e amizade.

Aos laboratoristas do Laboratório de Pavimentação da UFRGS Vinícius e Daniel, pelo auxilio durante os ensaios realizados, agradeço todo o apoio e amizade.

Enfim gostaria de agradecer profundamente a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho, principalmente os professores da UNIJUI seja por orientação técnica, ou por amizade.

## RESUMO

Os pavimentos merecem uma atenção quanto aos estudos de sua vida útil dada sua importância no cotidiano das pessoas e na economia em geral. Uma das soluções que vem sendo muito utilizada é a incorporação de cal em misturas asfálticas, que além de melhorar a adesividade agregado-ligante e enrijecer o ligante asfáltico a própria mistura retarda o trincamento e altera favoravelmente a cinética da oxidação e interage com produtos da oxidação, reduzindo seus efeitos deletérios. O alvo da pesquisa é avaliar os efeitos da adição de diferentes tipos e teores de cal em misturas de CA, quanto a ensaios para avaliar características de adesividade e mecânica. Para utilização nesse estudo, foram utilizados dois tipos de cales, uma dolomítica produzida no estado do Rio Grande do Sul, outra calcítica provinda do estado de Minas Gerais, nos teores de 1% e 2% sendo adicionadas sobre o agregado graúdo seco. Foram dosadas, através da metodologia Marshall, cinco misturas em concreto asfáltico: Referência; 1% Calcítica; 1% Dolomítica; 2% Calcítica; 2% Dolomítica. Foram realizados ensaios para verificação do comportamento mecânico e adesividade. Para a dosagem Marshall percebe-se uma redução no teor de ligante em relação à mistura referência (5,65%) e que a mistura com 1% cal calcítica obteve a maior redução (5,40%), reduzindo assim o consumo de ligante, contudo todas as misturas ficaram com teor de ligante de projeto abaixo da referência. Para o ensaio de Resistência à Tração maiores valores ficaram com a mistura de 1% de cal dolomítica com 1,52 MPa, seguida da outra mistura de 2% de cal dolomítica com 1,46 MPa. Já as misturas com 1% e 2% de calcítica ficaram respectivamente com 1,44 MPa e 1,35 MPa seguido então da mistura referência a qual ficou com 1,30 MPa. Com o ensaio de Módulo de Resiliência observa-se os maiores valores ficaram com as misturas com incorporação de 1% de cal, sendo a calcítica com 3872 MPa e para a dolomítica com 3625 MPa. Com a relação  $M_r/R_t$  observa que os melhores valores encontrados foram com a mistura dolomítica, ficando a com 2% de cal a melhor encontrada. Seguido das misturas com 1% e 2% de calcítica, as quais ficaram abaixo da mistura referência. Já para as propriedades de adesividade (cantabro), percebe-se que a incorporação da cal ajuda plenamente a retardar a perda de massa, aumentando assim a adesividade entre a mistura, ou seja, todas as misturas ficaram abaixo da mistura de referência. A mistura que obteve o menor valor de perda foi a com a incorporação de 2% Calcítica. Com a Metodologia Lottman Modificada constata-se a mistura com a adição de 1% de calcítica obteve o melhor desempenho (100%), seguida da mistura 2% calcítica (97%) e referência (96%), já as misturas dolomítica 1% e 2% respectivamente (72%, 81%) apresentaram os menores desempenhos.

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

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de Tratamento Superficial .....	20
Figura 2: Exemplo de um Compactador giratório – Laboratório de Geotecnia da COOPE ....	23
Figura 3: Demonstração do trincamento de um pavimento.....	25
Figura 4: Distribuição Granulométrica.....	35
Figura 5: Composição granulométrica da mistura.....	37
Figura 6: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro .....	39
Figura 7: Fixação dos LVDTs e equipamento de módulo de resiliência.....	39
Figura 8: Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência .....	40
Figura 9: Exemplo de equipamento para ensaio de Rt. ....	42
Figura 10: Equipamento de abrasão Los Angeles .....	43
Figura 11: Parâmetros da mistura Referência.....	45
Figura 12: Parâmetros da mistura Dolomítica 1%.....	46
Figura 13: Parâmetros da mistura Dolomítica 2%.....	47
Figura 14: Parâmetros da mistura Calcítica 1% .....	48
Figura 15: Parâmetros da mistura Calcítica 2% .....	49
Figura 16: Relação de teores de ligante das misturas.....	50
Figura 17: Resistência à Tração das misturas.....	51
Figura 18: Resultado do Módulo de Resiliência .....	52
Figura 19: Relação Mr/Rt.....	53
Figura 20: Perda de massa das misturas .....	55
Figura 21: Resistência à Tração das misturas sem condicionamento.....	56
Figura 22: Resistência à Tração das misturas com condicionamento .....	57
Figura 23: Resistência Retida à Tração das misturas .....	57

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Fatores intervenientes nas características de adesividade.....	28
Tabela 2: Características dos agregados utilizados.....	35
Tabela 3: Resumo dos resultados da Resistência à Tração.....	51
Tabela 4: Resumo dos resultados de Módulo de Resiliência.....	52
Tabela 5: Resumo dos resultados do Cantabro.....	54
Tabela 6: Resumo dos resultados do Lottman.....	56



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Causas e exemplos de defeitos em pavimentos.....	26
Quadro 2: Número de amostras.....	34
Quadro 3: Propriedades das cales.....	36
Quadro 4: Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70).....	37
Quadro 5: Resumo dos parâmetros de cada mistura.....	50

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

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

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

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

**CA:** *Concreto Asfáltico*

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

**d:** *diâmetro do Corpo-de-Prova*

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

**DNER:** *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*

**F:** *Força Aplicada*

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

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

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

**Mr:** *Módulo de Resiliência*

**PM:** *Perda de massa*

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

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

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

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

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1. TEMA DA PESQUISA .....	13
1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	13
1.3. FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO .....	13
1.4. OBJETIVOS.....	13
1.4.1. <i>Objetivos gerais</i> .....	13
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	13
1.5. JUSTIFICATIVAS .....	14
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1. TIPOS DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS .....	16
2.1.1. <i>Revestimentos Asfálticos por Mistura</i> .....	17
2.1.1.1. <i>CBUQ ou CA</i> .....	17
2.1.1.2. <i>CPA</i> .....	17
2.1.1.3. <i>SMA</i> .....	18
2.1.1.4. <i>AAUQ</i> .....	18
2.1.1.5. <i>PMF</i> .....	18
2.1.2. <i>Revestimento Asfáltico por Penetração</i> .....	19
2.2. DOSAGEM MISTURAS ASFÁLTICAS .....	20
2.2.1. <i>Dosagem Marshall</i> .....	20
2.2.2. <i>Método de Hubbard-Field</i> .....	21
2.2.3. <i>Método de Hveem</i> .....	21
2.2.4. <i>Método de Triaxial Smith</i> .....	22
2.2.5. <i>Método SUPERPAVE</i> .....	22
2.3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....	23
2.3.1. <i>Módulo de Resiliência</i> .....	24
2.3.2. <i>Fadiga</i> .....	24
2.3.3. <i>Deformação Permanente</i> .....	25
2.4. CARACTERÍSTICA ADESÃO E COESÃO.....	27
2.5. MELHORADORES DE ADESIVIDADE.....	29
2.5.1. <i>Ligantes Modificados</i> .....	29
2.5.2. <i>Intertravamento</i> .....	30
2.5.3. <i>Dopes</i> .....	30
2.5.4. <i>Cal Hidratada</i> .....	30
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
3.1. CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO.....	33
3.2. PLANEJAMENTO DA PESQUISA .....	33
3.3. MATERIAIS UTILIZADOS .....	34
3.3.1. <i>Agregados Minerais</i> .....	34
3.3.2. <i>Fíleres</i> .....	35
3.3.3. <i>Ligantes Asfálticos</i> .....	36
3.4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS .....	37
3.4.1. <i>Dosagem Marshall</i> .....	38
3.4.2. <i>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral</i> .....	38
3.4.3. <i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i> .....	39
3.4.4. <i>Ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada</i> .....	41

3.4.5.	<i>Perda de massa por desgaste</i> .....	42
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>44</b>
4.1	DOSAGEM MARSHALL .....	44
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	51
4.2.1.	<i>Ensaio de Resistência à Tração – DNER-ME 138/94</i> .....	51
4.2.2.	<i>Ensaio de Módulo de Resiliência - DNER-ME 133/94</i> .....	52
4.2.3.	<i>Relação Mr/Rt</i> .....	53
4.3	PROPRIEDADE DE ADESIVIDADE .....	53
4.3.1.	<i>Perda de Massa – Metodologia Cantabro</i> .....	53
4.3.2.	<i>Adesividade – Metodologia Lottman Modificada</i> .....	55
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>58</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	58
5.1.1.	<i>Dosagem Marshall</i> .....	58
5.1.2.	<i>Propriedades Mecânicas</i> .....	58
5.1.2.1.	<i>Ensaio de Resistência à Tração – DNER–ME 138/94</i> .....	58
5.1.2.1.	<i>Ensaio de Módulo de Resiliência – DNER–ME 133/94</i> .....	59
5.1.2.1.	<i>Relação Mr/Rt</i> .....	59
5.1.3.	<i>Propriedades de adesividade</i> .....	59
5.1.3.1.	<i>Perda de Massa – Metodologia Cantabro</i> .....	59
5.1.3.2.	<i>Adesividade – Metodologia Lottman Modificada</i> .....	60
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	60
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>61</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Tema da Pesquisa

O tema da pesquisa é: Pavimentação Asfáltica.

## 1.2. Delimitação do Tema

Este trabalho limita-se a estudar revestimentos asfálticos do tipo concreto asfáltico (CA) levando em consideração a substituição de 1% e 2% de fíler basáltico por cal.

## 1.3. Formulação da questão de estudo

Qual o efeito da porcentagem e tipo de cal no desenvolvimento mecânico e de adesividade de misturas em Concreto Asfáltico (CA)?

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivos gerais

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o efeito de diferentes adições de cal em mistura tipo CA, quanto a ensaios para avaliar características mecânicas e de adesividade.

### 1.4.2. Objetivos específicos

Verificar a influência dos tipos e teores de cal Dolomítica e Calcítica na Dosagem Marshall, Resistência à tração, Módulo de Resiliência, Adesividade e Resistência ao Desgaste.

### 1.5. Justificativas

Uma das primeiras estradas reportadas tem início em 1560, à época do terceiro governador-geral do Brasil, Mem de Sá. Trata-se do caminho aberto para ligar São Vicente ao Planalto Piratininga. Em 1661, o governo da Capitania de São Vicente recuperou esse caminho, construindo o que foi denominada Estrada do Mar (ou Caminho do Mar), permitindo assim o tráfego de veículos. Hoje a estrada também é conhecida como Estrada Velha do Mar (BERNUCCI *et al* 2006).

O Brasil cresceu bastante nos últimos anos em relação a sua malha rodoviária, porem ainda continua com certo atraso nesse aspecto. Sendo que malha rodoviária é elemento fundamental para as cadeias produtivas, pois une mercados promovendo a integração de regiões e estados e ainda 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). Segundo pesquisa da CNT (2010) pôde-se constatar em relação às rodovias do Brasil, cerca de 14,7% das rodovias avaliadas são classificadas como ótimas 26,5% como boas, 33,4% são regulares, 17,4% estão ruins e 8% péssimas.

A degradação de pavimentos está associada a varias patologias, dentre elas: deformações permanentes excessivas, fissuras de fadiga, retração térmica e desagregação. As duas primeiras estão 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 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 (Bock, 2009).

Além das condições de conforto e segurança, uma rodovia em mau estado de conservação, acaba resultando em um consumo maior de combustível, aumentam o custo de operação e ainda em um maior tempo para percorrer as rotas.

Neste sentido, os pavimentos merecem uma atenção especial quanto aos estudos de sua vida útil, sempre analisando novas idéias a fim de prolongar sua vida útil. Uma das soluções que vem sendo aplicadas durante as ultimas décadas é a utilização de asfaltos modificados por polímero, segundo Specht (2004), a adição de materiais poliméricos traz vários benefícios aos ligantes asfálticos, como a redução da suscetibilidade térmica e o aumento da ductilidade, proporcionando estabilidade em altas temperaturas e reduzindo o risco de fratura em baixas temperaturas, além de contribuir para uma melhor resistência ao intemperismo e uma melhor adesão ligante/agregado, mas em contrapartida possuem custos muito elevados, dificuldades de transportes, armazenamento e incorporação na mistura.

Em estudos publicados nos Estados Unidos (Little *et al.*, 2006 apud Núñez *et al.*, 2007) relatam 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.

O DNIT já especifica a incorporação de cal em misturas de CA, porém não especifica a natureza mineral da cal. Pesquisas recentes em Ijuí-RS, realizadas por Budny *et al.* (2009), estudaram a incorporação de cal nas misturas do tipo CA, utilizando apenas a substituição de 1% do fíler pelas cales produzidas no Rio Grande do Sul e as de Minas Gerais (dolomítica e calcítica). Sendo essa pesquisa irá tratar sobre a incorporação de 1% e 2% das cales.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tratará sobre as misturas asfálticas, onde estes constituem sistemas plástico-elásticos cujos componentes tem características, composta de uma fase sólida, que é constituída pelos agregados pétreos de elevado módulo de Elasticidade, uma fase líquida de betume asfáltico com viscosidade elevada e outra fase gasosa de ar, que é um fluído de compressibilidade elevada.

Os fatores que influem na dosagem das misturas, vinculadas com as propriedades que se busca atingir no conjunto são: granulometria da mistura dos agregados; temperatura e viscosidade do asfalto; quantidade de asfalto usado; grau de compactação. A granulometria do agregado adotada e a quantidade de asfalto utilizado na mistura são os responsáveis pela estabilidade, flexibilidade, impermeabilização, durabilidade e distribuição das tensões no revestimento asfáltico.

As misturas asfálticas podem ser classificadas, segundo sua composição granulométrica em *misturas abertas ou fechadas*: Abertas são aquelas que possuem granulometria com predomínio de agregados grossos de um mesmo tamanho (de 1” a 1 1/2” são chamados de macadame). Já as misturas fechadas possuem uma granulometria contínua, assim os agregados finos preenchem os vazios deixados pelos agregados grossos.

### 2.1. Tipos de Revestimentos Asfálticos

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Portanto, essa camada deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos (Bernucci *et al*, 2006).

Os revestimentos são divididos em revestimentos asfáltico por Mistura ou Penetração.



### **2.1.1. Revestimentos Asfálticos por Mistura**

Revestimentos asfálticos por mistura são realizados em uma usina estacionária e transportados posteriormente por caminhão para a pista, onde é lançada por equipamento apropriado, denominado vibroacabadora. Em seguida é compactada, até atingir um grau de compressão tal que resulte num arranjo estrutural estável e resistente, tanto às deformações permanentes quanto às deformações elásticas repetidas da passagem do tráfego (Bernucci *et al*, 2006).

Dentro dos revestimentos por mistura, ainda podem ser executados a quente e a frio. Abaixo estarão descritos os principais revestimentos asfálticos por mistura.

#### **2.1.1.1. CBUQ ou CA**

O CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) ou CA (concreto asfáltico) é um dos tipos de revestimentos asfálticos mais utilizados nas rodovias brasileiras. O CBUQ é normalmente composto por uma porcentagem de agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e um ligante (CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo). A mistura dos agregados com o ligante é realizada à quente em uma usina de asfalto e transportada até o local de sua aplicação por caminhões especialmente equipados onde é lançado por equipamento adequado chamado de vibroacabadora. Após seu lançamento a mistura é compactada por rolos compactadores até atingir a densidade especificada em projeto.

#### **2.1.1.2. CPA**

O CPA (Camada Porosa de Atrito) é empregada como camada de rolamento com a finalidade de aumento de aderência pneu-pavimento em dias de chuva. Esse revestimento é responsável pela coleta da água de chuva para o seu interior e é capaz de promover uma rápida percolação da mesma devido à sua elevada permeabilidade, até a água alcançar as sarjetas. A característica importante dessa mistura asfáltica é que ela causa: redução da espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento e conseqüentemente das distâncias de frenagem; redução do spray proveniente do borrifo de água pelos pneus dos veículos,

umentando assim a distância de visibilidade; redução da reflexão da luz dos faróis noturnos; maior percepção de sinalização vertical durante a noite; todas essas características importantes acabam acarretando uma diminuição dos níveis de "stress" do usuário (Bernucci *et al*, 2006).

Estes tipos de mistura asfáltica mantêm uma grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de fíler, de agregado miúdo e de ligante asfáltico.

### **2.1.1.3. SMA**

SMA (Stone Matrix Asphalt) ou em português (Matriz Pétreo Asfáltica), foi concebida na Alemanha em 1968 e passou a ser usada nos anos 80 na Europa. Uma das aplicações mais frequentes na Alemanha tem sido a reabilitação de pavimentos de concreto de cimento Portland. As misturas asfálticas densas convencionais em geral resistem pouco à reflexão de trincas e à deformação permanente, o que é retardado na solução de SMA. Em 1990, o SMA foi introduzido no Canadá e em 1991 nos Estados Unidos. Atualmente a tecnologia vem sendo aplicada também na Ásia e na América Latina (Bernucci *et al*, 2006).

Bernucci *et al* (2006) comenta que é uma mistura concebida para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão. É uma mistura rica em ligante asfáltico, com um consumo em torno de 6,0 a 7,5%. São misturas que tendem a ser impermeáveis com volume de vazios que variam entre 4 e 6% em pista.

### **2.1.1.4. AAUQ**

A Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ), é uma prática muito utilizada em regiões onde não existem agregados graúdos, utiliza-se como revestimento uma argamassa de agregado miúdo, em geral areia, CAP e fíler se necessário, com um consumo maior de ligante do que as misturas convencionais devidos o aumento da superfície específica.

### **2.1.1.5. PMF**

Os Pré-Misturados a Frio (PMF) são misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, são misturados com emulsão asfáltica de petróleo à temperatura ambiente.

Eles podem ser usados em revestimentos de ruas e estradas de baixo volume de tráfego, ou ainda como camada intermediária e em operações de conservação e manutenção (Bernucci *et al.*, 2006).

### **2.1.2. Revestimento Asfáltico por Penetração**

São revestimento que podem tanto ser executados a quente ou a frio e são executados em pista. Podem ser utilizados como revestimento propriamente dito ou como uma camada intermediária.

Um dos revestimentos por penetração mais utilizados é o Tratamento Superficial. Trata-se de um revestimento de pequena espessura, executado pelo espalhamento do ligante e de agregados e posteriormente compactação que promove o recobrimento parcial e a adesão entre os agregados e o ligante.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), as principais funções de um revestimento de Tratamento Superficial é:

- ✓ Proporcionar uma camada de rolamento de pequena espessura, porém, de alta resistência ao desgaste;
- ✓ Impermeabilizar o pavimento e proteger a infra-estrutura do pavimento;
- ✓ Proporcionar um revestimento antiderrapante;
- ✓ Proporcionar um revestimento de alta flexibilidade que possa acompanhar deformações relativamente grandes da infra-estrutura.

Podem ser executados da forma simples (TSS), dupla (TSD) e tripla (TST). A Figura 1 representa as fases de execução do Tratamento Superficial Simples e do Tratamento Superficial Duplo.

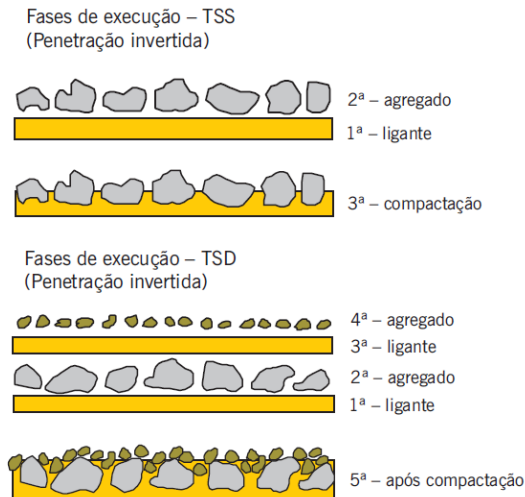


Figura 1: Esquema de Tratamento Superficial

Fonte: Nascimento, 2004, apud, Bermucci *et al*, 2006

## 2.2. Dosagem Misturas Asfálticas

### 2.2.1. Dosagem Marshall

No Brasil, maior parte dos projetos de misturas asfálticas é realizado pela metodologia Marshall. O método foi desenvolvido por na década de 30 por Bruce G. Marshall, do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi dos Estados Unidos. Esse método foi idealizado para efeito da determinação da quantidade de ligante que deveria ser usada na composição de mistura betuminosa, destinadas a serviços de pavimentação rodoviária (Specht, 2004).

Durante a segunda guerra a USACE (Corpo de Engenheiros do Exército Americano), carecia de um método simples, prático e eficiente para dosagem de misturas asfálticas a quente, para uso na pavimentação de pistas de aeroportos militares. A razão determinante dessa necessidade foi o crescente aumento das cargas e das pressões dos pneus impostos pela aviação militar, devido ao desenvolvimento de pesados aviões de bombardeiro (Specht 2004).

Tendo em vista isto, realizaram uma pesquisa de caráter nacional, para selecionar aparelhos de ensaio simples e de fácil transporte, para serem utilizados em campos. Então o USACE adotou o aparelho e o método de projeto de misturas betuminosas concebido por Bruce Marshall. Este método se limita a misturas betuminosas a quente, utilizando CA de

petróleo de penetração compatíveis com as condições ambientais. O agregado deve ter diâmetro efetivo de pelo menos 1 polegada (25,4 mm) (Senço, 2001).

Segundo Moura (2001) o método Marshall apresenta algumas limitações, como a compactação dos CP's a pouca representatividade do método de compactação em relação ao campo e a grande influência na determinação do teor de projeto derivada de fatores ligados à preparação dos corpos-de-prova (tipo de soquete, formas de apoio etc.) (Motta 1998). Trata-se de um método de fácil assimilação e execução, e tem como principal aliado o baixo custo dos equipamentos necessários para sua realização, sendo uma das principais razões de até hoje ter tido grande aceitação e utilização no meio técnico rodoviário brasileiro.

### **2.2.2. Método de Hubbard-Field**

Segundo Hirsch (2007) este foi um dos primeiros a avaliar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas. O ensaio consiste em determinar a carga máxima resistida por um corpo de prova quando forçado através de um orifício circular, sendo que esta carga é considerada o valor da estabilidade Hubbard-Field. O ensaio acarreta um tipo de ruptura correspondente ao cisalhamento.

Tendo em vista que as condições de tráfego existente quando se desenvolveu o método, que travam se de veículos com rodas de aço, transformando o tipo de carregamento em um cisalhamento (Senço, 2001).

### **2.2.3. Método de Hveem**

Segundo Motta *et al* (2000) método Hveem realiza uma análise de densidade/vazios e estabilidade. Também é determinada a resistência da mistura ao inchamento em água. O método Hveem possui duas vantagens reais. Primeiramente, o método de compactação pulsante em laboratório é vista pelos técnicos como a melhor simulação do adensamento que ocorre com o CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente – em campo. Segundo, o parâmetro de resistência, a estabilidade Hveem é uma medida direta dos componentes de atrito interno da resistência de cisalhamento. Este mede a capacidade de um corpo-de-prova resistir a deformação lateral quando uma carga vertical é aplicada.

#### 2.2.4. Método de Triaxial Smith

Dos métodos utilizados hoje, o método Triaxial Smith é o que melhor correlaciona o confinamento praticamente total que as laterais de uma porção de material de um maciço recebe na natureza, com as condições de confinamento, no laboratório, ao se aplicar uma pressão lateral, os corpos-de-prova e, depois, submetê-los a pressões verticais (Senço, 2001).

Senço (2001) ainda comenta que os métodos empíricos de determinação de misturas têm seu ponto fraco no fato de serem limitadas as considerações para as quais se fizeram as correlações iniciais entre os resultados obtidos em laboratório e os obtidos no comportamento em campo.

#### 2.2.5. Método SUPERPAVE

Quem desenvolveu o método foi *Strategic Highway Research Problem* (SHRP), no qual foi criado para substituir os métodos de *Hveem* e *Marshall*. A comum análise volumétrica destes dois métodos serviu de base para o método Superpave. Em 1993 foi concluído e nomeado de *Superior Performing Asphalt Pavement System* (SUPERPAVE).

O SUPERPAVE trata-se de um método que abrange o dimensionamento de misturas asfálticas adaptadas aos requisitos de desempenho ditadas pelo tráfego e ambiente (clima). Ele facilita a escolha e a combinação do ligante asfáltico, agregado, e algum modificante necessário para alcançar o nível requerido do desempenho do pavimento.

Segundo Cavalcanti (2010) o SUPERPAVE tem como a diferença mais importante em relação ao Marshall e o Hveem o tipo de compactação, pois utiliza um compactador designado de giratório, conforme demonstrado na Figura 2, que aplica energia por amassamento. É a metodologia usada atualmente nas universidades e Departamentos de Estradas dos EUA. No Brasil este tipo de dosagem tem sido feito em centros de pesquisas, mas obras federais já foram realizadas com este procedimento. A principal diferença com relação ao método Marshall é a forma de compactação.



Figura 2: Exemplo de um Compactador giratório – Laboratório de Geotecnia da COOPE

Fonte: Cavalcanti, 2010

O seu funcionamento se compara a de um rolo compressor que, em vez de aplicar golpes de impacto, faz a compactação exercendo uma tensão de amassamento na mistura. Os parâmetros utilizados na operação do CGS são: Ângulo de rotação de  $1,25 \pm 0,02^\circ$ ; taxa de 30RPM; tensão de compressão aplicada ao CP durante a rotação de 600KPa e capacidade de reproduzir corpos de provas com diâmetro de 100mm e 150mm (Cavalcanti, 2010).

Embora seja recente, a metodologia de dosagem Superpave, que é a utilizada no Brasil, tem limitação assim como na metodologia Marshall, de apenas considerar os parâmetros volumétricos, sendo as propriedades mecânicas as que realmente se relacionam diretamente com o desempenho da mistura.

### 2.3. Caracterização Mecânica

Segundo Motta (1991) cabe ao revestimento asfáltico resistir diretamente à repetição das cargas dos diferentes tipos de veículos. O acúmulo dessas solicitações resulta na fadiga inevitável da mistura asfáltica aplicada. Este fenômeno é considerado no dimensionamento de um pavimento através da definição de modelos que relacionam o número de repetições de carga com o estado de tensões aplicado.

### 2.3.1. Módulo de Resiliência

Segundo Núñez *et al* (2007) diz que o módulo de resiliência é um fator importante na definição do dimensionamento racional dos pavimentos, estando intimamente ligado ao projeto da mistura. O autor diz ainda que é a razão entre a tensão de tração e a correspondente deformação específica recuperável, quando as misturas asfálticas são submetidas a carregamentos repetidos, de curta duração.

Bernucci *et al* (2006) diz que os estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930 com Francis Hveem, que foi o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. Foi ele também quem adotou o termo “resiliência”, que é definido classicamente como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. Hveem criou um equipamento chamado estabilômetro para medir essas deformações verticais através de sensores eletromecânicos (strain gages). O nome módulo de resiliência (resilient modulus em inglês) foi criado para que não fosse confundido com o módulo de Young, determinado estaticamente.

A descrição do ensaio de Módulo de Resiliência estará descrito na metodologia desta pesquisa.

### 2.3.2. Fadiga

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).



A Figura 3 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).

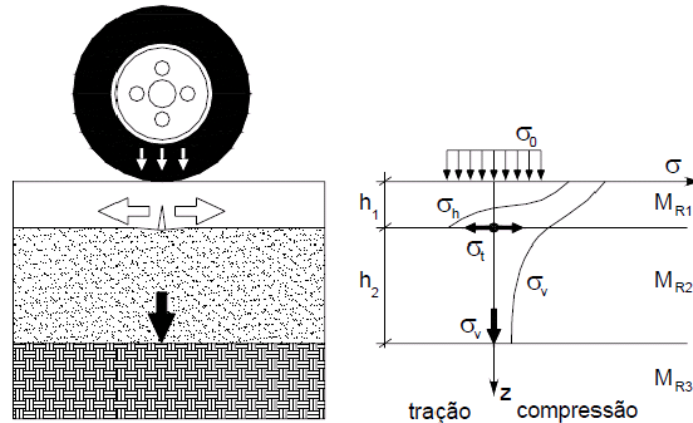


Figura 3: Demonstração do trincamento de um pavimento

Fonte: Medina, 1997

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.

Bock (2009) comenta que 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.

### 2.3.3. Deformação Permanente

Deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, podendo ser atribuída ao revestimento, ou às subcamadas, ou ainda a uma combinação de efeitos. As camadas não-asfálticas abaixo do revestimento podem apresentar deformações permanentes principalmente por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao

cisalhamento. Esses problemas podem ser evitados por uma seleção dos materiais e compactação adequada e um bom projeto estrutural de forma a limitar as tensões atuantes aos níveis admissíveis e seguros (Bernucci *et al.*, 2006).

Segundo Bernucci *et al* (2006) a deformação permanente em misturas asfálticas ocorre devido a uma combinação do fluxo do material (viscoelástico ou viscoplástico) e do dano neste material, representado pela formação e propagação de trincas. A capacidade de uma mistura de resistir a esse tipo de deformação depende de diversos fatores, entre os quais, a consistência do ligante e a volumetria da mistura (agregados e ligantes).

Conforme o DNIT (2006) entre as deformações permanentes em pavimentos incluem-se os afundamentos nas trilhas de roda, deformações plásticas no revestimento e depressões. Esses defeitos causam acréscimos na irregularidade longitudinal afetando a dinâmica das cargas, a qualidade de rolamento, o custo operacional dos veículos e, devido ao acúmulo de água, riscos à segurança dos usuários.

No quadro a seguir, as causas de alguns defeitos em pavimentos:

Quadro 1: Causas e exemplos de defeitos em pavimentos

Fonte: DNIT, 2006.

<b>Causa Geral</b>	<b>Causa específica</b>	<b>Exemplo de defeito</b>
<b>Associada com o carregamento</b>	Carregamento concentrado ou em excesso	Fluência plástica (ruptura por cisalhamento)
	Carregamento de longa duração ou estático	Deformações ao longo do tempo (creep)
	Grande número de repetições de carga	Afundamento nas trilhas de roda
<b>Não associada com o carregamento</b>	Subleito constituído de solo expansivo	Inchamento ou empolamento
	Solos compressíveis na fundação do pavimento	Recalque diferencial

O ensaio triaxial possui a vantagem de reproduzir uma condição de tensão multiaxial mais próxima da condição existente em campo. Neste caso as deformações precisam ser monitoradas nos sentidos vertical e horizontal. Trata-se de um ensaio de realização complexa

e que não vem sendo usado no Brasil, nem mesmo em pesquisas acadêmicas (Bernucci *et al.* 2006).

#### 2.4. Característica Adesão e Coesão

A adesão e coesão em misturas asfálticas estão intimamente ligadas, pois é a partir destes fenômenos que existe a possibilidade de poder misturar materiais de diferentes estados, em uma mistura com capacidade de suportar cargas sem os materiais separar-se.

Para Moura (2001) 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. A adesão pode-se descrever como um fenômeno que advém do contato entre a superfície de dois materiais diferentes e dá-se pela afinidade desenvolvida neles, mantendo-os unidos. Em misturas asfálticas cabe o cimento asfáltico aderir ao agregado, e manter a mistura coesa; isso acontece devido as propriedades do ligante como tensão superficial, poder de molhagem e viscosidade, e do agregado, como composição mineralógica, forma textura superficial e absorção (FURLAN, 2006 *apud* Budny 2009).

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. 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 (Moura 2001).

Para Oliveira Filho (2006), a perda de adesão entre agregado e ligante está comumente relacionada a três fatores: a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso, a ocorrência de umidade e a presença de sujeira e finos na superfície do agregado. Essa perda de adesão do ligante asfáltico com a superfície do agregado (fratura adesiva) bem como a fratura do próprio filme de ligante (fratura coesiva), quer seja na presença de água ou não, é a origem de muitos tipos de defeitos em pavimentos, incluindo trincamento por fadiga, deformação permanente e dano por umidade (Lytton, 2004, *apud* Oliveira Filho 2006).

Tabela 1: Fatores intervenientes nas características de adesividade

Fonte: Hicks 1991

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

A susceptibilidade de misturas asfálticas à umidade é um problema complexo (Tabela 1), que depende de fatores ambientais, práticas construtivas e características das misturas asfálticas. Os principais fatores que aceleram o aparecimento dos danos causados pela umidade são o clima e o tráfego. Os maiores danos ocorrem em condições climáticas extremas, particularmente quando ocorre congelamento combinado com alto volume de tráfego. Os fatores construtivos que influenciam a sensibilidade da mistura à umidade incluem a qualidade da compactação e as condições do tempo durante o processo de construção do pavimento (FURLAN *et al*, 2004, *apud* Budny, 2009).

Segundo Budny (2009), uma mistura asfáltica deve possuir flexibilidade suficiente para que o aparecimento de trincas devido às variações térmicas seja minimizado, e em contrapartida ter rigidez capaz de suportar as solicitações do tráfego, principalmente em elevadas temperaturas.

## 2.5. Melhoradores de Adesividade

A verificação da adesividade ligante/agregado é de suma importância para prever o comportamento da mistura quanto a resistência à desagregação e ao descolamento das misturas asfálticas. Misturas que possuem má adesividade do ligante/agregado, 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 (Budny 2009).

Uma das principais soluções para problemas de adesividade são os melhoradores de adesividade, que usualmente são usados para resolver os problemas de ligação entre o agregado e o CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo). Os mais utilizados são os Ligantes Modificados, Intertravamento, Dopes e a Cal Hidratada.

Estes melhoradores de adesividade podem fazer-se necessários se um determinado projeto de mistura mostrar-se susceptível ao dano por umidade induzida. Então 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).

### 2.5.1. Ligantes Modificados

Segundo BILLMEYER (1984), *apud* Morilha (2004) relata que os polímeros são produtos de origem orgânica, inorgânica ou sintética, de alto peso molecular, cuja estrutura molecular consiste da ligação por reação química de pequenas unidades chamadas monômeros. Esta reação é denominada polimerização e o tamanho final da molécula oriunda da reação com os polímeros é conhecida como macromolécula. Caso o polímero seja composto de monômeros idênticos, este polímero é classificado como homopolímero e caso seja composto de espécies diferentes de monômeros, é classificado como copolímero.

Segundo Moura (2001) os asfaltos modificados por polímero suas características reológicas são modificadas, ocorrendo o aumento da viscosidade em elevadas temperaturas e

diminuição da viscosidade em baixas temperaturas, o aumento da temperatura do ponto de amolecimento, maior resistência ao envelhecimento, alta adesividade e coesão e maior elasticidade e resistência à deformação permanente.

Por outro lado Specht (2004), diz que o uso destes ligantes implica maiores custos inicial, apresentando ainda dificuldades de transporte, armazenamento e incorporação à mistura.

### **2.5.2. Intertravamento**

Consistem basicamente de duas frações de material: agregado graúdo e um elevado teor de mástique, este formado por agregado miúdo, fíler 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 maiores resistência. Já o elevado teor de mástique fornece às misturas uma maior durabilidade (Vasconcelos, 2004, *apud* Bock 2009).

### **2.5.3. Dopes**

Os Dope's são agentes de atividade de superfície que são adicionados em pequena quantidade aos asfaltos. O grupo químico de alta polaridade do final da molécula do dope se liga à superfície do agregado e a parte não-polar do hidrocarboneto chamada surfactante se liga ao asfalto, deste modo os dopes agem como uma ponte de ligação entre o agregado e asfalto.

### **2.5.4. Cal Hidratada**

Segundo Guimarães (1998) a cal recebe dos técnicos a denominação de material versátil e social, por suas múltiplas aplicações e pela contribuição ao bem-estar das comunidades. Apesar de sua produção ser inferior aos dos líderes da produção de origem mineral (petróleo, carvão e cascalho), a cal se destaca pelo seu consumo misto (como insumo ou produto).

Segundo Nuñez *et al* (2007) cal hidratada é o mais eficiente agente melhorador de adesividade, sendo utilizada em muitos locais onde os agregados apresentam problemas de

adesividade. Alguns agregados, como os de granito, são particularmente susceptíveis à perda de adesividade. Além do fenômeno químico, as características ambientais (calor e chuvas intensas) e o tráfego têm papel importante na perda de adesividade. 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 (Little e Epps, 2001).

A cal hidratada tem a capacidade de tornar uma mistura asfáltica mais rígida e resistente às deformações permanentes é um reflexo de seu desempenho superior como fíler mineral ativo. Reage com o ligante, removendo componentes indesejáveis ao mesmo tempo em que suas pequenas partículas se dispersam na mistura asfáltica, tornando-a mais resistente às deformações permanentes e à fadiga. 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 (Nuñez *et al*, 2007).

Nuñez (2007) complementa dizendo que a adição de cal reduz a taxa de oxidação e envelhecimento do ligante. Esta redução é resultado das reações químicas que ocorrem entre o hidróxido de cálcio e as moléculas altamente polarizadas do ligante. A cal hidratada não reduz apenas o envelhecimento, mas também o decorrente da fadiga e das baixas temperaturas. Embora, via de regra, as misturas asfálticas mais rígidas apresentem maior trincamento, a adição de cal melhora as características de fadiga das misturas e reduz o trincamento das mesmas. O trincamento frequentemente ocorre devido à formação de micro-fissuras. Essas micro-fissuras são interceptadas e têm sua direção desviada pelas pequenas partículas de cal hidratada.

Conforme apresentado por Bock (2009) 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. A prática atual de adição de cal como melhorador de adesividade na forma de fíler, prática corrente no Brasil, não foi a forma mais satisfatória de adição. E Bock *et al* (2009) complementa além da qualidade da cal e dos agregados que compõe a mistura, a forma

de incorporação da cal exerce grande influência no comportamento das mesmas as formas de incorporação que tratam com cal o agregado graúdo são as mais eficientes.

A comparação entre as cales dolimítica e a calcítica, se dá principalmente por causa dessa diferença de composição, ou seja, a cal produzida no Rio Grande do Sul é de baixo teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), por outro lado a cal produzida em Minas Gerais tem elevado teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Um teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  na ordem de 90% parece suficiente para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade.



### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Classificação do Estudo

Esta pesquisa trata-se de um estudo de ordem quantitativa, onde serão moldadas amostras de concreto asfáltico (CA) para realização de ensaios em laboratório para verificar propriedades de dosagem, adesividade e de resistência mecânica, para posterior análise dos resultados.

#### 3.2. Planejamento da Pesquisa

Este estudo trata-se na determinação de parâmetros de dosagem Marshall de misturas de concreto asfáltico (CA) tendo em vista a substituição de 1% e 2% de fíler basáltico por diferentes tipos de cal. A utilização da cal nesse estudo tem dupla função: como fíler e como agente melhorador de adesividade ligante/agregado.

Para utilização nesse estudo, serão utilizados dois tipos de cales, uma dolomítica produzida no estado do Rio Grande do Sul, e outra calcítica provinda esta do estado de Minas Gerais. Após a determinação dos parâmetros de dosagem Marshall, como teor de ligante de projeto, e então serão estudados cinco tipos de misturas diferentes de concreto asfáltico:

- ✓ REFERÊNCIA;
- ✓ 1% CAL CALCÍTICA;
- ✓ 1% CAL DOLOMÍTICA;
- ✓ 2% CAL CALCÍTICA;
- ✓ 2% CAL DOLOMÍTICA.

Então serão realizados ensaios para verificação do comportamento mecânico (ensaio de resistência à tração por compressão diametral e ensaio de módulo de resiliência), para a verificação das propriedades de adesividade (Metodologia Lottman Modificada) e Desgaste (Ensaio Cantabro).

Para os ensaios terão que ser moldados um total de 155 corpos-de-prova tendo suas respectivas quantidades e ensaios a que serão submetidos descritos no Quadro 2.

Quadro 2: Número de amostras

Misturas	Nº de amostras			
	Dosagem	Mr/Rt	Lottman	Cantabro
Referência	15	4	8	4
1% Calcítica	15	4	8	4
1%Dolomítica	15	4	8	4
2% Calcítica	15	4	8	4
2% Dolomítica	15	4	8	4
Parcial	75	20	40	20
Total	155			

### 3.3. Materiais Utilizados

#### 3.3.1. Agregados Minerais

Segundo Bernucci *et al* (2006) os revestimentos asfálticos constituem-se de associações de ligantes asfálticos, de agregados e, em alguns casos, de produtos complementares. Essas associações, quando executadas e aplicadas apropriadamente, devem originar estruturas duráveis em sua vida de serviço. Para que isso ocorra, deve-se conhecer e selecionar as propriedades que os agregados devem conter. São apresentados os conceitos básicos sobre agregados para que o engenheiro possa fazer uma escolha apropriada.

O agregado mineral utilizado nesta pesquisa é proveniente de uma rocha basáltica da formação Serra Geral, semelhante à encontrada em outros pontos do estado e considerada a mais representativa desta região do país, estes agregados basálticos são provenientes da pedreira Tabille com sede no município de Ijuí-RS, e a jazida localizada no município de Coronel Barros-RS.

A areia utilizada nesta pesquisa foi proveniente da região de Santa Maria-RS, esta escolha ocorreu pelo fato destes agregados serem representativos da realidade regional.

Os agregados coletados serão submetidos a ensaios laboratoriais no LEC (Laboratório de Engenharia Civil) da UNIJUÍ (Universidade Regional do Estado do Rio Grande do Sul). A granulometria deste esta descrita na Tabela 2 e graficados na Figura 4.

Tabela 2: Características dos agregados utilizados

PENEIRA	mm	BRITA 3/4	PEDRISCO	PO-DE-PEDRA	AREIA	CAL Dolomítica	CAL Calcítica
3/4"	19,1	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	0,0	68,2	100,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	0,0	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/4"	6,35	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
n 4	4,76	0,0	0,6	95,3	100,0	100,0	100,0
n 8	2,38	0,0	0,3	69,4	99,8	100,0	100,0
n 30	0,59	0,0	0,2	32,7	87,1	100,0	100,0
n 50	0,297	0,0	0,2	23,9	30,1	98,9	100,0
n 100	0,149	0,0	0,2	18,0	5,1	94,5	99,9
n 200	0,074	0,0	0,1	14,0	2,4	83,0	96,9

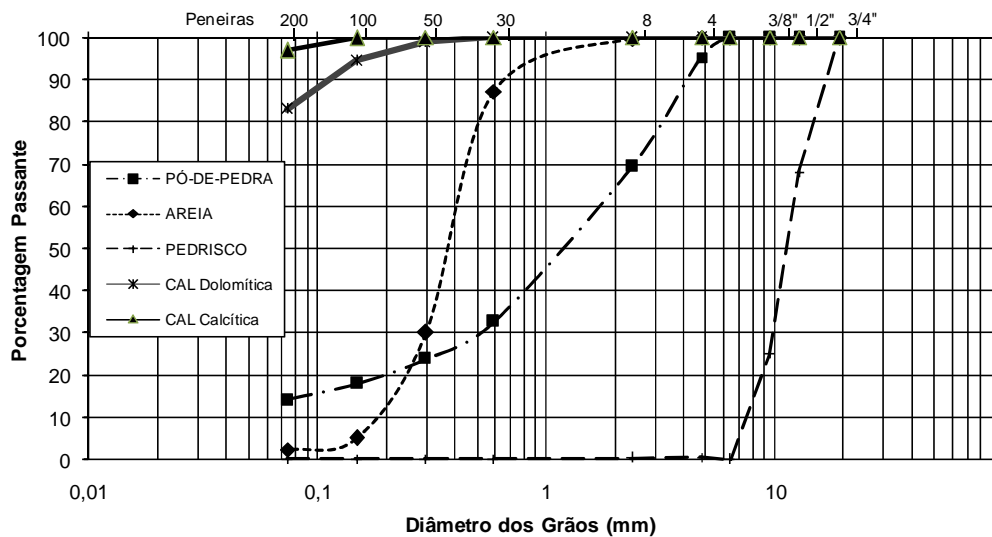


Figura 4: Distribuição Granulométrica

### 3.3.2. Fíleres

Para utilização na pesquisa foram utilizados os fíleres: pó-de-pedra e a cal hidratada. O pó de pedra é resultante da britagem da rocha basáltica usada neste estudo, as cales são dolomíticas que é produzida no estado do Rio Grande do Sul fornecida pela Torc e uma cal

calcítica produzida no estado de Minas Gerais fornecida pela Mineração Belocal Ltda. A escolha pela cal do Rio Grande do sul se deu pelo fato de ser uso corrente em obras de Engenharia no estado e a escolha da cal calcítica fundamentou-se no fato de que no Rio Grande do Sul são produzidas apenas cales dolomíticas, com baixos teores de hidróxido de cálcio. Sendo que a bibliografia internacional 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 cales foram adicionadas na mistura sobre o agregado graúdo seco, sendo esta a forma mais eficiente estudada por Bock (2009), nessa pesquisa foram estudadas diferentes formas de incorporação de cal em CA. No estudo se viu que a melhor forma de adição é a do agregado graúdo seco, que se da dessa forma: misturava-se a cal no agregado graúdo seco, e posteriormente colocava-se com o resto da mistura.

No Quadro 3 estão descritos as propriedades das cales e na Figura 4 e Tabela 2 está descrito a granulometria de ambas as cales.

Quadro 3: Propriedades das cales

	<b>Finura Média (%)</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Dolomítica</b>	15	2,427
<b>Calcítica</b>	7,61	2,386

### 3.3.3. Ligantes Asfálticos

O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi 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, os resultados dos ensaios estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4: Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70)

Característica	Unidade	Resultado
Penetração	0,1 mm.	56
Ponto de amolecimento	°C	48,8
Viscosidade Brookfield 135 °C	cp	333
Viscosidade Brookfield 150 °C	cp	167
Viscosidade Brookfield 177 °C	cp	63
Ductilidade a 25 °C	cm	> 147
Solubilidade no Tricloroetileno	% massa	100
Ponto de fulgor	°C	> 236

### 3.4 Procedimentos de ensaios e descrição dos equipamentos

A composição granulométrica da mistura será realizada de forma a enquadrar o material no centro da faixa “B” do DAER/RS ou na faixa “IV B” do Instituto do Asfalto (Figura 5), com tamanho máximo de granulares de 19mm. O concreto asfáltico foi projetado seguindo as recomendações do Asphalt Institute (1995) e de acordo com ASTM D6926-04 e ASTM D6927-05.

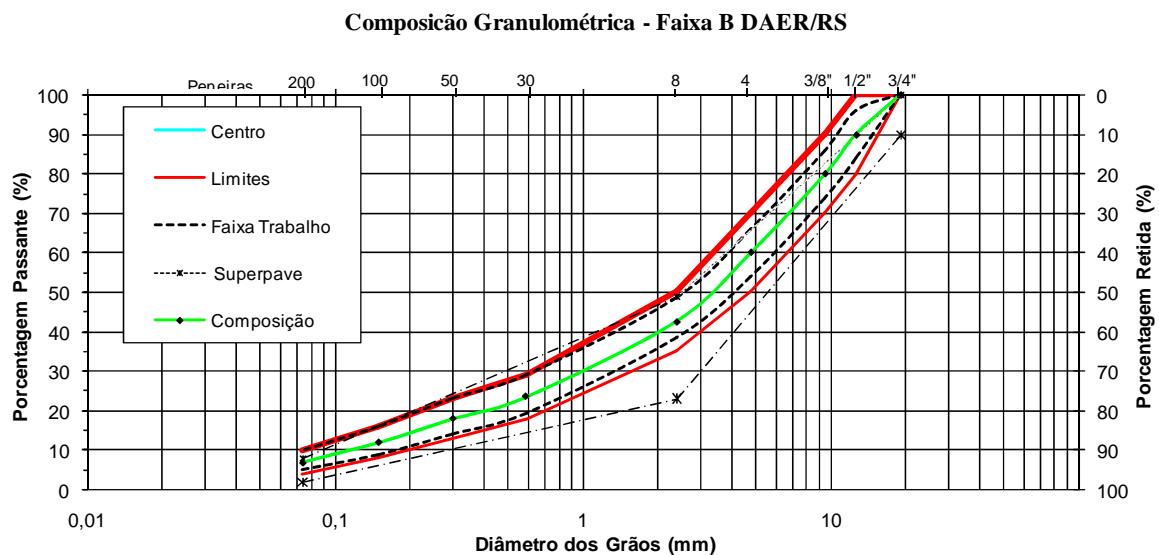


Figura 5: Composição granulométrica da mistura

### **3.4.1. Dosagem Marshall**

No Brasil, maior parte dos projetos de misturas asfálticas é realizado pela metodologia Marshall, onde segue a norma DNER-ME 043/95.

Primeiramente foi feita a coleta do agregado e então estes foram separados em peneiras (retida na: # 1/2, # 3/8, # 4, # 8, # 30, # 50, # 100 e # 200), em seguida estes foram lavados e pesados para posterior moldagem das amostras de acordo com a Metodologia Marshall.

Em síntese, a moldagem dos corpos-de-prova decorreu do seguinte modo: molda-se por compactação a quente, uma série de corpos-de-prova com a mistura de agregados e de ligante asfáltico, dentro de moldes cilíndricos metálicos que depois de armazenados, ao ar livre, durante 24 horas são desmoldados, medidos e pesados. O passo seguinte consiste em calcular os parâmetros de dosagem.

### **3.4.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral**

Este ensaio 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). Segundo Bernucci et. al (2006), a resistência à tração ( $R_t$ ) tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização de materiais como o concreto de cimento Portland e misturas asfálticas.

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral nas amostras com diâmetro 10,20 cm e altura variável, moldadas através do método Marshall, seguiu 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. Antes de aplicar a carga o corpo-de-prova deve apoiado sobre uma geratriz em compartimento com temperatura controlada de 25°C durante no mínimo 4 horas. A medida resultante é a resistência à tração ( $R_t$ ) Figura 6.

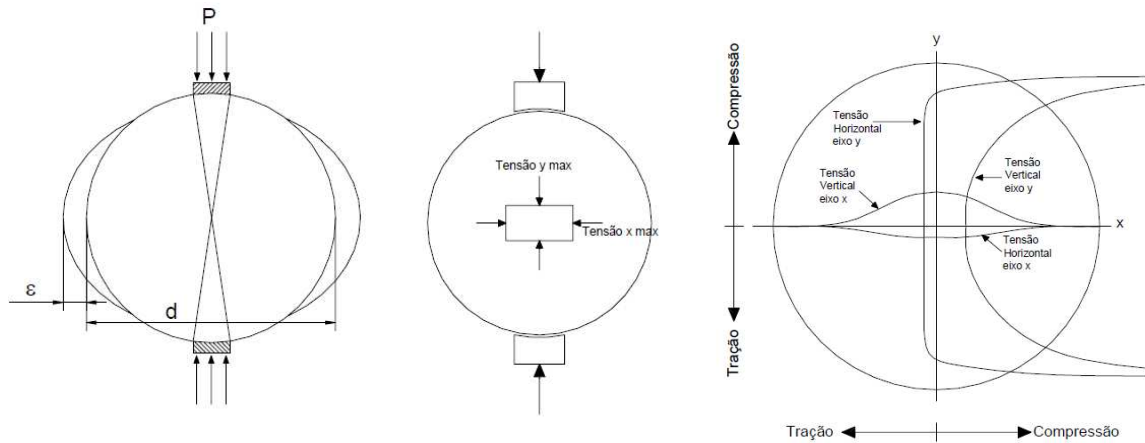
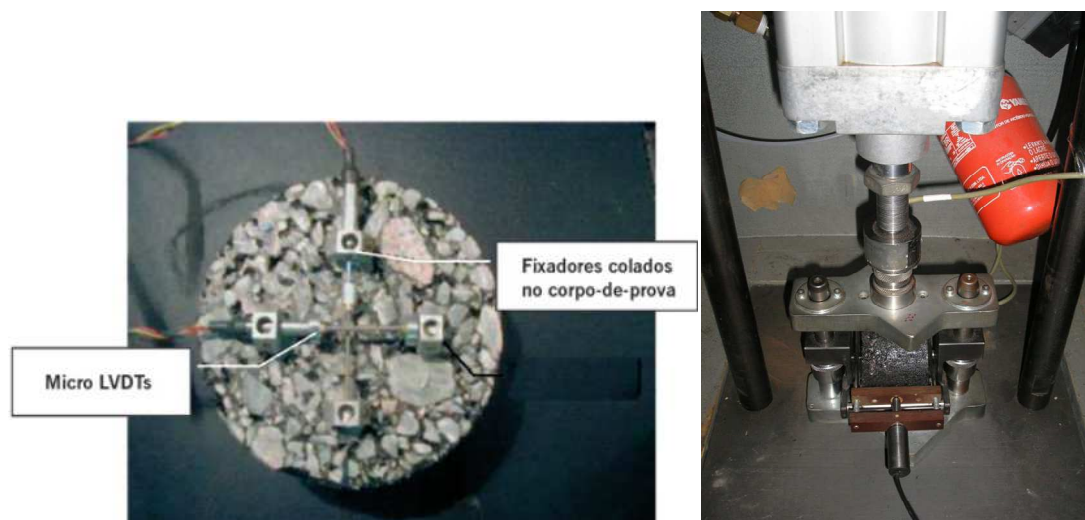


Figura 6: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro

Fonte: Specht (2004)

### 3.4.3. Ensaio de Módulo de Resiliência

Segundo Specht (2004) o ensaio de módulo de resiliência é determinado através das prescrições da norma do DNER-ME 133/94. O equipamento utilizado (Figura 7) 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.



(a) Arranjos dos LVDTs

(b) Equipamento de módulo de resiliência

Figura 7: Fixação dos LVDTs e equipamento de módulo de resiliência

Fonte: Bermucci *et al*, 2006

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;
- ✓ Fixar e ajustar os transdutores LVDTs;
- ✓ Colocar o corpo-de-prova sobre a base da estrutura de suporte, entre os dois cabeçotes curvos;
- ✓ Observar o perfeito assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova.

O módulo de resiliência ( $M_r$ ) é medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT (Linear Variable Differential Transducer), ligado a um microcomputador.

Na Figura 8 estão apresentados o pulso de carga e o pulso de deformação versus tempo, típicos dos ensaios realizados.

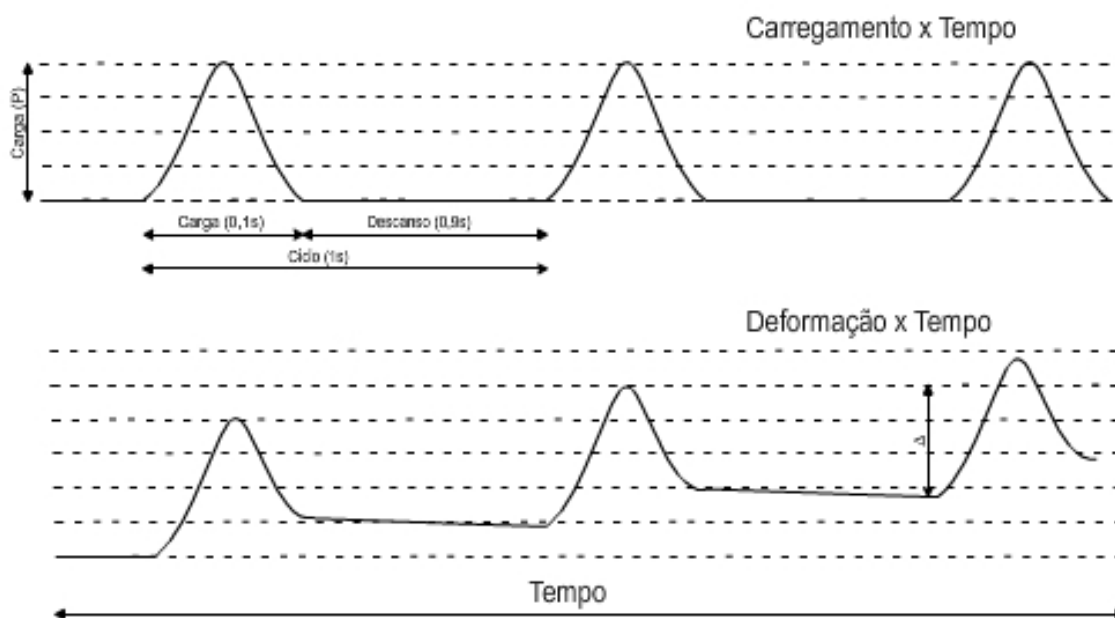


Figura 8: Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência

Fonte: Specht (2004)



### 3.4.4. Ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Segundo Specht (2004) ensaio Lottman Modificado é normatizado pelas normas AASHTO T 283-89 ou ASTM D4867 e trata em avalia as propriedades de adesividades em misturas asfálticas, considerando o efeito deletério da água, em amostras cilíndricas, preparadas através da Metodologia Marshall, com volume de vazios de aproximadamente 7% ( $\pm 1\%$ ). A análise é feita pela relação entre a resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento. Esta relação é denominada Resistência Retida à Tração (RRt).

O condicionamento das misturas ocorre levando primeiramente as amostras a 16 horas a temperatura de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , após esse tempo as amostras são colocadas submerso a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas e para finalizar o ensaio as amostras são estabilizadas a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a duas horas e então são rompidas. Já as amostras sem condicionamento prévio, ficam às duas horas a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  para estabilizar, porem sem o contato direto da água, sendo assim rompidas a seco.

O valor obtido desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas, em campo (4 à 12 anos), face a adesividade ligante/agregado e também para verificar o efeito da adição de aditivos químicos ou pulverulentos, na adesividade da mistura (SPECHT, 2004). Na Figura 9 esta representado o equipamento utilizado para determinar a Resistência a Tração.



Figura 9: Exemplo de equipamento para ensaio de Rt.

### 3.4.5. Perda de massa por desgaste

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 Carreteras na Espanha (CEC 325/86) e, posteriormente normalizado e no Brasil sob as normas DNER – ES 383/99 e DAER – EL215/01.

O ensaio consiste em submeter amostras (uma por vez) de concreto asfáltico à 300 revoluções (33rpm), dentro da máquina de abrasão Los Angeles (Figura 10), sem as esferas metálicas. A massa das amostras é determinada antes e depois do ensaio e é calculada a perda de massa por desgaste. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas.



Figura 10: Equipamento de abrasão Los Angeles

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 1:

$$PM = \frac{P - P'}{P} * 100 \quad (1)$$

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 dos ensaios realizados para avaliar comparativamente o desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas através da incorporação de cal. São apresentados ensaios para avaliar o comportamento mecânico e de adesividade de 5 misturas asfálticas: *Referência, 1% Dolomítica, 2% Dolomítica, 1% Calcítica e 2% Calcítica*.

### 4.1 Dosagem Marshall

A dosagem Marshall busca uma máxima massa específica aparente possível para garantir máxima estabilidade; Fluência entre certos limites, para garantir flexibilidades; Um volume de vazios entre certos limites para garantir que não ocorra oxidação da massa asfáltica pela ação da água e/ou ar, e que não ocorra exsudação e uma relação betume vazios entre certos limites, para garantir que exista betume suficiente para unir os agregados e que não exsude (Budny, 2009).

As figuras 11, 12, 13, 14, 15 demonstram as curvas dos parâmetros encontrados com a dosagem Marshall para cada mistura. E no Quadro 5 está o resumo com os parâmetros encontrados em cada mistura.

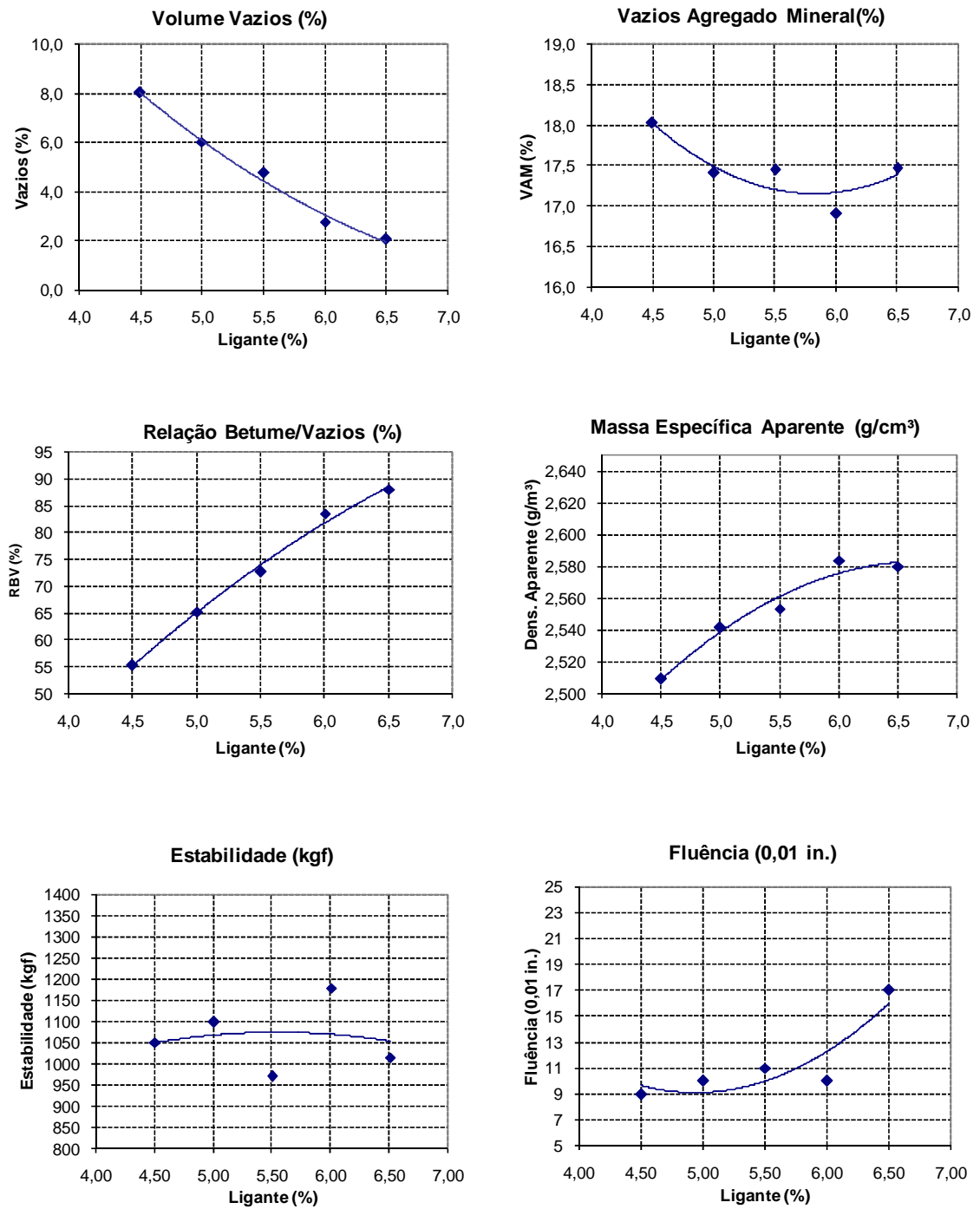


Figura 11: Parâmetros da mistura Referência

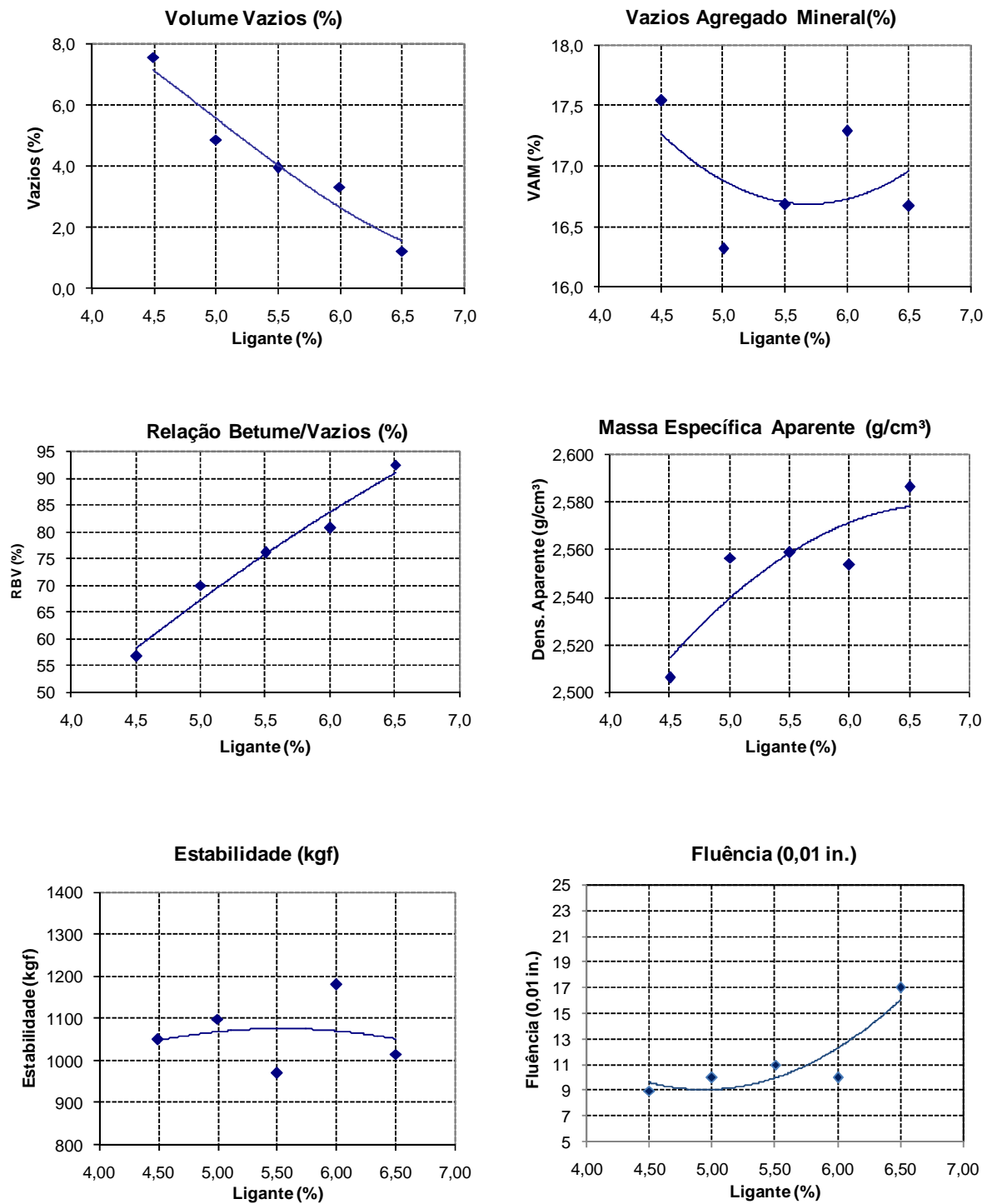


Figura 12: Parâmetros da mistura Dolomítica 1%

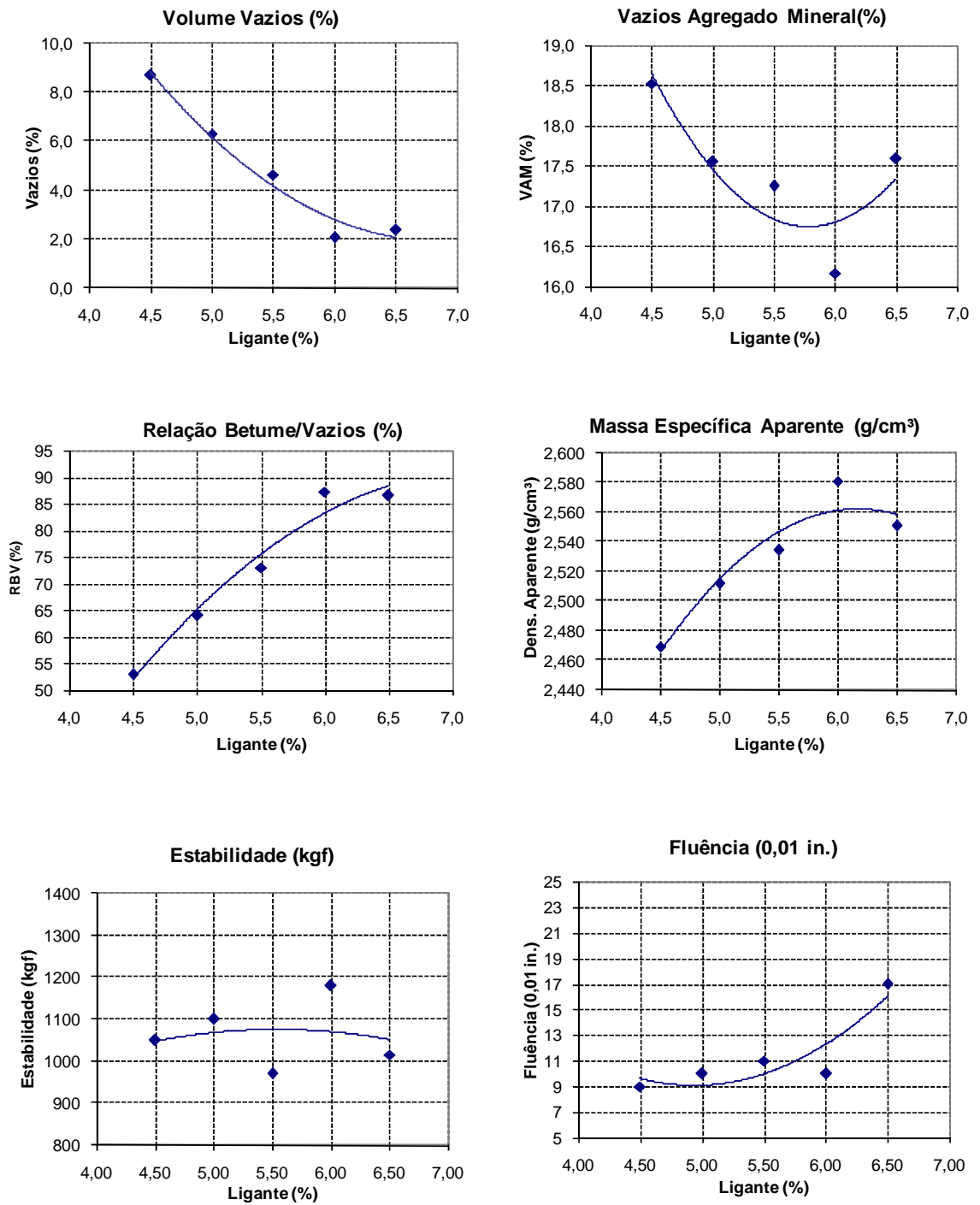


Figura 13: Parâmetros da mistura Dolomítica 2%

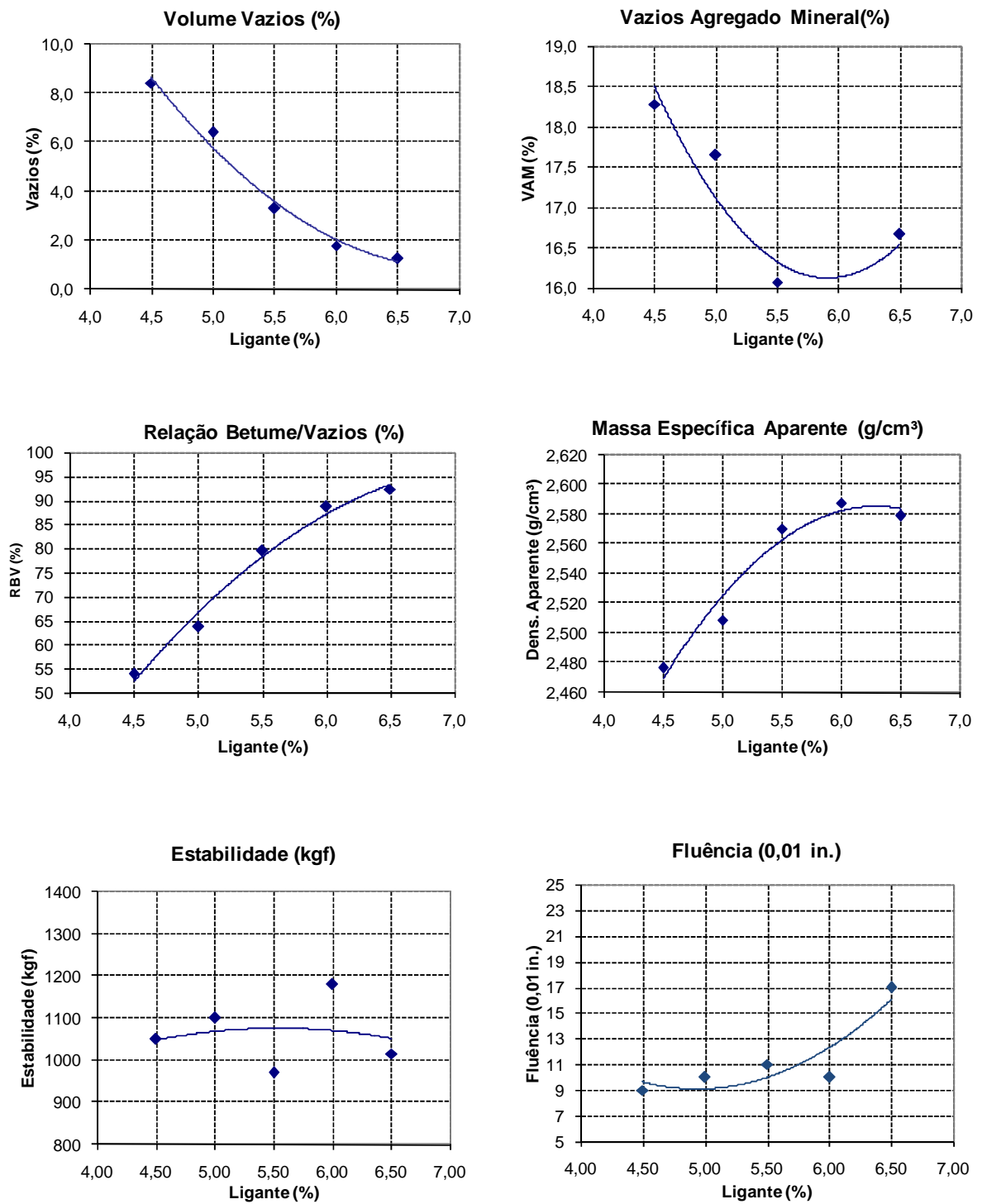


Figura 14: Parâmetros da mistura Calcítica 1%



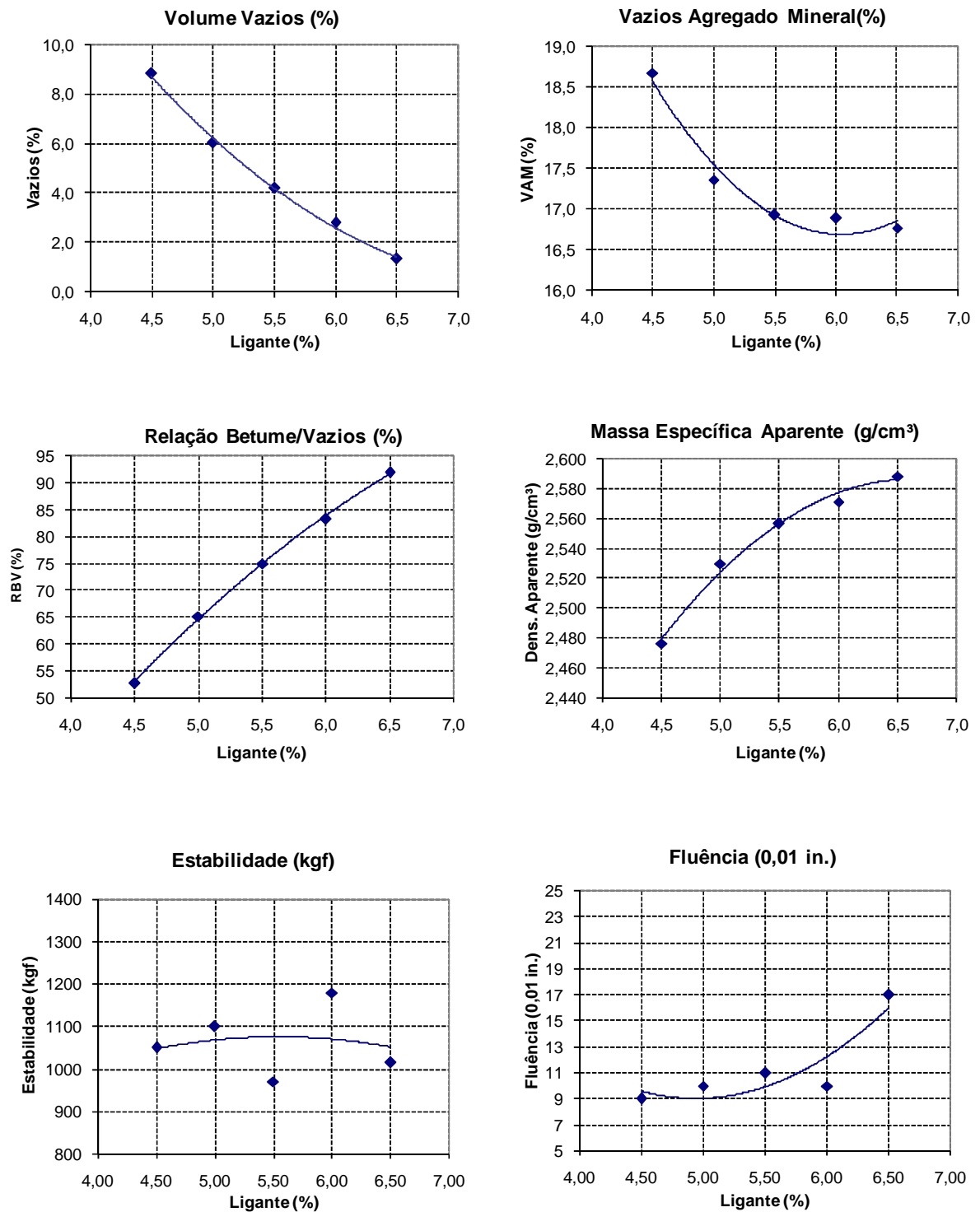


Figura 15: Parâmetros da mistura Calcítica 2%

Quadro 5: Resumo dos parâmetros de cada mistura

Propriedade	ESP 16/91 DAER	TIPO DE MISTURA				
		REFERÊNCIA	DOLOMITICA 1%	DOLOMITICA 2%	CALCITICA 1%	CALCITICA 2%
Teor de Betume (%)	--	5,65	5,50	5,55	5,40	5,55
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	77,00	76,00	75,15	75,15	76,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	17,15	16,75	16,82	16,42	16,85
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	--	2,63	2,64	2,63	2,63	2,63
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	97% (mínimo)	2,57	2,56	2,55	2,56	2,56
Estabilidade (kgf)	>800	1080	1080	1070	1060	1070
Fluência (1/100 in)	8 a 16	10	10	10	9,60	10

A Figura 16 demonstra graficamente os teores de ligantes encontrados em cada mistura com cal, com relação à mistura de referência, levando em consideração o parâmetro fixo de 4% no volume de vazios. Pode-se perceber uma redução significativa no consumo de ligante levando em consideração a mistura de referência. Porém pelo gráfico pode perceber que com o aumento da porcentagem de cal adicionada houve um aumento no consumo de ligante, mas mesmo assim ficando abaixo da referência. A mistura com o menor consumo de ligante foi a de 1% Calcítica.

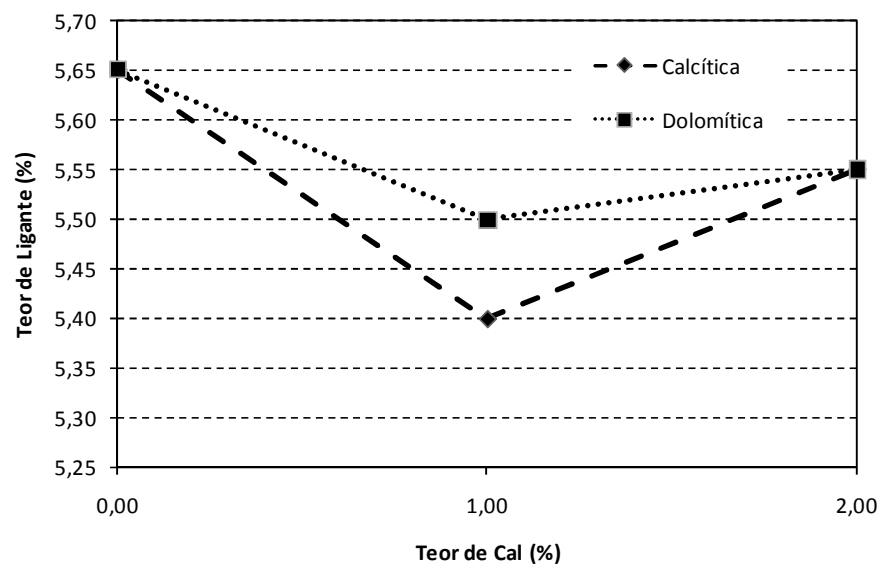


Figura 16: Relação de teores de ligante das misturas

## 4.2 Propriedades Mecânicas

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

O ensaio de resistência à tração é preconizado pela norma DNER-ME 138/94, onde foram moldados 4 corpos-de-prova para cada mistura, totalizando 20 corpos-de-prova. A Tabela 3 demonstra a média dos valores obtidos para cada mistura.

Tabela 3: Resumo dos resultados da Resistência à Tração

MISTURA	Média RT (MPa)	$\sigma$ (MPa)	$C_v$ (%)
Referencia	1,30	0,15	11,37
Calcítica 1%	1,44	0,03	2,18
Calcítica 2%	1,35	0,07	4,96
Dolomítica 1%	1,52	0,12	8,16
Dolomítica 2%	1,46	0,07	4,61

Com a Figura 17 nota-se que as misturas com a incorporação de cal obtiveram um aumento na resistência à tração. Nota-se também que a cal dolomítica obteve os maiores valores de resistência do que as misturas com a cal calcítica, ficando a mistura com 1% cal dolomítica com o maior valor na resistência.

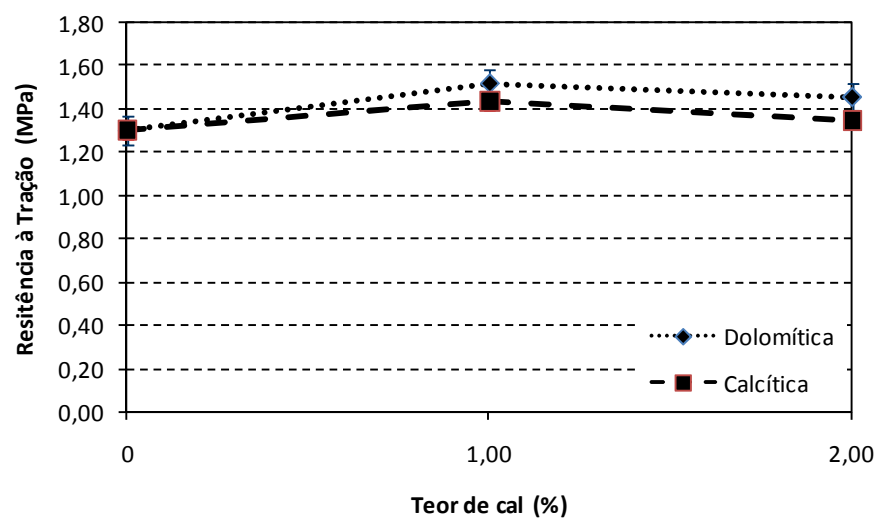


Figura 17: Resistência à Tração das misturas

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

O ensaio de módulo de resiliência é preconizado pela norma DNER-ME 133/94, onde foram moldados 4 corpos-de-prova para cada mistura, totalizando 20 corpos-de-prova. A Tabela 4 demonstra a média dos valores obtidos para cada mistura.

O ensaio foi realizado com a temperatura de 25°C.

Tabela 4: Resumo dos resultados de Módulo de Resiliência

MISTURA	Média MR (MPa)	$\sigma$ (MPa)	$C_v$ (%)
Referencia	3742	705,12	18,85
Calcítica 1%	3872	462,32	11,94
Calcítica 2%	3707	696,55	18,79
Dolomítica 1%	3828	992,49	25,93
Dolomítica 2%	3625	727,13	20,06

A Figura 18 demonstra graficamente os resultados obtidos com o módulo de resiliência, e com isso nota-se que as misturas com 1% de incorporação de cal ficaram acima da mistura referência (3742 MPa), sendo a dolomítica com 3828 MPa e a calcítica com 3872 MPa, sendo essa a que obteve o maior valor no módulo de resiliência. Percebe-se que as misturas com 2% de cal ficaram abaixo da mistura referência, ficando a dolomítica com 3625 MPa e a calcítica com 3707 MPa.

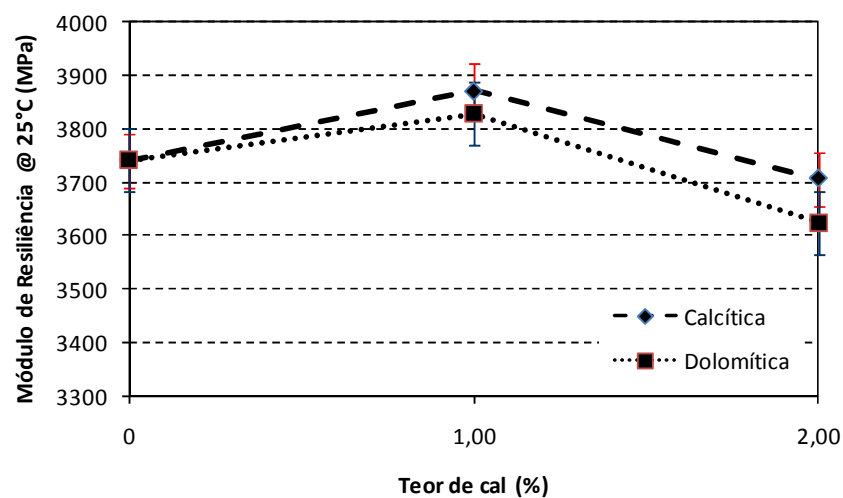


Figura 18: Resultado do Módulo de Resiliência

### 4.2.3. Relação Mr/Rt

A Figura 19 representa graficamente os resultados da relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração. Com isso observa-se que os melhores valores encontrados foram com a mistura com a cal dolomítica, ficando a com 2% de cal a melhor encontrada. Seguido das misturas com 1% e 2% de calcítica, as quais também ficaram abaixo da mistura referência.

Constata-se isso, pois a relação Mr/Rt permite-nos perceber que quanto menor o valor da relação, maior a flexibilidade uma mistura terá, unida a uma boa resistência à tração. A relação Mr/Rt nos dá uma idéia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura; misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência.

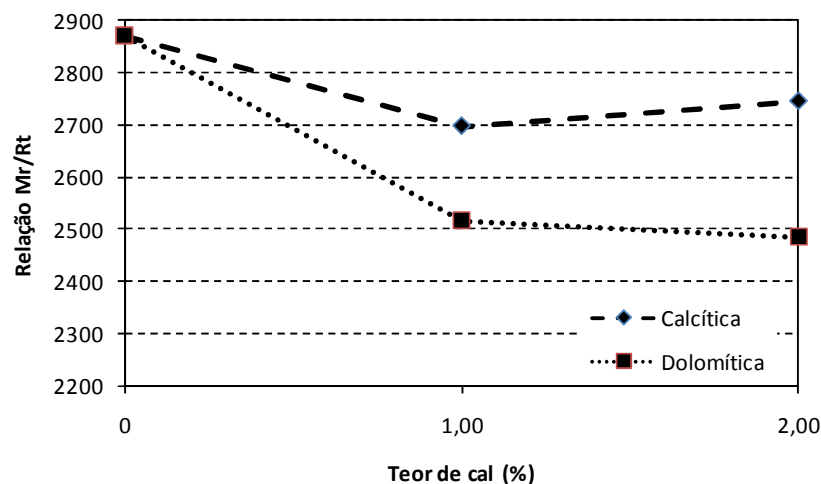


Figura 19: Relação Mr/Rt

## 4.3 Propriedade de Adesividade

### 4.3.1. Perda de Massa – Metodologia Cantabro

O Cantabro trata de avaliar a perda de massa por desgaste ou abrasão. A massa das amostras é determinada antes e depois do ensaio e é calculada a perda de massa por desgaste. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas. Pois o desgaste é a patologia muito comum nos

revestimentos asfálticos, processo pelo qual ocorre arrancamento progressivo de agregados do revestimento causado pelo atrito entre pneu e pavimento.

O ensaio de Cantabro foi realizado segundo a norma DNER – ES 386/99, a qual diz que o valor máximo de perda de massa para misturas pré-misturadas a quente, com asfalto polímero é aceitável 25%. Foram ensaiados quatro corpos-de-prova para cada mistura, todos a 25°C, essa temperatura é preconizada em norma para execução do ensaio. Na Tabela 5 estão descritos os valores encontrados no ensaio.

Tabela 5: Resumo dos resultados do Cantabro

Mistura	Perda de massa (%)						
	medição 1	medição 2	medição 3	medição 4	Média	$\sigma$ (%)	$C_v$ (%)
Referência	6,94	6,29	6,19	8,20	6,91	0,80	11,59
Calcítica 1%	4,11	4,27	4,50	5,59	4,62	0,58	12,47
Calcítica 2%	5,12	4,65	2,71	3,25	3,93	0,99	25,09
Dolomítica 1%	5,20	4,32	4,11	3,07	4,17	0,76	18,15
Dolomítica 2%	4,29	3,56	5,13	3,98	4,24	0,58	13,57

A Figura 20 demonstra graficamente estes valores obtidos. De uma maneira geral as misturas com maior teor de ligante obteriam a menor perda de massa, devido a mistura acabar sendo mais plástica. Porém percebe-se que com a incorporação da cal, todas as misturas ficaram abaixo da referência (qual não leva incorporação de cal), percebe-se assim que a incorporação da cal ajuda plenamente na perda de massa, aumentando assim a adesividade entre a mistura. A mistura que obteve o menor valor de perda foi a com a incorporação de 2% Calcítica. Podemos perceber também que a incorporação da cal Dolomítica houve uma pequena variação da perda de massa quando variado a porcentagem de cal.

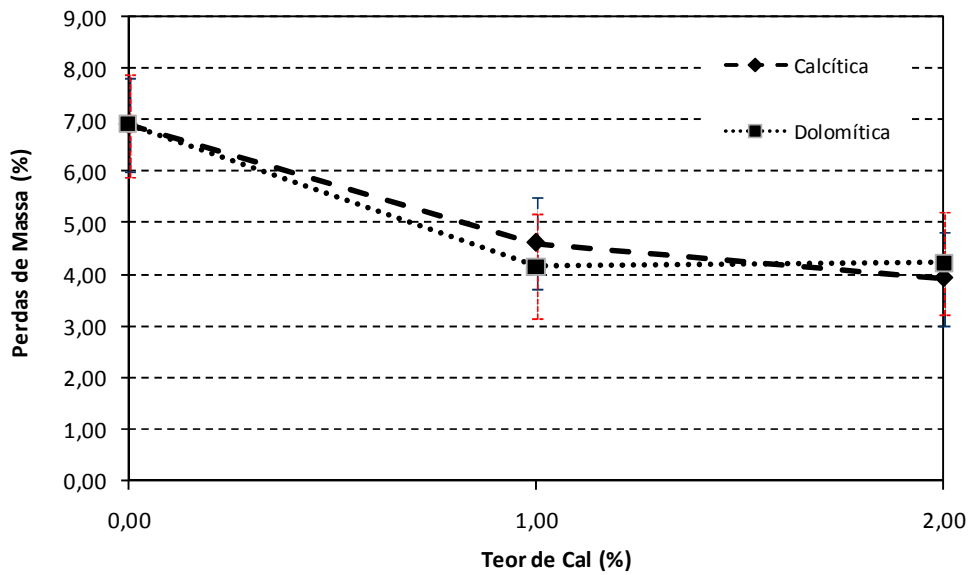


Figura 20: Perda de massa das misturas

#### 4.3.2. Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Para a realização do ensaio de Lottman Modificado, foram moldados 40 corpos-de-prova preparadas através da Metodologia Marshall, com volume de vazios de aproximadamente 7% ( $\pm 1\%$ ), ficando com o número de golpes por face entre 16 e 20. Esses CP's foram divididos em dois grupos sendo o primeiro sem condicionamento prévio (Rt1), e o segundo grupo com condicionamento prévio (Rt2).

O condicionamento das misturas ocorreu levando primeiramente as amostras a 16 horas a temperatura de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , após esse tempo as amostras são colocadas submerso a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas e para finalizar o ensaio as amostras são estabilizadas a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a duas horas e então são rompidas. Já as amostras sem condicionamento prévio, ficam as duas horas a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  para estabilizar, porém sem o contado direto da água, sendo assim rompidas a seco.

A Tabela 6 demonstra os resultados obtidos com o ensaio.

Tabela 6: Resumo dos resultados do Lottman

PROPRIEDADES		MISTURAS				
		Referência	Dolomítica 1%	Dolomítica 2%	Calcítica 1%	Calcítica 2%
Rt1 (sem cond.)	leitura 1	0,76	0,76	0,56	0,58	0,77
	leitura 2	0,76	0,69	0,75	0,60	0,80
	leitura 3	0,75	0,67	0,71	0,70	0,58
	leitura 4	0,74	0,65	0,72	0,77	0,79
	Média	0,75	0,69	0,69	0,66	0,74
	$\sigma$ (MPa)	0,01	0,04	0,07	0,08	0,09
	$Cv$ (%)	1,10	5,99	10,75	11,61	12,26
Rt2 (com cond.)	leitura 1	0,73	0,51	0,61	0,61	0,64
	leitura 2	0,77	0,45	0,60	0,56	0,72
	leitura 3	0,72	0,52	0,48	0,69	0,79
	leitura 4	0,68	0,52	0,52	0,80	0,71
	Média	0,73	0,50	0,55	0,67	0,72
	$\sigma$ (MPa)	0,03	0,03	0,05	0,09	0,05
	$Cv$ (%)	4,42	5,83	9,86	13,64	7,43

As Figuras 21 e 22 demonstram graficamente os resultados da Resistência à Tração das amostras sem e com condicionamento respectivamente. Percebe-se que a mistura de referência obteve melhores desempenho tanto sem condicionamento como com condicionamento com valores 0,75 MPa e 0,73 MPa respectivamente, seguido da mistura calcítica 2%. Ficando assim a mistura com 1% e 2% dolomítica com os piores valores obtidos em ambos os grupos.

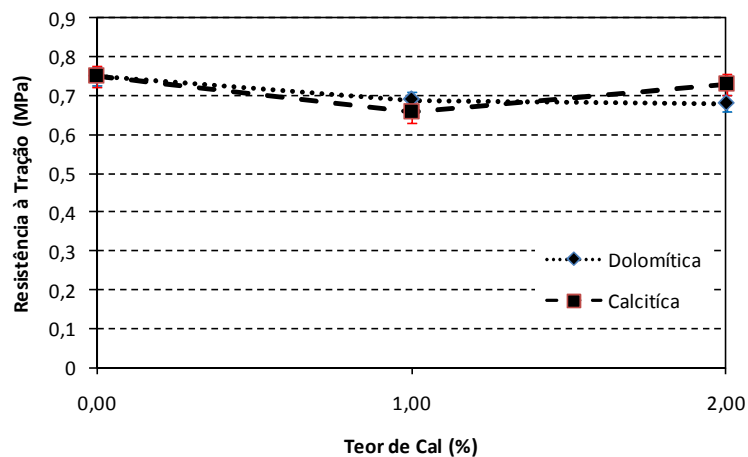


Figura 21: Resistência à Tração das misturas sem condicionamento



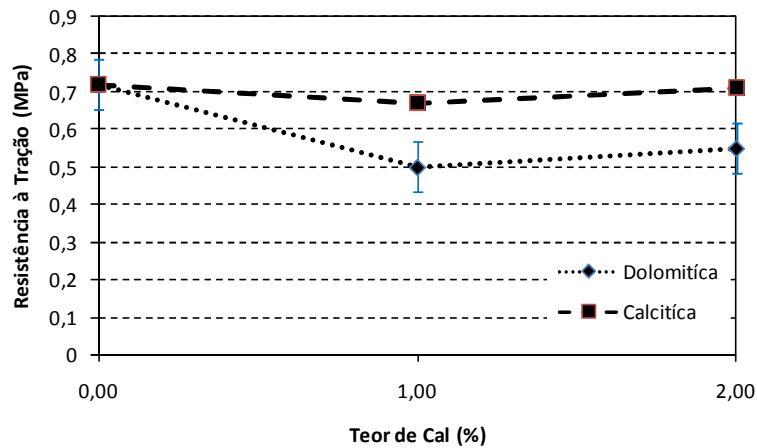


Figura 22: Resistência à Tração das misturas com condicionamento

Já na Figura 23 estão demonstrados graficamente os valores médios da Resistência Retida à Tração. Percebe-se que a mistura com a adição de 1% de calcítica obteve o melhor desempenho (100%), seguida da mistura com 2% calcítica (97%) e referência (96%), já as misturas dolomítica com 1% e 2% respectivamente (72%, 81%) apresentaram os menores desempenhos. A especificação Superpave aceita apenas valores acima de 80%, sendo nesse estudo a mistura com 1% dolomítica não estaria dentro da especificação.

Visualiza-se que o efeito do teor de cal entre uma cal e outra, muda completamente, pois a calcítica com 2% diminuiu a Resistência Retida à Tração, pelo qual a dolomítica com 2% aumenta. Porém percebe-se que para a mistura de referência não seria necessário cal, pois já tem um resultados satisfatório, mas a calcítica pode melhorar ainda mais na resitência, já com a dolomítica piorou os resultados de Resistência Retida à Tração.

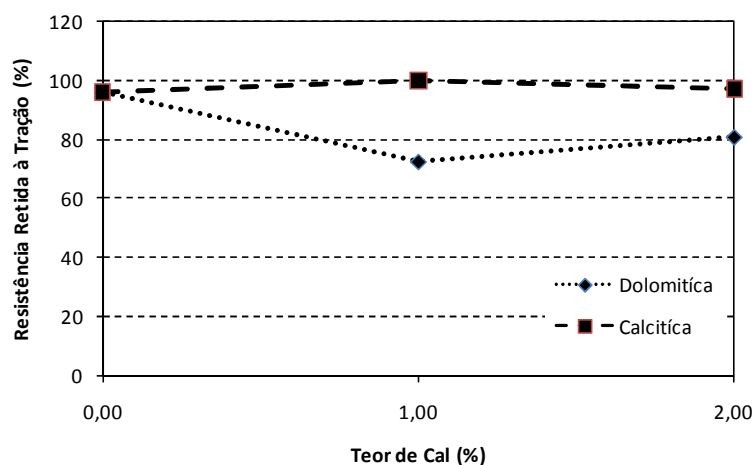


Figura 23: Resistência Retida à Tração das misturas

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, o qual teve como objetivo geral avaliar os efeitos da adição de diferentes teores de cal em misturas de CA, quanto a ensaios para avaliar características mecânicas e de adesividade.

São feitas também sugestões de trabalhos futuros, visando assim à continuação da pesquisa.

### 5.1 Conclusões

Com os resultados obtidos nos ensaios realizados e dos dados analisados foi possível chegar as seguintes conclusões.

#### 5.1.1. Dosagem Marshall

A cal exerce uma influência positiva nas misturas, visto que ambas as misturas com cal apresentaram uma considerável redução do teor de ligante, a redução foi de 1,77% para as misturas com 2% de cal, uma redução de 2,65% para a mistura com 1% de cal dolomítica e uma redução de 4,42% para a mistura com 1% de cal calcítica. Essa redução proporciona uma grande economia, levando em consideração que nas misturas de CA, pois o ligante asfáltico é o componente de maior custo.

#### 5.1.2. Propriedades Mecânicas

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

Para o ensaio de  $R_t$  observou-se os maiores valores ficaram entre as duas cales, a qual o maior valor ficou com a mistura de 1% de cal dolomítica com 1,52 MPa, seguida da outra mistura de 2% de cal dolomítica com 1,46 MPa. Já as misturas com 1% e 2% de calcítica ficaram respectivamente com 1,44 MPa e 1,35 MPa seguido então da mistura referência a qual ficou com 1,30 MPa.

Nota-se então que mesmo com a redução no teor de ligante as mesmas não perderam resistência a tração, o que demonstra que a cal é um fíler ativo, o qual age de uma forma muito positivamente entre o agregado e o ligante.

#### **5.1.2.1. Ensaio de Módulo de Resiliência – DNER–ME 133/94**

Com o ensaio de Mr observa-se que os maiores valores ficaram com as misturas com incorporação de 1% de cal, sendo a calcítica com 3872 MPa e para a dolomítica com 3625 MPa, com uma acréscimo de 3,47% e 2,30% respectivamente, levando em consideração a mistura referência (sem cal). Já as misturas com 2% de cal apresentaram um decréscimo em relação à referência de 0,94% para mistura calcítica e de 3,12% para a mistura dolomítica.

#### **5.1.2.1. Relação Mr/Rt**

Percebe-se que a adição das cales nas misturas reduz a relação entre o módulo de resiliências e a resistência a tração, ficando assim os menores valores com a mistura dolomítica.

Os resultados deste ensaio não significam perda ou ganho no desempenho da mistura, uma relação Mr/Rt alta ou baixa é selecionada de acordo um caso específico de aplicação. Como por exemplo, um determinado tipo de tráfego, ou de clima ou ainda do tipo da estrutura.

#### **5.1.3. Propriedades de adesividade**

##### **5.1.3.1. Perda de Massa – Metodologia Cantabro**

Misturas com elevado teor de ligante, geralmente tem uma tendência de obter os menores valores de perda de massa, devido ao poder cimentício que o ligante exerce nas misturas. Mas percebe-se pelos resultados que aumentando o teor de cal (o qual diminui o teor de ligante das mesmas) o valor da perda de massa diminui, no qual pode-se dizer que a cal exerce uma influência positiva nas misturas, ou seja, a cal consegue exercer o poder cimentício que o ligante exerceria.

### **5.1.3.2. Adesividade – Metodologia Lottman Modificada**

Constata-se que a mistura com a adição de 1% de calcítica obteve o melhor desempenho (100%), seguida da mistura com 2% calcítica (97%) e referência (96%), já as misturas dolomítica com 1% e 2% respectivamente (72%, 81%) apresentaram os menores desempenhos. Observa-se que as misturas com cales de baixo teor de hidróxido de cálcio são as mais afetadas.

### **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

- Tempo para a cal reagir: Deixar a cal em contato com o agregado graúdo, por uma quantidade de tempo estabelecida;
  
- Estudar a influência da cal em diversos tipos de agregados, ou ainda diversos tipos de basaltos de diferentes origens e pedreiras, com diversos tipos de forma adição;
  
- Realizar um estudo de comparação entre misturas com adição de cal e adição de Dopes (melhoradores de adesividade);
  
- Cales: Misturar as duas cales, exemplo 0,5 % de calcitica + 0,5 % de dolomitica, e testar as propriedades;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, 2005.

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.

BERNUCCI, Liedi Bariani et all. Pavimentação Asfáltica: **Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 2008, 504p.

BOCK, A. L. **DESEMPENHO À FADIGA DE MISTURAS EM CONCRETO ASFÁLTICO COM DIFERENTES FORMAS DE INCORPORAÇÃO DE CAL,** Trabalho de conclusão de curso, UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

BOCK, A. L., HARTMANN, D. A., BUDNY, J., CERATTI, J. A. P., SPECHT, L. P. **Estudo Laboratorial Sobre os Efeitos de Diferentes Formas de Adição de Cal a Concreto Asfáltico.** Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online). , v.09, p.60 - 69, 2009.

BUDNY, J. **Avaliação dos efeitos de diferentes tipos de cal em misturas de concreto asfáltico,** Trabalho de conclusão de curso, UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

CAVALCANTE, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas.** Rio de Janeiro, 2010. Dissertação (Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia – COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 196p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT). **Uma pesquisa a favor do Brasil.** Disponível em <http://www.cnt.org.br/informacoes/revista.asp> (acessado em 03/05/2010).

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS E RODAGEM (2001) Determinação da Perda por Desgaste de Misturas Betuminosas de Graduação aberta (Ensaio Cantabro): DAER/RS – EL 215/01. Porto Alegre, 4p.

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. **Adesividade de Agregado a Ligante Betuminoso.** DNER – ME 79/94. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Adesividade de Agregado Graúdo a Ligante Betuminoso**. DNER – ME 78/94. Rio de Janeiro, 1994, 3p.

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 – Determinação do Módulo de Resiliência**. DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro, 1994, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Misturas Betuminosas à Quente – Ensaio Marshall**. DNER – ME 043/95. Rio de Janeiro, 1995, 11p. Editora UFRJ, 574p. 2005.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3º ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Editora PINI, 1997. 285 p.

HIRSH, Fábio. **Estudo do Comportamento de Misturas Asfálticas Preparadas com Diferentes Tipos de Ligantes**. 130f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

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

LITTLE, Dallas; EPPS, Jon. **The Benefits of Hidrated Lime in Hot Mix**. 2001, 54f. prepared for Lime Association, 2001.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 380p. 1997.

MOURA, Edson de. **Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Agentes Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas**. 2001. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2001.

MORILHA, A. Jr. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. Florianópolis, 2004. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 165 p.

MOTTA, Laura Maria Goretti et al. **Princípios de Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas**. Tradução Comentada, IBP – Instituto brasileiro do Petróleo, 41p. 2000.

MOTTA, L.M.G. **Contribuição para a estimativa do módulo resiliente de misturas asfálticas**. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 14., 1998, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 1998.

MOTTA, L.M.G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** 1991. 366 f. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

NÚÑEZ, Washington Peres et al. **Produzindo Misturas Asfálticas de Elevado Desempenho com Emprego de Cal Hidratada.** In: 38a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - 12o ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA - 38a RAPv / 12o ENACOR, 2007, Manaus-AM. Anais... p. xx-yy. 2007

OLIVEIRA FILHO, Clonilo; SOARES, Jorge Barbosa. **Melhoradores de Adesividade e Intertravamento.** In: XX ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2006, Brasília-DF. Anais... p. xx-yy. 2006 Paulo, 2001.

ROZEK, Thiago de Matos. **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, 2007, 93p.

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.

SENÇO, Wlastermir de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** Volume 2, Ed. Pini, São Paulo.

SPECHT, Luciano Pivotto. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

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.

