

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

Bruno Pereira Mariano

**CONCRETO ASFÁLTICO COM AGREGADO GRANÍTICO:
EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE CAL HIDRATADA**

Porto Alegre
dezembro 2013

BRUNO PEREIRA MARIANO

**CONCRETO ASFÁLTICO COM AGREGADO GRANÍTICO:
EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE CAL HIDRATADA**

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
Coorientador: André Luiz Bock

Porto Alegre
dezembro 2013

BRUNO PEREIRA MARIANO

**CONCRETO ASFÁLTICO COM AGREGADO GRANÍTICO:
EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE CAL HIDRATADA**

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

Porto Alegre, março de 2013

Washington Peres Núñez
Dr. Pela UFRGS
Orientador

André Luiz Bock
MSc. Pela UFRGS
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
DSc. pela UFRJ

Lélio Antônio Teixeira Brito (UFRGS)
PhD. pela University of Nottingham

Washington Peres Núñez
Dr. Pela UFRGS

André Luiz Bock
MSc. Pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Elter e Rubensmar, que sempre me incentivaram a nunca desistir dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Washington Peres Núñez, orientador deste trabalho, pelo grande auxílio e tempo dedicado, tornando possível a realização dessa pesquisa.

Agradeço ao coorientador, André Luiz Bock, pelos auxílios durante os experimentos laboratoriais.

Agradeço aos bolsistas e técnicos do Lapav pela grande ajuda na realização dos experimentos.

Agradeço a Greca Asfaltos pelo material fornecido.

Agradeço também ao engenheiro Felipe Tamanini pelo grande empenho no fornecimento dos agregados necessários a realização da pesquisa.

Agradeço a professora Carin por ter me ensinado as técnicas de escrever um trabalho científico.

Agradeço a todos amigos da casa do estudante e que por aqui passaram, por todas as trocas de cultura e conhecimento ao longo desses anos de convívio.

Agradeço a minha irmã, Paula, por estar sempre ao meu lado quando precisei.

Agradeço aos meus pais, Elter e Rubensmar, por todo apoio prestado e pelas sábias palavras em momentos difíceis.

Precisamos dar sentido humano às nossas construções. E quando o amor ao dinheiro, ao sucesso, nos estiver deixando cegos, saibamos fazer pausas para olhar os lírios do campo e as aves do céu.

Érico Veríssimo

RESUMO

Com a predominância do modal de transporte rodoviário no Brasil, aliado a uma manutenção, na maioria das vezes, insuficiente, os pavimentos estão em um estado de condição funcional abaixo do ideal para o tráfego. Com o intuito de analisar uma possível solução – que possua um baixo custo, aliado a um eficiente resultado – este trabalho aborda a capacidade de melhorar o desempenho em misturas asfálticas através da adição de cal. Estudos relatados na bibliografia internacional e pesquisas realizadas previamente no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (com agregados de basalto) mostraram que a incorporação de cal pode melhorar características como a adesividade agregado-ligante, a rigidez e resistência aos efeitos deletérios. Neste Trabalho de Conclusão, foram ensaiados concretos asfálticos com incorporação de dois tipos de cales: calcítica e dolomítica. Além disso, resultados de ensaios em misturas asfálticas sem cal (de referência), previamente obtidos, foram utilizados para comparação. Empregaram-se agregados de granito, pois esta rocha apresenta, normalmente, problemas de adesividade ligante-agregado. A avaliação das misturas é realizada através de ensaios de adesividade e, também, de ensaios mecânicos, como o de Módulo de Resiliência, Dano por Umidade Induzida (Lottman) e Resistência à Tração. Assim, pode-se constatar um pequeno aumento na resistência à tração do concreto asfáltico com cal calcítica, enquanto que com a cal dolomítica ocorreu um aumento maior em sua resistência, com relação ao concreto asfáltico de referência. No ensaio de módulo de resiliência, ambas as cales obtiveram um aumento, chegando quase a atingir o dobro do módulo de resiliência do concreto asfáltico de referência. No ensaio de dano por umidade induzida, ambas as cales obtiveram um aumento com relação ao concreto asfáltico de referência, sendo que os resultados com cal calcítica foram melhores do que os com dolomítica.

Palavras chave: Incorporação de Cal. Cal Dolomítica. Cal Calcítica. Agregado Granítico. Concreto Asfáltico. Pavimentação. Vantagens. Metodologia Marshall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho.....	18
Figura 2 – Peneiras para curvas granulométricas.....	22
Figura 3 – Exemplo de curvas granulométricas.....	23
Figura 4 – Exemplo de gráfico para determinação do teor de ligante.....	38
Figura 5 – Curvas granulométrica dos agregados empregados 45.....	45
Figura 6 – 1% de cal calcítica.....	47
Figura 7 – 2% de cal calcítica.....	47
Figura 8 – 3% de cal calcítica.....	47
Figura 9 – 4% de cal calcítica.....	47
Figura 10 – Referência.....	47
Figura 11 – 1% de cal dolomítica.....	48
Figura 12 – 2% de cal dolomítica.....	48
Figura 13 – 3% de cal dolomítica.....	48
Figura 14 – 4% de cal dolomítica.....	48
Figura 15 – Curva granulométrica de projeto e faixa 1 da SMOV/POA e faixa B do DNIT.....	53
Figura 16 – Parâmetros de dosagem Marshall do concreto asfáltico com cal calcítica....	57
Figura 17 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico com cal dolomítica.....	58
Figura 18 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico de referência....	59
Figura 19 – Resultados dos ensaios de resistência à tração (RT).....	62
Figura 20 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência (MR).....	63
Figura 21 – Resultados dos ensaios de dano por umidade induzida.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos cimentos asfálticos de petróleo (CAPs).....	28
Tabela 2 – Distribuição granulométrica.....	45
Tabela 3 – Caracterização do agregado.....	46
Tabela 4 – Caracterização do ligante.....	49
Tabela 5 – Caracterização química das cales.....	50
Tabela 6 – Caracterização física das cales.....	50
Tabela 7 – Faixa 1 de projeto da SMOV/POA.....	52
Tabela 8 – Faixa B do DNIT.....	52
Tabela 9 – Composição granulométrica de projeto.....	53
Tabela 10 – Distribuição granulométrica de projeto.....	54
Tabela 11 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico com adição de cal calcítica.....	55
Tabela 12 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico com adição de cal dolomítica.....	56
Tabela 13 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico de referência.....	56
Tabela 14 – Comparação entre resultados das misturas e especificações limites (SMOV/POA e DNIT).....	60
Tabela 15 – Resultados do ensaio RT e MR em concretos asfálticos com adição de cal e de referência (sem cal).....	62
Tabela 16 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida.....	64

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – American Association of Highway and Transportation Officials

ADP – asfaltos diluídos de petróleo

AMP – asfaltos modificados por polímeros

AR ou ARE – agente rejuvenescedores

CA – concreto asfáltico

CAP – cimento asfáltico de petróleo

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

CP – corpo de prova

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

EAP – emulsão asfáltica de petróleo

EUA – Estado Unidos da América

Lapav – Laboratório de Pavimentação

MR – módulo de resiliência

RT – resistência à tração

SMOV/POA – Secretaria Municipal de Obras e Viação de Porto Alegre

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

A – desgaste da mistura betuminosa com asfalto, com aproximação de 1% (%)

D – Diâmetro do corpo de prova (cm)

DMT – densidade máxima teórica (g/cm³)

F – carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova (N)

F' – carga de ruptura (N)

G_{mb} – massa específica aparente (g/cm³)

G_{sa} – massa específica real do agregado (g/cm³)

G_{sb} – massa específica aparente do agregado (g/cm³)

G_{se} – massa específica efetiva do agregado (g/cm³)

H – altura do corpo de prova (cm)

Massa seca – massa seca do agregado (g)

MR – módulo de resiliência (MPa)

M_s – massa seca do corpo de prova compactado (g)

M_{sss} – massa de corpo de prova compactado na condição de superfície saturada seca, que corresponde ao corpo de prova com os poros superficiais saturados, sendo eliminado o excesso de água (g)

M_{sss_{sub}} – massa de corpo de prova compactado na condição de superfície saturada seca e posteriormente submerso em água (g)

M_{s_{sub}} – massa seca do corpo de prova posteriormente submerso em água (g)

P – peso do corpo de prova antes do ensaio (g)

P' – peso do corpo de prova após o ensaio (g)

RBV – relação betume/vazios (%)

V – volume do corpo de prova (cm³)

V_a – volume do asfalto (cm³)

V_{ag-efetivo} – volume efetivo do agregado (cm³)

VAM – vazios do agregado mineral (%)

V_{ar} – volume de ar (cm³)

Volume aparente – volume do sólido mais volume do poro permeável à água (cm³)

Volume real – volume da partícula sólida do agregado (cm³)

V_v – volume de vazios (cm³)

ε – deformação de tração do diâmetro horizontal (adimensional)

μ – coeficiente de Poisson (adimensional)

σ_R – resistência à tração (Mpa)

σ_t – tensão de tração (kgf/cm²)

δh = Deslocamento horizontal medido, em cm;

%a – teor de asfalto (%)

Δ – deformação elástica ou resiliente para as cargas de 55, 65 e 75 aplicações da carga F (cm)

Σ % n – porcentagem em massa dos agregados (%)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo principal	16
2.2.2 Objetivos secundários	16
2.3 HIPÓTESE	17
2.4 PRESSUPOSTO	17
2.5 DELIMITAÇÕES	17
2.6 LIMITAÇÕES	17
2.7 DELINEAMENTO	18
3 O PAVIMENTO E SEUS MATERIAIS.....	20
3.1 PAVIMENTO.....	20
3.2 AGREGADO.....	21
3.3 LIGANTE ASFÁLTICO.....	26
3.4 CAL.....	30
4 PROCEDIMENTO DE LABORATÓRIO.....	33
4.1 DOSAGEM.....	33
4.1.1 Conceito e tipos.....	33
4.1.2 Definições de massas.....	33
4.1.3 Dosagem Marshall.....	35
4.1.4 Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico.....	37
4.2 ENSAIOS.....	38
4.2.1 Resistência à tração.....	39
4.2.2 Dano por umidade induzida.....	40
4.2.3 Módulo de resiliência.....	41
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
5.1 MATERIAIS.....	44
5.1.1 Agregado.....	44
5.1.2 Ligante asfáltico.....	48
5.1.3 Cales.....	49
5.2 MÉTODOS E RESULTADOS.....	51

5.2.1 Projeto e metodologia Marshall.....	51
5.2.2 Ensaio de resistência à tração e de módulo de resiliência.....	60
5.2.3 Ensaio de dano por umidade induzida (Lottman Modificado).....	63
6 CONCLUSÕES.....	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Segundo Bernucci et al. (2008), o sistema de transporte brasileiro possui uma grande concentração no setor rodoviário. O transporte de passageiros chega a atingir 90% nessa modalidade, enquanto que para, o de cargas, a concentração é de 60%.

Em virtude disso, os pavimentos do Brasil são submetidos a uma grande sobrecarga gerada pelo grande volume de tráfego e ao desrespeito às cargas máximas definidas na legislação. Aliado a isso, ocorre falta da manutenção necessária para que o pavimento mantenha boas condições de trafegabilidade. De acordo com Bernucci et al. (2008), a maior parte da malha rodoviária está em condições de ruim a péssimo, ou seja, 69%, em 2004, foram assim classificados.

Esse estado de conservação dos pavimentos ocasiona diversos problemas. Dentre eles, pode-se citar o risco de acidentes, que aumenta sensivelmente com um pavimento em más condições; o aumento dos custos de manutenção dos veículos que utilizam as rodovias, o que proporciona uma elevação do valor de transporte, que é um fator importante no custo das mercadorias. Ainda, pode-se mencionar o aumento dos tempos de viagens e diminuição do conforto durante as mesmas.

Para minimizar esse problema, muitos estudos estão sendo realizados. Diversas técnicas e materiais estão sendo estudados para que o pavimento possua uma vida útil maior e mantenha o nível adequado de por mais tempo. Um dos métodos que vem sendo estudados é o da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos para pavimentos.

Outros países, como os EUA, já utilizam largamente esta prática. Afirma-se lá que a cal hidratada proporciona melhorias na adesividade ligante-agregado, aumenta a rigidez e a reduz efeitos deletérios da oxidação do ligante. No Brasil, essa prática já é recomendada, entretanto existem poucos estudos sobre os reais efeitos que a cal ocasiona na resistência a deformações permanentes e a outros mecanismos de degradação de pavimentos flexíveis. Sabe-se que a cal hidratada aumenta o desempenho desses pavimentos, mas existem poucos estudos que quantifiquem essas melhorias na área (BOCK, 2012; NÚÑEZ et al, 2007).

No Laboratório de Pavimentação (Lapav) da UFRGS, os efeitos da adição de cal hidratada no comportamento mecânico de concretos asfálticos têm sido estudados desde 2006. Até o momento, as principais pesquisas realizadas (BOCK, 2012; GRANICH¹, 2014) envolveram agregados de basalto – rocha que oferece pouco risco de perda de adesividade ligante-agregado — como acontece com os graníticos.

Observa-se que há, até o momento, apenas um relato (NÚÑEZ et al., 2007) de um estudo preliminar sobre os efeitos da adição da cal na adesividade ligante-agregado, no módulo de resiliência, na resistência à tração, no desgaste por abrasão Cântabro e no dano por umidade induzida, empregando-se agregados de granito, no caso, granitos extraídos no município de Eldorado do Sul, RS.

Com o intuito de dar continuidade à pesquisa, esse trabalho tem por propósito analisar os efeitos de adição de cal no comportamento mecânico de concretos asfálticos elaborados com agregados graníticos obtidos em instalação de britagem no município de Porto Alegre. É relevante destacar que a composição mineralógica dos granitos é muito variada e que, principalmente, a adesividade ligante-agregado é fortemente afetada pelo teor de sílica (quartzo) presente na rocha. Assim, os resultados preliminares apresentados por Núñez et al. (2007) precisam ser verificados para outras fontes de agregados graníticos.

Para tal, foram analisados concretos asfálticos elaborados com ligante asfáltico convencional e tipos diferentes de cal (calcítica e dolomítica), assim como concretos asfálticos sem cal, denominados “de referência”. Foram realizados ensaios que permitiram evidenciar e quantificar os efeitos que a adição de cal provoca em misturas asfálticas elaboradas com agregados graníticos.

Este trabalho apresenta uma estrutura dividida em seis capítulos. O primeiro deles é referente à introdução, mostrando uma abordagem inicial do assunto. O capítulo 2 aborda as diretrizes que a pesquisa seguiu durante sua execução. No capítulo 3, foi realizado um estudo sobre os componentes de um pavimento asfáltico. O capítulo 4 mostra os procedimentos laboratoriais encontrados na bibliografia. No capítulo 5, é exposto os métodos utilizados durante a pesquisa e os resultados encontrados. E, por fim, no capítulo 6, é apresentada a conclusão do trabalho.

¹ 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, 2010.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: quais os resultados da adição das cales empregadas às misturas asfálticas a quente, comparativamente a uma mistura sem cal, quando se empregam agregados de granito?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a avaliação das alterações das propriedades mecânicas de misturas asfálticas a quente (do tipo concreto asfáltico) com adição de cal em relação a amostras de referência (sem cal), em misturas que empregam agregados de granito.

2.2.2 Objetivos secundários

O objetivo secundário do trabalho é a apresentação dos resultados de ensaios de adesividade e do comportamento mecânico das amostras com cal e de referência analisados nos ensaios.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a adição de cal a concretos asfálticos com agregados graníticos melhora as seguintes propriedades: adesividade agregado-ligante; rigidez e resistência aos efeitos deletérios da água; sendo que a cal calcítica apresenta melhores resultados do que a cal dolomítica.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que ensaios, quando realizados segundo as normas NBR 15573/2008 (Misturas Asfálticas – Determinação da Massa Específica Aparente de Corpos de Prova Compactados); NBR 15617/2008 (Misturas Asfálticas – Determinação do Dano por Umidade Induzida); NBR 15619/2008 (Misturas Asfálticas – Determinação da Massa Específica Aparente Máxima Medida em Amostras Não Compactadas); NBR 15087/2004 (Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral); DNER-ME 117/94 (Mistura Betuminosa – Determinação da Densidade Aparente); DNER-ME 133/94 (Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência), são adequados para os fins desse trabalho e que, para os demais ensaios, não normalizados, foram utilizadas as metodologias empregadas no Lapav/UFRGS e Coppe/UFRJ.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo dos efeitos da adição de cal às misturas asfálticas a quente em que se utilizam agregados de granito.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) o uso de agregados graníticos fornecidos por um único fornecedor;
- b) o uso de ligante asfáltico convencional;
- c) o uso de dois tipos de cales: calcítica e dolomítica, cada uma delas provenientes de uma única usina.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do programa experimental;
- c) realização dos ensaios;
- d) análise dos resultados;
- e) conclusões.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A pesquisa bibliográfica ocorreu ao longo do desenvolvimento do trabalho, servindo de base para a realização das outras etapas. Nesta, realizou-se um estudo sobre outras pesquisas no tema, com a finalidade de analisar os efeitos que a adição de cal pode causar em concretos asfálticos. Além disso, conhecer os resultados encontrados por outros pesquisadores.

Ademais, ela serviu como base para definir os procedimentos adotados durante a realização dos ensaios laboratoriais. Ainda, constituiu-se como fonte de referências para análise e comparação dos resultados encontrados neste trabalho.

Posteriormente, realizou-se a elaboração do programa experimental. É nessa fase que ocorreu o planejamento dos ensaios de laboratório. Em uma primeira etapa foram realizados estudos de caracterização do ligante e agregados usados, além da metodologia que foi utilizada na moldagem dos corpos de prova. Logo após, foram definidos os procedimentos dos ensaios para obter os parâmetros de comportamentos mecânico das misturas. Ainda, foi determinada a quantidade de corpos de prova a serem moldados e elaborado um cronograma para realização dos procedimentos laboratoriais.

Os ensaios ocorreram como fase subsequente. Nesta etapa foram utilizados os corpos de prova, em ensaios de laboratório, para obter propriedades mecânicas como: módulo de resiliência e resistência à tração; bem como avaliar o dano por umidade induzida.

Na etapa da análise dos resultados, foram organizadas as informações obtidas anteriormente. Além disso, foram apresentados os resultados encontrados. Ainda, foram confrontados os resultados obtidos nesta pesquisa com estudos relatados por outros pesquisadores.

A partir da análise de resultados, chegou-se às conclusões do trabalho. Foi realizada a comparação das análises com a questão e hipótese de pesquisa. E, como finalização, foram feitas observações do autor sobre o trabalho.

3 O PAVIMENTO E SEUS MATERIAIS

Neste capítulo é apresentado o conceito de pavimento. Além disso, são detalhados os métodos de caracterização do agregado e do ligante, assim como são apresentadas algumas classificações para cal e as principais utilizações deste produto.

3.1 PAVIMENTO

O surgimento dos pavimentos deve-se à tentativa de melhorar as estradas de terra, protegendo-as da ação da água e do desprendimento de poeiras e pedras, tornando-as mais cômodas e seguras. As primeiras técnicas consistiam em colocar cascalho e saibro nas estradas de solos argilosos, que ficavam em péssimas condições de trafegabilidade em função da chuva. Tempos depois, elas começaram a ser revestidas com macadame e pedra britada. Esse revestimento não exercia todas as funções que um pavimento possui atualmente, por isso ele é chamado de pavimento primário (MEDINA; MOTTA, 2005).

Segundo Pinto e Preussler (2002, p. 4), os pavimentos construídos na atualidade podem ser conceituados como uma estrutura realizada após a terraplenagem e que deve possuir as seguintes características:

- a) ter resistência para suportar os esforços verticais oriundos do tráfego para os quais foi projetado e distribuí-los ao terreno sobre o qual assenta;
- b) resistir, sem desgaste excessivo, aos esforços horizontais produzidos pelo tráfego;
- c) melhorar as condições de rolamento, permitindo uma circulação fácil, cômoda e segura;
- d) permitir que se realizem operações de reforço ou recapeamento compatíveis com crescimento do volume de tráfego;
- e) conservar suas qualidades sob a ação dos agentes intempéricos.

No século XX, usou-se largamente a tecnologia já existente do concreto Portland para se construir pavimentos rígidos. Com o desenvolvimento da indústria de refino do petróleo, começou-se a utilizar, em grande escala, os pavimentos asfálticos como uma solução fácil e econômica de ser executada (MEDINA; MOTTA, 2005).

Um pavimento é constituído de diversas camadas responsáveis por conferir as características anteriormente citadas. A primeira camada, junto ao solo, é chamada de subleito. Essa é a camada de fundação do pavimento. Mais acima, existe a camada de sub-base, que tem a finalidade de dar as devidas correções ao subleito. Em seguida, existe a base, que possui a função de resistir aos esforços recebidos para as outras estruturas imediatamente abaixo dela (MEDINA; MOTTA, 2005).

Ainda, pode-se definir como revestimento asfáltico a parte superior do pavimento. É essa camada que é responsável por transmitir as cargas para as outras. Além disso, ela desempenha a função de impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento (BERNUCCI et al., 2008).

Essa camada geralmente é constituída por uma mistura contendo: concreto asfáltico, mistura asfáltica realizada a quente com agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento e cimento asfáltico de petróleo. Para se obter melhor desempenho, a mistura deve ser aplicada de forma a cobrir na totalidade os agregados e, posteriormente, ela deve ser espalhada e compactada a quente.

3.2 AGREGADO

Define-se agregado como: “Material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 2). Esse material pode ser caracterizado quanto:

- a) a natureza;
- b) o tamanho do grão;
- c) a distribuição do grão;
- d) a limpeza;
- e) a resistência à abrasão;
- f) a textura superficial;
- g) a forma das partículas;
- h) a absorção;
- i) a adesividade;

- j) a sanidade;
- k) a densidade.

Segundo a natureza, eles podem ser classificados em naturais e artificiais. Sendo que no primeiro caso, estão aqueles encontrados disponíveis no meio ambiente, sob sua forma geológica natural. Já os agregados ditos artificiais são aqueles de origem de rejeitos industriais e da construção civil (BALDO, 2007).

Quanto ao tamanho, o agregado pode ser dividido em gráudo, miúdo e material de enchimento (*filler*). O agregado gráudo é aquele material retido na peneira n. 10 (maior que 2 mm). O miúdo é o material passante na peneira n. 10 (menor que 2 mm) e que fica retido na peneira n. 200 (maior que 0,075 mm). Já o material de enchimento, é aquele que 65 % das partículas é passante na peneira n. 200 (menor que 0,075mm) (BERNUCCI et al., 2008).

A distribuição do grão é outra classificação importante. De acordo com ela, o revestimento pode mudar sensivelmente suas características. O procedimento para se obter a granulometria é realizado através de um fracionamento feito em peneiras (figura 2). Após esse peneiramento, com a porcentagem retida em cada peneira, traça-se uma curva granulométrica.

Figura 2 – Peneiras para curvas granulométricas

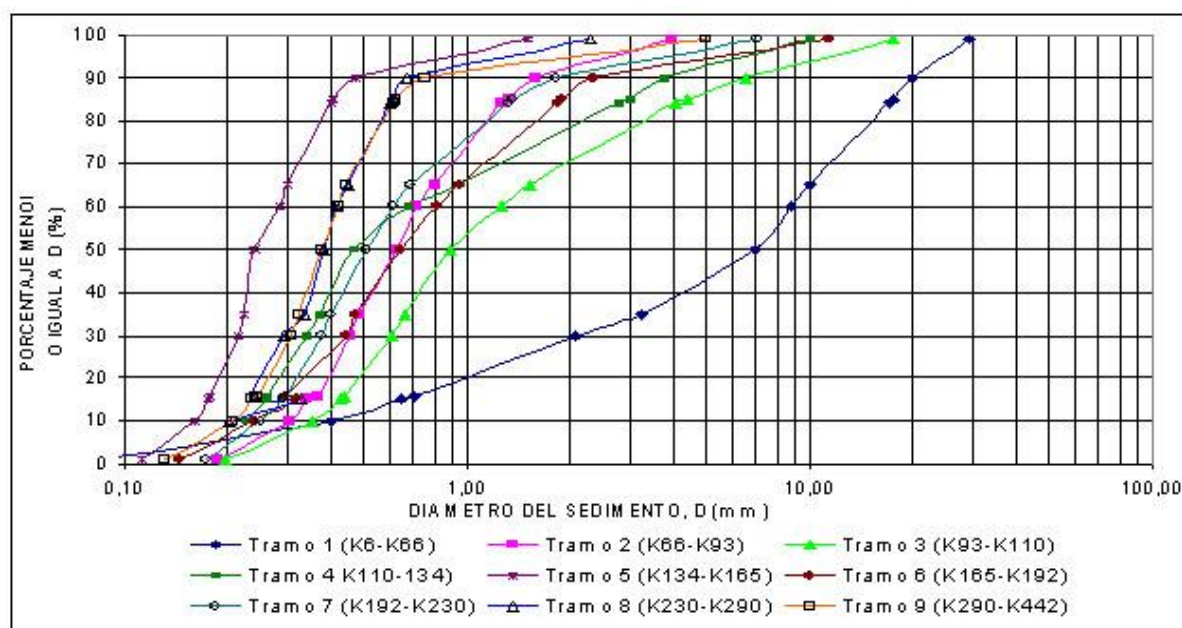


(fonte: FORTEST INDÚSTRIA E COMÉRCIO, 2012)

Desta forma, com a análise da curva granulométrica, pode-se classificar a graduação dos agregados em: densa; aberta; uniforme e descontínua. A curva densa é aquela em que a distribuição é contínua, aproximando-se da máxima densidade (também conhecida como bem graduada). A curva aberta é semelhante à curva densa, mas com pouco material passante na

peneira n. 200 (menor que 0,075 mm). O agregado de graduação uniforme é aquele que possui a maior parte de seu material retido em uma pequena faixa granulométrica. Já a graduação descontínua, ou em degrau, é a que apresenta uma pequena quantidade de material intermediário (BERNUCCI et al., 2008). Um exemplo de curva granulométrica pode ser visto na figura 3.

Figura 3 – Exemplo de curvas granulométricas



(fonte: CALLEJAS et al., 2012).

A limpeza do agregado está relacionada com partículas impróprias, para uso em pavimentação, contidas no agregado. Elas são materiais deletérios como: a vegetação, conchas e grumos de argilas contidas na superfície do agregado. É muito importante fazer uma inspeção nos agregados para que eles possam atender aos limites das especificações de serviço. Para a quantificação da quantidade de impurezas, utiliza-se o ensaio de equivalente de areia (BERNUCCI et al., 2008).

Outra classificação é quanto à resistência à abrasão. O agregado sofre uma grande solicitação ao desgaste quando no processo executivo do revestimento. Além disso, é muito solicitado no decorrer de sua vida útil com a ação do tráfego. Para se mensurar essa característica, é muito comum a utilização do ensaio de abrasão Los Angeles. Nesse, o agregado é submetido ao desgaste, em um cilindro rotativo, através do choque com esferas de aço (BERNUCCI et al., 2008).

Além dessas, pode-se classificar o agregado quanto à sua textura superficial. Essa característica influi diretamente na trabalhabilidade, na adesividade, na resistência ao atrito e ao cisalhamento (BERNUCCI et al., 2008).

Ainda, o agregado pode ser classificado quanto à sua forma. Essa característica influi na trabalhabilidade e na resistência ao cisalhamento, além de mudar a energia de compactação para se atingir a densidade desejada. Para fazer essa análise, é utilizado um índice que varia de 0 a 1, chamado índice de forma. Quanto maior for esse valor, maior é a cubicidade do agregado, e, inversamente, quanto mais próximo de 0, mais angular é o agregado (BERNUCCI et al., 2008).

Outra característica que exerce importante influência é a absorção. Ela pode ser analisada medindo-se a quantidade de água que o agregado é capaz de absorver em um determinado período. Quanto maior a capacidade de absorção, maior será o consumo de ligante (BERNUCCI et al., 2008).

A adesividade é outra característica que exerce grande influência no desempenho do agregado. Ela é definida como a capacidade que o agregado tem de resistir aos efeitos de descolamento pelo efeito da água. Para realização dessa análise pode-se recorrer ao método DNER-ME 078² (1994 apud BERNUCCI et al., 2008), em que é feita uma avaliação visual do agregado coberto com ligante logo após ter sido imerso em água. Ainda, pode-se utilizar o ensaio Lottman modificado, descrito na norma AASHTO T 283-89³ (1989 apud BERNUCCI et al., 2008), que consiste na simulação da presença de água na mistura e de tensões internas decorrentes das cargas de tráfego.

Além disso, pode-se caracterizar o agregado quanto à sanidade. Os agregados, quando expostos a certas condições químicas, podem modificar sensivelmente suas propriedades. Para isso, realiza-se um ensaio de sanidade, que mede a capacidade do agregado de resistir à desintegração química (BERNUCCI et al., 2008).

² DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 078**: agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

³ AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T283** – resistance of compacted bituminous mixture induced damage, 1989.

Outra forma de caracterizar o agregado é através de sua massa específica. Ela pode ser dividida em três tipos: real, aparente e efetiva. A massa específica real considera a massa seca e o volume de sólidos, sem considerar o volume dos poros da superfície (BERNUCCI et al., 2008):

$$G_{sa} = \frac{\text{Massa seca}}{\text{(Volume real)}} \quad (\text{fórmula 1})$$

Já na massa específica aparente, considera-se o volume dos poros da superfície (BERNUCCI et al., 2008):

$$G_{sb} = \frac{\text{Massa seca}}{\text{(Volume aparente)}} \quad (\text{fórmula 2})$$

Enquanto que na massa específica efetiva se considera como volume a parcela do agregado sólido mais o volume dos poros permeáveis à água que não foram preenchidos pelo ligante (BERNUCCI et al., 2008):

$$G_{se} = \frac{\text{Massa seca}}{\text{(Volume efetivo)}} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

G_{sa} = massa específica real do agregado (g/cm^3);

Massa seca = massa seca do agregado (g);

Volume real = volume da partícula sólida do agregado (cm^3);

G_{sb} = massa específica aparente do agregado (g/cm^3);

Volume aparente = volume do sólido mais volume do poro permeável à água (cm^3);

G_{se} = massa específica efetiva do agregado (g/cm^3).

3.3 LIGANTE ASFÁLTICO

Segundo Bernucci et al. (2008, p. 25), tem-se as seguintes definições quanto aos asfaltos:

- a) betume: comumente é definido como uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono;
- b) asfalto: 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;
- c) alcatrão: é uma designação genérica de um produto que contém hidrocarbonetos, que se obtém da queima ou destilação destrutiva do carvão, madeira etc.

É frequente o uso de ligantes asfálticos na área da pavimentação. Isso se deve principalmente ao fato desses materiais possuírem uma série de características que podem agregar qualidade em um pavimento. Segundo Senço (1997, p. 319), os principais atributos que fazem com que esses materiais sejam usados são:

- a) adesividade entre o betume e os agregados, que permite a ligação entre as pedras;
- b) impermeabilidade;
- c) durabilidade das misturas e manutenção das propriedades do betume por muitos anos;
- d) possibilidade de trabalho a diversas temperaturas;
- e) [...] preço competitivo e, em muitos casos, vantajoso em relação a outros materiais utilizados em pavimentação, principalmente na capa de rolamento.

Esses ligantes podem ser classificados, segundo a sua natureza, em três tipos: rochas asfálticas ou arenitos betuminosos; asfaltos nativos ou naturais e asfaltos de petróleo. O primeiro deles são rochas que contém em seus vazios gotículas de asfalto conferindo a esse elemento uma certa flexibilidade. Já os asfaltos naturais são aqueles que se encontram em depósitos naturais, em um estado dissolvido, formando lagos de asfalto. Por último, os asfaltos de petróleo são aqueles que são obtidos através da refinação do petróleo (BERNUCCI et al., 2008).

No Brasil, o refino de petróleo pela Petrobras é realizado através de nove conjuntos de produtores e distribuidores, além de uma unidade de exploração de xisto e fábricas de emulsão asfáltica. Além disso, 60% dos cimentos asfálticos produzidos por ela são de origem nacional. Segundo os tipos de ligantes produzidos no mercado brasileiro, pode-se classificá-los, segundo Bernucci et al. (2008, p. 40), em:

- a) cimentos asfálticos de petróleo (CAP);
- b) asfaltos diluídos (ADP);
- c) emulsões asfálticas (EAP);
- d) asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- e) asfaltos modificados por polímeros (AMP) ou por borracha de pneus (AMB);
- f) agentes rejuvenescedores (AR e ARE).

Os cimentos asfálticos de petróleo, ou CAP, podem ser definidos como um material termo-sensível e aglutinante que possui grande flexibilidade. Ademais, esse material possui alta resistência à ação da maioria dos ácidos inorgânicos, sais e álcalis (PETROBRAS DISTRIBUIDORA, 2012). A tabela 1 apresenta valores normalmente encontrados em alguns CAPs.

Os asfaltos diluídos são materiais de fácil aplicação. Isso se deve ao fato dele ser derivado de CAPs por destilados leves, o que proporciona uma redução temporária na sua viscosidade (SENÇO, 1997).

A emulsão asfáltica pode ser definida como uma dispersão estável de água e asfalto. Essa combinação possui uma fase óleo com elevada viscosidade que faz com que a mistura se torne estável somente com a adição de um agente emulsionante. Esse agente atua na redução da tensão superficial, permitindo a estabilidade da mistura (BERNUCCI et al., 2008).

Os asfaltos oxidados provêm da elevação da temperatura e posterior aeração do mesmo. Devido a essa exposição, consegue-se conferir ao ligante uma maior consistência do que outros ligantes, tornando-os menos vulneráveis a variações térmicas (SENÇO, 1997).

Os asfaltos modificados por polímeros são um conjunto de macromoléculas sintéticas de estrutura simples e repetida contidas no CAP. Essas estruturas são adicionadas no intuito de reduzir a frequência de manutenção e aumentar a vida útil dos pavimentos (BERNUCCI et al., 2008).

Tabela 1 – Características dos Cimentos Asfálticos de Petróleo

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30 45	CAP 50 70	CAP 85 100	CAP 150 200	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 45	50 70	85 100	150 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade SayboltFurol	s					NBR 14950	E 102
a 135 °C, mín		192	141	110	80		
a 150 °C, mín		90	50	43	36		
a 177 °C		40 150	30 150	15 60	15 60		
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	214	155		
a 150 °C, SP, 21, mín.		203	112	97	81		
a 177 °C, SP 21		76 285	57 285	28 114	28 114		
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 mín							D 2872
Variação em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

(fonte: AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2006)

Os agentes rejuvenescedores são substâncias usadas para a reciclagem do pavimento quando este, devido ao envelhecimento, perdeu certos componentes ou sofreu um enrijecimento. Eles atuam como repositores de frações maltênicas do ligante envelhecido (BERNUCCI et al., 2008).

A fim de se atingir uma mistura adequada, é necessário conhecer as principais propriedades do ligante analisado. Para isso, faz-se necessário uma análise laboratorial com diversos ensaios do ligante.

Um desses ensaios é o de penetração. Ele consiste na medida da profundidade que uma agulha pode perfurar uma amostra de ligante durante um tempo determinado. Quanto menor for a profundidade do ensaio, maior será a consistência do CAP (BERNUCCI et al., 2008). A norma brasileira que determina os procedimentos para a execução do ensaio é a NBR 6576⁴ (1998 apud BERNUCCI, 2008).

Outro ensaio muito comum é o de viscosidade. A viscosidade pode ser definida como a deformação do fluido quando submetido a esforços cisalhantes. Para se realizar essa análise se utiliza um aparelho chamado viscosímetro. No Brasil, um dos viscosímetros mais utilizados é o Saybolt-Furol. Esse aparelho é utilizado para ensaios diretamente em campo. O ensaio consiste em colocar a amostra a ser analisada em um tubo, e deixá-lo em um banho com óleo até que se atinja a temperatura adequada. Logo após, é aberto um pequeno orifício no fundo do tubo até que se escoe 60 ml do ligante. O tempo decorrido da abertura do orifício até a marca de 60 ml é o valor da viscosidade em segundos Saybolt-Furol (BERNUCCI et al., 2008).

Outro viscosímetro muito utilizado é o de Brookfield. A grande vantagem desse aparelho é que ele permite uma curva viscosidade-temperatura com apenas uma amostra. Isso se deve ao aparelho permitir diversos valores de tensões de cisalhamento, já que ele possui cilindros coaxiais, em rotação, mergulhados na amostra (BERNUCCI et al., 2008).

Outro ensaio para realizar a análise do ligante é de ponto de amolecimento. Esse ensaio é feito com o intuito de se obter a medida da temperatura que o ligante amolece. Ele é realizado através de uma pequena esfera de aço, colocada em cima de uma amostra de ligante confinada que é aquecida, a uma determinada taxa, até que a superfície do ligante não possa mais suportar o peso da esfera. A temperatura do ensaio é quando a esfera toca o fundo do recipiente (BERNUCCI et al., 2008).

⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.576**: cimento asfáltico de petróleo – especificação de material. Rio de Janeiro, 1998.

Além desses, pode-se avaliar a coesão dos ligantes. Esse parâmetro é obtido através do ensaio de ductilidade que consiste em medir a capacidade que o material tem de se alongar longitudinalmente. O ensaio é realizado moldando o ligante em formato de um osso e colocando-o imerso em água. Quando o filamento é rompido, é obtida a medida da ductilidade através do alongamento suportado pelo ligante (BERNUCCI et al., 2008).

Para se medir a quantidade de betume em uma amostra, faz-se necessário um ensaio de solubilidade. Ele é realizado dissolvendo uma amostra do ligante e, logo após, realizando uma filtragem. A quantidade dissolvida e restante (não filtrada) indica a quantidade de betume (BERNUCCI et al., 2008).

Ainda, um ensaio muito importante para a segurança é o de fulgor. Ele consiste em medir a menor temperatura em que o ligante, em contato com uma chama, é capaz de inflamar os gases emanados durante o aquecimento. Diminuindo, com isso, os riscos de incineração durante as fases de estocagem, transporte e usinagem (BERNUCCI et al., 2008).

3.4 CAL

De acordo com a NBR 7.175 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 2), a cal pode ser definida como: “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.”.

A cal hidratada pode ser classificada em: calcítica, dolomítica ou magnésiana. Essa classificação depende do teor de óxido de cálcio contido. Se esse teor for maior que 90%, ela é classificada como calcítica. A cal magnésiana é uma cal intermediária, que possui teores de óxido de cálcio entre 65% e 90 %. Já a cal dolomítica é a que apresenta o menor teor de óxido de cálcio, com valores compreendidos entre 58% e 65% (BOCK, 2012).

Além disso, pode-se classificar a cal hidratada de acordo com a sua qualidade. As cales são submetidas a ensaios e são classificadas em CH I, CH II ou CH III. Sendo que CH I é aquela que apresenta os melhores resultados nos ensaios. Por conseguinte, CH II apresenta um

resultado intermediário e a CH III é a que apresenta os piores resultados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Quanto a sua utilização, a cal tem uma ampla gama de aplicações. Ela é utilizada na construção civil; siderurgia; pelletização; celulose; açúcar; fosfatos; alumínio; tratamento de água; químicos; cítricos e papel. Ademais, ela está entre os dez produtos de origem mineral mais consumidos no mundo. O ramo da construção civil é um dos maiores consumidores desse produto. Nesse, ela é utilizada nas argamassas, nas pinturas, na estabilização de solos, nas misturas asfálticas e nos blocos de tijolos construtivos (BOCK, 2012).

A utilização da cal em misturas asfálticas começou a partir de 1970. Isso se deve a uma forte crise no petróleo que, em consequência, diminuiu drasticamente a qualidade de ligante. E, devido a isso, começaram a surgir diversos problemas nos revestimentos asfálticos. Muitos aditivos foram testados na tentativa de reduzir os efeitos causados pela diminuição da qualidade do ligante. Desses aditivos testados, a cal hidratada foi a que apresentou resultados mais promissores (HICKS⁵, 1991 apud BOCK, 2012).

Sabe-se, atualmente, que a cal é capaz de melhorar diversas características do revestimento asfáltico. Uma delas é a capacidade de reduzir os efeitos de envelhecimento do ligante asfáltico. Além disso, ela pode ser usada como um ótimo aditivo para prevenir danos causados pela umidade. Ainda, ela tem um excelente desempenho como redutor dos trincamentos por fadiga e das deformações permanentes. Estudos franceses indicam que a incorporação de cal resulta em uma durabilidade do pavimento em torno de 20% a 25% maior (EUROPEAN LIME ASSOCIATION⁶, 2010 apud BOCK, 2012).

A adição de cal reduz o envelhecimento devido ao hidróxido de cálcio da cal reagir com as moléculas polarizadas do ligante, que, em uma situação sem adição de cal, se romperiam quando em contato com o meio ambiente. Igualmente, o contato da cal com as moléculas polarizadas do ligante aumenta o seu volume efetivo, gerando, em consequência, um desvio

⁴ HICKS, R. P. Moisture damage in asphalt concrete. **National Cooperative Highway Research Program: synthesis of highway practice**, Washington, n. 175, p. 1-91, 1991.

⁶ EUROPEAN LIME ASSOCIATION. Hydrated lime: a proven additive for durable asphalt pavements – critical literature review. Report to the European Lime Association / Asphalt Task Force. Sept. 2010.

das microfissuras causadoras de trincamento por fadiga (GRANICH⁷, 2010 apud CASTRO, 2011).

Os EUA é um país que possui a maior aplicação dessa tecnologia. Segundo pesquisas, “[...] estima-se que 10 % dos concretos asfálticos produzidos no EUA têm incorporação de cal hidratada.”. No continente europeu, esse uso começou a crescer largamente. Na Holanda, cerca de 70 % das rodovias já utilizam a cal hidratada nos pavimentos (HICKS; SCHOLZ⁸, 2003 apud BOCK, 2012, p. 38).

No Brasil, o emprego da cal hidratada ainda está no começo. A utilização dessa, na grande maioria dos casos, tem como único objetivo a funcionalidade de material de enchimento (*filer*), sem levar em consideração as qualidades que a cal hidratada pode agregar na mistura asfáltica. Contudo, essa situação está mudando, as instituições brasileiras estão cada vez mais cientes da capacidade que a cal possui de melhorar a mistura asfáltica. Inclusive, já existem especificações exigindo o seu uso (BOCK, 2012).

⁷ 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, 2010.

⁸ HICKS, R. G.; SCHOLZ, T. V. Life Cycle Costs for Lime in Hot Mix Asphalt. **National Lime Association**, Arlington, Virginia, USA, v. 3, 2003.

4 PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO

Neste capítulo são apresentados os procedimentos para realização da dosagem e para a realização dos ensaios mecânicos.

4.1 DOSAGEM

Os procedimentos para a realização da dosagem são descritos nos itens a seguir.

4.1.1 Conceito e tipos

A dosagem de uma mistura asfáltica pode ser definida como a determinação laboratorial de um teor de ligante ótimo. No entanto, a definição desse ponto específico não é exata. Ela pode variar de acordo com o critério utilizado. Devido a isso, torna-se mais adequado utilizar o termo teor de projeto, ao invés de teor ótimo (BERNUCCI et al., 2008).

No Brasil, o método mais utilizado para obter o teor de ligante é o de dosagem Marshall. O procedimento de compactação consiste na utilização de um soquete Proctor de 3 7/8" para exercer 75 golpes no corpo de prova. (BERNUCCI et al., 2008).

4.1.2 Definições de massas

Para realizar a dosagem, primeiramente é necessário realizar o cálculo de massa. A massa específica aparente de mistura asfáltica compacta pode ser definida como (BERNUCCI et al., 2008):

$$G_{mb} = \frac{M_s}{V_a + V_{ag-efetivo} + V_{ar}} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

G_{mb} = massa específica aparente (g);

M_s = massa seca do corpo de prova compactado (g);

V_a = volume do asfalto (cm³);

$V_{ag-efetivo}$ = volume efetivo do agregado (cm³);

V_{ar} = volume de ar (cm³).

Ainda, de acordo com Bernucci et al. (2008), ela pode ser definida como:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_{SSS_{sub}}} * 0,9971 \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

G_{mb} = massa específica aparente (g);

M_{SSS} = massa de corpo de prova compactado na condição de superfície saturada seca, que corresponde ao corpo de prova com os poros superficiais saturados, sendo eliminado o excesso de água (g);

$M_{SSS_{sub}}$ = massa de corpo de prova compactado na condição de superfície saturada seca e posteriormente submerso em água (g);

0,9971 = massa específica da água a 25 °C (g/cm³).

Existem dois métodos de se medir a M_{SSsub} . Um deles é utilizado em corpos de prova que absorvam no máximo 2% de água, e é realizado com o corpo de prova diretamente submerso em água. Para essa metodologia, deve-se utilizar o procedimento ASTM D 2726⁹. A outra metodologia é utilizada com o corpo de prova envolto em material impermeável. Para essa, deve-se utilizar o procedimento ASTM D 1188¹⁰ (BERNUCCI et al., 2008).

Ainda, de acordo com o DNER-ME 117 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994a), pode-se definir a massa específica aparente da seguinte maneira:

⁹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2726**: standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures. USA, 2000.

¹⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1188**: standard test method for bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using paraffin-coated specimens. USA, 2000.

$$Gmb = \frac{Ms}{Ms - Ms_{sub}} * 0,9971 \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

Gmb = massa específica aparente (g);

Ms = massa seca do corpo de prova compactado (g);

Ms_{sub} = massa seca do corpo de prova posteriormente submerso em água (g).

4.1.3 Dosagem Marshall

Para a determinação da Dosagem Marshall uma série de procedimentos devem ser adotados (BERNUCCI et al., 2008):

- a) determinar as massas específicas do CAP e dos agregados;
- b) selecionar a faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica;
- c) definir a composição dos agregados de acordo com a faixa granulométrica escolhida;
- d) definir as temperaturas de mistura e de compactação;
- e) adotar os teores de asfalto;
- f) obter a volumetria (as dimensões dos corpos de prova (CPs). Determinar para cada corpo de prova suas massas seca (MS) e submersa em água (MS_{sub})). Obter a massa específica aparente dos corpos de prova (Gmb), comparar com a massa específica máxima teórica (DMT) e obter as relações volumétricas típicas da dosagem;
- g) ajustar o percentual em massa de cada agregado;
- h) calcular a DMT correspondente ao teor de asfalto considerado;
- i) calcular os parâmetros de dosagem para cada CP conforme as fórmulas 9 a 12;
- j) realizar as medidas volumétricas: submergir os corpos de prova em banho maria, retirar os corpos de prova colocando-os imediatamente dentro do molde de compressão, determinar, por meio da prensa Marshall, a estabilidade e a fluência.

Para o cálculo desses procedimentos são utilizadas as seguintes relações (BERNUCCI et al., 2008):

$$V = M_S - M_{Ssub} \quad (\text{fórmula 7})$$

$$Gmb = \frac{M_s}{V} \quad (\text{fórmula 8})$$

$$V_v = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \quad (\text{fórmula 9})$$

$$\sum \%n = 100 - \%a \quad (\text{fórmula 10})$$

$$VAM = 100 - \frac{Gmb * \sum \%n}{G_{sb}} \quad (\text{fórmula 11})$$

$$RBV = 100 * \frac{VAM - V_v}{VAM} \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

V = volume do corpo de prova (cm³);

M_S = massa seca do corpo de prova compactado (g);

M_{Ssub} = massa seca do corpo de prova posteriormente submerso em água (g);

G_{mb} = massa específica aparente (g);

V_v = volume de vazios (cm³);

DMT = densidade máxima teórica (g/cm³);

∑ % n = porcentagem em massa dos agregados (%);

%a = teor de asfalto (%);

VAM = vazios do agregado mineral (%);

G_{sb} = massa específica aparente do agregado (g/cm³);

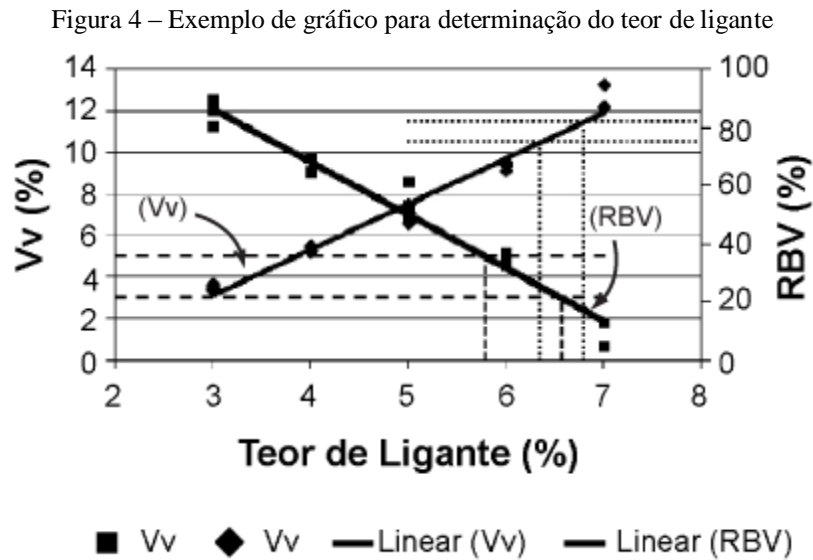
RBV = relação betume/vazios (%).

4.1.4 Determinação do teor de projeto de ligante asfáltico

Para a determinação do teor de ligante asfáltico existem diferentes métodos. Pode-se realizar essa escolha tendo como base o volume de vazios, correspondente a 4% ou à média das especificações. Além disso, pode-se obtê-lo tendo como base a estabilidade Marshall, a partir da massa específica aparente e do volume de vazios. Sendo que neste caso, deve-se realizar uma média do teor de máxima estabilidade, massa específica aparente máxima da amostra compactada e a de um volume de vazios de 4% (BERNUCCI et al., 2008).

Além dessas, outra metodologia é aquela que utiliza os parâmetros de volume de vazios e a relação betume /vazios. Nessa, primeiramente agrupam-se os corpos de prova de mesmo valor de teor (teor - 1%; teor - 0,5%; teor; teor + 0,5%; teor + 1%). Em seguida, com esses cinco valores médios pode-se traçar um gráfico que relaciona o teor de asfalto e volume de vazios e relação betume/vazios, adicionando uma linha de tendência para esses dados. Assim, com a

interseção das linhas de tendência com seus respectivos valores máximos e mínimos encontram-se quatro valores de teores. O teor escolhido é obtido obtendo-se uma média dos teores centrais, como ilustrado na figura 4 (BERNUCCI et al., 2008).



(fonte: NUNES et al., 2009).

4.2 ENSAIOS

Os Seguintes procedimentos dos ensaios são descritos nos itens a seguir:

- a) resistência à tração;
- b) dano por umidade induzida;
- c) Módulo de resiliência.

4.2.1 Resistência à tração

Medir diretamente a resistência à tração é um procedimento muito difícil de ser realizado, em virtude disso, surgiram métodos para se obter de forma indireta esse parâmetro. No Brasil, um dos métodos mais utilizados é o do professor Lobo Carneiro, do Rio de Janeiro (BERNUCCI et al., 2008).

A grande utilização desse ensaio é devida, principalmente, a sua simplicidade e rapidez de utilização. Além disso, esse ensaio tem a facilidade de utilizar o mesmo corpo de prova cilíndrico e o mesmo equipamento utilizado para obtenção da resistência à compressão do concreto de cimento Portland (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com a norma DNER-ME 138 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994c, p. 2), a seguinte aparelhagem é necessária para a execução do ensaio:

- a) prensa mecânica, com sensibilidade inferior ou igual a 19,60 N (ou 2,0 kgf), com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s;
- b) estufa capaz de manter a temperatura entre 30° C e 60° C;
- c) sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura em torno de 25° C;
- d) paquímetro.

Ainda, essa Norma indica que o corpo de prova deve ter forma cilíndrica. Quanto as suas dimensões, o CP deve ter uma altura compreendida entre 3,5 cm e 6,5 cm, enquanto que o seu diâmetro deve ser de 10 cm, permitindo uma tolerância de 0,2 cm, para mais, ou para menos.

Para a execução do ensaio, deve-se seguir os seguintes procedimentos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994c):

- a) realizar quatro medidas da altura do corpo de prova, através de um paquímetro. Os locais das medidas devem ser opostos diametralmente. Após, calcular a média dessas alturas, e adotá-la como a altura do corpo de prova;
- b) através do paquímetro, medir o diâmetro do CP em três posições diferentes e paralelas entre si. Em seguida, calcular a média e adotá-la com o diâmetro do corpo de prova;
- c) durante um período de 2 horas, deixar o corpo de prova em uma estufa ou sistema de refrigeração. Obter a temperatura específica para o ensaio (25, 30,

45, ou 60°C). Após, colocar o corpo de prova sobre o prato inferior da prensa, em uma posição horizontal;

- d) verificar se há ocorrência de desvios sensíveis. Se houver, colocar, entre os pratos da prensa e o CP, dois frisos metálicos curvos ao longo dessa geratriz, de mesmo comprimento do corpo de prova. Além disso, deve-se ajustar os pratos da prensa até que se obtenha uma leve compressão a fim de manter a posição do corpo de prova;
- e) aplicar a carga de forma progressiva até que se rompa o corpo de prova, separando-se em duas metades segundo o plano diametral vertical. A velocidade de deformação deve ser $0,8 \pm 0,1$ mm/s;
- f) calcular a resistência à tração.

Após a execução desses passos, pode-se calcular a resistência à tração através da seguinte fórmula:

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

Onde:

σ_R = resistência à tração (MPa);

F' = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = altura do corpo de prova (cm);

4.2.2 Dano por umidade induzida

Uma patologia muito comum na pavimentação é o desprendimento do agregado. O ensaio de dano por umidade induzida tem a função de avaliar possíveis problemas de adesividade do agregado com o ligante, avaliando os efeitos deletérios da água.

Para se realizar esse ensaio, Bernucci et al. (2008) recomendam os seguintes passos:

- a) moldar seis corpos de prova: Cada um deles deve possuir 1.200 g de massa e vazios de 7 ± 1 %;
- b) selecionar três corpos de prova e colocar em sacos plásticos. Após, imergi-los em água a 25°C por 2 ± 1 h;

- c) colocar os outros três corpos de prova em um recipiente com água destilada. Aplicar vácuo durante 5 a 10 min para se obter um grau de saturação de 70 a 80 % de água;
- d) recobrir os CPs com filme plástico e colocá-los dentro de um saco plástico vedado com 10 ml de água. Colocar para congelamento o CPs do item 'c' por um período mínimo de 16 h;
- e) imergir esses CPs em água a uma temperatura de 60°C. Logo após devem ser retirados dos CPs o saco plástico e o filme. Os corpos de prova devem ficar imersos por um período 24 ± 1 h;
- f) após o período de 24 h, retirá-los do banho e imergi-los novamente em outro banho a 25°C. Eles devem permanecer por um período de 2 ± 1 h;
- g) realizar o ensaio de resistência a tração nos dois grupos de três CPs (condicionados e não condicionado);
- h) calcular a resistência a tração por umidade induzida.

Uma observação importante a ser salientada é que quando utilizado a dosagem Marshall com vazios compreendidos entre 6 e 8%, os corpos de prova devem ser moldados com diferentes números de golpes (BERNUCCI et al., 2008).

4.2.3 Módulo de resiliência

Segundo a norma DNER-ME 133 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994b, p. 2), pode-se conceituar o módulo de resiliência para misturas asfálticas como sendo “[...] a relação entre a tensão de tração (σ_t) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica (ϵ_t) correspondente a tensão aplicada, numa dada temperatura (T)”. Esse módulo pode ser obtido a partir da seguinte fórmula:

$$MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (\text{fórmula 15})$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (kgf/cm²);

σ_t = tensão de tração (kgf/cm²);

ϵ = deformação de tração do diâmetro horizontal (adimensional).

Segundo Bernucci et al. (2008), esse módulo depende diretamente das características da mistura asfáltica, sendo possível dosar uma mistura para se obter um determinado módulo de resiliência almejado. As propriedades que alteram o MR são as seguintes:

- a) tipo da mistura;
- b) faixa granulométrica;
- c) tipo de ligante asfáltico;
- d) propriedades volumétricas;
- e) energia de compactação;
- f) temperatura de compactação;
- g) temperatura de ensaio.

Outrossim, segundo a norma DNER-ME 133 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994b), é necessário possuir os seguintes equipamentos para a realização do ensaio:

- a) prensa;
- b) sistema pneumático de carregamento;
- c) sistema de medição de deformação do corpo de prova;
- d) sistema automático de refrigeração e aquecimento.

Para a realização dos ensaios, a seguinte metodologia da montagem do ensaio deve ser seguida (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994b, p. 2):

- a) prender o quadro-suporte, por meio de duas garras, nas faces extremas do corpo de prova cilíndrico, que se encontra apoiado horizontalmente segundo uma diretriz;
- b) colocar o corpo de prova na base da prensa, apoiado no friso côncavo inferior;
- c) assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com o corpo de prova diametralmente oposto ao friso inferior;
- d) fixar e ajustar os transdutores LVDT, de modo a obter o registro no oscilógrafo, no início da escala linear dos mesmos;
- e) ajustar o leitor para o registro de deslocamentos horizontais do corpo de prova.

Após a preparação do equipamento, aplica-se 80 vezes uma carga vertical F , com uma velocidade de 60 ciclos por minuto, com duração de 0,1 segundos. Essa força deve ser

aplicada diametralmente ao corpo de prova, com a finalidade de se obter uma tensão de tração menor ou igual a 30% da tensão obtida no ensaio de compressão diametral estático. Logo em seguida, registrar os valores da deformação resiliente para 55, 65 e 75 aplicações da carga F. Assim, de posse desses dados, o módulo de resiliência pode ser obtido a partir da seguinte relação (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994b):

$$MR = \frac{F * (0,7801 * \mu + 0,2339)}{\Delta * H} \quad (\text{fórmula 16})$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

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

Δ = deformação elástica ou resiliente para as cargas de 55, 65 e 75 aplicações da carga F (cm);

H = altura do corpo de prova (cm);

μ = coeficiente de Poisson (adimensional).

Ainda, vale salientar que, segundo Bernucci et al. (2008), o coeficiente de Poisson não varia com o tipo de carregamento, ele varia apenas com a temperatura, oscilando entre valores de 0,35 para temperaturas baixas e 0,50 para temperaturas altas. O valor utilizado no Brasil é de 0,30.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são caracterizados o ligante asfáltico, os agregados, e as cales utilizadas. Ainda, são descritos os métodos laboratoriais utilizados.

5.1 MATERIAIS

Foram utilizados como materiais: cales, ligante asfáltico e agregados pétreos. As suas caracterizações foram realizadas através de ensaios laboratoriais que são descritos a seguir.

5.1.1 Agregado

Os agregados utilizados para essa pesquisa são todos de origem granítica, coletados de uma única pedreira na cidade de Porto Alegre. Na mineradora, esses agregados foram britados e separados em pilhas de acordo com sua granulometria.

Os agregados foram coletados diretamente das pilhas, tendo o cuidado de diversificar o máximo possível o local de coleta, dentro de uma mesma pilha. Foram utilizados três tamanhos de agregados: 1", ¾" e pó de pedra.

Esses materiais foram peneirados mecanicamente, separados de acordo com sua granulometria e lavados. Posteriormente, adequaram-se as quantidades encontradas com as curvas granulométrica obtidas por Tamanini (2012), apresentadas na tabela 2 e no gráfico na figura 5.

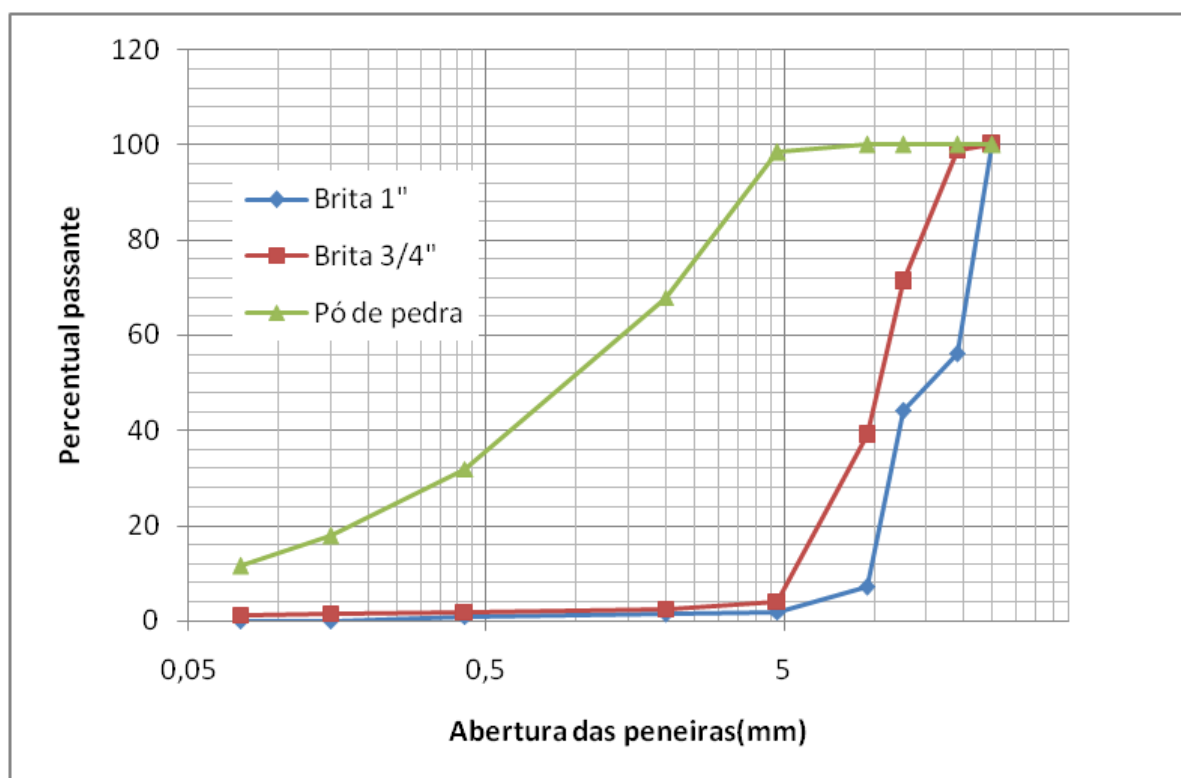
Ainda, obteve-se, através de Tamanini (2012), os resultados dos ensaios de abrasão, índice de forma e densidade do agregado graúdo e miúdo. Os resultados obtidos nesses ensaios são apresentados na tabela 3.

Tabela 2 – Distribuição granulométrica

Peneiras		Passante (%)		
n°	mm	Brita 1"	Brita 3/4"	Pó de pedra
1"	25	100	100	100
3/4"	19	56	98,9	100
1/2"	12,5	44	71,2	100
3/8"	9,5	7	38,9	100
4	4,75	1,9	4	98,4
10	2	1,4	2,4	67,8
40	0,425	0,8	1,9	31,9
100	0,15	0	1,5	17,8
200	0,075	0	1,1	11,5

(fonte: TAMANINI, 2012)

Figura 5 – Curvas granulométrica dos agregados empregados



(fonte: TAMANINI, 2012)

Tabela 3 – Caracterização do agregado

Características	Norma	Especificação	Resultados
Perda por abrasão (%)	DNER 035/1998	<50	33,58
Índice de Forma (%)	DNER 086/1994	>50	62
Massa específica do agregado graúdo (g/cm ³)	DNER 081/1998	NE	2,57
Absorção (%)		NE	0,961
Massa específica do agregado miúdo (g/cm ³)	DNER 084/1995	NE	2,67

(fonte: TAMANINI, 2012)

Posteriormente, realizou-se o ensaio de adesividade, conforme a norma DNER-ME 078¹¹. Neste, foram selecionados 500g de agregados passantes da peneira 3/4” e retidos na peneira 1/2”. A cal foi incorporada antes da adição do ligante, tomando os devidos cuidados para que ela cobrisse toda superfície dos agregados. Para essa pesquisa, foram realizados 8 ensaios de adesividade, com adição de 1, 2, 3 e 4% de cal para cada tipo (dolomítica e calcítica), relativos aos 500g de agregado. Ainda, como referência, utilizaram-se resultados do ensaio de adesividade realizado por Tamanini (2012). Os resultados podem ser vistos nas figuras de 6 a 14.

Os resultados de adesividade ligante-agregado foram satisfatórios quando se incorporaram 3 e 4% de cal, sendo que com 4% obtiveram-se os melhores resultados. Tendo em vista que o DNIT aconselha a adição de no máximo 2%, principalmente em função da difícil trabalhabilidade de concretos asfálticos com teores muito elevados de cal, e o ensaio que apresentou o melhor resultado foi de 4%, optou-se escolher o valor intermediário de 3% para dar continuidade aos ensaios.

¹¹ DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 078**: agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

Figura 6 – 1% de cal calcítica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 7 – 2% de cal calcítica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 8 – 3% de cal calcítica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 9 – 4% de cal calcítica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 10 – Referência



(fonte: TAMANINI, 2012)

Figura 11 – 1% de cal dolomítica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 12 – 2% de cal dolomítica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 13 – 3% de cal dolomítica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 14 – 4% de cal dolomítica



(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.2 Ligante asfáltico

O ligante escolhido para realizar as misturas foi o CAP 50/70 distribuído pela Greca Asfaltos. Este ligante foi escolhido por ser convencionalmente utilizado em obras de pavimentação no sul do Brasil. Os ensaios de caracterização do CAP foram realizados pela empresa fornecedora e são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização do ligante

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D5	50 a 70	59	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D36	46 min	49,2	grau C
Viscosidade Brookfield 135GC-SP21 20 RPM	D4402	274 min	387,5	cp
Viscosidade Brookfield 150GC-SP21	D4402	112 min	198	cp
Viscosidade Brookfield A 177GC SP21	D4402	57 a 285	74	cp
RTFOT Penetração Retida	D5	55 min	64	%
RTFOT-Aumento do Ponto de Amolecimento	D36	8 max	4,2	grau C
RTFOT-Ductibilidade a 25 GC	D113	20 min	>147	cm
RTFOT Variação em % de Massa	D2872	-0,5 a 0,5	-0,097	%
Ductibilidade a 25 GC	D113	60 min	>147	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D2042	99,5 min	100	% massa
Ponto de Fulgor	D92	235 min	>236	grau C
Índice de susceptibilidade Térmica	X018	-1,5 a 0,7	-1	N/A
Densidade Relativa 20/4 graus Celsius	D70	-	1	g/cm ³

(fonte: GRECA ASFALTOS, 2012)

5.1.3 Cales

A utilização da cal nesse estudo tem como principal função o melhoramento da adesividade agregado ligante, já que o granito apresenta grandes problemas de adesividade. Para esse estudo, foram utilizadas dois tipos de cales: calcítica e dolomítica.

A cal calcítica foi escolhida por apresentar uma quantidade maior de hidróxido de cálcio (maiores que 90%). Essa característica faz com que ela seja fortemente indicada pela bibliografia, pois o desempenho está diretamente relacionado com a quantidade de hidróxido de cálcio, tendo resultados melhores para maiores teores. A cal utilizada nessa pesquisa foi obtida da empresa Cobrascal Ltda., na cidade de Mairiporã, no estado de São Paulo. Essa cal foi trazida de outro estado porque o Rio Grande do Sul não possui cales com elevados teores de óxido de cálcio.

A cal dolomítica foi obtida no Estado do Rio Grande do Sul. Ela foi escolhida por ser facilmente encontrada no estado, onde é vastamente utilizada nas obras de pavimentação. Entretanto, este tipo de cal vinha sendo empregada sem que se tivesse realizado previamente uma amplo estudo a respeito das modificações que ela causa nas misturas asfálticas. Essa situação começou a mudar com a pesquisa de Bock (2012), especificamente para concretos asfálticos com agregados graníticos.

As propriedades físicas e químicas das cales utilizadas podem ser observadas na tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Caracterização química das cales

Característica (%)	Calcítica	Dolomítica
Perda ao fogo (1000 ± 50o)	23,5	23,9
Óxido de cálcio (CaO)	71,2	41,3
Óxido de magnésio (MgO)	0,5	27,7
Resíduo insolúvel (SiO ₂)	2,3	6,1
Óxidos de ferro e alumínio (Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃)	1,1	1,1
Óxido de cálcio (CaO) disponível	63,1	35,1

(fonte: BOCK, 2012)

Tabela 6 – Caracterização física das cales

Característica (%)	Passante da #200 (<0,0075 mm)	Massa específica aparente solta (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)
Calcítica	95,45	0,496	2,239
Dolomítica	88,10	0,546	2,320

(fonte: BOCK, 2012)

5.2 MÉTODOS e RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos laboratoriais executados ao longo da pesquisa. Eles correspondem à metodologia utilizada na moldagem dos corpos de prova e, também, aos ensaios mecânicos realizados para analisar os comportamentos da mistura asfáltica.

5.2.1 Projeto e metodologia Marshall

Para a moldagem dos corpos de prova, a metodologia escolhida foi a dosagem Marshall. Como primeira etapa, logo após o peneiramento do agregado, foi corrigida a curva granulométrica para coincidir com as curvas encontradas por Tamanini (2012), já que algumas frações apresentavam alguma diferença. Em seguida, foi definido como curva de projeto os percentuais encontrados por Tamanini (2012). Este foi desenvolvido visando enquadrar a distribuição granulométrica na faixa 1 da Secretaria Municipal de Obras e Viação da Cidade de Porto Alegre (SMOV/POA), conforme a tabela 7. Além disso, ela também está inserida dentro da faixa B do DNIT, exposta na tabela 8, utilizada para o projeto de camadas de ligação e de rolamento do pavimento. Na tabela 9 e figura 11 é apresentada a distribuição utilizada no projeto com as faixas de projeto.

Definida a curva a ser utilizada no projeto, deu-se seguimento aos procedimentos com a incorporação de cal.

Como já exposto, com base nos resultados dos ensaios de adesividade, foi decidido utilizar um teor de 3% de cal nos concretos asfálticos. Essa adição ocorreu a seco, anteriormente à adição do ligante, procurando cobrir todo o agregado com a fração de cal. Além disso, por ser de difícil aplicação em campo, evitou-se a incorporação com agregado úmido, realizando a simples aplicação a seco, tendo em vista uma futura aplicação prática do trabalho.

Tabela 7 – Faixa 1 de projeto da SMOV/POA

Peneiras		Passante (%)		
n°	mm	Limite Inferior	Limite Superior	Tolerância
1”	25	100	100	± 7
3/4"	19	80	95	± 7
1/2"	12,5	65	80	± 7
3/8"	9,5	57	72	± 7
4	4,75	40	55	± 5
10	2	27	40	± 5
40	0,425	15	25	± 5
100	0,15	8	17	± 3
200	0,075	4	8	± 2

(fonte: adaptado de PORTO ALEGRE)

Tabela 8 – Faixa B do DNIT

Peneiras		Passante (%)		
n°	mm	Limite Inferior	Limite Superior	Tolerância
1”	25	95	100	± 7
3/4"	19	80	100	± 7
1/2"	12,5	-	-	± 7
3/8"	9,5	45	80	± 7
4	4,75	28	60	± 5
10	2	20	45	± 5
40	0,425	10	32	± 5
80	0,18	8	20	± 3
200	0,075	3	8	± 2

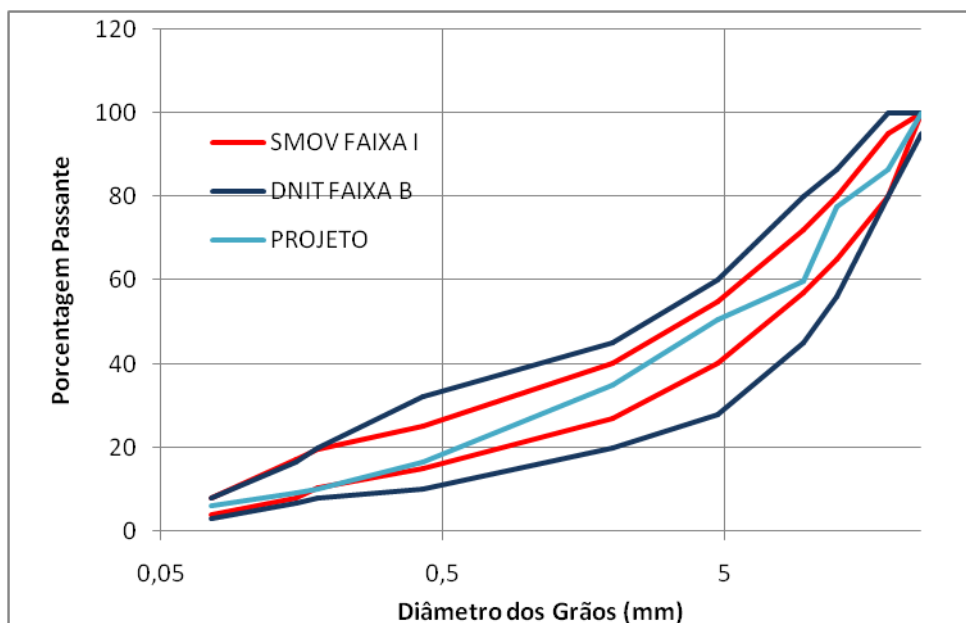
(fonte: adaptado de DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006)

Tabela 9 – Composição granulométrica de projeto

Peneiras		Passante (%)		
nº	Mm	30%	20%	50%
		Brita 1"	Brita 3/4"	Pó de pedra
1"	25,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	56,0	98,9	100,0
1/2"	12,5	44,0	71,2	100,0
3/8"	9,50	7,0	38,9	100,0
4	4,75	1,9	4,0	98,4
10	2,00	1,4	2,4	67,8
40	0,425	0,8	1,9	31,9
100	0,150	0,0	1,5	17,8
200	0,075	0,0	1,1	11,5

(fonte: TAMANINI, 2012)

Figura 15 – Curva granulométrica de projeto e faixa 1 da SMOV/POA e faixa B do DNIT



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 10 – Distribuição granulométrica de projeto

Peneiras		Passante (%)
		100%
n°	Mm	Projeto
1”	25,0	100,0
3/4”	19,0	86,58
1/2”	12,5	77,44
3/8”	9,50	59,88
4	4,75	50,57
10	2,00	34,82
40	0,425	16,55
100	0,150	9,23
200	0,075	5,97

(fonte: TAMANINI, 2012)

Após essa etapa, realizou-se o aquecimento dos materiais empregados na mistura. O ligante foi aquecido em estufa até alcançar uma temperatura de 153°C. Esta temperatura foi escolhida por recomendação do fabricante. Além disso, também por recomendação do fabricante, o agregado foi aquecido em estufa até uma temperatura de 163°C. Em sequência os materiais foram colocados em um misturador mecânico para posterior moldagem em um compactador mecânico, utilizando 75 golpes.

Para definir o teor ideal realizou-se a moldagem de 3 CPs para cada uma das 5 porcentagens de teores escolhidos: 6,0, 5,5, 5,0, 4,5 e 4,0%. Especificamente para o projeto em que se utilizou a incorporação de cal calcítica, moldou-se uma porcentagem adicional de 3,4%. Essa moldagem adicional ocorreu devido à cal reduzir consideravelmente o volume de vazios da mistura e, utilizando um valor de 4% de volume de vazios para determinação do teor ideal, resultou em uma porcentagem de ligante menor que 4% para o teor ideal. No dia seguinte a moldagem, os CPs foram levemente aquecido – com a finalidade de facilitar a desmoldagem.

Em sequência, foi realizada a medida das alturas dos CPs. O procedimento ocorreu da seguinte forma: foram medidos quatro alturas opostas diametralmente e tomada como altura a média delas.

Ainda, realizou-se o ensaio de volumetria. Este ocorreu com a finalidade determinar as propriedades volumétricas dos corpos de prova. Neste ensaio os CPs foram pesados secos, posteriormente imersos em água a 25 °C por 4 ± 1 minutos e pesados novamente (imersos na água). Ainda, foi realizada a pesagem com superfície seca.

Por fim, realizaram-se os ensaios de estabilidade e fluência. Para esse procedimento, os CPs foram imersos em banho a uma temperatura de 60 °C por um tempo de 30 minutos. Logo após, foram retirados do banho, colocados nos moldes de compressão e rompidos. Através da deformação do anel metálico ao rompimento obteve-se a estabilidade. Além disso, nesse mesmo processo, através de um defletômetro, pode-se medir a fluência.

Com esses dados obtidos, pode-se realizar a caracterização das misturas para cada porcentagem de ligante. Os resultados estão expostos nas tabelas 10 e 11 e nas figuras 12 e 13 para mistura com cal calcítica e dolomítica. Além disso, na tabela 12 e na figura 14, são apresentados os resultados de referência.

Tabela 11 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico com adição de cal calcítica

Teor de ligante	Unidade	3,4	4	4,5	5	5,5	6
DMM – Rice	g/cm ³	2,457	2,435	2,417	2,400	2,382	2,365
Densidade Aparente	g/cm ³	2,324	2,363	2,417	2,400	2,382	2,365
Volume de vazios	%	5,43	2,98	2,07	1,54	0,89	0,48
Vazios do agregado mineral	%	13,33	12,43	12,72	13,35	13,87	14,60
Relação Betume Vazios	%	59,29	76,04	83,74	88,47	93,60	96,70
Estabilidade	kgf	-	810,00	606,67	566,67	413,33	476,67
Fluência (0,01")	pol	-	13,44	17,27	17,36	18,40	20,84

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 12 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico com adição de cal dolomítica

Teor de ligante	Unidade	4	4,5	5	5,5	6
DMM – Rice	g/cm ³	2,438	2,420	2,402	2,384	2,367
Densidade Aparente	g/cm ³	2,348	2,420	2,402	2,384	2,367
Volume de vazios	%	3,67	2,37	1,79	1,03	0,72
Vazios do agregado mineral	%	13,07	13,00	13,58	14,01	14,82
Relação Betume Vazios	%	71,89	81,76	86,83	92,63	95,16
Estabilidade	kgf	713,33	663,33	520,00	476,67	406,67
Fluência (0,01'')	pol	13,02	16,34	15,76	17,01	19,15

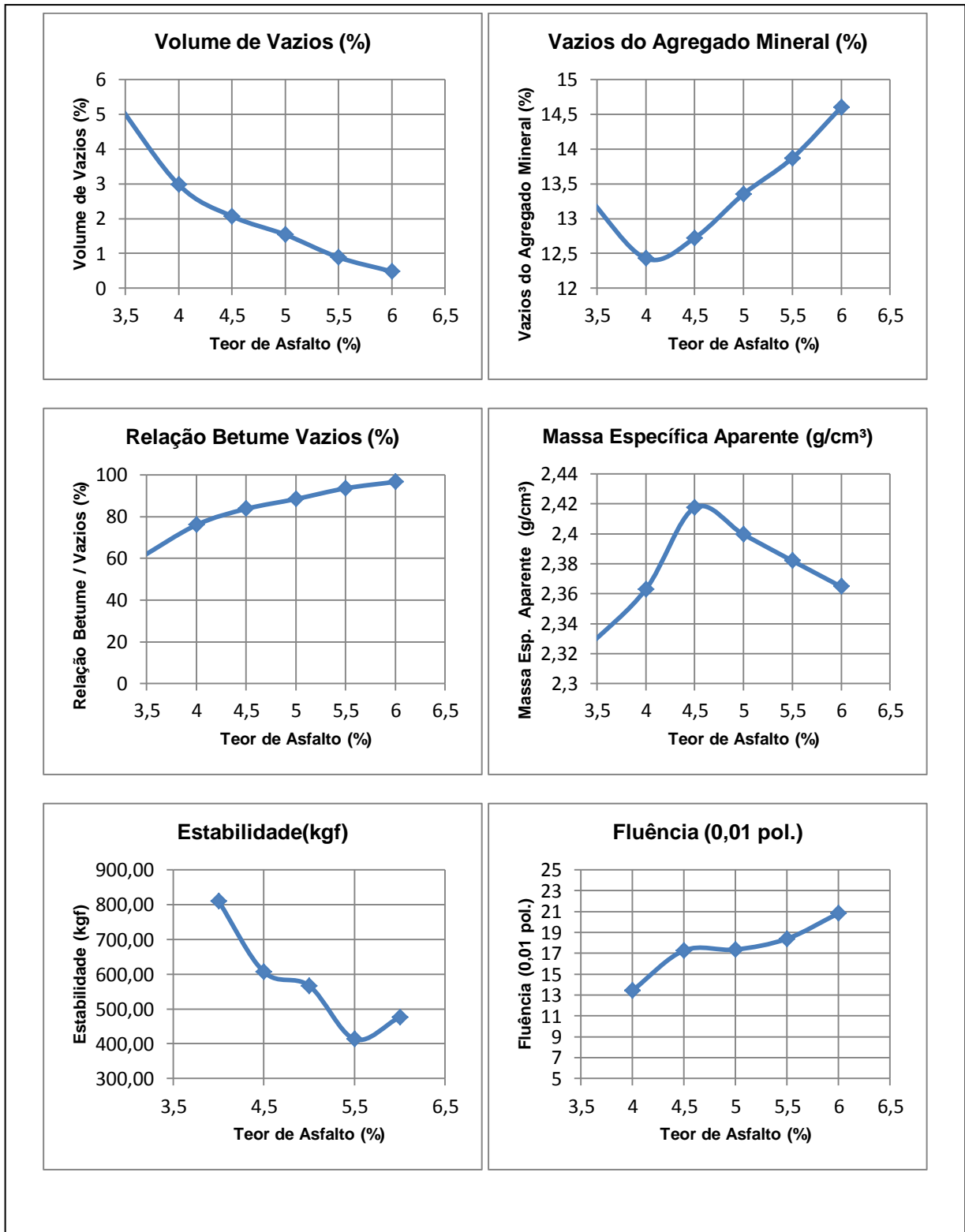
(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 13 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico de referência

Teor de ligante	Unidade	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
DMM – Rice	g/cm ³	2,47	2,44	2,41	2,39	2,39
Densidade Aparente	g/cm ³	2,35	2,36	2,38	2,37	2,37
Volume de vazios	%	4,65	3,35	1,4	0,75	0,82
Vazios do agregado mineral	%	13,95	13,84	13,17	13,64	14,86
Relação Betume Vazios	%	66,73	75,83	89,36	94,51	94,54
Estabilidade	kgf	606	746	684	553	540
Fluência (0,01'')	pol	12,56	10,34	13,44	13,56	12,86

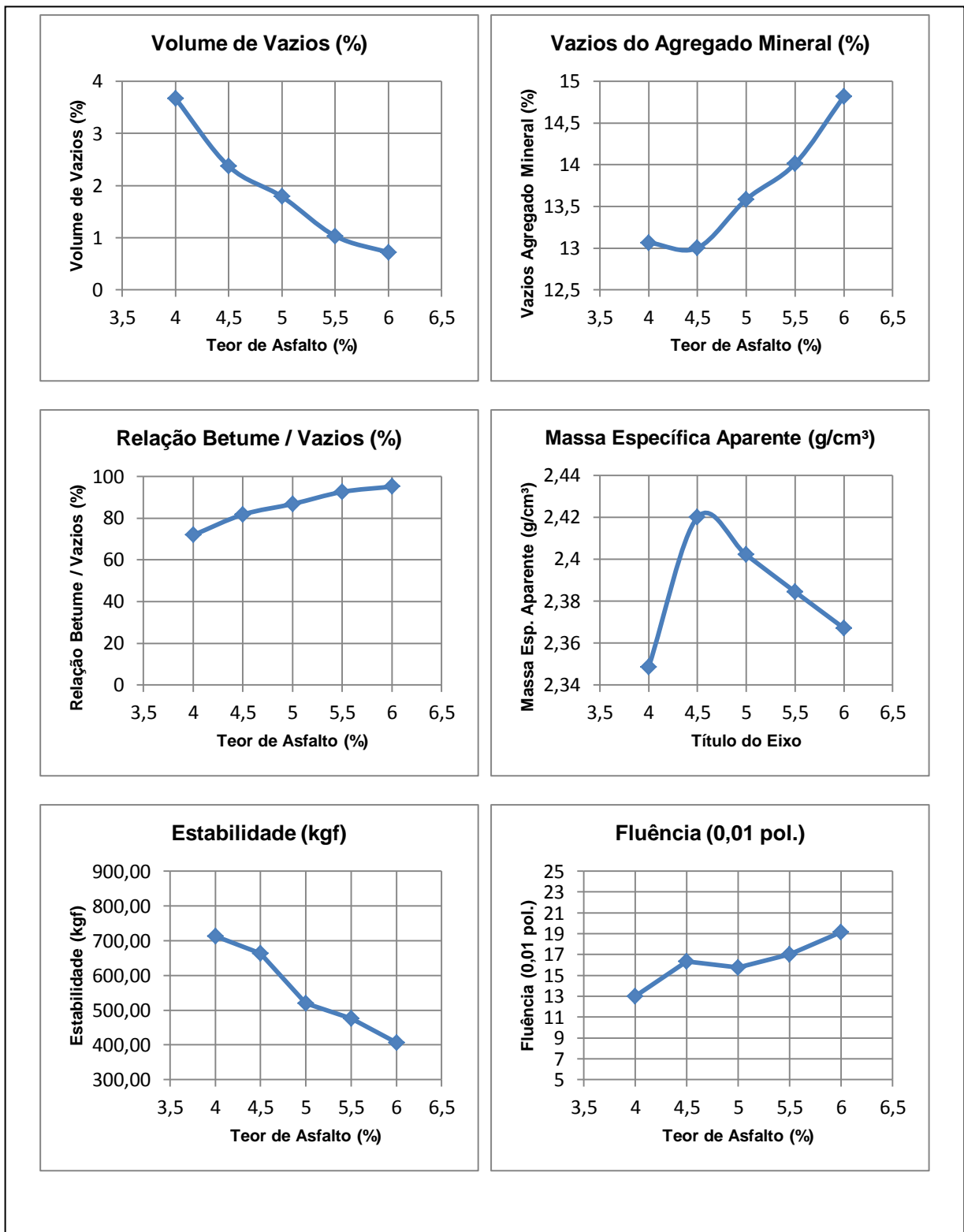
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 16 – Parâmetros de dosagem Marshall do concreto asfáltico com cal calcítica



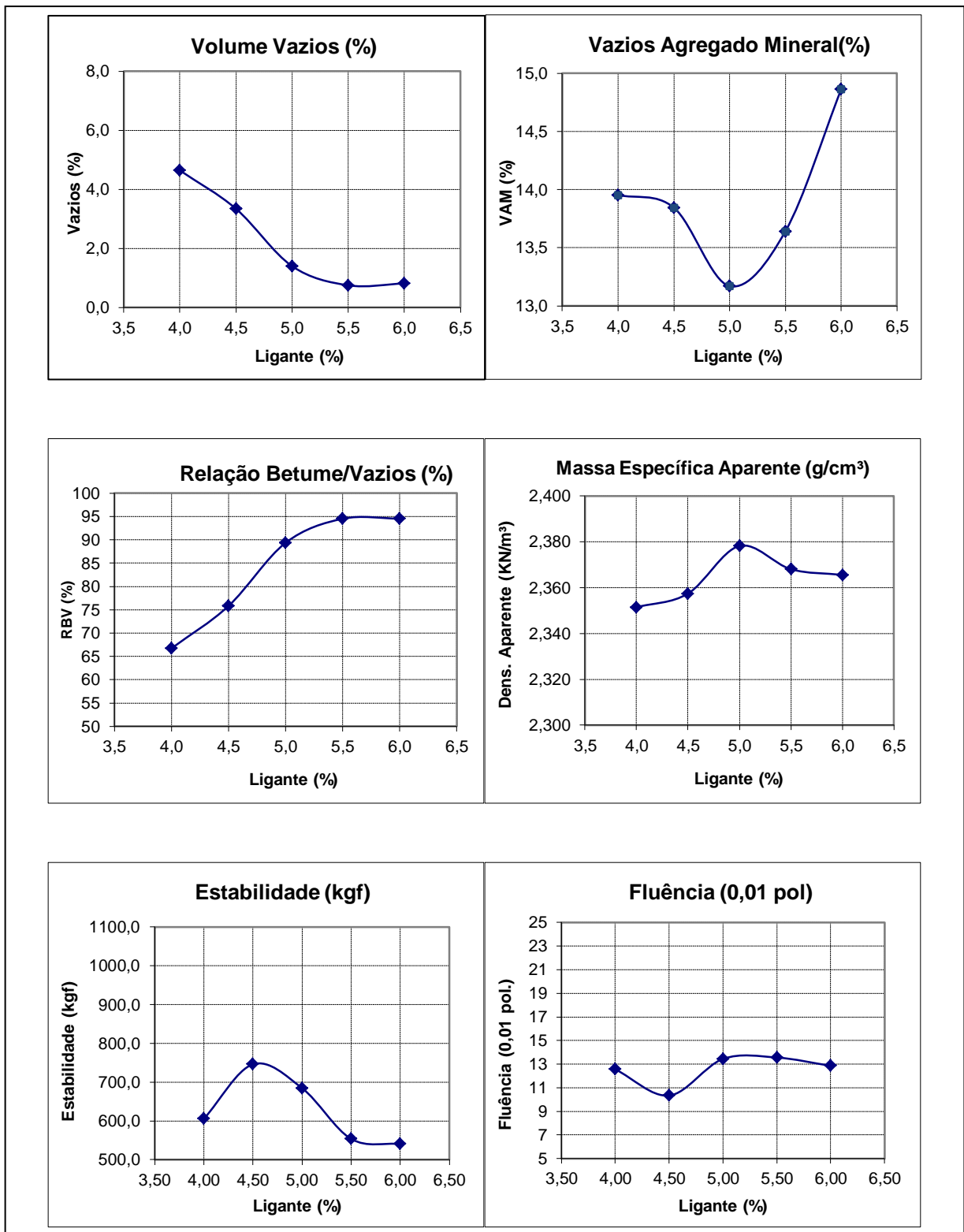
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico com cal dolomítica



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 – Parâmetros de dosagem Marshall para o concreto asfáltico de referência



(fonte: TAMANINI, 2012)

Com os resultados obtidos, encontraram-se os teores de projeto. Para isso, utilizou-se, em um primeiro momento, o teor de projeto correspondente a um volume de vazios igual a 4%. Assim, encontrou-se como teor ideal para a cal calcítica o valor de 3,7 % de ligante asfáltico e para a cal dolomítica o valor de 3,8%. Contudo, esses valores são muito baixos, formando uma mistura que não consegue unir os agregados adequadamente. Desta forma, com a finalidade de moldar uma mistura mais coesa, optou-se por utilizar como metodologia o valor de teor de asfalto correspondente a um volume de vazios igual a 3,5%, já que ele pode variar de 3 até 5%. Com isso, o teor ideal de asfalto para a mistura com cal calcítica aumentou para 3,9 %, enquanto que a mistura para a dolomítica aumentou para 4%. Os parâmetros encontrados para o teor ideal das três misturas estão na tabela 13, junto com especificações da SMOV/POA e DNIT.

Tabela 14 – Comparação entre resultados das misturas e especificações limites (SMOV/POA e DNIT)

Característica	Unidade	Referência	Calcítica	Dolomítica	Especificação de Camada		
					SMOV/POA - Ligação/Rolamento	DNIT - Rolamento	DNIT - Ligação (Binder)
DMT	g/cm ³	2,44	2,44	2,44	NE	NE	NE
Massa específica Aparente	g/cm ³	2,34	2,35	2,37	NE	NE	NE
Volume de vazios	%	4,2	3,83	2,94	3 – 5	3 – 5	4 – 6
VAM	%	14,22	12,98	12,41	NE	>14	>14
RBV	%	70,11	70,5	76,29	NE	75 - 82	65 - 72

(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.2 Ensaio de resistência à tração e de módulo de resiliência

A realização destes ensaios começou com a extração das medidas de altura e diâmetro de cada CP. Logo após, eles foram condicionados em uma estufa a 25 °C por um período de 2 horas. Em seguida, foi escolhido um CP de cada mistura para realizar o ensaio de resistência à tração. Neste, cada CP foi posicionado em uma prensa na posição horizontal, verificando seu alinhamento de contato com a prensa. Após isso, a prensa é movida até que ocorra o rompimento do CP. A resistência à tração é calculada em função da leitura e da fórmula 17:

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (\text{fórmula 17})$$

Onde:

σ_R = 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.

Com os dados de RT de cada mistura definiu-se os níveis de tensão a serem aplicados nos ensaios de módulo de resiliência. Nesta pesquisa os CPs foram submetidos à tensão de tração de 30% da RT, já que ao aplicar-se 15% da resistência à tração não foi possível obter um mínimo de deslocamento elástico.

Para a realização desse ensaio, os corpos-de-prova foram colocados nos cabeçotes curvos, o transdutor de deslocamento foi fixado e posicionado procurando evitar superfícies não uniformes dos CPs, os corpos-de-prova foram condicionados e foram feitas as leituras aos 55, 65 e 75 ciclos de carga. Assim, com os valores obtidos, calcularam-se os valores de módulos com a fórmula 18. Depois desse ensaio, os mesmos CPs foram submetidos ao ensaio de RT descrito anteriormente. Os resultados são apresentados na tabela 14 e ilustrados nas figuras 15 e 16:

$$MR = \frac{F * (0,7801 * \mu + 0,2339)}{\Delta * H} \quad (\text{fórmula 18})$$

Onde:

MR = módulo de Resiliência, em MPa;

F = carga vertical cíclica aplicada diretamente na amostra, em N;

Δ = deslocamento horizontal medido, em cm;

H = altura da amostra, em cm;

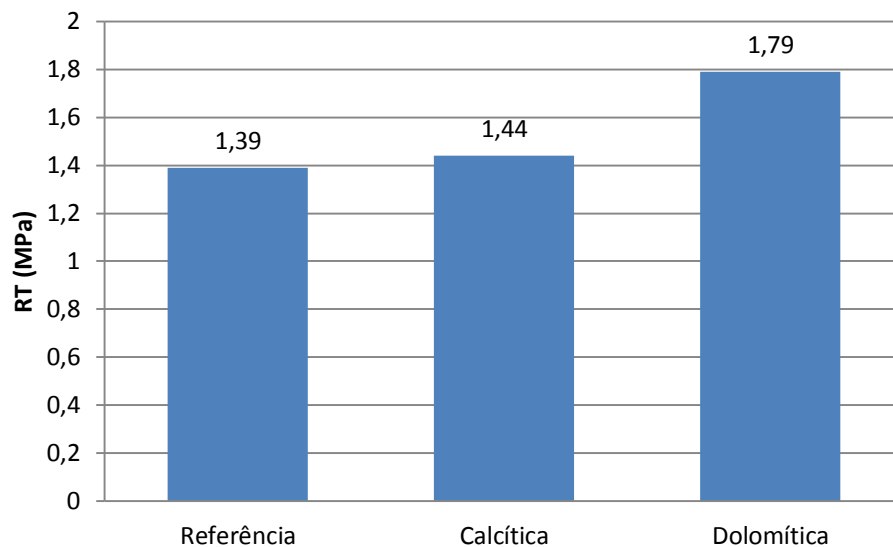
μ = coeficiente de Poisson.

Tabela 15 – Resultados do ensaio RT e MR em concretos asfálticos com adição de cal e de referência (sem cal)

Ensaio	Unidade	Referência	Calcítica	Dolomítica
RT	MPa	1,39	1,44	1,79
MR	MPa	6732	12157	12540

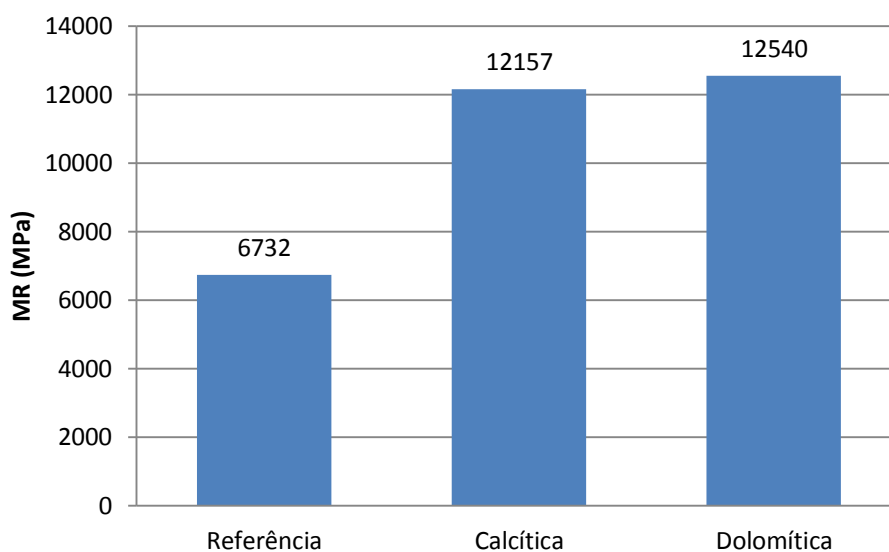
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Resultados dos ensaios de resistência à tração (RT)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência (MR)



(fonte: elaborado pelo autor)

Desta forma, pode-se perceber que para os resultados de RT, os concretos asfálticos com ambas as cales apresentam um resultado superior ao de referência (aumento de quase 4% com cal calcítica e quase 30% com cal dolomítica). Entretanto, a cal que apresentou uma maior resistência foi a dolomítica, mostrando que esse resultado não está de acordo com a literatura, em que era esperado um melhor resultado para o concreto asfáltico com cal calcítica.

Os resultados do módulo de resiliência, em ambos os casos, obtiveram um aumento. Para o concreto asfáltico com cal calcítica, esse aumento foi de aproximadamente 80%, enquanto que para a cal dolomítica foi maior que 85%. Assim como nos resultados de RT, a cal dolomítica apresentou um valor maior, contrariando os resultados encontrados na literatura.

5.2.3 Ensaio de dano por umidade induzida (Lottman Modificado)

Para a moldagem dos CPs para o ensaio Lottman, realizaram-se os mesmos procedimentos relatados anteriormente na dosagem, com a diferença do número de golpes aplicado a cada CP. Para esse ensaio é necessário que o volume de vazios esteja compreendido entre 6 e 8%. Para obter esse valor, foram moldados 3 CPs para cada mistura, com 12, 15 e 17 golpes. Em seguida foi realizado o ensaio de densidade e verificado o volume de vazios para cada energia de compactação. Assim, verificou-se que para a moldagem de CPs para o ensaio de dano por umidade induzida eram necessários 12 golpes por face.

Logo após foram moldados 6 CPs para cada mistura, utilizando o procedimento Marshall, com um número de 12 golpes. Após a extração dos CPs, foi realizado o ensaio de densidade, obtendo-se o volume de vazios de cada um. Então, eles foram divididos em dois grupos de 3 CPs, para cada mistura. Esses grupos foram escolhidos de forma a balancear o volume de vazios, com a finalidade de não deixar um grupo com os maiores volumes de vazios e outro com os menores.

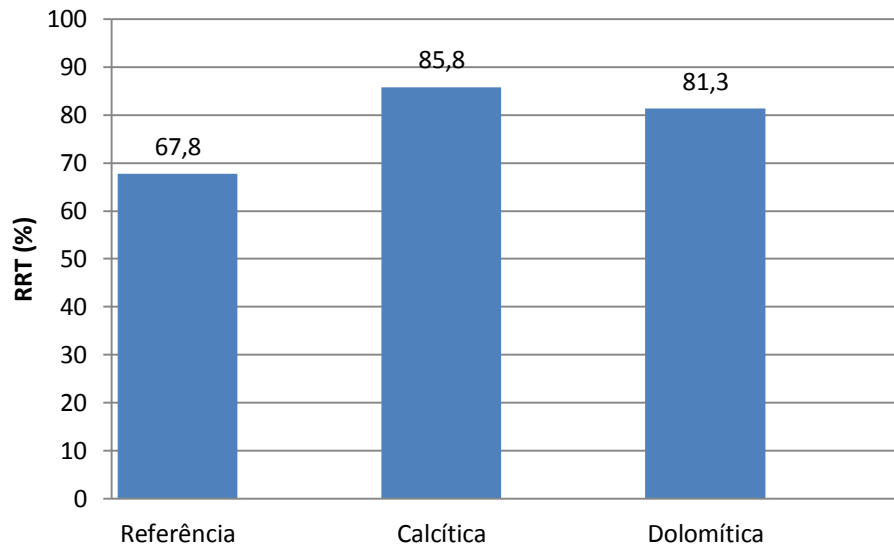
Divididos os dois grupos, escolheu-se um de cada mistura para realizar o condicionamento. Em primeiro lugar, eles foram saturados com água entre 55 e 80%. Após a saturação, eles foram submetidos ao congelamento a uma temperatura de -18 °C por um período de 16 horas, banho a 60°C por um período de 24 h e banho a 25°C por um período de 2 horas. Enquanto que o outro grupo passou apenas por banho em água a 25°C. Em seguida os dois grupos são rompidos no ensaio RT, descrito anteriormente, para comparar as resistências à tração de cada um. Os resultados estão expostos na tabela 15 e ilustrados na figura 17.

Tabela 16 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida

Mistura	Referência		Calcítica		Dolomítica	
	RT	RT'	RT	RT'	RT	RT'
Resistência à Tração	0,923	0,581	0,634	0,589	0,685	0,512
	0,974	0,637	0,811	0,671	0,705	0,59
	1,062	0,79	0,716	0,594	0,577	0,498
Média	0,987	0,669	0,720	0,618	0,656	0,533
RRT	67,8		85,8		81,3	

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Resultados dos ensaios de dano por umidade induzida



(fonte: elaborado pelo autor)

Para o ensaio de dano por umidade induzida, o concreto asfáltico com cal calcítica apresentou um aumento de aproximadamente 25%, enquanto que para a cal dolomítica, esse aumento foi de aproximadamente 20%. Desta forma, conforme a literatura, o concreto asfáltico que obteve melhor resultado foi o que continha cal calcítica, em seguida, o que continha cal dolomítica, e o que apresentou o pior resultado, foi a mistura de referência.

6 CONCLUSÕES

A análise dos resultados apresentados permitem concluir que a cal influencia significativamente, e de forma positiva, as propriedades do concreto asfáltico elaborado com agregados de granito. São perceptíveis os efeitos da adição de cal na definição do teor de ligante de projeto (“teor ótimo”), na adesividade ligante-agregado, bem como nas propriedades mecânicas analisadas (Módulo de resiliência, Resistência à Tração e Resistência à Tração Retida após o condicionamento pelo método Lottman Modificado). Além disso, pode-se notar que a magnitude dos efeitos depende do tipo de cal incorporada (calcítica ou dolomítica).

Logo no processo de dosagem da mistura asfáltica, pode-se perceber que a cal influencia diretamente suas propriedades com relação a uma mistura de referência. A incorporação de cal, com a simples substituição, em peso, de pó por cal, faz com que ocorra uma significativa redução no volume de vazios da mistura, para um mesmo teor de ligante. Assim, pode-se constatar que é necessária uma dosagem diferente para cada tipo de mistura: de referência (sem incorporação de cal), com cal calcítica e com cal dolomítica.

Além disso, como a cal possui propriedades volumétricas diferentes do pó de pedra, foi verificado que com a introdução de cal, utilizando a dosagem Marshall para obter o teor ideal de ligante, tem-se uma significativa redução no teor de ligante de projeto, ficando as misturas analisadas nesta pesquisas, muito seca, ou seja, pouco coesas; já que a introdução da cal resulta em um preenchimento dos vazios e um grande aumento na superfície específica da mistura asfáltica. Assim, foi possível chegar à conclusão que não é adequado fixar um volume de vazios de 4%, como é feito usualmente.

Ademais, pode-se constatar que, como a mistura de referência possui um teor de projeto muito baixo (4,3%), e o material utilizado como agregado foi o granito, verificou-se uma grande dificuldade em obter os 3,5% de volume de vazios. Isso ocorre porque as misturas incluem baixos teores de ligantes e agregados muito quebradiços.

Pode-se concluir que a adição de cal na mistura asfáltica provoca alteração, também, na resistência à tração. Ambas as cales provocaram aumento na resistência à tração dos concretos

asfálticos (4% para cal calcítica e 30% para a cal dolomítica), com melhores resultados sendo obtidos ao incorporar-se cal dolomítica, o que difere da tendência analisada na literatura científica. Contudo, o aumento mais significativo da RT no concreto asfáltico com cal dolomítica pode ser também atribuído, ao menos em parte, ao maior teor de ligante dessa mistura (4% no concreto asfáltico com cal dolomítica, contra 3,9% na mistura com cal calcítica).

Quanto ao módulo de resiliência, a incorporação de ambas as cales resultaram em aumentos de cerca de 81% na mistura com cal calcítica e de cerca de 86% na mistura com cal dolomítica. Os resultados obtidos foram muito elevados, ao serem comparado com valores de MR normalmente relatados na bibliografia. Isto pode ser indicativo de que as misturas são muito rígidas e, talvez muito frágeis, o que pode limitar seu emprego em pavimentos com espessuras de camadas asfálticas pequenas a médias (inferiores a 15 cm). Entretanto, seu emprego pode ser indicado para pavimentos com camadas asfálticas espessas (superiores a 15 cm), especialmente se executados sobre outra camada asfáltica mais flexível (com menor MR e com elevada RT). De fato, as pesquisas realizadas, desde 2006, no LAPAV visam produzir misturas com elevada resistência à deformação permanente (misturas de módulo elevado) por meio da incorporação de cal.

Os resultados do ensaio de dano por umidade induzida (Metodologia Lottman Modificada) são muito significativos, pois a introdução de cal aumentou a resistência à tração retida de 68% (mistura sem cal) para valores entre 86% (com cal calcítica) e 81% (cal dolomítica). Como constatado em outras pesquisas, os melhores resultados foram obtidos ao incorporar-se cal calcítica. Salienta-se a significância destes resultados. Como concretos asfálticos elaborados com agregados de granito podem apresentar grave perda de adesividade de ligantes asfálticos (decretando a destruição da coesão da camada, iniciando-se de baixo para cima), talvez o principal benefício da adição de cal seja assegurar que tão grave e deletério fenômeno (a perda de adesividade ligante-agregado) não ocorrerá, quando a camada asfáltica ficar submetida a cargas de tráfego, em condições de elevada umidade.

Assim, pode-se concluir, finalmente, que a incorporação de cal em concretos asfálticos tem efeitos benéficos significativos em termos de adesividade, comportamento quanto à deformação elástica e à solicitações de tração. Contudo, como mostrado em pesquisas

anteriores, tais benefícios dependem do tipo de cal empregado e demanda um projeto específico de mistura.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.

Resolução n. 19. 2006. Brasil. Disponível em:

<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/julho/ranp%2019%20-%202005.xml>. Acessado em: 10 dez. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.175:** cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9.935:** agregados. Rio de Janeiro, 2005

BALDO, J. T.; **Pavimentação Asfáltica:** materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica:** formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008 (reimpressão 2010).

BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado.** 2012. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CALLEJAS, C. R.; GARCÍA, J. L.; RAMÍREZ, O.; BOCANEGRA, R. A. Caracterización de los Materiales del Lecho del Río Cauca. **Revista Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente**, Cali, Colômbia. Disponível em:

<http://revistaeldenar.univalle.edu.co/revista1_1a.phtml>. Acessado em: 10 dez. 2012.

CASTRO, S. F de. **Misturas Asfálticas com Incorporação de Cal:** análise volumétrica e mecânica. 2011. 63 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 117:** misturas betuminosas – determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994a.

_____. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 133:** misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994b.

_____. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **DNER-ME 138:** misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **031/2006 ES:** pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

FORTEST INDÚSTRIA E COMÉRCIO. Jogo de Peneiras Red Inox 8x2 Agregado Miúdo, São Paulo, 2012. Disponível em:
<http://www.fortest.com.br/ecommerce_site/produto_3622_7895_JOGO-DE-PENEIRAS-RED-INOX-8X2-AGREGADO-MIUDO->. Acesso em: 10 dez. 2012.

GRECA ASFALTOS. **Certificado de ensaio**. Canoas, RS, 2013.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

NUNES, F. R. G.; SILVA, C. L. da; FROTA, C. A. da. Identificação do dano induzido por fadiga e cura de micro trincas em compósitos cerâmicos particulados, voltados à aplicação em pavimentos flexíveis. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 336, out./dez. 2009. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132009000400014&script=sci_arttext>. Acesso em: 9 dez. 2012.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; PERAÇA, V. Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, n. 38, 2007, Manaus. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2007. Não paginado. 1 CD.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA. **Cimentos asfálticos de petróleo (CAPs)**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em:
<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/asfalticos/cap/!ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ3dLA_2CbEdFAFe2Wp0!>. Acesso em: 10 dez. 2012.

PORTO ALEGRE. Secretaria Municipal de Obras e Viação. **CONCRETO ASFÁLTICO - FAIXA I, II e III**. Porto Alegre.

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

TAMANINI, F. A. **Revestimento Asfáltico: Caracterização Mecânica e Volumétrica de Concreto Asfáltico Enquadrado na Faixa I da Prefeitura Municipal de Porto Alegre**. 2012. 70 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.