

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Suzana Fraga de Castro**

**MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE CAL:  
ANÁLISE VOLUMÉTRICA E MECÂNICA**

Porto Alegre  
dezembro 2011

**SUZANA FRAGA DE CASTRO**

**MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE CAL:  
ANÁLISE VOLUMÉTRICA E MECÂNICA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Washington Peres Núñez  
Coorientadora: Luciana Rohde**

Porto Alegre  
dezembro 2011

**SUZANA FRAGA DE CASTRO**

**MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE CAL:  
ANÁLISE VOLUMÉTRICA E MECÂNICA**

Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2 de dezembro de 2011

Washington Peres Núñez  
Dr. pela UFRGS  
Orientador

Luciana Rohde  
Dra. pela UFRGS  
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)**  
DSc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Eng. Lélío Antônio Teixeira Brito**  
PhD. pela University of Nottingham

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Enga. Luciana Rohde**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha mãe, Ana, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. Seja por orientação técnica, por apoio, por incentivo ou mesmo por amizade, várias pessoas desempenharam papel importante para o desenvolvimento deste estudo.

Agradeço aos professores que orientaram essa pesquisa, são eles: Prof. Washington Peres Núñez, Profa. Carin Maria Schmitt e Profa. Luciana Rohde. Com certeza, sem os esforços destes excelentes profissionais, esse trabalho não seria realizado. Agradeço ainda ao Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti por permitir que eu trabalhasse como bolsista de iniciação científica e ao Eng. Lélío Brito pelo auxílio na execução de alguns ensaios.

Agradeço aos colegas e amigos do LAPAV, em especial aos laboratoristas Vini e Dani, aos bolsistas Lysi, Astrid, Douglas, Marco e Rebeca e principalmente ao mestrando André Bock. Sem a ajuda e a amizade deles, este estudo teria sido impossível.

Agradeço aos professores da UFRGS, especialmente aos professores da Geotecnia, por contribuírem com minha formação profissional.

Agradeço às empresas CONCEPA e Greca Asfaltos pelos materiais fornecidos na pesquisa.

Finalmente, agradeço a minha mãe Ana e meu irmão Daniel pelo incentivo, confiança e carinho. Ao meu namorado Maurício, pelo amor e compreensão ao longo do trabalho.

A espécie de felicidade de que preciso não é fazer o que quero, mas não fazer o que não quero.

*Jean-Jacques Rousseau*

## RESUMO

O emprego de novos materiais tem sido estudado a fim de promover uma melhora na qualidade das misturas asfálticas, de modo que as rodovias possuam melhores níveis de conforto e segurança. Além disso, devido à importância dos pavimentos, sempre há o interesse de que sua vida útil seja prolongada, o que resulta em redução de custos com manutenção e reabilitação. E, para este fim, acrescentam-se melhoradores de misturas asfálticas. Pesquisadores apontam que a incorporação de cal, como melhorador em misturas betuminosas a quente, além de aumentar a resistência a deformações permanentes, reduzir o trincamento nos revestimentos e promover uma melhor adesividade entre os agregados e o ligante, possibilita o emprego de um menor teor de CAP necessário, significando uma redução de custos na execução do pavimento. Com base nestes estudos, essa pesquisa analisa comparativamente, em laboratório, as características volumétricas e as propriedades mecânicas entre três misturas diferentes: uma com incorporação de cal calcítica, outra com incorporação de cal dolomítica e uma última, chamada de mistura de referência, sem incorporação de cal. Nas misturas com esse melhorador, fez-se a simples substituição de 1% da fração de pó de pedra do agregado por 1% de sua respectiva cal. Assim, através de ensaios para determinação das densidades máxima medida e aparente, pode-se constatar a redução que ocorre no volume de vazios das misturas com cal em relação à mistura de referência. Além disso, verifica-se também, com os ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração, uma redução da ordem de 20% na resistência do material, causada pelo teor inadequado de ligante em função da presença de cal. O efeito da adesividade associado à água verificado no ensaio de dano por umidade induzida apresenta valores abaixo dos limites recomendados nas misturas em cada uma das cales adicionadas. A perda de massa por desgaste mostra valores que variam muito conforme a temperatura a qual os CP são condicionados. Os projetos devem ser dosados de acordo com os materiais que os constituem, não sendo possível a simples substituição de uma fração de pó de pedra por qualquer tipo de cal, possivelmente em virtude da diferença de granulometria e de massas específicas.

Palavras-chave: Pavimentação. Misturas Asfálticas. Incorporação de Cal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática das etapas do delineamento.....	18
Figura 2 – Curvas típicas do ensaio Marshall .....	33
Figura 3 – Exigências químicas .....	41
Figura 4 – Exigências físicas .....	41
Figura 5 – Composição granulométrica .....	44
Figura 6 – Ensaio de MR .....	50
Figura 7 – Ensaio de RT .....	52
Figura 8 – Parâmetros de dosagem Marshall .....	55
Figura 9 – Variação do volume de vazios .....	57
Figura 10 – Resultados do Módulo de Resiliência .....	58
Figura 11 – Resultados de Resistência à Tração .....	59

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades e características dos agregados utilizados .....	43
Quadro 2 – Análise granulométrica .....	44
Quadro 3 – Propriedades e características do ligante utilizado .....	45
Quadro 4 – Análise química das cales utilizadas .....	45
Quadro 5 – Características das misturas de referência .....	54
Quadro 6 – Propriedades finais da mistura de referência .....	56
Quadro 7 – Densidades das três misturas .....	57
Quadro 8 – RRt das três misturas .....	59
Quadro 9 – Volume de vazios das três misturas .....	60
Quadro 10 – Perda de massa por desgaste das três misturas .....	60

## LISTA DE SIGLAS

CA – concreto asfáltico

CAP – cimento asfáltico de petróleo

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CP – corpo-de-prova

CPA – camada porosa de atrito

DMM – densidade máxima medida

DMT – densidade máxima teórica

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

LAPAV – Laboratório de Pavimentação

LVDT – *Linear Variable Differential Transformers*

MR – módulo de resiliência

RT – resistência à tração

SMA – *stone matrix asphalt*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A – massa da amostra seca em ar (g)
- B – massa do recipiente com volume completo com água (g)
- C – massa do recipiente + amostra submersa em água (g)
- d – densidade aparente do CP
- D – diâmetro do corpo-de-prova (cm)
- Desgaste – desgaste da mistura betuminosa (%)
- $E_c$  – módulo de *creep* dinâmico (MPa)
- F – força aplicada por unidade de espessura do cilindro (N)
- $G_a$  – massa específica do ligante ( $t/m^3$ )
- $G_{mb}$  – massa específica da mistura ( $t/m^3$ )
- $G_{mm}$  – densidade máxima medida
- $G_{mt}$  – massa específica máxima teórica ( $t/m^3$ )
- $G_{sa}$  – massa específica real do agregado ( $g/cm^3$ )
- $G_{sb}$  – massa específica aparente do agregado ( $g/cm^3$ )
- $G_{se}$  – massa específica efetiva do agregado ( $g/cm^3$ )
- H – altura do corpo-de-prova (mm)
- MR – módulo de resiliência (MPa)
- MS – massa seca do agregado (g)
- $M_S$  – massa seca do CP (g)
- $M_{SUB}$  – massa submersa em água do CP (g)

$P$  – carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova (N)

$P_{ar}$  – peso do corpo-de-prova compactado determinado ao ar (N)

$P_{final}$  – peso do corpo-de-prova após o ensaio de Cantabro (g)

$P_1$  – peso do corpo-de-prova compactado imerso em água (N)

$P_{inicial}$  – peso do corpo-de-prova antes do ensaio de Cantabro (g)

RBV – relação betume/vazios (%)

$V$  – volume do CP (cm<sup>3</sup>)

VAM – vazios de agregado mineral (%)

VCB – vazios com betume (%)

Vol. aparente – volume do sólido + volume dos poros permeáveis à água (cm<sup>3</sup>)

Vol. efetivo – volume do sólido + volume dos poros permeáveis à água não preenchidos pelo ligante asfáltico (cm<sup>3</sup>)

Vol. real – volume da partícula sólida do agregado (cm<sup>3</sup>)

$V_v$  – volume de vazios (%)

$\delta_h$  – deslocamento horizontal medido (cm)

$\epsilon_{esp}$  – deformação permanente específica (mm/mm)

$\mu$  – coeficiente de Poisson

$\sigma$  – tensão de tração uniforme (MPa)

$\sigma_{axial}$  – tensão axial aplicada (MPa)

$\%_a$  – teor de ligante (%)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	16
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	16
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	16
<b>2.2.2 Objetivos secundários</b> .....	16
2.3 HIPÓTESE .....	17
2.4 PRESSUPOSTO .....	17
2.5 DELIMITAÇÕES .....	17
2.6 LIMITAÇÕES .....	17
2.7 DELINEAMENTO .....	18
<b>3 MISTURAS ASFÁLTICAS</b> .....	20
3.1 AGREGADOS .....	21
3.2 LIGANTE ASFÁLTICO .....	25
3.3 FILER .....	28
<b>3.3.1 Cimento Portland</b> .....	28
<b>3.3.2 Cal</b> .....	29
<b>3.3.3 Cinza volante</b> .....	29
3.4 PROJETO .....	29
<b>3.4.1 Dosagem</b> .....	29
<b>3.4.2 Propriedades mecânicas</b> .....	34
3.4.2.1 Ensaio de Módulo de Resiliência (MR) .....	34
3.4.2.2 Ensaio de Resistência à Tração (RT) .....	35
3.4.2.3 Ensaio de Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado) .....	36
3.4.2.4 Ensaio de Perda de Massa por Desgaste (Cantabro) .....	38
<b>4 CAL HIDRATADA</b> .....	40
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	43
5.1 MATERIAIS .....	43
<b>5.1.1 Agregados</b> .....	43
<b>5.1.2 Ligante asfáltico</b> .....	44
<b>5.1.3 Cales</b> .....	45
5.2 MÉTODOS .....	46
<b>5.2.1 Projeto e Metodologia Marshall</b> .....	46

<b>5.2.2 Módulo de Resiliência</b> .....	49
<b>5.2.3 Resistência à Tração</b> .....	51
<b>5.2.4 Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado)</b> .....	52
<b>5.2.5 Perda de Massa por desgaste (Cantabro)</b> .....	53
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	54
6.1 PARÂMETROS DE DOSAGEM E CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS .....	54
6.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ESTUDADAS .....	58
<b>6.2.1 Módulo de Resiliência</b> .....	58
<b>6.2.2 Resistência à Tração</b> .....	58
<b>6.2.3 Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado)</b> .....	59
<b>6.2.4 Perda de Massa por Desgaste (Cantabro)</b> .....	60
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	61
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	62



## 1 INTRODUÇÃO

Pavimento é um conjunto de camadas executadas sobre a superfície final de terraplenagem, com a finalidade de suportar as ações do tráfego e do meio ambiente. Estas camadas são a sub-base, a base e o revestimento asfáltico. Este último é formado pela mistura de agregados, com graduação adequada, e de um teor ideal de materiais asfálticos, sendo destinado a receber a carga dos veículos e, mais diretamente, a ação climática.

Conforme estudo realizado pela CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2011) sobre as condições das rodovias brasileiras, mais da metade foi classificada como regular, ruim ou péssima. A pesquisa avaliou a situação das rodovias a partir da perspectiva dos usuários, tanto sob o aspecto da segurança como do desempenho.

A infraestrutura viária com revestimentos asfálticos satisfatórios proporciona melhores níveis de conforto e segurança, além de reduzir custos operacionais dos veículos, propiciar o desenvolvimento socioeconômico do País e promover o escoamento da produção agrícola e industrial. O crescente aumento do tráfego comercial rodoviário lança o desafio de aumentar-se a vida útil dos pavimentos, reduzindo os custos com manutenção e reabilitação dos mesmos (BUDNY et al., 2010, p. 2).

Uma opção para promover o aumento da vida útil dos pavimentos é a adição de modificadores de asfalto, que elevam a resistência à fadiga e minimizam as deformações permanentes. Entre estes modificadores, a cal hidratada incorporada à mistura asfáltica vem sendo amplamente utilizada. Esta incorporação enrijece a mistura, tornando-a mais resistente a deformações permanentes, retarda o trincamento ocasionado pela fadiga e ainda melhora a adesividade entre o agregado e a mistura. Outra característica observada é que a cal reduz o teor de ligante betuminoso, o que diminui os custos da execução de pavimentos (NÚÑEZ et al., 2007).

Através de ensaios de laboratório, foi possível realizar, nesse trabalho, a comparação entre mistura asfáltica de referência (sem adição de modificadores) com misturas com adição de cal. Ensaios como os de densidade aparente e de máxima medida (Rice), de módulo de resiliência, de resistência à tração, de dano por umidade induzida e de desgaste por abrasão propiciaram um comparativo eficiente entre as misturas.

A estrutura proposta para este trabalho é constituída por sete capítulos. A seguir, é apresentado o capítulo 2, em que são abordadas as diretrizes da pesquisa. O capítulo 3 aborda as misturas asfálticas e as características dos materiais que as compõem. O capítulo 4 trata do material incorporado às misturas asfálticas, ou seja, a cal hidratada. O capítulo 5 apresenta os materiais e os métodos desenvolvidos na pesquisa. O sexto capítulo refere-se a apresentação e análise dos resultados do trabalho e o sétimo mostra as conclusões deste estudo.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

Este capítulo apresenta as diretrizes que foram determinantes para a elaboração do presente trabalho.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: incorporando-se cal a misturas asfálticas a quente, qual a influência dos tipos de cales estudadas nas características volumétricas e nas propriedades mecânicas dessas misturas frente as que não utilizam modificadores?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é a comparação das características volumétricas e propriedades mecânicas das misturas asfálticas com incorporação das cales calcítica e dolomítica com a mistura de referência (sem incorporação de cal).

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários deste trabalho são as análises, para os três tipos de misturas asfálticas, dos resultados:

- a) do comportamento mecânico através da comparação dos ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração;
- b) dos ensaios de dano por umidade induzida (Lottman modificado);
- c) dos ensaios de desgaste por abrasão (Cantabro).

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a incorporação de cales influencia nas características volumétricas, reduzindo o volume de vazios, os vazios do agregado mineral e a relação betume/vazios. Dentre os tipos avaliados, a cal calcítica tem maior influência nas propriedades mecânicas, reduzindo deformação permanente e aumentando a rigidez da mistura.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os ensaios para os quais há norma técnica (NBR 15573/2008, NBR 15617/2008, NBR 15619/2008, NBR 15087/2004, DNER-ME 117/94, DNER-ME 133/94) são realizados segundo essas diretrizes, sendo esses requisitos suficientes para a execução da pesquisa. Os ensaios para os quais não existam especificações técnicas são executados conforme as metodologias utilizadas nos centros de pesquisa de referência do País (LAPAV/UFRGS e Coppe/UFRJ) e estas são consideradas adequadas para esse estudo.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao uso de cales calcítica e dolomítica e de ligante asfáltico convencional.

## 2.6 LIMITAÇÕES

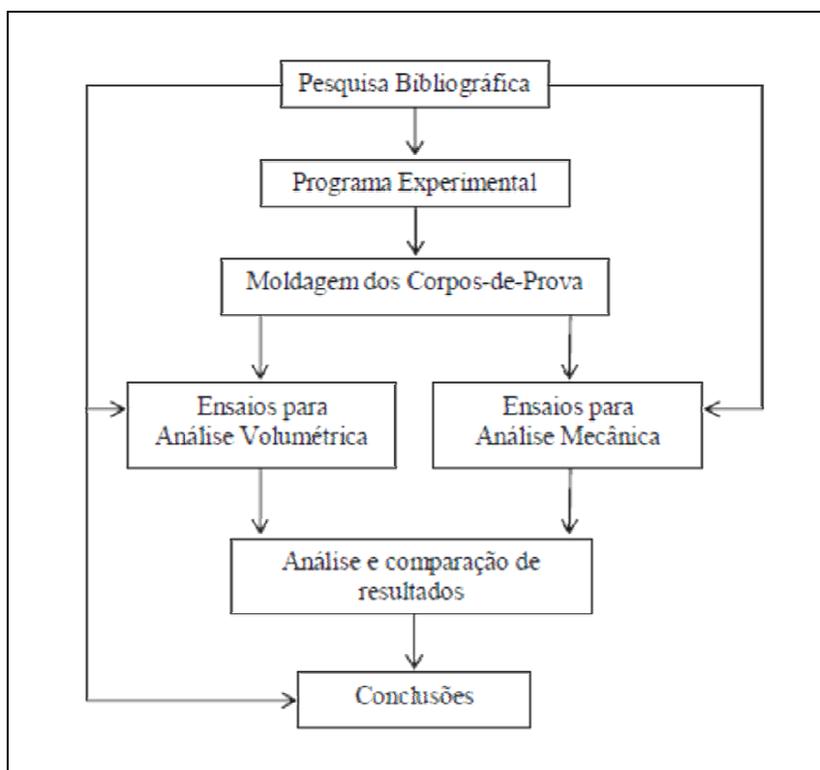
São limitações do trabalho a utilização de agregados basálticos fornecidos pela empresa responsável pela execução do projeto da mistura da rodovia BR-290 que liga as cidades de Porto Alegre a Osório (*Freeway*), de ligante asfáltico cedido por uma única empresa de distribuição e de um traço em que somente 1% de pó de pedra foi substituído por cal. Além disso, são limitações também a definição das características volumétricas apenas através dos ensaios de densidade aparente e de densidade máxima medida e para a caracterização das propriedades mecânicas, empregar somente os ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração, dano por umidade induzida e perda de massa por desgaste.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir e estão representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) programa experimental;
- c) moldagem dos corpos-de-prova;
- d) ensaios para análise volumétrica;
- e) ensaios para análise mecânica;
- f) análise e comparação dos resultados;
- g) conclusões.

Figura 1 – Representação esquemática das etapas do delineamento



(fonte: elaborada pela autora)

As etapas são descritas nos próximos parágrafos.

A pesquisa bibliográfica constituiu da coleta de dados para a realização de um estudo consistente. Foi composta pela consulta a um grande acervo de material disponível, como livros, dissertações e artigos que proporcionam o embasamento teórico. Para esse trabalho, buscou-se um estudo detalhado dos componentes constituintes das misturas asfálticas para execução de pavimentos flexíveis.

O programa experimental compreendeu um levantamento dos ensaios que deveriam ser realizados para que fosse possível analisar as características volumétricas e as propriedades mecânicas. Consequentemente, foi nesse momento em que se determinou o número de corpos-de-prova (CP) que deveriam ser moldados para a realização das próximas etapas.

A etapa de moldagem dos CP foi realizada na sequência, de acordo com o método Marshall. Todos os CP foram moldados no LAPAV/UFRGS.

A etapa de ensaios para análise volumétrica ocorreu de acordo com as características decorrentes dos ensaios de densidade aparente e de densidade máxima medida. A fase de ensaios para análise mecânica deu-se de acordo com os resultados dos ensaios de módulo de resiliência, de resistência à tração, de dano por umidade induzida e de perda de massa por desgaste.

Na fase de análise e comparação de resultados obtidos, foram avaliados os resultados dos ensaios realizados nas misturas com incorporação das cales calcítica e dolomítica em relação à mistura de referência. E, através da análise das etapas anteriores, a pesquisa foi finalizada com as conclusões.

### 3 MISTURAS ASFÁLTICAS

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 157-158), a mistura entre os agregados com material betuminoso é utilizada em grande parte dos pavimentos executados no País nas proporções adequadas, de modo que atenda os requisitos quanto a impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade e resistência à derrapagem, à fadiga e ao trincamento térmico. Estes requisitos técnicos e de qualidade serão atendidos baseados num projeto de acordo com a dosagem da mistura asfáltica. O material que compõe o revestimento asfáltico pode tanto ser produzido em usinas quanto no local onde será executado. Existem basicamente dois tipos de ligantes para este fim: os usados em misturas a quente, o chamado CAP (cimento asfáltico de petróleo), e as emulsões, que são executadas em misturas a frio.

As misturas asfálticas a quente podem se distinguir em várias classificações, conforme padrão granulométrico empregado ou ainda, conforme as exigências de características mecânicas, de acordo com a aplicação a qual se destina. Elas se dividem em grupos específicos em função da granulometria dos agregados, como Bernucci et al. (2006, p. 159) definem:

As misturas asfálticas a quente podem ser subdividas pela graduação dos agregados e filler [...]. São destacados três tipos mais usuais nas misturas a quente:

- a) graduação densa: curva granulométrica contínua e bem-graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos volumes de vazios visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores. Exemplo: concreto asfáltico (CA);
- b) graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, com insuficiência de material fino (menor que 0,075 mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, com o objetivo de tornar a mistura com elevado volume de vazios com ar e, portanto, drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA);
- c) graduação descontínua: curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, com objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos. Exemplo: matriz pétrea asfáltica (*stone matrix asphalt* – SMA), mistura sem agregado de certa graduação (*gap-graded*).

De acordo com Senço (1997a, p. 27), concreto asfáltico (CA) é o tipo de revestimento asfáltico que consiste na mistura de agregados com ligante em usina, com um rigoroso

controle quanto às temperaturas dos materiais, ao teor de ligante, transporte, aplicação e compressão e tem sido usado de forma preferencial na execução de auto-estradas e vias expressas. Existe também, dentro da categoria das misturas usinadas, o pré-misturado a quente, com especificações menos exigentes do que as para CA tanto em relação à granulometria, quanto em relação ao volume de vazios e à estabilidade. Nesta mistura, o agregado é aquecido a uma temperatura próxima a do ligante. E, há ainda, o pré-misturado a frio, no qual os materiais pétreos são misturados à temperatura ambiente.

Mistura asfáltica a quente, de acordo com a Norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT-ES 031 (BRASIL, 2006a, p. 3), é “[...] executada em usina apropriada, com características específicas, compostas de agregado mineral graduado, material de enchimento (fíler) e ligante betuminoso, espalhada e comprimida a quente.”. Este tipo de revestimento é o mais utilizado no Brasil por ter disponibilidade de equipamentos e domínio da técnica, além de um menor custo, haver impermeabilidade do ligante, ser possível trabalhar com várias temperaturas, ter durabilidade e adesividade.

Existem muitos fatores que podem influenciar o desempenho das misturas asfálticas. O projeto da mistura, suas práticas construtivas, as propriedades dos materiais que a compõe e ainda o uso de aditivos tem uma importância fundamental nas características estruturais do pavimento. Os materiais componentes das misturas serão apresentados a seguir.

### 3.1 AGREGADOS

Segundo a Norma NBR 9.935 (ASSOCIAÇÃO BASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 2), “[...] agregado é o material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto.”. Além disso, o agregado é o responsável pelo suporte das cargas do pavimento, de acordo com suas características, pois assegura sua estabilidade devido ao atrito interno provocado pelo entrosamento entre as partículas (BRASIL, 2006b).

Os agregados podem ser classificados quanto a sua natureza e são divididos em naturais ou artificiais. Agregados naturais são aqueles que surgem de alterações de rochas através de processos de intemperismo ou produzidos por britagem. Os agregados artificiais são provenientes de processos industriais, a partir de transformações físicas e químicas (ROHDE, 2007, p. 52).

A autora ainda afirma que “[...] os agregados representam a maior parcela constituinte de uma mistura asfáltica, chegando a valores superiores a 90% em peso do conjunto asfalto-agregado.” (ROHDE, 2007, p. 52). Sendo assim, é muito importante conhecer as propriedades dos agregados que são usados nas misturas asfálticas para o desempenho dos pavimentos.

É imprescindível ressaltar que a distribuição granulométrica é uma das características principais dos agregados e esta influi de forma muito importante no comportamento dos revestimentos asfálticos. A distribuição granulométrica do agregado, feita através de uma análise por peneiramento, influencia diretamente na rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, entre outras propriedades (BERNUCCI et al., 2006, p. 121).

A utilização dos agregados em revestimentos asfálticos deve ocorrer segundo uma seleção, que depende de disponibilidade, custo, qualidade e tipo de aplicação (BERNUCCI et al., 2006, p. 129). A seguir são descritas algumas características que devem ser analisadas para que haja aceitação de agregados para misturas asfálticas segundo especificações do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (BERNUCCI et al., 2006). As principais características dos agregados de interesse para pavimentação são:

- a) tamanho e graduação;
- b) limpeza;
- c) resistência à abrasão;
- d) forma das partículas;
- e) absorção;
- f) adesividade ao ligante asfáltico;
- g) sanidade;
- h) massa específica.

O **tamanho e graduação** são especificações que prescrevem a distribuição granulométrica a ser usada numa determinada aplicação e controlam o tamanho máximo do agregado. A distribuição granulométrica garante a estabilidade da camada de revestimento asfáltico devido ao entrosamento entre partículas e o atrito entre elas. A especificação que determina o método de ensaio para realização da análise granulométrica é a Norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem DNER-ME 083 (BRASIL, 1998a).

A **limpeza** é uma característica importante, pois materiais deletérios como vegetação, conchas e grumos de argila podem fazer parte dos agregados e isto os torna impróprios para sua utilização em revestimentos asfálticos se forem encontrados em grandes quantidades. A limpeza dos agregados pode ser verificada visualmente, mas uma lavagem do material é mais eficiente. O ensaio de equivalente de areia, descrito na Norma DNER-ME 054 (BRASIL, 1997a) determina a proporção de argila em agregados miúdos.

A **resistência à abrasão** garante aos agregados a capacidade para resistir a quebras, degradação e desintegração, principalmente os que estão localizados na superfície do pavimento. O ensaio de determinação da abrasão Los Angeles – DNER-ME 035 – mede as alterações a que os agregados são submetidos após degradação mecânica (BRASIL, 1998b).

A **forma das partículas** dos agregados está intimamente ligada à trabalhabilidade e à resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas. A forma ideal dos agregados é a cúbica, pois conduz a um melhor entrosamento entre partículas, produzindo um maior travamento. O método DNER-ME 086 caracteriza a forma das partículas através da determinação de forma (BRASIL, 1994a).

A **absorção** é muito importante, tendo em vista que os agregados com elevada porosidade não são recomendados para utilização em misturas asfálticas. Isto porque um agregado poroso irá absorver uma grande quantidade de ligante asfáltico necessário para dar coesão à mistura. A absorção é a relação entre a massa de água absorvida pelo agregado graúdo após 24 horas de imersão à temperatura ambiente e a massa inicial de material seco. O método DNER-ME 081 especifica a realização deste ensaio (BRASIL, 1998c).

A **adesividade ao ligante asfáltico** é uma característica fundamental dos agregados, pois a água pode separar ou descolar a película formada de ligante asfáltico da superfície do agregado, tornando-o inaceitável para seu uso em misturas asfálticas. Um dos ensaios que determina as características de adesividade é o método DNER-ME 078 (BRASIL, 1994b).

A **sanidade** é importante para verificar e quantificar a resistência à desintegração química. Isto é possível através do ensaio que consiste em atacar o agregado com solução saturada de sulfato de sódio ou de magnésio, em cinco ciclos de molhagem e secagem. O método DNER-ME 089 apresenta o procedimento desse ensaio (BRASIL, 1994c).

A **massa específica**, no estudo dos agregados, possui três denominações importantes: real, aparente e efetiva. A massa específica real é determinada através da relação entre a massa seca e o volume real, o qual é constituído do volume de sólidos subtraindo o volume dos poros da superfície e é definida pela fórmula 1:

$$G_{sa} = \frac{MS}{Vol.\ real} \quad (\text{fórmula 1})$$

A massa específica aparente é determinada considerando o material como um todo, sem desconsiderar os vazios. É obtida dividindo-se a massa seca pelo volume aparente do agregado, definida pela fórmula 2:

$$G_{sb} = \frac{MS}{Vol.\ aparente} \quad (\text{fórmula 2})$$

A massa específica efetiva é calculada através da relação entre a massa seca da amostra e o volume efetivo do agregado. A mesma é apresentada na fórmula 3:

$$G_{se} = \frac{MS}{Vol.\ efetivo} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

$G_{sa}$  = massa específica real do agregado, em g/cm<sup>3</sup>;

MS = massa seca do agregado, em g;

Vol. real = volume da partícula sólida do agregado, em cm<sup>3</sup>;

$G_{sb}$  = massa específica aparente do agregado, em g/cm<sup>3</sup>;

Vol. aparente = volume do sólido + volume do poro permeável à água, em cm<sup>3</sup>;

$G_{se}$  = massa específica efetiva do agregado, em g/cm<sup>3</sup>;

Vol. efetivo = volume do sólido + volume dos poros permeáveis à água não preenchidos pelo ligante asfáltico; em  $\text{cm}^3$ .

O método de ensaio DNER-ME 081 especifica a determinação das massas específicas de agregados graúdos (BRASIL, 1998c). A norma da NBR-NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a) define os procedimentos para obtenção da massa específica na condição seca e massa específica na condição de superfície saturada seca.

### 3.2 LIGANTES ASFÁLTICOS

Bernucci et al. (2006, p. 25) indicam que o principal tipo de estrutura na maioria dos países é o pavimento asfáltico flexível. No Brasil, o concreto asfáltico é utilizado em grande parte das ruas, além de ser utilizado em aproximadamente 95% das rodovias pavimentadas. Por proporcionar forte união dos agregados, agindo como ligante que permite flexibilidade controlável, ser impermeabilizante, ser durável e poder ser usado aquecido ou emulsionado, o asfalto é amplamente utilizado.

Asfalto pode ser definido como “[...] mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção.” (BERNUCCI et al., 2006, p. 25). Além disso, o asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso proveniente da destilação do petróleo, sendo um adesivo termoviscoplastico, pouco reativo e ainda impermeável à água. Esta característica termoviscoplastica é observada no comportamento mecânico, pois é suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento e à temperatura de serviço (BERNUCCI et al., 2006, p. 26).

Quanto à natureza, o asfalto pode ser natural ou artificial. Os asfaltos naturais provenientes de jazidas foram utilizados por franceses a partir de 1802, por americanos depois de 1838 e por ingleses somente em 1869 em pavimentações de ruas e pátios. A obtenção de asfalto originária da destilação de petróleo iniciou-se em 1902 nos Estados Unidos e seu uso em pavimentação, a partir de 1909. No Brasil, o asfalto é produzido desde 1944, na refinaria Ipiranga, com petróleo importado da Venezuela (SENÇO, 1997a, p. 319).

Existem vários tipos de ligantes presentes no mercado brasileiro. Entre eles, pode-se destacar: CAP, asfaltos diluídos, emulsões asfálticas, asfaltos modificados por polímero ou por borracha (BERNUCCI et al., 2006, p. 40-41).

O CAP é um material semi-sólido em temperatura ambiente, possui propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, tem boas características de flexibilidade e de durabilidade e alta resistência à ação de sais, álcalis e ácidos. Os asfaltos dissolvidos são obtidos pela dissolução do CAP com um solvente (gasolina, querosene ou óleos voláteis), podem ser de cura rápida (CR), média (CM) ou lenta (CL) e são aplicados a temperaturas mais baixas ou mesmo, ambiente. As emulsões asfálticas consistem em uma suspensão de asfalto em água mantida estabilizada com um agente emulsificador e são usadas em misturas a frio (BAPTISTA, 1976).

Asfaltos modificados por polímeros são utilizados para melhorar o desempenho da mistura em corredores de tráfego pesado canalizado, rodovias especiais ou aeroportos e para condições adversas de clima, ou seja, grandes variações térmicas entre verão e inverno (BERNUCCI et al., 2006, p. 59). O asfalto-borracha incorpora os mesmos benefícios dos asfaltos modificados por polímeros, apresentando a vantagem de reduzir problemas ambientais (BERNUCCI et al., 2006, p. 75).

As propriedades físicas do asfalto estão diretamente relacionadas com sua temperatura, de modo que quanto mais alta, menor será sua viscosidade. Com isso, o asfalto se comporta como líquido quando submetido a temperaturas muito elevadas (BERNUCCI et al., 2006, p. 41). As principais características físicas do asfalto que definem se este é adequado ou não para uso em pavimentação são a dureza, medida através do ensaio de penetração, e a resistência ao fluxo, medida através do ensaio de viscosidade. Nos próximos parágrafos, são apresentados os ensaios de caracterização e controle de ligantes asfálticos.

O **ensaio de penetração** realizado em um CAP mede a distância, em décimos de milímetro, que uma agulha padrão, de massa igual a 100 gramas, penetra verticalmente numa amostra de volume padronizado durante 5 segundos, à temperatura de 25°C. A consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a profundidade medida. A norma que especifica este ensaio é a NBR 6.576 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998).

O **ensaio de viscosidade** mede de consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento. Este ensaio pode ser realizado no viscosímetro Saybolt-Furol, normatizado pela NBR 14.756 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a), ou ainda pode ser empregado o viscosímetro rotacional (Brookfield), de acordo com a norma NBR 15.184 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004a).

O ensaio chamado **ponto de amolecimento** correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece e atinge o escoamento. Os CAP apresentam aproximadamente a mesma penetração, em suas respectivas temperaturas. Este ensaio atende as especificações da NBR 6.560 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

O **ensaio de ductilidade** indica a capacidade do material de se alongar na forma de filamento. Caracteriza a resistência à tração e a flexibilidade do CAP e quanto mais dúctil, maior será a sua flexibilidade. A ductilidade é dada pelo alongamento em centímetros obtido no instante da ruptura. A norma que regulamento este ensaio é a NBR 6.293 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001b).

O **ensaio de solubilidade** é utilizado para medir a quantidade de betume presente na amostra de asfalto através da solubilidade em tricloroetileno e mede o teor de pureza do asfalto. É realizado, filtrando com papel filtro a amostra dissolvida pelo solvente. O ensaio é normatizado pela NBR 14.855 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002).

O **ensaio de ponto de fulgor** apresenta a menor temperatura na qual os vapores que saem durante o processo de aquecimento do material asfáltico se inflamam devido ao contato com chama padronizada. Este é um ensaio referente à segurança de manuseio do asfalto durante o transporte, estocagem e usinagem e deve ser executado seguindo a NBR 11.341 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008a).

No **ensaio de massa específica** é obtida a relação entre a massa e o volume através da determinação do volume de ligante com o uso de picnômetros. Os ligantes asfálticos têm massa específica entre 1 e 1,02 g/cm<sup>3</sup>. O ensaio é realizado de acordo com a NBR 6.296 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004b). O **ensaio de densidade relativa** tem a finalidade de converter massas em volumes para a determinação do teor de

projeto de ligante na mistura asfáltica. A densidade relativa é a razão da massa específica de asfalto a temperatura de 20°C pela massa de água a temperatura de 4°C.

### 3.3 FÍLER

Material de enchimento é, de acordo com a Norma DNER-EM 367 (BRASIL, 1997b, p. 2), “[...] material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada. É também denominado fíler.”. O material de enchimento deve ser homogêneo, seco e livre de grumos que são originados de agregação de partículas muito finas. Os tipos de fíler podem ser cimento Portland, cal hidratada, cinza volante ou qualquer outro material que atenda às especificações de norma (BRASIL, 1997b, p. 2).

#### 3.3.1 Cimento Portland

O cimento Portland pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. É uma das substâncias mais consumidas pela sociedade atual e isso se deve às suas características de trabalhabilidade e de moldabilidade (estado fresco), e de alta durabilidade e de resistência a cargas e ao fogo (estado duro). Este material é insubstituível em obras civis, podendo ser empregado tanto em peças de mobiliário urbano como em grandes barragens, em estradas ou edificações, em pontes, tubos de concreto ou telhados e até pode ser matéria-prima para artistas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2011).

Os principais componentes químicos do cimento são: cal (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnésia (MgO), álcalis (Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O) e sulfatos (SO<sub>3</sub>). Estes componentes podem ser facilmente encontrados nos produtos minerais que são matérias-primas para sua fabricação: calcário, argila e gesso. Já, a composição potencial é calculada imaginando-se que o cimento seja inteiramente cristalino, ou seja, sem qualquer vitrificação (SENÇO, 1997a, p. 386).

### 3.3.2 Cal hidratada

A continuidade do processo industrial que dá origem à cal virgem resulta na cal hidratada. A reação química que a produz, com presença de água, é uma clássica **reação de fases sólido-líquida**. De acordo com o volume de água utilizado neste processo, o produto final pode variar seu aspecto, desde seco à solução saturada, passando por aspectos de creme, lama ou leite (GUIMARÃES, 2002, p. 118). Devido à importância deste material na pesquisa, este tema será abordado com profundidade no próximo capítulo.

### 3.3.3 Cinza volante

Cinza volante é o material sólido obtido como resíduo a partir da queima do carvão nas termoelétricas. É uma pozolana artificial, ou seja, é um material sílico-aluminoso que isoladamente não possui grande poder cimentício, mas quando em presença de água, reage com a cal, formando composto com valores cimentícios. As cinzas volantes são constituídas por partículas de sílica e alumina, e, algumas vezes, contam com a presença de carbono livre. As partículas das cinzas volantes podem ter cargas elétricas, o que dificulta o processo de compactação (SOUZA, 1980, p. 188).

## 3.4 PROJETO

O projeto de misturas asfálticas pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa é a dosagem, que visa uma correta caracterização dos materiais e a determinação do teor de projeto de ligante. A segunda fase é a da caracterização mecânica da mistura, realizada através de ensaios. Essas etapas estão detalhadas nos próximos itens.

### 3.4.1 Dosagem

A dosagem de uma mistura asfáltica é um processo complexo, tendo em vista que envolve a caracterização correta de todos os materiais envolvidos. Deve-se estudar não apenas o comportamento individual destes materiais, mas também analisá-los em conjunto. O uso das misturas em revestimentos asfálticos deve ser feito de acordo com ensaios que permitam a obtenção do teor, ou seja, da quantidade de ligante a ser empregado na mistura. Isto significa

que a escolha de um teor de ligante é baseada em experimentos, seguindo uma faixa granulométrica preestabelecida (BERNUCCI et al., 2006, p. 205).

Segundo Rohde (2007, p. 56), há vários métodos de dosagem de misturas asfálticas, sendo possível destacar:

- a) o método Marshall: desenvolvido nos Estados Unidos na década de 1930, sendo o mais utilizado no Brasil;
- b) o método francês de dosagem: desenvolvido na França na década de 1970. Atualmente alguns ensaios e especificações deste método estão sendo incorporadas às especificações européias, em função da criação da União Européia;
- c) o método SUPERPAVE<sup>TM</sup>: surgiu nos Estados Unidos no final da década de 1980 como resultado do Programa SHRP. Alguns procedimentos sugeridos por este método são empregados experimentalmente no Brasil como complemento ao método Marshall.

O *U. S. Corps of Engineers* deparou-se com um problema de projeto e construção dos aeroportos militares, no Oceano Pacífico, durante a 2. Guerra Mundial, por não possuir um tipo de ensaio simples nem esquemas de trabalho para projeto e controle de campo para pavimentação. Com isso, deu-se início uma pesquisa para selecionar aparelhos de ensaio simples e de fácil transporte. Depois, começou uma nova etapa desse estudo, destinada a determinar um método de compactar corpos-de-prova no laboratório com valores de massa específica comparáveis com os obtidos em campo. Após, a terceira fase da pesquisa foi o estabelecimento de um critério de projeto racional de ensaios prévios e de controle (SENÇO, 1997b, p. 173).

O *U. S. Corps of Engineers* adotou o aparelho e o método de projeto de misturas betuminosas concebido por Bruce Marshall. Este método é utilizado para misturas betuminosas a quente, utilizando CAP com penetração compatível com as condições ambientais e agregados com diâmetros inferiores a 25,4 mm (1 polegada). Com isso, os ensaios ficam limitados às condições estabelecidas para produtos resultantes do método proposto por Marshall, como volume de vazios correspondentes ao ar na faixa de 3 a 5% e vazios preenchidos com betume fixados entre 75 e 85% dos vazios do agregado mineral (SENÇO, 1997b, p. 174).

Os CP preparados para o ensaio devem ter agregados e ligante aquecidos separadamente, até certa temperatura, e depois misturados. A mistura é colocada em moldes igualmente aquecidos e então compactada com soquete padronizado, dando-se 50, 75 ou 100 golpes, de

acordo com o volume de tráfego projetado, conforme a Norma DNER-ME 43 (BRASIL, 1995). Para este estudo, definiu-se a quantia de 75 golpes por face de cada CP, tendo em vista que esta quantidade de golpes é indicada para pressão de pneus de 7 a 14 kgf/cm<sup>2</sup>. Deve-se moldar um número mínimo de dois CP para cada teor de ligante pesquisado, sendo normalmente usados os valores de 4,5; 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5% em peso.

Depois da moldagem, verifica-se o valor da altura média e do diâmetro de cada CP, estes devem ser pesados para que se possa determinar a massa específica aparente. O método de ensaio DNER-ME 117 (BRASIL, 1994d) determina que a massa específica (ou, como usualmente é denominada, densidade) aparente de uma mistura asfáltica com volume de vazios de até 7% é obtida a partir de corpos-de-prova e determinada pela fórmula 4:

$$d = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_i} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

d = densidade aparente do corpo-de-prova;

P<sub>ar</sub> = peso do corpo-de-prova compactado, determinado ao ar, em N;

P<sub>i</sub> = peso do corpo-de-prova compactado, imerso em água, em N.

O ensaio Marshall é executado em CP cilíndricos de 10,16 cm (4 polegadas) de diâmetro e de 6,35 cm (2 ½ polegadas) de altura. Após as medidas para determinação de volume e peso, condicionam-se os CP em banho-maria a 60°C por período de 30 minutos e então os mesmos são levados à prensa Marshall, na qual se aplica uma carga continuamente por compressão diametral até o rompimento. O valor máximo de carga, que provoca o rompimento é denominado de valor de estabilidade Marshall, e a deformação sofrida pelos CP durante aplicação da carga até o valor máximo é chamado de valor de fluência, medido pelo medidor de fluência.

Os resultados do ensaio são anotados para elaboração dos gráficos das variações das grandezas, em função da variação dos teores de betume. Senço (1997b, p. 176) aponta que as grandezas são variação de:

- a) cargas máximas de ruptura (ou estabilidade Marshall);
- b) porcentagens de vazios não preenchidos (volume de vazios);
- c) porcentagens de vazios preenchidos (relação betume/vazios);
- d) densidades máximas teóricas;
- e) deformação sofrida pelos CP antes do rompimento (fluência).

Senço (1997b, p. 176-179) resume os gráficos elaborados com os resultados da seguinte forma:

- a) gráfico estabilidade x teor de betume. Nota-se que a estabilidade cresce inicialmente com o teor de betume crescente. A partir de determinado teor, a estabilidade passa a ser decrescente;
- b) a densidade máxima teórica, embora sem ser para os mesmos teores, também aumenta com os teores de betume crescentes até determinado ponto, onde passa a ser decrescente;
- c) os vazios não preenchidos decrescem com o aumento do teor de betume; porém, a partir de determinado teor, o decréscimo é imperceptível e a curva é assintótica ao eixo onde estão lançados esses teores;
- d) os vazios preenchidos (relação betume x vazios) crescem com os teores de betume crescentes, porém, a partir de determinado teor, o acréscimo é imperceptível e a curva é assintótica a uma horizontal;
- e) a fluência cresce indefinidamente com o aumento do teor de betume.

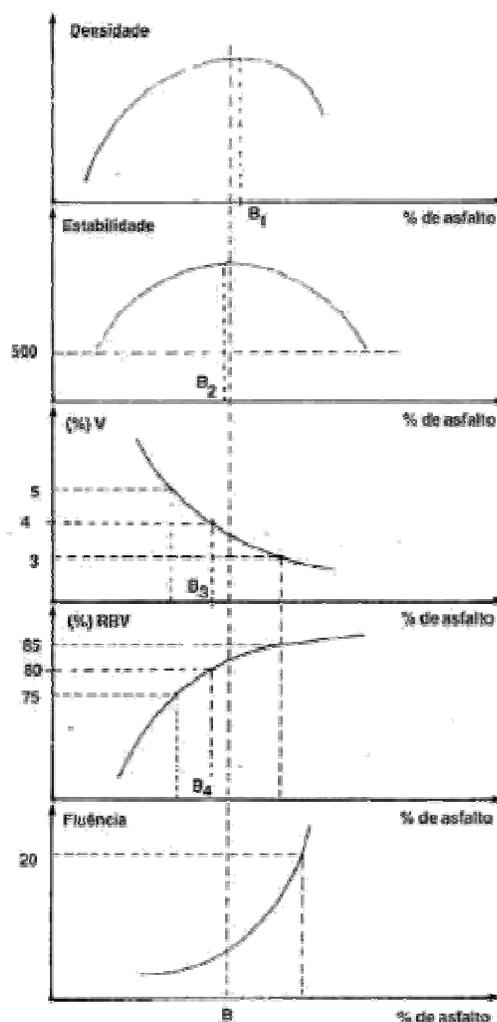
São descritas cinco curvas, conhecidas como curvas características do ensaio Marshall, através das quais é possível determinar o teor ótimo de asfalto para o agregado misturado. Para facilitar a visualização dos resultados, alinham-se verticalmente os valores de teores de betume, como se observa na figura 2.

Senço (1997b, p. 178) ainda apresenta o roteiro para que se obtenha o teor de projeto:

- a) tomar o teor de betume que dá a máxima estabilidade Marshall (B1);
- b) tomar o teor de betume que dá a densidade máxima teórica (B2);
- c) tomar o teor de betume que dá a média do intervalo especificado para os vazios não preenchidos [...] (B3);
- d) tomar o teor de betume que dá a média do intervalo especificado para os vazios preenchidos [...] (B4);
- e) calcular a média dos quatro valores [...] obtidos;

- f) verificar se o valor [...] encontrado satisfaz, ainda, duas condições: dá estabilidade Marshall acima do mínimo especificado e dá fluência abaixo do máximo especificado.

Figura 2 – Curvas típicas do ensaio Marshall



(fonte: SENÇO, 1997b, p. 179)

A massa específica máxima teórica, usualmente denominada de densidade máxima teórica (DMT) é definida pela Norma NBR 12891 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993) e dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica. O ensaio de massa específica corresponde numericamente à densidade e é realizado nos agregados de acordo com as normas do DNER para agregados graúdos (DNER-ME 81/89) e miúdos (DNER-ME 84/95), além da densidade do ligante utilizado. Com as massas

específicas reais de todos os materiais e suas respectivas proporções, determina-se a DMT da mistura (BERNUCCI et al., 2006, p. 211).

A massa específica máxima medida, convencionalmente denominada de densidade máxima medida (DMM) é também chamada de densidade específica Rice, pois foi desenvolvida por James Rice. No Brasil, é utilizada a NBR 15619 que prescreve o método para essa determinação em laboratório. Este ensaio pode ser aplicado por ocasião do projeto de dosagem das misturas asfálticas ou para avaliação e controle de qualidade das misturas que estão sendo produzidas. Bernucci et al. (2006, p. 213) indicam que a principal vantagem da DMM sobre a DMT é que a primeira não necessita a obtenção das massas específicas dos constituintes da mistura asfáltica separadamente, além de já considerar a absorção de ligante pelos agregados.

### **3.4.2 Propriedades mecânicas**

Bernucci et al. (2006, p. 287) indicam que a caracterização dos materiais de pavimentação não é uma tarefa simples devido às propriedades desses materiais serem dependentes de uma série de fatores, como o meio ambiente, a magnitude, o tempo de aplicação e a frequência das cargas dos veículos, além do estado de tensões. Neste item, são descritos ensaios utilizados para a caracterização do comportamento mecânico das misturas asfálticas, além do ensaio de estabilidade Marshall, anteriormente descrito.

#### **3.4.2.1 Ensaio de Módulo de Resiliência (MR)**

O termo resiliência é definido como energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Este termo foi adotado pela primeira vez por Francis Hveen, que foi o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resilientes) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos na década de 1930. Hveen criou um equipamento denominado estabilômetro para medir essas deformações verticais através de sensores (*strain gages*) (BERNUCCI et al., 2006, p. 291).

O MR de misturas asfálticas a quente é influenciado por diversas variáveis, como o tipo de mistura, a faixa granulométrica, o tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas, a energia e a temperatura de compactação, por exemplo. Valores típicos podem ser considerados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa para CA, a uma temperatura de 25°C, sendo que

menores valores correspondem a misturas com asfaltos modificados por polímeros ou por borracha e os maiores, a misturas com asfaltos considerados de consistência dura (BERNUCCI et al., 2006, p. 301).

A execução do ensaio de MR em misturas asfálticas no Brasil baseia-se nas recomendações da DNER-ME 133 e é realizado aplicando-se uma carga repetidamente na seção diametral vertical de um CP cilíndrico regular. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano no qual foi aplicada a carga. Após, é medido o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa certa temperatura. Os CP podem ser extraídos da pista ou moldados no compactador Marshall (BRASIL, 1994e).

#### 3.4.2.2 Ensaio de Resistência à Tração (RT)

O valor da RT é um importante parâmetro para a caracterização de misturas asfálticas, assim como de cimento Portland. O ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da RT foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro, no Rio de Janeiro, para concreto de cimento Portland. Este ensaio tornou-se muito popular pela facilidade, rapidez de execução e pelo fato de utilizar o mesmo CP cilíndrico e o mesmo equipamento usado na obtenção da resistência à compressão do concreto de cimento Portland. O ensaio tem sido adotado desde a década de 1970 para a caracterização de misturas asfálticas, entretanto com a aplicação das forças através de frisos de carga no CP Marshall convencional. O ensaio de RT consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um CP cilíndrico Marshall, que geram ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro (BERNUCCI et al., 2006, p. 308-309).

A Norma DNER-ME 138 (BRASIL, 1994f) define o equipamento utilizado no ensaio, as características do CP e o procedimento. A Norma DNIT 031 (BRASIL, 2006a) especifica o valor de RT mínimo de 0,6 MPa para CA.

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 311), valores típicos de RT para CP de CA recém-moldado ou logo após a construção de pista situam-se na média entre 0,5 e 2,0 MPa. Misturas que constituem CPA apresentam valores mais baixos, da ordem de 0,5 a 0,8 MPa e do tipo SMA estão entre 0,8 e 1,2 MPa. Na medida em que as misturas envelhecem em pista, a RT aumenta e, por perder flexibilidade, o MR também aumenta.

Segundo a EULA (*European Lime Association*, 2010), a cal hidratada nem sempre aumenta a resistência das misturas asfálticas. De acordo com estudo desta associação, apenas pouco mais da metade de um universo de 113 misturas apresenta aumento na resistência quando tratadas com cal hidratada.

#### 3.4.2.3 Ensaio de Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado)

Este ensaio é descrito na norma NBR 15.617. Esta foi elaborada, baseando-se nas normas AASHTO T 283 e ASTM D 4967:2004, a qual é fundamentada no trabalho de R. P. Lottman e, por isto, também é chamado de Ensaio Lottman Modificado. Este ensaio serve para avaliar as propriedades de adesividade das misturas asfálticas, considerando o efeito deletério da água, em amostras cilíndricas regulares, preparadas através da Metodologia Marshall.

Bernucci et al. (2006, p. 143) afirmam que o efeito da água em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Alguns exemplos destes agregados que requerem atenção quanto à sua adesividade ao ligante asfáltico, chamados de hidrófilos, são quartzitos. Além disto, os autores indicam que a relação entre os resultados deste ensaio indica a perda de resistência por umidade induzida. Esta relação deve ser maior ou igual a 0,70, o que significa que a perda deve ser inferior a 30%.

Núñez et al. (2007, p. 4) afirmam que a cal é o agente melhorador de adesividade mais eficiente. Os autores explicam que há perda de adesividade quando existe presença de água, pois a ligação entre cimento asfáltico e agregado é quebrada, separando-se então, estes dois materiais. Com isso, a cal hidratada reage com os agregados, reforçando a ligação entre o CAP e o material pétreo. Ao mesmo tempo em que age sobre o agregado, a cal também reage com as partículas polarizadas do asfalto, evitando que as mesmas formem sabões solúveis em água, causando assim, a perda de adesividade.

#### 3.4.2.4 Ensaio de Perda de Massa por Desgaste (Cantabro)

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 327-328), o ensaio Cantabro é realizado para determinar-se a resistência à desagregação dos componentes presentes no CA. Este ensaio foi originado no *Centro de Estudios de Carreteras e Universitat Politècnica de Catalunya*, na Espanha, com o intuito de avaliar o comportamento de misturas asfálticas relativo à perda de material. A norma DNER-ME 383 é baseada na norma espanhola e consiste em analisar os CP Marshall

no aparelho onde se realiza o ensaio de abrasão Los Angeles. Inicialmente, foi desenvolvido para avaliar pavimentos drenantes. Entretanto, pode ser estendido a outros tipos de misturas asfálticas. O desgaste máximo admitido, segundo a Norma do DNER, é de 25% para misturas asfálticas porosas e o desgaste para cada teor de ligante deve ser realizado a partir da média entre três CP. O valor individual de cada um deles não deve ser superior a 20% do valor médio.

Sabe-se que a adição de cal em misturas asfálticas atua na adesividade das mesmas. Estudos apresentados por Granich (2010, p. 52) mostram que misturas com cal obtiveram melhor desempenho nos ensaios de desgaste. Mistura de cal calcítica com 2% desempenharam resultados melhores, seguidas por mistura de cal dolomítica com 2%, mistura com cal calcítica com 1% e, com pior resultado, mistura de referência.

## 4 CAL HIDRATADA

Há muito tempo a cal vem sendo utilizada em misturas asfálticas. No período de 1910 a 1930, algumas experiências foram feitas nos Estados Unidos com o intuito de melhorar o desempenho das capas de concreto betuminoso com adição de cal hidratada. Nas experiências mais significativas, foram adicionados de 1% a 2% em peso de cal hidratada ao CA, em misturas a quente e a frio, para melhorar a adesividade e diminuir o volume de vazios na pista. Após um período em que a cal foi deixada de lado devido a questões financeiras, em 1958 seu uso foi reavivado pelo *Colorado Highway Department*, dos Estados Unidos, em função da obtenção de resultados nos testes de imersão-compressão. Os resultados foram superiores aos resultados apresentados pelo calcário pulverizado ou pelo cimento Portland. Desde então, a aceitação espalhou-se pelo mundo com a composição típica: agregado mineral, material de enchimento (cal hidratada como fíler) e CAP. No Brasil, o processo de capeamento começou com o DNER no final da década de 1940, em algumas estradas, como a antiga BR-02 no Rio Grande do Sul, no qual foi usado 0,7% de cal hidratada (GUIMARÃES, 2002, p. 223-224).

Segundo a NBR 7.175 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b, p. 2), cal hidratada é o “[...] pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.”. Além disso, a cal hidratada deve ser denominada de acordo com as exigências químicas, conforme figura 3, e físicas, conforme figura 4, pelas seguintes siglas: CH-I, CH-II e CH-III (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b).

Segundo Guimarães (2002, p. 118), a qualidade química da cal classifica-a em:

- a) calcítica: alto teor em óxido de cálcio (CaO);
- b) dolomítica: quando possui a relação entre óxidos de cálcio e de magnésio igual em proporção molecular;
- c) magnesiana: quando possui teores de óxido de magnésio intermediário entre a cal calcítica e a cal dolomítica.

Figura 3 – Exigências químicas

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado e calculado (CaO + MgO) <sup>1)</sup>		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO <sub>t</sub> + MgO <sub>t</sub> ) <sup>2)</sup>		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

<sup>1)</sup> O teor de óxido de cálcio (CaO) ou óxido de magnésio (MgO) não hidratados deve ser calculado como segue:

a) CaO combinado com CaSO<sub>4</sub> ..... = % SO<sub>3</sub> x 0,70

b) CaO combinado com CaCO<sub>3</sub> ..... = % CO<sub>2</sub> x 1,27

c) água combinada ..... = % perda ao fogo - (% CO<sub>2</sub> + % umidade)

d) CaO hidratado ..... = % água combinada x 3,11

e) CaO não-hidratado ..... = % CaO - (a + b + d)

f) MgO hidratado ..... = |e| x 0,72

O teor de óxidos não hidratados é expresso por:

Hipóteses	Óxido de cálcio não hidratado calculado (CaO)	Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO <sub>t</sub> + MgO <sub>t</sub> )
e < 0	0 (zero)	% MgO - f
e = 0	0 (zero)	% MgO
e > 0	e	e + % MgO

<sup>2)</sup> O teor de óxidos totais na base de não-voláteis (CaO<sub>total</sub> + MgO<sub>total</sub>) deve ser calculado como segue:

$$\% (\text{CaO}_{\text{total}} + \text{MgO}_{\text{total}}), \text{base de não voláteis} = \frac{(\% \text{CaO}_{\text{total}} + \% \text{MgO}_{\text{total}}) \times 100}{(100 - \% \text{perda ao fogo})}$$

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b)

Figura 4 – Exigências físicas

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0%	≥ 2,5%	≥ 2,2%
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110%	≥ 110%	≥ 110%

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b)

Bock (2009, p. 45-46) afirma que as investigações em laboratório e verificações em campo têm mostrado efeitos positivos da cal hidratada em misturas asfálticas. O autor ainda salienta que este material melhora substancialmente a adesividade entre ligante e agregado, reduz a formação de afundamento de trilhas de roda e também diminui o trincamento e o envelhecimento (oxidação) da camada asfáltica.

Granich (2010, p. 26) informa que as moléculas polarizadas do ligante, as quais se rompem quando em contato com o meio ambiente, reagem com o hidróxido de cálcio, existente na cal, evitando o rompimento e a progressiva fragilização do pavimento, e, conseqüentemente, reduzindo o envelhecimento. A cal reduz não só o trincamento por envelhecimento, mas também o trincamento por fadiga. Tendo em vista que, quando em contato com as moléculas polarizadas do ligante asfáltico, o volume efetivo de partículas de cal aumenta e assim desvia as micro-fissuras, responsáveis pelo trincamento por fadiga.

Bock et al. (2009, p. 3-11) indicam que existem diversas maneiras de incorporar-se a cal nas misturas asfálticas. A cal pode ser adicionada na composição sob a forma de fíler ou de calda ao agregado graúdo e ainda ao agregado graúdo seco ou úmido. A partir de ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, Cantabro e Lottman modificado com CP dosados pelo método Marshall, os autores afirmam que, de modo geral, a incorporação da cal ao agregado graúdo seco apresenta melhores resultados.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os procedimentos laboratoriais empregados para a caracterização e avaliação dos materiais estudados nessa pesquisa.

### 5.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste estudo são agregados, ligante e cales, que compõem as misturas asfálticas. A caracterização dos mesmos foi realizada através de ensaios executados no LAPAV, segundo as técnicas laboratoriais.

#### 5.1.1 Agregados

Os agregados empregados são de origem basáltica e oriundos da Central de Britagem TRS, a qual está localizada na BR 290, km 30, em Santo Antônio da Patrulha – RS. Todos agregados utilizados foram submetidos a ensaios laboratoriais para a verificação de sua qualidade e os resultados obtidos estão apresentados no quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades e características dos agregados utilizados

Propriedade	Método	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Absorção	DNER-ME 081/98	1,17%	-
Desgaste à abrasão	DNER-ME 035/98	28%	-
Índice de forma	DNER-ME 086/94	0,58	-
Massa específica aparente	DNER-ME 081/98	2,745 kN/m <sup>3</sup>	-
Massa específica real	DNER-ME 081/98	2,829 kN/m <sup>3</sup>	2,835 kN/m <sup>3</sup> -

(fonte: elaborado pela autora)

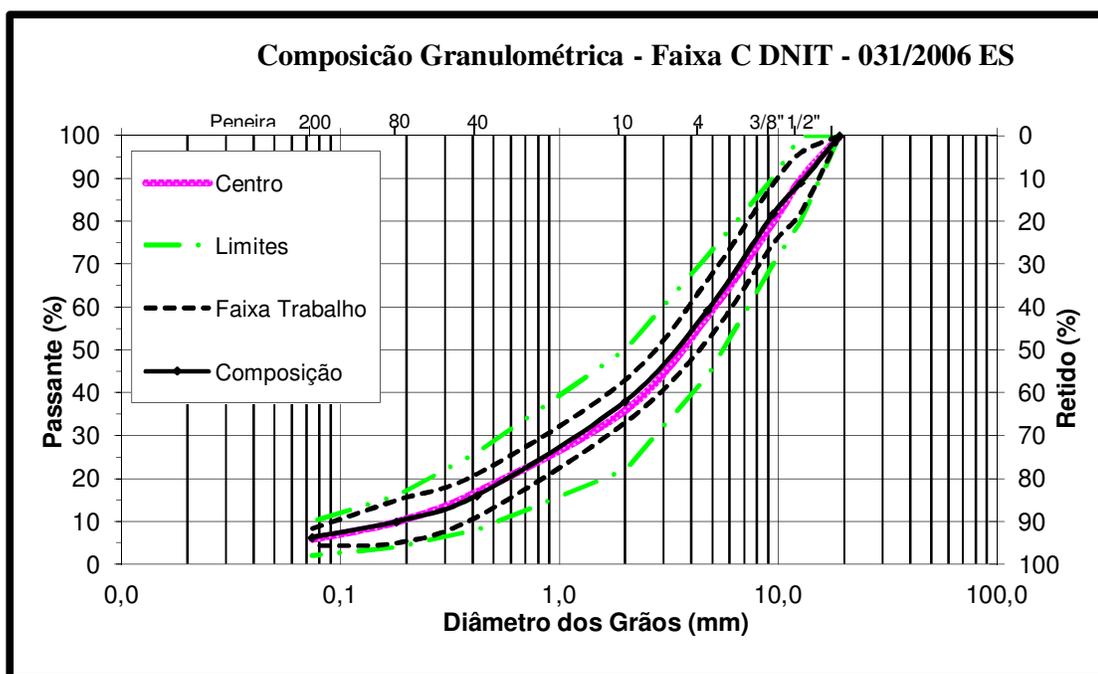
A análise granulométrica foi feita de acordo com a norma DNER 083/98 (BRASIL, 1998a). Os resultados obtidos estão demonstrados no quadro 2. A composição granulométrica está apresentada na figura 5, baseada na faixa C do DNIT, cujo diâmetro máximo é inferior a  $\frac{2}{3}$  da espessura da camada.

Quadro 2 – Análise granulométrica

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Cal calcítica	Cal dolomítica
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	65,90	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,50	30,30	100,00	100,00	100,00	100,00
n 4	4,76	1,00	43,10	99,90	100,00	100,00
n 10	2,00	0,70	3,20	91,30	100,00	100,00
n 40	0,42	0,70	1,90	37,70	100,00	100,00
n 80	0,18	0,60	1,80	23,80	98,10	99,46
n 200	0,07	0,60	1,60	15,50	88,80	88,83

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 5 – Composição granulométrica



(fonte: elaborada pela autora)

### 5.1.2 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa é comercializado pela Greca Asfaltos e é do tipo convencional, ou seja, CAP 50/70. Este ligante é muito empregado em obras de pavimentação. A caracterização do mesmo é apresentada no quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades e características do ligante utilizado

Propriedade	Método	CAP 50/70
Ductilidade (cm)	NBR 6.293	>147
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 6.296	1,013
Penetração (0,1 mm)	NBR 6.576	57,6
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6.560	46,75
Ponto de fulgor (°C)	NBR 11.341	>236
Viscosidade. Brookfield 135°C (cP)	NBR 15.184	387
Viscosidade. Brookfield 150°C (cP)	NBR 15.184	154
Viscosidade. Brookfield 177°C (cP)	NBR 15.184	75

(fonte: elaborado pela autora)

### 5.1.3 Cales

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de cales, sendo uma, calcítica e a outra dolomítica. A cal calcítica é produzida pela empresa Cobrascal Ltda., na cidade de Mairiporã, no Estado de São Paulo. A cal dolomítica é produzida pelo Grupo Dagoberto Barcelos S.A. e tem como origem a cidade de Caçapava do Sul, no Estado do Rio Grande do Sul. As características das cales, decorrentes de ensaios químicos realizados pela Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC), estão apresentadas no quadro 4.

Quadro 4 – Análise química das cales utilizadas

Característica	Calcítica	Dolomítica
Perda ao fogo (%)	24,0	23,9
Óxido de cálcio (%)	61,6	41,3
Óxido de magnésio (%)	9,3	27,7
Resíduo insolúvel (%)	2,30	6,12
Óxidos de ferro e alumínio (%)	1,93	1,10
Óxidos de cálcio disponível (%)	48,4	35,1

(fonte: elaborado pela autora)

A cal calcítica estudada foi escolhida, pois apresenta teores de hidróxido de cálcio – Ca(OH)<sub>2</sub> – mais altos, o que resulta em melhorias da adesividade e conseqüentemente, desempenhos maiores em misturas asfálticas. A cal dolomítica foi selecionada para este trabalho, devido ao amplo uso em obras de pavimentação neste Estado. Usualmente é empregada como material de enchimento, todavia, sem o devido estudo de sua qualidade e como se comporta frente às misturas asfálticas.

## 5.2 MÉTODOS

Os métodos empregados nesta pesquisa compreendem procedimentos laboratoriais. Estes procedimentos foram utilizados para a realização da análise das características volumétricas e das propriedades mecânicas. São eles:

- a) dosagem Marshall e moldagem de CP para determinação do teor de projeto do ligante asfáltico;
- b) ensaios de densidade aparente e densidade máxima medida;
- c) ensaios de MR, RT, Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado) e Perda de Massa por Desgaste (Cantabro).

### 5.2.1 Projeto e Metodologia Marshall

A dosagem das misturas asfálticas e a moldagem dos CP foram realizadas segundo a metodologia Marshall. A partir das características dos componentes das misturas, ou seja, das massas específicas do CAP e dos agregados, determinou-se a curva granulométrica a ser utilizada. Posteriormente, fez-se a escolha da composição dos agregados de forma a enquadrar sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida (faixa C do DNIT).

As temperaturas de mistura e de compactação foram estabelecidas segundo a curva viscosidade-temperatura do ligante. A temperatura do ligante na hora de ser misturado deve ser tal que sua viscosidade seja de  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s e não deve ser inferior a  $107^{\circ}\text{C}$  nem superior a  $177^{\circ}\text{C}$ . A temperatura dos agregados deve estar de 10 a  $15^{\circ}\text{C}$  acima da temperatura definida para o ligante (BERNUCCI et al., 2006, p. 219). Com isso, a temperatura estabelecida para o aquecimento dos agregados foi de  $175^{\circ}\text{C}$  e para o ligante foi de  $160^{\circ}\text{C}$ .

Os teores de ligante adotados para os diferentes grupos de CP a serem moldados foram 4; 4,5; 5; 5,5 e 6%. Cada grupo destes teve três CP moldados, totalizando 15 CP. Os CP foram desmoldados após seu resfriamento, ou seja, no dia seguinte à moldagem, identificados e todos tiveram suas alturas medidas. Este procedimento ocorreu através do uso de paquímetro, no qual foram feitas quatro medidas e a média entre elas. Os parâmetros de dosagem para cada CP são calculados através das fórmulas 5 e 6:

$$V = M_S - M_{SUB} \quad (\text{fórmula 5})$$

$$G_{mb} = \frac{M_S}{V} \quad (\text{fórmula 6})$$

Com os valores médios de  $G_{mb}$  calculados a partir das três amostras, calcularam-se os parâmetros volumétricos da mistura. Através da comparação entre a massa específica aparente e a massa específica teórica, obtiveram-se as relações volumétricas típicas de dosagem, conforme indicado nas fórmulas a seguir:

$$V_V = \frac{G_{mt} - G_{mb}}{G_{mt}} \quad (\text{fórmula 7})$$

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \%_a}{G_a} \quad (\text{fórmula 8})$$

$$VAM = V_V + VCB \quad (\text{fórmula 9})$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

V = volume do CP, em  $\text{cm}^3$ ;

$M_S$  = massa seca do CP, em g;  
 $M_{SUB}$  = massa submersa em água do CP, em g;  
 $G_{mb}$  = massa específica aparente da mistura, em g/cm<sup>3</sup>;  
 $V_V$  = volume de vazios, em %;  
 $G_{mt}$  = massa específica máxima teórica, em t/m<sup>3</sup>;  
 $VCB$  = vazios com betume, em %;  
 $\%_a$  = teor de ligante, em %;  
 $G_a$  = massa específica do ligante, em t/m<sup>3</sup>;  
 $VAM$  = vazios de agregados mineral, em %;  
 $RBV$  = relação betume/vazios, em %.

A obtenção da massa específica aparente ou **densidade aparente** foi feita a partir do DNER-ME 117, em todos os CP. De acordo com o método de ensaio, para corpos-de-prova com percentagem de vazios de até 7%, pesa-se o CP ao ar e depois, pesa-se o mesmo imerso em água, através de uma balança hidrostática à temperatura ambiente padrão (25°C). Para cada tipo de mistura, fez-se uma média entre as densidades aparentes de três amostras.

A massa específica máxima medida ou **densidade máxima medida** (DMM), segue a Norma NBR 15.619 e é dada pela razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios não preenchidos com asfalto e total de asfalto. O procedimento utilizado na pesquisa para determinação da DMM é o que se utiliza vácuo. Para a realização deste ensaio, inicialmente é pesado 1.500 g de mistura asfáltica não compactada em um recipiente denominado *Kitasato* com massa conhecida. Depois de cobrir essa mistura com água a 25°C, aplica-se uma pressão de vácuo residual de 30 mmHg, durante um período de 15 minutos. Durante este tempo, em que se deseja expulsar o ar existente entre os agregados recobertos pelo filme de ligante, o recipiente com o material fica sobre uma mesa agitadora para a potencialização do processo. Depois do período de vácuo, preenche-se todo *Kitasato* com água em temperatura de 25°C, e pesa-se o conjunto. A DMM é determinada pela fórmula 11 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c):

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C} \times 0,9971 \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

$G_{mm}$  = densidade máxima medida;

A = massa da amostra seca em ar, em g;

B = massa do recipiente com volume completo com água, em g;

C = massa do recipiente + amostra submersa em água, em g.

A partir das características volumétricas, descobriu-se o teor de ligante para um volume de vazios de 4% e, então, determinou-se o projeto das misturas. Foram elaborados três projetos: o primeiro sendo a mistura de referência, o segundo, a mistura com adição de cal calcítica e terceiro, outra mistura com incorporação de cal dolomítica. Nas três misturas, o teor de projeto calculado foi de 4,6% de ligante e nas misturas com adição dos melhoradores, substituiu-se 1% da fração de pó de pedra pelas cales (calcítica e dolomítica).

Cabe ressaltar que a cal foi adicionada ao agregado graúdo seco e posteriormente, este material foi misturado ao agregado miúdo e ao ligante. De acordo com Bock (2009, p. 6), esta forma de incorporação é mais eficiente, pois apresentou resultados superiores em comparação às misturas em que se adicionou cal ao agregado graúdo sob a forma de calda.

A descrição dos ensaios realizados para caracterização das propriedades mecânicas está apresentada nos itens a seguir.

### 5.2.2 Módulo de Resiliência

A execução do ensaio de MR em misturas asfálticas no Brasil baseia-se nas recomendações da DNER-ME 133 (BRASIL, 1994e). Primeiramente, é feita a montagem do conjunto e após, condiciona-se o CP, aplicando duzentas vezes uma carga vertical repetida diametralmente de modo a se obter uma tensão menor ou igual a 30% da resistência à tração, conforme é apresentado na figura 6. Depois, registram-se os deslocamentos lidos pelos LVDT (*linear variable differential transformers*) após 50, 60 e 70 aplicações de carga. Considerando-se que

os pontos de deslocamentos são distantes  $\frac{1}{2}$  diâmetro do CP, é calculado o MR por meio da fórmula 12 (BRITO, 2006, p. 89):

$$MR = \frac{P}{\delta_h \times H} (0,7801\mu + 0,2339) \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em MPa;

P = carga vertical cíclica aplicada diretamente no CP, em N;

$\delta_h$  = deslocamento horizontal medido, em cm;

H = altura do CP, em cm;

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

Figura 6 – Ensaio de MR



(fonte: foto da autora)

A DNER-ME 133 recomenda que uma pré-calibração dos LVDT é necessária, a fim de correlacionar as deformações com os valores registrados. Além disso, o MR é a média

aritmética dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de carga, e o coeficiente de Poisson é de 0,30 (BRASIL, 1994e).

### 5.2.3 Resistência à Tração

A Norma DNER-ME 138 (BRASIL, 1994f, p. 2) indica que os equipamentos necessários para execução do ensaio são prensa mecânica com sensibilidade igual ou inferior a 20 N, com êmbolo movimentando-se numa velocidade de 0,8 mm/s, admitindo uma variação de 0,1 mm/s a mais ou a menos, estufa capaz de manter a temperatura entre 30 e 60°C, sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura em torno de 25°C e um paquímetro. Além disso, estabelece que o CP pode ser extraído diretamente da pista através de sonda rotativa ou fabricado em laboratório, de forma cilíndrica, com altura e diâmetro determinados.

O procedimento para a execução do ensaio inicia, medindo-se a altura do CP e o diâmetro do mesmo. Após, coloca-se o CP na estufa ou sistema de refrigeração com temperatura de 25, 30, 45 ou 60°C, por 2 horas. Em seguida, o CP é colocado em posição horizontal, repousando, segundo uma geratriz, sobre o prato inferior da prensa e verifica-se a retilidade das geratrizes de contato com ambos os pratos. Então, posiciona-se o CP no dispositivo centralizador da prensa e ajustam-se os pratos da prensa até que os mesmos exerçam uma pequena compressão, como é ilustrado na figura 7. Por fim, aplica-se a carga progressivamente até que se atinja a ruptura do CP no plano diametral vertical. A RT é calculada a partir do valor da carga de ruptura, seguindo a fórmula 13:

$$\sigma = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (\text{fórmula 13})$$

Onde:

$\sigma$  = tensão de tração uniforme, em MPa;

F = força aplicada por unidade de espessura do cilindro, em N;

D = diâmetro do CP, em cm;

H = altura do CP, em cm.

Figura 7 – Ensaio de RT



(fonte: foto da autora)

#### **5.2.4 Dano por umidade induzida (Lottman Modificado)**

Neste ensaio, de acordo com a Norma NBR 15.617 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b), os CP são moldados de acordo com a metodologia Marshall, entretanto, com um número de golpes menor do que o indicado no método, a fim de que se obtenha um volume de vazios maior do que os 4% indicados, pois o mesmo deve estar na faixa entre 6 e 8%. Para esta pesquisa, foram utilizados 12 golpes por face em cada corpo-de-prova. Os CP são divididos em dois grupos. Para o primeiro grupo, esses são condicionados a 25°C e então submetidos ao ensaio de Resistência à Tração, obtendo-se assim, um valor chamado de RT.

Para o segundo grupo, faz-se uma simulação das condições mais agressivas para os CP, ou seja, são imersos em água e após, submetidos a uma pressão de vácuo a fim de que seu grau de saturação atinja valores de 55 a 80%. Logo depois, esses CP são condicionados a uma temperatura de -18°C por um período de 16 horas e após são levados para um banho a 60°C durante 24h. Após remover os CP do banho a 60°C, levam-se os mesmos à submersão em um

banho a 25°C por 2 horas e então são submetidos ao ensaio de RT a 25°C, o qual é denominado de RT'. A perda de resistência é dada pelo valor da relação RT'/RT, denominado de Resistência Retida à Tração (RRt).

### 5.2.5 Perda de massa por desgaste (Cantabro)

O Cantabro é normalizado pela Norma DNER-ME 383 (BRASIL, 1999), a qual estabelece o procedimento do ensaio. Todavia, para a realização deste estudo, foram feitas algumas alterações neste ensaio. Inicialmente, moldaram-se nove CP de acordo com o método Marshall para cada tipo de mistura, totalizando 27 CP. Cada três CP por mistura foram condicionados a uma temperatura diferente, sendo elas 25°C, conforme a Norma DNER-ME 383, 4°C e 40°C, simulando a temperatura da pista nos dias mais rigorosos de inverno e de verão, respectivamente. O valor do desgaste é dado pela média entre os três CP de cada mistura para cada temperatura.

Após o condicionamento em cada temperatura, pesou-se o CP e o mesmo foi colocado no tambor da máquina Los Angeles, previamente limpo e sem carga abrasiva. Então, ligou-se a máquina para realizar 300 revoluções do tambor a uma velocidade de 30 rotações por minuto. Completadas as revoluções, o CP foi retirado do tambor, pesado e então feito o cálculo do desgaste da mistura betuminosa por abrasão através da fórmula 14:

$$\text{Desgaste} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (\text{fórmula 14})$$

Onde:

Desgaste = desgaste da mistura betuminosa, em %;

$P_{\text{inicial}}$  = peso do CP antes do ensaio, em g;

$P_{\text{final}}$  = peso do CP após o ensaio, em g.

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios desenvolvidos ao longo do trabalho. Estes resultados permitem a verificação das características volumétricas, através das densidades aparente e máxima medida, determinadas a partir do ensaio de dosagem Marshall e das propriedades mecânicas, pelos ensaios de MR, RT, dano por umidade induzida e perda de massa por desgaste.

### 6.1 PARÂMETROS DE DOSAGEM E CARACTERÍSTICA VOLUMÉTRICA

Para encontrar o teor de projeto, foi feita a moldagem de três CP para cinco teores diferentes de betume (4; 4,5; 5; 5,5; 6%), aplicando-se 75 golpes por face segundo a dosagem Marshall. O projeto utilizado para mistura de referência, com incorporação de cal calcítica e com cal dolomítica foi o mesmo, ou seja, com 4,6% de teor de ligante. As características da mistura sem cal adicionada estão apresentadas através da média entre três CP de cada teor no quadro 5.

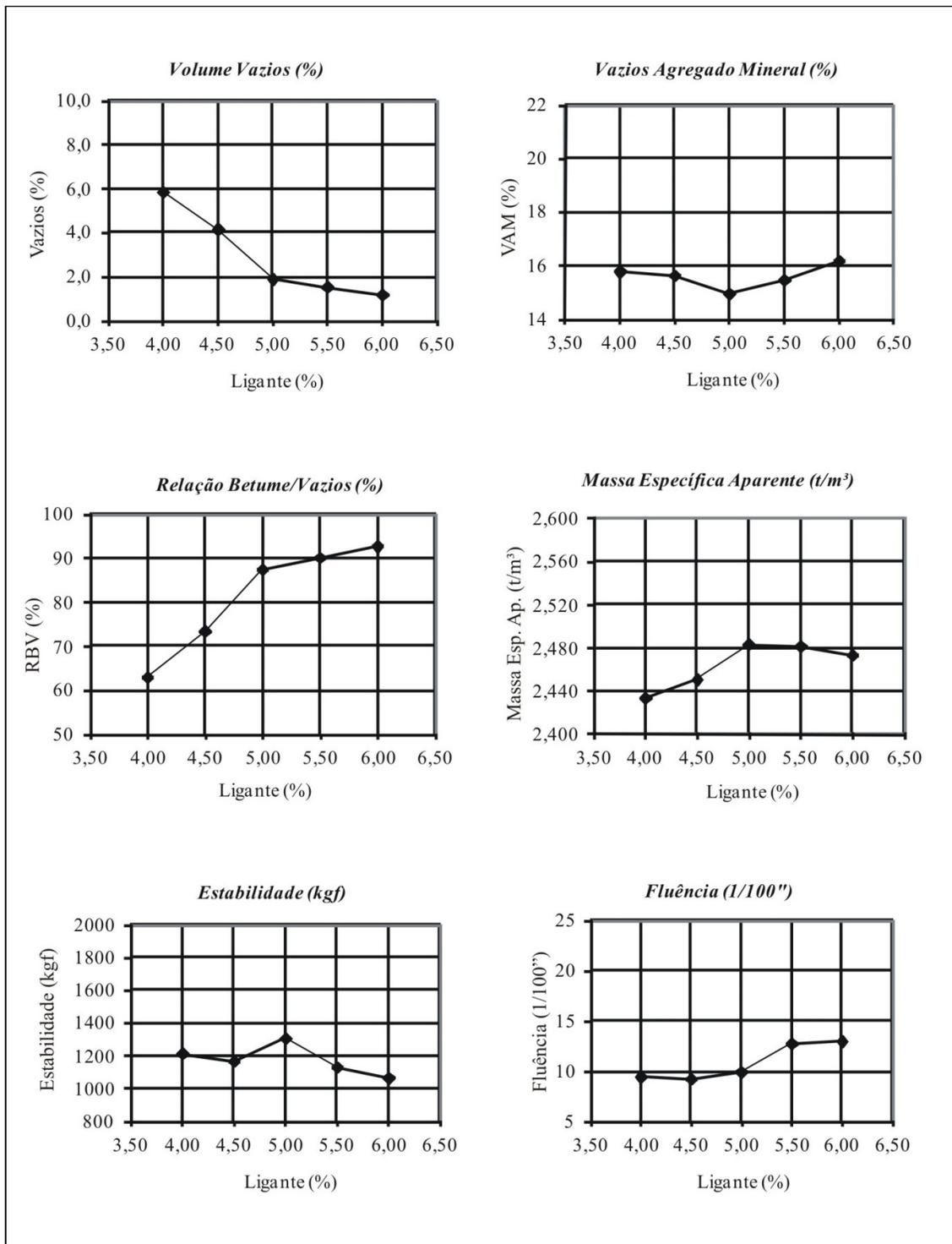
Quadro 5 – Característica da mistura de referência

Propriedade	Teor de Betume (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Volume de Vazios (%)	5,9	4,1	1,9	1,5	1,2
Relação Betume Vazios (%)	63	73	87	90	93
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,78	15,62	14,96	15,46	16,18
Massa Esp. Aparente (t/m <sup>3</sup> )	2,434	2,451	2,483	2,482	2,474
Estabilidade (kgf)	1214	1166	1306	1131	1064
Fluência (mm)	9	9	10	13	13

(fonte: elaborado pela autora)

A partir destas características, foram elaborados os gráficos para obtenção final do teor de projeto. Estes estão apresentados na figura 8.

Figura 8 – Parâmetros de dosagem Marshall



(fonte: elaborada pela autora)

De posse destes resultados, é possível fazer uma interpolação para encontrar o valor de porcentagem de volume de vazios. Segundo especificações da dosagem Marshall, o volume de vazios deve ser entre 3 e 5%. Neste trabalho foi utilizado o valor médio, ou seja, 4%, obtendo-se assim, o valor de teor de ligante de projeto de 4,6%. A partir deste teor, encontram-se os demais valores de projeto, definindo assim as propriedades finais da mistura de referência, as quais estão apresentadas no quadro 6.

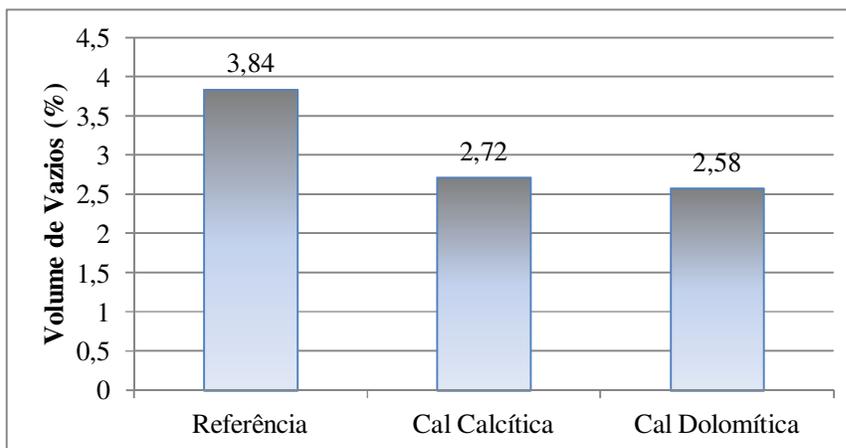
Quadro 6 – Propriedades finais da mistura de referência

Propriedade	Valor de Projeto
Teor de Ligante (%)	4,60
Volume de Vazios (%)	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,50
Massa Esp. Aparente (t/m <sup>3</sup> )	2,43
Estabilidade (kgf)	1194
Fluência (1/100 in)	9

(fonte: elaborado pela autora)

Com a análise da substituição de 1% do pó de pedra pela mesma fração de cal hidratada, é possível constatar que há redução significativa do volume de vazios. De acordo com a Norma DNER-ME 043/95, o volume de vazios de projeto para misturas convencionais deve ser um valor entre 3 e 5%. Todavia, as misturas com incorporação de cales, tanto calcítica quanto dolomítica, obtiveram valores inferiores ao mínimo estabelecido. Este resultado fica evidenciado na figura 9. Uma possível razão para esta redução é o fato de haver diferenças entre a massa específica e a granulometria dos materiais. O pó de pedra apresenta massa específica de 2,83 g/cm<sup>3</sup> enquanto que a cal hidratada, 2,25 g/cm<sup>3</sup>. Como a substituição dos materiais foi realizada em peso, ao se adicionar a cal, acrescentou-se um volume maior deste material.

Figura 9 – Variação do volume de vazios



(fonte: elaborada pela autora)

O valor de volume de vazios para a mistura de referência encontrado na prática foi de 3,84%, diferente do valor determinado no projeto (4%), porém muito próximo. Isso se deve a diferente forma de compactação e acomodação dos agregados, alterando assim, a densidade aparente. Esta foi obtida através da média de valores entre três CP por mistura. A DMM resultou da média entre duas amostras não compactadas por mistura. Os resultados estão apresentados no quadro 7.

Quadro 7 – Densidades das três misturas

Dimensões			Massas (g)		Densidades	
Mistura	h (cm)	d(cm)	no ar	na água	Aparente	DMM
Referência	6,11	10,20	1194,74	707,790	2,45352	2,552
Cal calcítica	6,21	10,20	1221,66	726,687	2,46812	2,536
Cal dolomítica	6,20	10,20	1220,15	728,303	2,48075	2,545

(fonte: elaborado pela autora)

Com base nessas informações, é possível verificar que a densidade aparente da mistura de referência apresentou menor valor em relação às misturas com incorporação das cales. Além disso, a mistura com adição de cal dolomítica apresentou um valor de densidade aparente superior à mistura com cal calcítica. Por outro lado, ao observar-se a DMM, pode-se notar que a mistura de referência apresenta valor maior em relação às duas outras misturas.

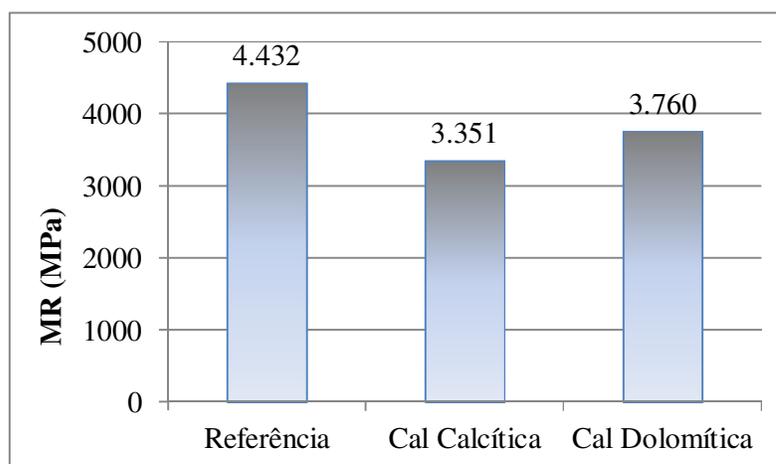
## 6.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ESTUDADAS

Os resultados das propriedades mecânicas estão evidenciados nos ensaios de MR, RT, dano por umidade induzida e perda de massa por desgaste. Estes estão apresentados a seguir.

### 6.2.1 Módulo de Resiliência

Houve uma redução significativa dos valores de MR, da ordem de 20%, nas misturas em que foi feita a incorporação de cal. Estes resultados são discordantes com outros relatados na bibliografia. Isto, provavelmente se deva à incorreção de aproveitar-se o mesmo projeto de misturas, empregando-se materiais com características diferentes. Os resultados estão apresentados na figura 10.

Figura 10– Resultado do MR

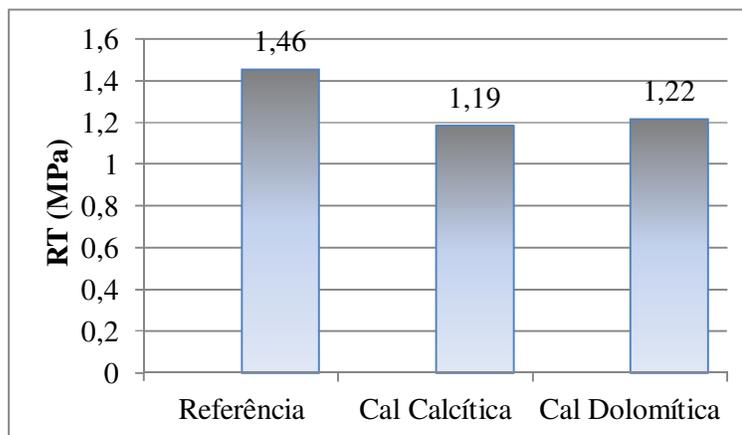


(fonte: elaborada pela autora)

### 6.2.2 Resistência à Tração

Da mesma forma que ocorreu no módulo de resiliência das misturas, para a resistência à tração observou-se que os resultados não estão de acordo com a literatura. A incorporação das cales causou uma redução de RT de aproximadamente 18%. Estas misturas podem estar com excesso de ligante, apresentando uma resistência menor do que a mistura de referência, tendo em vista que as mesmas provocaram redução significativa no volume de vazios. Os resultados estão demonstrados na figura 11.

Figura 11– Resultado de RT



(fonte: elaborada pela autora)

### 6.2.3 Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado)

O ensaio de Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado) foi realizado, moldando-se os CP com volume de vazios entre 6 e 8%. No quadro 8 são apresentados os resultados de RT dos CP divididos em dois grupos (com e sem condicionamento), e, a partir das médias destes resultados, obteve-se o valor de RRt.

Quadro 8 – RRt das três misturas

Mistura	Leituras de Resistência à Tração (MPa)								RRt (%)
	CP sem condicionamento				CP com condicionamento				
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 4	CP 5	CP 6	Média	
Referência	0,62	0,51	0,65	<b>0,59</b>	0,46	0,45	0,50	<b>0,47</b>	<b>79,21</b>
Cal Calcítica	0,81	0,51	0,72	<b>0,68</b>	0,14	0,31	0,38	<b>0,28</b>	<b>40,69</b>
Cal Dolomítica	0,77	0,70	0,70	<b>0,72</b>	0,45	0,44	0,39	<b>0,43</b>	<b>58,99</b>

(fonte: elaborado pela autora)

O valor encontrado de resistência retida à tração da mistura de referência foi maior do que os das misturas com cal incorporada. Como valor de referência para aceitação de uma mistura segundo este método, é preconizado valores acima de 70%. Portanto, é possível notar que apenas a composição de referência enquadra-se na especificação. Conforme descrito anteriormente, houve uma redução significativa no volume de vazios. Sendo assim, analisou-se este parâmetro para uma possível justificativa para estes resultados. Todavia, não houve

discrepância nos valores dos volumes de vazios entre as misturas moldadas para o ensaio, como pode ser verificado no quadro 9.

Quadro 9 – Volume de vazios das misturas

Mistura	Volume de Vazios							
	CP sem condicionamento				CP com condicionamento			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 4	CP 5	CP 6	Média
Referência	6,11	7,08	7,03	<b>6,74</b>	7,25	7,41	6,90	<b>7,19</b>
Cal Calcítica	7,21	6,15	6,92	<b>6,76</b>	6,30	7,78	7,39	<b>7,16</b>
Cal Dolomítica	6,57	7,17	6,23	<b>6,66</b>	6,98	7,80	7,40	<b>7,39</b>

(fonte: elaborado pela autora)

### 6.2.4 Perda de Massa por Desgaste (Cantabro)

O ensaio Cantabro foi realizado, condicionando os CP a três temperaturas diferentes, conforme descrito anteriormente. Os resultados estão indicados no quadro 10.

Quadro 10 – Perda de massa por desgaste das três misturas

Mistura	Média (%)		
	2°C	25°C	40°C
Referência	11,29	6,75	0,70
Cal Calcítica	10,99	7,12	1,44
Cal Dolomítica	6,87	4,76	1,71

(fonte: elaborado pela autora)

Os resultados indicam que a mistura de referência, em temperatura menor, apresenta maior perda de massa em relação às misturas com incorporação de cal. Entretanto, para temperatura elevada, a mistura com adição de cal dolomítica demonstra maior porcentagem de perda de massa. Em temperatura ambiente, é possível verificar que a composição com cal calcítica sofre maior perda de massa por desgaste.

## 7 CONCLUSÕES

A incorporação de cal pode influenciar de forma significativa as misturas de CA com ligante convencional. Esta influência se dá tanto em relação às propriedades volumétricas, quanto às características mecânicas. Além disso, os dois tipos de cales (calcítica e dolomítica) influenciam essas misturas.

A adição de cal em misturas asfálticas parece alterar as características volumétricas, pois houve um aumento no valor de densidade aparente e uma redução no valor de DMM das composições com cales em relação à de referência. Além disso, houve uma considerável redução no volume de vazios das misturas com cales em relação à mistura de referência. Possivelmente, isso ocorre devido à diferença de massa específica e de granulometria entre os materiais. Este fato torna inaplicável a incorporação de cal, seja ela calcítica ou dolomítica, para manter as misturas asfálticas dentro das especificações.

A incorporação de cal influencia o comportamento mecânico das misturas, pois apresentou redução de MR e de RT em relação à mistura de referência. Provavelmente, a causa de ambas as reduções o teor inadequado de ligante nas misturas em que foram adicionadas as cales, pois possuem menor resistência. Também, em relação ao efeito deletério da água, houve uma diminuição no valor de RRt das misturas com os dois tipos de cales estudados, conforme verificado no ensaio de dano por umidade induzida. Apenas a mistura de referência enquadra-se no limite especificado por norma.

A perda de massa constatada no ensaio de Cantabro foi maior na mistura de referência quando os CP estavam submetidos à temperatura mais baixa e o resultado mais satisfatório a 2°C foi encontrado na composição com cal dolomítica. Na temperatura de 25°C, a mistura com cal calcítica incorporada foi a que apresentou menor perda de massa, significando assim, uma melhora em sua adesividade. Entretanto, a temperatura de 40°C, a mistura sem incorporação de cal resultou em menor perda de massa.

A partir destas considerações, verifica-se que os resultados não condizem com a bibliografia consultada. Há incorreção em aproveitar-se de um mesmo projeto para misturas cujos materiais possuem características diferentes. Sugere-se que, para cada mistura asfáltica, faça-se um projeto específico, com uma nova dosagem.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.891**: dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall – procedimento. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. **NBR 6.576**: cimento asfáltico de petróleo – especificação de material. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 6.560**: materiais betuminosos – determinação do ponto de amolecimento. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR 14.756**: materiais betuminosos – determinação da viscosidade cinemática. Rio de Janeiro, 2001a.

\_\_\_\_\_. **NBR 6.293**: materiais betuminosos – determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 2001b.

\_\_\_\_\_. **NBR 14.855**: materiais betuminosos – determinação da solubilidade em tricloroetileno. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR-NM 53**: agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003a.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.175**: cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 2003b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.184**: materiais betuminosos – determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004a.

\_\_\_\_\_. **NBR 6.296**: produtos betuminosos semi-sólidos – determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2004b.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.935**: agregados. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 11.341**: derivados do petróleo – determinação dos pontos de fulgor e de combustível em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2008a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.617**: misturas asfálticas – determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2008b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.619**: misturas asfálticas – determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2008c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND. **Básico sobre o cimento**. 2011. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/basico/basico-sobre-cimento>>. Acesso em: 9 jun. 2011.

BAPTISTA, C. N. **Pavimentação**. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1976. tomo 1.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, ADEBA, 2006.

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 SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS E PROJETOS DE REFORÇO, 4.. 2009, Fortaleza. **Trabalhos Técnicos...** Fortaleza: ABPv, 2009.

BOCK, A. L. **Desempenho à fadiga de misturas em concreto asfáltico com diferentes formas de incorporação de cal.** 2009. 88 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 086/94:** agregado – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994a.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 078/94:** agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994b.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 089/94:** agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994c.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 117/94:** misturas betuminosas – determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994d.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 133/94:** misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994e.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 138/94:** misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994f.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 43/95:** misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 054/97:** equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997a.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-EM 367/97:** material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997b.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 083/98:** agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998a.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 035/98**: agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998b.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 081/98**: agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998c.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 383/99**: desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro. Rio de Janeiro, 1999.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. **DNIT 031/2006-ES**: pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006b. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual\\_de\\_Pavimentação\\_Versão\\_Final.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentação_Versão_Final.pdf)>. Acesso em: 15 abr. 2011.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

BUDNY, J.; HARTMANN, D. A.; BOEIRA, F. D.; BOCK, A. L.; TREICHEL, D. S.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. Avaliação dos efeitos de diferentes tipos de cal em misturas de concreto asfáltico. In: ENCONTRO DO ASFALTO, 20., 2010, Rio de Janeiro. **Trabalhos Técnicos...** Rio de Janeiro: IBP, 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa Rodoviária 2010**. 2011. Disponível em: <<http://www.sistemacnt.org.br/pesquisacntrodovias/2010/>>. Acesso em: 16 abr. 2011.

EUROPEAN LIME ASSOCIATION. Hydrated lime: a proven additive for durable asphalt pavements. Critical literature review. Report to the European Lime Associate/Asphalt Task Force. Disponível em: <[http://www.eula.eu/fileadmin/user\\_upload/Publications\\_miscellaneous/Reports/Asphalt\\_literature\\_review\\_final\\_\\_reduced\\_size\\_.pdf](http://www.eula.eu/fileadmin/user_upload/Publications_miscellaneous/Reports/Asphalt_literature_review_final__reduced_size_.pdf)>. Acesso em 27 ago. 2011.

GRANICH, A. R. **Análise do desempenho de misturas asfálticas com adição de cal**: um estudo de caso. 2010. 62 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; PERAÇA, V.; TSUKUDA, R. S. Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 38., 2007, Manaus. **Trabalhos Técnicos...** Manaus: ABPv, 2007.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos**. 2007. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997a. v 1.

\_\_\_\_\_. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997b. v. 2

SOUZA, M. L. **Pavimentação rodoviária**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos: DNER, IPR, 1980.