

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS
ASFÁLTICOS COM DIFERENTES TIPOS DE
AGREGADOS E CALES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fernando Dekeper Boeira

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS COM DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS E CALES

Fernando Dekeper Boeira

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil,
Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental,
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Coorientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Boeira, Fernando Dekeper
Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales / Fernando Dekeper Boeira.-2014.
148 p.; 30cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht
Coorientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2014

1. Pavimentação 2. Misturas Asfálticas 3. Incorporação de cal I. Specht, Luciano Pivoto II. Pinheiro, Rinaldo José Barbosa III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS
ASFÁLTICOS COM DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS E
CALES**

elaborado por
Fernando Dekeper Boeira

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Luciano Pivoto Specht, Dr.
(Presidente/Orientador)

Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)
(Coorientador)

Washington Peres Núñez, Dr. (UFRGS)

Andrea Valli Nummer, Dra. (UFSM)

Santa Maria, 15 de Agosto de 2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer profundamente aos meus pais, José Antonio Borges Boeira e Maria Dekeper Boeira, pelo incentivo e pela confiança que depositaram, pois sem eles essa conquista não teria se realizado.

Um agradecimento especial a minha noiva Eveline Betiolo, pelo seu apoio, compreensão, determinação e pelo amor que une nos dois, certamente não teria conseguido sem você. E principalmente por aguentar a distância! Você faz com que os meus dias sejam os melhores sempre!

Ao Professor Luciano Pivoto Specht, pela exímia orientação prestada neste trabalho e, pela oportunidade que me foi dada de ingressar na pesquisa desde a graduação, pelos ensinamentos dentro e fora de sala de aula e, principalmente pelo exemplo de competência que me serviu.

Ao Professor Rinaldo José Barbosa Pinheiro coorientador dessa dissertação, agradeço pela sua amizade, confiança e oportunidade, pelo incentivo e principalmente pela qualidade de formação.

Ao Professor Deividi da Silva Pereira e a Prof^a. Tatiana Cureau Cervo, pelo apoio, amizade e ajuda sempre fornecida durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Professor Washington Peres Núñez e a Prof^a. Andrea Valli Nummer pela dedicação e participação na banca examinadora.

A todos os amigos que estiveram presentes no decorrer do curso, agradeço a amizade e a compreensão, tenho certeza de que todos contribuíram, pois sem vocês não teria concluído sozinho essa pesquisa: Patrícia Hennig Osmari, Cecília Vione Lunardi, Valdir Barboza Jr, Eduardo Renz, Mauricio Silveira dos Santos, Fábio Rossato, Daiana Frank Bruxel, Gustavo Menegusso Pires. Enfim a todo o grupo GEPPASV, sendo os bolsistas ou voluntários todos tem a participação para a realização dessa dissertação.

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

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS COM DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS E CALES

AUTOR: FERNANDO DEKEPER BOEIRA
ORIENTADOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT
COORIENTADOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 15 de agosto de 2014.

Os pavimentos asfálticos possuem alta relevância no contexto econômico atual e o seu desempenho depende, dentre outros fatores, dos materiais componentes de cada camada da estrutura. Uma das soluções estudada é a incorporação da cal em concreto asfáltico (CA), que além de melhorar a adesividade ligante/agregado altera as propriedades mecânicas das misturas. O DNIT tem indicado, a partir de 2009, a incorporação de cal em misturas tipo CA em rodovias federais brasileiras, porém não especifica a natureza mineral da cal nem faz distinção em relação ao tipo de agregado utilizado. O objetivo desta pesquisa é avaliar os efeitos da adição de diferentes tipos de cales e diferentes tipos de agregados em misturas de tipo CA, quanto a características mecânicas e de adesividade. Para realização do estudo, foram utilizados dois tipos de cales, uma dolomítica produzida no estado do Rio Grande do Sul, outra calcítica provinda de Minas Gerais, ambas no teor de 1,5%, adicionadas sobre o agregado graúdo seco. As seis fontes de agregados utilizados foram escolhidas de modo a cobrir as principais formações geológicas do estado Rio Grande do Sul. Utilizou-se ainda como comparação os dados de pesquisas anteriores (Boeira, 2011). As misturas foram dosadas através da metodologia Marshall, sendo realizadas três misturas em CA para cada agregado: Referência; 1,5% Calcítica e 1,5% Dolomítica. Foram realizados ensaios para verificação do comportamento mecânico (ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral e ensaio de Módulo de Resiliência) e verificação das propriedades de adesividade (Metodologia Lottman Modificada), Desgaste (ensaio Cantabro) e o ensaio de Adesividade a Ligante Betuminoso (Agregado Graúdo). A partir da investigação é possível formular-se CA de elevado módulo de resiliência e resistência à tração, e controlar os efeitos deletérios da água através da adição de cal hidratada. O comportamento das misturas, irá depender da formação geológica de cada agregado utilizado, pois dependendo da constituição mineralógica o efeito pode ser mínimo ou determinante para o sucesso da mistura. Constata-se que os agregados de Eldorado do Sul, Caçapava do Sul e Bagé foram os que obtiveram melhorias no que diz respeito a adição das cales.

Palavras-chave: pavimentação, misturas asfálticas, incorporação de cal.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

STUDY OF THE BEHAVIOR OF ASPHALT CONCRETE WITH DIFFERENT TYPES OF AGGREGATES AND LIMES

AUTHOR: BOEIRA, FERNANDO DEKEPER

ADVISOR: SPECHT, LUCIANO PIVOTO

CO-ADVISOR: PINHEIRO, RINALDO JOSÉ BARBOSA

Date and Location of Defense: Santa Maria, August 15, 2014.

Pavements are highly relevant structures in the current economic context and its performance depends, among other factors, on the component of the materials of each layer of the structure. One of the solutions studied is the addition of lime to the asphalt concrete (AC), which improves the adhesion between the asphalt binder and the aggregates and also changes the mechanical properties of the blends. The DNIT (National Department of Transport Infrastructure) has specified, since 2009, the addition of lime to AC mixtures on Brazilian federal highways, however does not specify the mineral composition of the limes neither determines the types of aggregates to add to the mixture. The scope of this study is to evaluate the effects of the addition of different types of limes and different types of aggregates to AC mixtures, as well as the mechanical properties and the adhesion of the mixture. Two types of limes were used in this study, a dolomitic lime produced in the state of Rio Grande do Sul and a calcite lime from the state of Minas Gerais, both added in the content of 1.5% of the dry coarse aggregate. The sources of the six different aggregates used in this study were chosen to cover the main geological formations in the state of Rio Grande do Sul. Besides, it was used as comparison data collected from previous researches (Boeira, 2011). The mixtures were design by the Marshall methodology, and three different AC mixtures were designed using each aggregate: Reference; 1,5% calcite and 1,5% dolomite. Experiments were made to analyze the mechanical behavior (test Tensile Strength by Diametral Compression and Resilience test Module) and check the properties of adhesion (Modified Lottman Methodology), Wear (Cantabro test) and the test Adhesion Ligand Bituminous (were performed Coarse aggregate). From the research it is possible to formulate the AC with high modulus of resilience and tensile strength, and also control the deleterious effects of water by the addition of hydrated lime. The behavior of the mixtures will depend on the geological formations of each aggregate used, depending on the mineral composition the effect can be minimal or critical for the success of the mixture. It appears that the aggregate of Eldorado do Sul, Caçapava do Sul and Bagé were the ones with improvements regarding the addition of limes.

Keywords: paving, asphalt mixtures, incorporation of lime.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores intervenientes nas características de adesividade	56
Tabela 2 - Influência da incorporação de cal hidratada em misturas de concreto asfáltico (CA)	65
Tabela 3 – Propriedade dos agregados de Eldorado do Sul e Itaara.....	71
Tabela 4 – Propriedade dos agregados de Sarandi e Santo Antônio da Patrulha	71
Tabela 5 – Propriedade dos agregados de Bagé e Caçapava do Sul.....	71
Tabela 6 - Propriedade do agregado de Coronel Barros.....	72
Tabela 7 – Característica granulométrica dos materiais de Coronel Barros.....	72
Tabela 8 – Característica granulométrica dos materiais de Itaara	73
Tabela 9 – Característica granulométrica dos materiais de Eldorado do Sul	74
Tabela 10 – Característica granulométrica dos materiais de Bagé.....	75
Tabela 11 – Característica granulométrica dos materiais de Caçapava do Sul	76
Tabela 12 – Característica granulométrica dos materiais de Santo Antônio da Patrulha.....	77
Tabela 13 – Característica granulométrica dos materiais de Sarandi.....	78
Tabela 14 – Característica granulométrica das cales.....	83
Tabela 15 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Eldorado do Sul.....	100
Tabela 16 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Itaara.....	101
Tabela 17 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Sarandi.....	101
Tabela 18 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Santo Antônio da Patrulha	101
Tabela 19 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Bagé.....	102
Tabela 20 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Caçapava do Sul.....	102
Tabela 21 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Coronel Barros	102
Tabela 22 – Resumo dos resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração das Misturas	105
Tabela 23 – Resumo dos resultados da Metodologia Cantabro	110
Tabela 24 – Resumo dos resultados da Metodologia Lottman Modificada	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo das Rochas.....	28
Figura 2: Limites entre as províncias geológicas que constituem o estado do Rio Grande do Sul	31
Figura 3: Exemplo de um Compactador giratório – Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM	43
Figura 4: Demonstração do trincamento de um pavimento.....	47
Figura 5: Deformações permanentes em pavimentos asfálticos.....	50
Figura 6: Localização da pedreira de coleta de materiais.....	69
Figura 7: Distribuição granulométrica das cales e agregados de Coronel Barros.....	73
Figura 8: Distribuição granulométrica dos agregados de Itaara	74
Figura 9: Distribuição granulométrica dos agregados de Eldorado do Sul	75
Figura 10: Distribuição granulométrica dos agregados de Bagé.....	76
Figura 11: Distribuição granulométrica dos agregados de Caçapava do Sul	77
Figura 12: Distribuição granulométrica dos agregados de Santo Antônio da Patrulha.....	78
Figura 13: Distribuição granulométrica dos agregados de Sarandi.....	79
Figura 14: Especificação dos resultados do AIMS.....	81
Figura 15: Distribuição granulométrica das cales	83
Figura 16: Difractogramas da cal Dolomítica (a) e da cal Calcítica (b).....	84
Figura 17: Composição granulométrica das misturas (faixa C DNIT 031/2006-ES).....	86
Figura 18: Composição granulométrica da mistura de Coronel Barros (faixa B DAER/RS) ..	87
Figura 19: Esquema de adição de cal na mistura.....	88
Figura 20: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro	90
Figura 21: Imagem de equipamento utilizado	91
Figura 22: Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência	93
Figura 23: Equipamento para ensaio de Rt.....	95
Figura 24: Equipamento de abrasão Los Angeles da UFSM	96
Figura 25: Avaliação visual das misturas	98
Figura 26: Gráfico dos Teores de Ligante de cada Mistura	103
Figura 27: Resistência à Tração e Módulo de Resiliência	106
Figura 28: Relação entre MR/RT	108
Figura 29: Perda de massa das misturas	111

Figura 30: Amostras ensaiadas em diferentes temperaturas	112
Figura 31: Ensaio de adesividade com agregados de Eldorado do Sul.....	114
Figura 32: Ensaio de adesividade com agregados de Itaara.....	114
Figura 33: Ensaio de adesividade com agregados de Bagé	114
Figura 34: Ensaio de adesividade com agregados de Caçapava do Sul.....	115
Figura 35: Ensaio de adesividade com agregados de Santo Antônio da Patrulha	115
Figura 36: Ensaio de adesividade com agregados de Sarandi	115
Figura 37: Resistência à tração de corpos-de-prova com volume de vazios entre 6% a 8% .	119
Figura 38: Resistência Retida à Tração das misturas.....	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Causas e exemplos de defeitos em pavimentos.....	51
Quadro 2 - Número de amostras por agregado.....	68
Quadro 3 – Cidades de origem e a geologia dos materiais.....	70
Quadro 4 - Resultados do equipamento AIMS.....	82
Quadro 5 - Resultados do equipamento AIMS.....	82
Quadro 6 - Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70).....	85
Quadro 7 - Resultados da análise visual do ensaio de adesividade agregado-ligante betuminoso	116
Quadro 8 - Quadro resumo do efeito da adição das cales nos materiais de origem granítica/metamórfica.....	122
Quadro 9 - Quadro resumo do efeito da adição das cales nos materiais de origem vulcânica	123

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AASHTO:** *American Association of Highway and Transportation Officials*
- ABNT:** *Associação Brasileira de Normas Técnicas*
- ABPC:** *Associação Brasileira de Produtores de Cal*
- AIMS:** *Aggregate Image Measurement System*
- ASTM:** *American Society of Testing and Materials*
- ATR:** *Afundamento de Trilha de Roda*
- CA:** *Concreto Asfáltico*
- CAP:** *Cimento Asfáltico de Petróleo*
- CBUQ:** *Concreto Betuminoso Usinado à Quente*
- CENPES:** *Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello*
- CGS:** *Compactador Giratório SUPERPAVE*
- CNT:** *Confederação Nacional de Transportes*
- DAER:** *Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem*
- DC:** *Deformação Controlada*
- DNER:** *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*
- DNIT:** *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*
- DRX:** *Difração de Raios X*
- E:** *Módulo de Elasticidade*
- ESAL:** *Equivalent Axle Loads*
- EUA:** *Estados Unidos da América*
- FLAPS:** *Finite Layer Analysis of Pavement Structures*
- IDOT:** *Departamento de Transporte de Illinois*
- IDT:** *Indirect Tensile Tester*
- LEC:** *Laboratório de Engenharia Civil*
- LMCC:** *Laboratório de Materiais de Construção Civil*
- LVDT:** *Linear Variable Differential Transducer*
- MR:** *Módulo de Resiliência*
- Nf:** *Vida de Fadiga*
- RBV:** *Relação Betume Vazios*
- RPM:** *Rotações por minuto*
- RRT:** *Resistência Retida à Tração*

RT: *Resistência à Tração*

SHRP: *Strategic Highway Research Problem*

SST: *SUPERPAVE Shear Tester*

SUPERPAVE: *Superior Performing Asphalt Pavement System*

TC: *Tensão Controlada*

UFRJ: *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

UFSM: *Universidade Federal de Santa Maria*

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

USACE: *Corpo de Engenheiros do Exército Americano*

UTM: *Universal Testing Machine*

VAM: *Vazios do Agregado Mineral*

VV: *Volume de Vazios*

SUMÁRIO

SUMÁRIO	21
1. INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivo geral	25
1.2 Objetivos específicos	25
2. REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1 Geologia do Rio Grande do Sul	27
2.1.1 Ciclo de Formação das Rochas	28
2.1.2 Províncias geológicas	30
2.1.2.1 Escudo Rio-grandense.....	31
2.1.2.2 Depressão periférica	33
2.1.2.3 Planalto de Derrames	34
2.1.2.4 Planície Costeira.....	35
2.2 Misturas Asfálticas	36
2.2.1 Dosagem de Misturas Asfálticas	38
2.2.1.1 Dosagem Marshall.....	39
2.2.1.2 Método de Hubbard-Field	40
2.2.1.3 Método de Hveem	41
2.2.1.4 Método de Triaxial Smith	41
2.2.1.5 Método SUPERPAVE.....	42
2.2.1.6 Método Bailey	44
2.3 Propriedades Mecânicas e de Adesividade de Misturas Asfálticas	45
2.3.1 Rigidez	45
2.3.2 Fadiga.....	46
2.3.3 Deformação Permanente	50
2.3.4 Adesividade.....	53
2.3.4.1 Processos de perda de adesividade.....	58
2.3.4.2 Melhoradores de adesividade	59
3. METODOLOGIA	67
3.1 Planejamento da Pesquisa	67
3.3 Materiais Utilizados	68
3.3.1 Agregados Minerai s	68

3.3.2 Fíleres	82
3.3.3 Ligante Asfáltico	85
3.4 Procedimentos de Ensaio e Descrição dos Equipamentos	86
3.4.1 Dosagem Marshall	86
3.4.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	89
3.4.3 Ensaio de Módulo de Resiliência	91
3.4.4 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada	93
3.4.5 Perda de Massa por Desgaste	95
3.4.6 Ensaio de Adesividade a Ligante Betuminoso (Agregado Graúdo).....	97
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	99
4.1 Dosagem Marshall.....	99
4.2 Propriedades Mecânicas das Misturas.....	104
4.2.1 Módulo de Resiliência e Resistência à Tração	104
4.2.2 Relação entre Módulo de Resiliência e Resistência à Tração (MR/RT)	107
4.3 Propriedades de Adesividade.....	109
4.3.1 Perda de Massa – Metodologia Cantabro	110
4.3.2 Ensaio de Adesividade Ligante - Agregado	113
4.3.3 Adesividade – Metodologia Lottman Modificada.....	117
4.4 Resumo dos Resultados	121
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	125
5.1 Conclusões.....	125
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
ANEXOS	141

1. INTRODUÇÃO

Podemos definir pavimento como uma estrutura formada por múltiplas camadas capazes de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente; e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Já o revestimento asfáltico propriamente dito é a camada destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e distribuir de forma atenuada às camadas inferiores. Dentre os fatores que influenciam o desempenho de uma camada asfáltica pode-se citar: características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção e restauração.

As rodovias brasileiras com volume expressivo de tráfego apresentam revestimento tipo CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado à Quente ou simplesmente Concreto Asfáltico (CA) que, nos últimos anos tem sido extensivamente estudado, tanto seus componentes individuais – ligantes e agregados – quanto a mistura, de maneira a atender à crescente demanda de durabilidade aliada à escassez de recursos do setor rodoviário.

Para o Brasil, o modal rodoviário apresenta grande importância, uma vez que promove integração dos demais modais contribuindo de forma estratégica para o país. No entanto, segundo Blass (2011), apenas 10% das rodovias são pavimentadas, enquanto em países desenvolvidos esse número varia entre 50 e 80%.

E o desempenho satisfatório do revestimento asfáltico depende da obtenção de uma mistura com graduação adequada e de um teor de projeto, de modo a proporcionar conforto e segurança ao rolamento dos veículos, além é claro de ter durabilidade e resistir às cargas, sem se tornar instável ao tráfego e as condições climáticas (BOCK, 2009).

Os pavimentos asfálticos brasileiros têm tido seu comportamento comprometido em algumas situações onde o aumento do volume de veículos e do excesso de carga são elevados, causando deterioração prematura e, em consequência, aumento nos custos de transportes (VASCONCELLOS, 2004). Segundo pesquisa da Confederação Nacional de Transportes (CNT) (2013) pôde-se constatar em relação às rodovias do Brasil, que cerca de 10,2% delas são classificadas como ótimas, 26% como boas, 34,4% são regulares, 21,4% estão ruins e 8,0% péssimas.

A degradação de pavimentos está associada a várias patologias, dentre elas: deformações permanentes excessivas, fissuras de fadiga, retração térmica e desagregação. As duas primeiras estão relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto

as duas últimas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes (SPECHT, 2004).

O aumento do custo dos materiais de construção, entre eles os derivados de petróleo, a redução da disponibilidade de materiais naturais, aliado às novas exigências/limitações ambientais impostas na construção e manutenção de pavimentos, faz com que seja imprescindível que os pesquisadores procurem materiais que possam apresentar bom desempenho com custo relativamente baixo. Assim, muitos modificadores têm sido desenvolvidos para melhorar as propriedades dos ligantes, gerando grandes benefícios para a engenharia rodoviária e aos usuários (HIRSCH, 2007).

Um dos processos de degradação dos revestimentos está associado à perda de adesão/coesão (ou adesividade) entre os componentes da mistura levado a desagregação do revestimento e conseqüentemente reduzindo o índice de serventia da via e acelerando os processos de degradação estrutural do pavimento. A adesividade entre o ligante asfáltico e o agregado é uma característica de grande relevância já que o ligante tem a função de "cimentar", mantendo os agregados, sempre que possível, nas mesmas posições e, dessa forma, proporcionar estabilidade à mistura asfáltica. (MOURA, 2001).

A cal hidratada tem sido utilizada como um filler mineral ou como um agente redutor de danos causados por umidade (antistripping agents) em misturas asfálticas por muitas agências da América do Norte. No entanto, além de apresentar esse comportamento, a cal hidratada também é reconhecida por melhorar as propriedades e desempenho das misturas. Como por exemplo, enrijecimento do ligante asfáltico, melhorando a resistência a fratura à baixas temperaturas, a cinemática de oxidação e a estabilidade e durabilidade a partir da alteração das propriedades plásticas do finos (LITTLE, 2001).

Vários estudos (LITTLE *et al.*, 2006, NÚÑEZ *et al.*, 2007, BOCK *et al.* 2009) relatam que a incorporação de cal em misturas asfálticas, além de melhorar a adesividade agregado-ligante e enrijecer o ligante asfáltico e a própria mistura (o que a torna mais resistente às deformações permanentes), retarda o trincamento (seja este ocasionado por fadiga ou por baixas temperaturas), altera favoravelmente a cinética da oxidação e interage com produtos da oxidação, reduzindo seus efeitos deletérios.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) tem indicado, a partir de 2009, a incorporação de cal em misturas do tipo concreto asfáltico (CA) a serem utilizadas nas rodovias federais brasileira sob sua administração, porém não especifica a natureza mineral da cal e nem faz distinção em relação ao tipo de agregado utilizado. É sabido

que diferentes tipos de cal (calcítica e dolomítica) e sua interação com diferentes agregados podem levar a distintos comportamentos.

E a verificação da adesividade ligante/agregado é de suma importância para prever o comportamento da mistura quanto a resistência à desagregação e ao descolamento das misturas asfálticas. Visto que há problemas de adesividade em misturas, as suas propriedades podem ser melhoradas a partir da modificação ou adição de materiais que atuem em um dos elementos da mistura asfáltica ou em ambos, com a missão de reduzir ou até mesmo evitar que o desempenho da mesma seja prejudicado.

Devido a importância dos pavimentos, e o alto custo dos materiais envolvidos nos revestimentos, na procura de melhoria para a pavimentação, muitos pesquisadores vem se motivando a buscar e investigar novos materiais, bem como novas combinações buscando materiais que possuam um bom desempenho e custo relativamente baixo. A utilização de novos materiais e novas técnicas têm sido estudadas nos principais centros de pesquisa do mundo buscando melhorar a qualidade das misturas e atenuar o problema da degradação prematura dos revestimentos.

Neste sentido a pesquisa atual estudou a incorporação de 1,5% de diferentes cales em mistura tipo concreto asfáltico, levando em conta a origem da rocha e buscou descobrir qual cal que leva a uma melhoria no comportamento mecânico e de adesividade.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o efeito de dois tipos de cal em misturas do tipo Concreto Asfáltico (CA) produzidas no Rio Grande do Sul nas propriedades mecânicas e de adesividade.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são enumerados como segue:

- a) Determinar os parâmetros de dosagem Marshall (VV, VAM, RBV, Estabilidade e Fluência) e analisar a influência da incorporação de cal nos mesmos.

- b) Avaliar, através da análise de desempenho de misturas estudadas, quais os fatores que influenciam, nas propriedades mecânicas (Resistência à Tração e Módulo de Resiliência) das misturas.

- c) Avaliar o desempenho quanto a melhoria das propriedades adesividade através da metodologia de Cantabro (Desgaste), pela metodologia Lottman Modificado (Resistência Retida à Tração) e pelo ensaio de Adesividade a Ligante Betuminoso (Agregado Graúdo).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Geologia do Rio Grande do Sul

O estado do Rio Grande do Sul é uma unidade da República Federativa do Brasil localizada no extremo sul do país. Com uma área de 282.062km², o que corresponde a pouco mais de três por cento do território brasileiro, o Rio Grande do Sul limita-se a leste com o oceano Atlântico, ao norte com o estado de Santa Catarina, a oeste com a Argentina e ao sul com o Uruguai. E a sua capital é Porto Alegre.

A evolução geológica do Rio Grande do Sul registra uma história prolongada de colisões entre continentes, assoalhos oceânicos, arcos de ilhas, vulcões e bacias sedimentares, hoje fazendo parte do registro geológico das rochas que compõem a superfície do nosso estado. Dentro desses limites, as rochas evoluíram de diversas formas e em vários ambientes, como montanhas, geleiras, rios, desertos, desembocaduras de rios e vulcões (VIERO, 2010).

O estado do Rio Grande do Sul apresenta, em sua maior parte, relevo baixo, com setenta por cento de seu território a menos de 300m de altitude. A única porção elevada, com mais de 600m de altitude, no nordeste, compreende 11% da superfície total. No estado, existem quatro ambientes típicos: os altiplanos no norte do Estado; as coxilhas mais íngremes do sul; a região de coxilhas suaves na região central e a região plana e costeira. Esses ambientes geomorfológicos costumam apresentar ocorrências semelhantes de rochas, delineando o que se define por “região” ou “província” geológica.

Para que haja um melhor entendimento dessas regiões/províncias, devemos entender como são formadas as rochas. Para que posteriormente possamos destacar as províncias geológicas e os seu principais materiais em cada uma delas. Para isso está descrito no próximo item, um prevêê resumo de como as rochas são formadas.

2.1.1 Ciclo de Formação das Rochas

Rocha nada mais é que um sólido natural, resultante de um processo geológico determinado, formado por agregados de um ou mais minerais, arranjados segundo as condições de temperatura e pressão existentes durante a sua formação. Também podem ser corpos de material mineral não-cristalino, como o vidro vulcânico (obsidiana) e materiais sólidos orgânicos, como o carvão (OLIVEIRA *et al.*, 1998).

Já o mineral é um elemento ou um composto químico, via de regra resultante de processos inorgânicos, de composição química geralmente definida e encontrado naturalmente na crosta terrestre. Os minerais, em geral, são sólidos. Somente a água e o mercúrio se apresentam no estado líquido, em condições normais de pressão e temperatura (LEINZ, 1963).

De acordo com a sua formação, as rochas constituem três grandes grupos: rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Estes grupos rochosos se inter-relacionam, evidenciando o carácter cíclico e dinâmico de formação das rochas, como mostra a figura 01 (OLIVEIRA *et al.*, 1998).

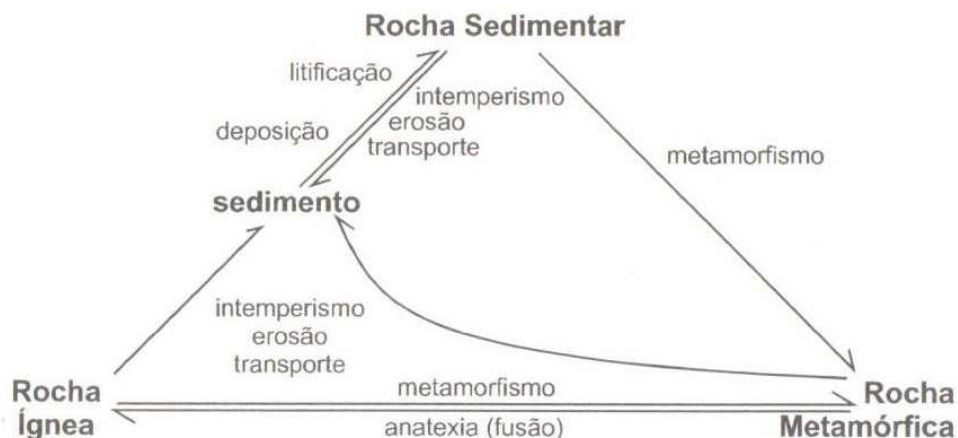


Figura 1: Ciclo das Rochas.

Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 1998).

As rochas ígneas ou magmáticas provem da consolidação do magma e por isto são chamadas de origem primária. Delas se derivam por processos vários as rochas sedimentares e metamórficas. Elas expressam as condições geológicas que se formou, graças a sua textura. A textura diz principalmente do tamanho e da disposição dos minerais que constituem a rocha, enquanto que a natureza mineralógica dos cristais ou mesmo vidro, se for o caso, diz da composição química aproximada do magma (LEINZ, 1963).

Essas rochas ígneas podem ser plutônicas (intrusivas) quando são formadas em profundidade, no interior da crosta terrestre, pelos lentos processos de resfriamento e solidificação do magma, resultando em material cristalino geralmente de granulação grossa e de formas definidas. Ou ainda podem ser vulcânicas (extrusivas) quando são formadas na superfície da crosta terrestre ou nas proximidades, resultando em material vítreo ou cristalino, de graduação fina (OLIVEIRA *et al.*, 1998).

Já como demonstra a figura 01, as rochas sedimentares são resultantes da consolidação de sedimentos, ou seja, partículas minerais provenientes da desagregação e do transporte de rochas preexistentes, ou da precipitação química, ou ainda, de ação biogênica. Se formam então, em sua maioria a partir dos processos que compõe o ciclo sedimentar, quais sejam: o intemperismo, a erosão, o transporte e a deposição e a litificação (OLIVEIRA *et al.*, 1998).

Tanto as rochas ígneas como as sedimentares podem ser levadas por processos geológicos a condições diferentes daquelas nas quais se formou a rocha. Estas novas condições determinam a instabilidade dos minerais preexistentes, estáveis nas antigas condições em que foram formadas. Estas transformações são sob ação das novas condições, que são temperatura, pressão, presença de agentes voláteis ou fortes atritos, adaptando assim as novas condições. E estas adaptações é que dá origem a formação das diferentes rochas denominadas rochas metamórficas. Dependendo do caso, poderá ou não mudar a composição mineralógica, mas a textura muda obrigatoriamente (LEINZ, 1963).

As rochas metamórficas são resultantes de um processo metamórfico, e depende essencialmente da sua composição original, das condições de pressão e temperatura e dos fluidos envolvidos, ou seja, rochas de composições mineralógicas diferentes (por exemplo, calcários, folhelhos, basaltos) irão apresentar mineralogia diversa, mesmo quando submetidas a ações metamórficas semelhantes (OLIVEIRA *et al.*, 1998).

2.1.2 Províncias geológicas

No Rio Grande do Sul, quatro grande domínios morfoestruturais são reconhecidos a partir das características geológicas e estruturais das rochas e modelados da superfície. Ao norte, encontra-se o Planalto Meridional ou Planalto de Derrames, formado por extenso platô de rochas basálticas e riodacíticas, com altitudes de até 1378 m. A Depressão Periférica, situada no entorno da fralda do platô, apresenta relevo de coxilhas suaves e planícies fluviais. Esse domínio estende-se num estreito corredor em direção ao oeste, até a fronteira com o Uruguai, é composta por rochas sedimentares paleozoicas e mesozoicas da Bacia do Paraná, no qual são mais antigas do que as rochas do platô (MENEGAT *et al.*, 1998).

Na porção sudeste do estado encontra-se o Escudo Rio-Grandense, trata-se de um planalto formado por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. E na costa leste situa-se o domínio da Província Costeira, formada por um rosário de pequenas lagoas isoladas encravadas em depósitos arenosos (MENEGAT *et al.*, 1998).

É importante destacar que nessas províncias há uma predominância de determinados tipos de rochas, o que não significa que existam exclusivamente esses afloramentos. A localização das quatro províncias geomorfológicas do Rio Grande do Sul estão demonstradas na figura 02.

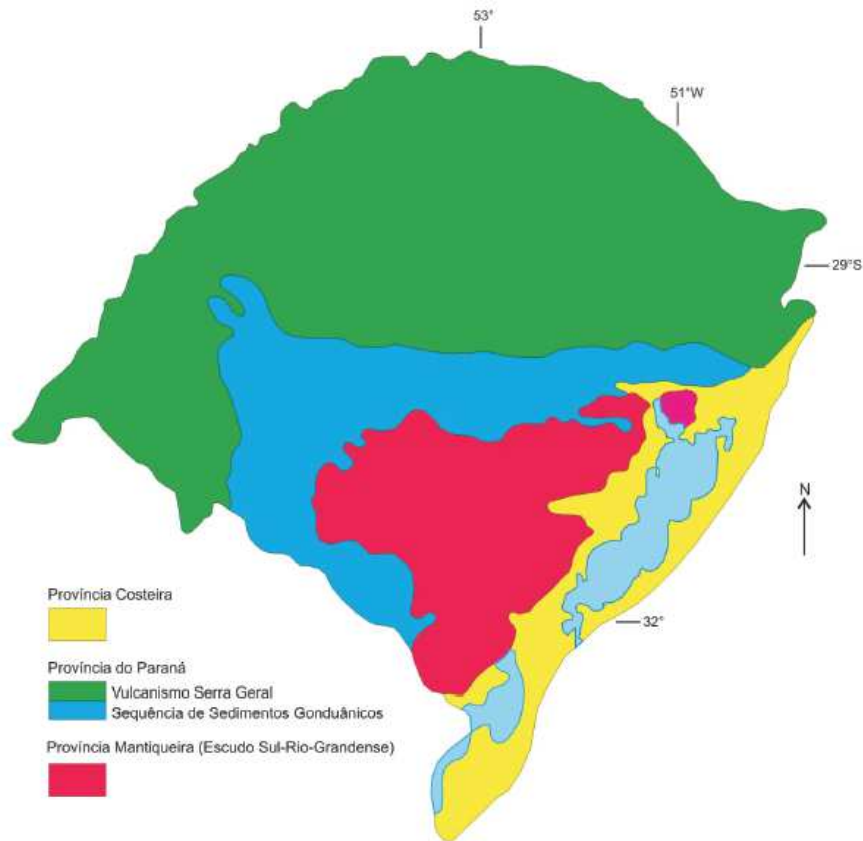


Figura 2: Limites entre as províncias geológicas que constituem o estado do Rio Grande do Sul

Fonte: Porscher e Lopes, 2000

2.1.2.1 Escudo Rio-grandense

Também denominado impropriamente Serras de Sudeste, o planalto dissecado de sudeste compreende um conjunto de ondulações cujo nível mais alto não ultrapassa 600 m. Trata-se de um planalto antigo, cuja superfície tabular só foi preservada entre alguns rios. Com coxilhas e cristas de rochas graníticas, de idade pré-cambriana, cobertas de campos e matas (MENEGAT *et al.*, 1998).

Esses terrenos pré-cambrianos constituem o chamado escudo rio-grandense e ocupa toda a porção sudeste do estado, formando uma área triangular cujos vértices correspondem aproximadamente às cidades de Porto Alegre, Dom Pedrito e Jaguarão. O conjunto está dividido, pelo vale do rio Camaquã, em duas grandes unidades, uma ao norte e outra ao sul,

denominadas serras de Herval e Tapes, respectivamente. Abrange os seguintes municípios: Caçapava do Sul, Encruzilhada do Sul, Lavras do Sul, Pinheiro Machado e Santana da Boa Vista.

Nesta província é constituída por associações de rochas ígneas de composição predominantemente granítica, as quais, são intrusivas em um conjunto de rochas metamórficas, representadas por extenso complexo de gnaisses ortoderivados, rochas máfico-ultramáficas de assoalho oceânico, xistos e mármore de composição metapelítica, que, por sua vez, estão recobertas por um pacote com cerca de 5000 m de espessura de rochas sedimentares intercaladas a rochas vulcânicas, cujas afinidades variam entre magma básicos a ácidos na forma de lavas e rochas pirocásticas (VIERO, 2010).

As idades, origens e evolução dessas associações litológicas são muito diversas, distribuídas em um complexo arranjo tectonoestratigráfico, controlado por lineamentos regionais que segmentam esse escudo em diversos compartimentos de afinidades geológicas distintas (VIERO, 2010).

Rochas metamórficas desta província são derivadas quando altas temperaturas e pressões ocorridas no fundo da terra atuam sobre qualquer outro tipo de rocha, podendo ser ígnea, metamórfica ou sedimentar. Devido a esse aquecimento a rocha volta a ser fundida, ocasionando uma mudança em suas características através das reações químicas. Já as rochas ígneas ou magmáticas formam-se pela cristalização do magma. A temperatura do magma chega alcançar 700°C ou mais, fundindo a maioria das rochas. À medida que o magma resfria lentamente no interior da terra, cristais microscópio começam a se formar, como resfria abaixo da temperatura de fusão, alguns destes cristais podem crescer mais alguns milímetros, antes que toda a massa seja cristalizada como uma rocha ígnea, um exemplo deste processo é a formação do granito. Existem dois tipos de rochas ígneas, as intrusivas, onde se cristalizam quando o magma entra em uma massa de rocha não fundida abaixo da superfície do solo, e as extrusivas que se formam pelo rápido resfriamento do magma quando chega à superfície por meio de erupções vulcânicas. (PRESS *et al.*, 2008).

2.1.2.2 Depressão periférica

A Depressão periférica, como o próprio nome diz, está na parte centro do estado, entre o Planalto Médio e a Serra do Sudeste. É formada pelos municípios principais: Gravataí, Santa Maria, Guaíba, Taquari, Canoas, Cachoeira do Sul e ocupa uma área de 31.778 km².

O solo é composto por aluvião ao longo dos rios e arenitos ao sul e norte do rio Jacuí, sendo em termos de nutrientes trocáveis materiais relativamente pobres. A vegetação divide-se em campestre, silvática e palustre; no sul predominam as formações campestres enquanto espécies florestais são encontradas a norte do Jacuí.

É delimitada pelos leques aluviais e os sedimentos da formação Serra Geral, ao norte, e pelos patamares inferiores do Escudo representados pelas serras do Sudeste, ao sul. São aspectos transicionais entre duas unidades e porque a depressão periférica deve sua gênese a uma evolução intimamente ligada à rede hidrográfica de uma extensa bacia fluvial: a do Jacuí (GUSMÃO *et al.*, 1990). É constituída por formações como a Botucatu, grupo Rosário do Sul, Rio do Rastro, Estrada Nova, Irati, Palermo e a mais perto do Escudo, a Formação Rio Bonito. Na formação Botucatu, existem arenitos que devido a sua porosidade constituem o Aquífero Guarani. Já o Grupo Rosário do Sul é formado por silitos e argilitos, podendo haver a presença de alguns fósseis. Na formação Rio Bonito é possível encontrar carvão mineral e xistos grafitosos, enquanto que a formação Estrada Nova apresenta rochas derivadas do calcário.

A depressão periférica caracteriza-se por apresentar uma topografia suave e com baixas cotas altimétricas onde ocorre a planície aluvial e os terraços fluviais. A área da planície aluvial está constituída principalmente por sedimentos recentes (Quaternário) que foram removidos de superfícies topograficamente mais elevadas e depositados nas áreas mais planas das margens dos cursos fluviais mais importantes sob o ponto de vista da atuação dos processos de acumulação. Modeladas sobre terraços fluviais em porções ao centro e sul ao sul da área, onde atuam processos de aplanamento e dissecação, ocorrem formas topograficamente um pouco mais elevadas constituindo as coxilhas. Em alguns pontos formam-se coxilhas alongadas, apresentando-se na forma de pequenas encostas rampeadas. Nelas ocorrem com facilidade os processos de erosão hídrica a partir da atuação de canais incisivos (NASCIMENTO *et al.*, 2012).

2.1.2.3 Planalto de Derrames

É uma região formada por uma sucessão de derrames, tendo-se constatado em determinadas sub-regiões, que ocorreram entre 90 e 150 milhões de anos atrás. A superfície do planalto apresenta uma inclinação geral de leste para oeste. No nordeste, junto ao litoral, alcança sua maior elevação, entre 1.000 e 1.100m; em Vacaria atinge 960m; em Carazinho, 602m. Em Cruz Alta, 469m; no extremo oeste do estado, junto à barranca do rio Uruguai, não ultrapassa cem metros. A topografia é plana ou levemente ondulada, mas os rios, que banham a parte mais elevada, abriram nela profundos sulcos ou vales, isolando compartimentos tabulares.

Os primeiros derrames ocorreram sobre as areias de dunas que, mais tarde, dariam origem aos arenitos arcoseanos da formação Botucatu. Com a ocorrência de novos derrames, essas dunas móveis acabaram presas entre as rochas basálticas, dando origem a outro tipo de arenito, conhecido como arenito intertrópico. Esses arenitos são muito semelhantes aos arenitos da formação Botucatu, porém aparecem em cotas mais altas e são mais afetados pelo intemperismo de contato. Por outro lado os derrames intermediários são os mais organizados como o fenômeno durou cerca de 20 milhões de anos, alguns desses derrames sofreram intemperismo e foram parcialmente transformados em solos residuais, e também parte desse solo foi erodida, produzindo assim depósitos sedimentares.

Um aspecto saliente do planalto é a forma de transição para as terras mais baixas com que se articula. A nordeste, cai diretamente sobre a planície litorânea, com um paredão íngreme ou escarpa, de quase mil metros de desnível: são os chamados "aparados da serra".

Os rios favorecidos pelo forte declive abriram aí profundas gargantas ou taimbés. Nesse trecho, próximo à divisa com Santa Catarina, a escarpa à borda do planalto corre paralela à costa. Nesse trecho voltado para o sul, os rios que correm para a depressão central abriram amplos vales. O rebordo do planalto basáltico recebe no Rio Grande do Sul, como nos demais estados meridionais, a denominação de Serra Geral. A sucessão sedimentar aflora ao longo da região geomorfológica denominada depressão periférica, caracterizada por relevo aplainado, com ondulações suaves e arredondadas. As áreas de exposição menores ocorrem sobre o embasamento cratônico, seja na forma de morros-testemunhos, como as situadas entre a cidade de Encruzilhada do Sul e as proximidades do rio Camaquã (VIERO, 2010).

A província denominada planalto de derrames, é dominado por basaltos e basaltos andesíticos de afinidade toleítica distribuídos em uma pilha de derrames com até 2 km de espessura que perfaz mais do que 90% do vulcanismo. As unidades ácidas descritas

genericamente como “riolitos” ocorrem intercaladas no topo da pilha vulcânica (Peate *et al.*, 1992).

As rochas vulcânicas e intrusivas correlatas tem sido subdividido em dois grupos comumente conhecidos como: (i) Basaltos Alto Ti: composto por basaltos ricos em TiO_2 , (ii) Basaltos Baixo Ti: basaltos pobres em TiO_2 . Os Basaltos Alto Ti ocorrem principalmente no norte da Bacia e os Baixo Ti são predominantes no sul (Melfi *et al.*, 1988).

O termo “basalto” é de origem latina, cujo termo “basalte” tem sentido referente à rocha vulcânica. Como já foi visto anteriormente é proveniente de rocha vulcânica e, em estudos geológicos, é detectada pela sua cor escura, dureza e resistência, fatores que a fazem ser utilizada na pavimentação de ruas e estradas. Os basaltos são rochas potencialmente aproveitáveis como pedra britada para as mais variadas aplicações na engenharia. Quando menos espesso for o derrame, pior a qualidade da rocha, visto que, quanto mais rápido é o resfriamento, mais fracos e de menos dimensão são os seus minerais.

2.1.2.4 Planície Costeira

A Planície Costeira é a região mais recente, ela se desenvolve de uma forma continua ao longo da costa, desde a cidade de Torres até a cidade do Chuí no extremo sul do estado. É um local com amplas e extensas planícies costeiras, numa superfície plana com cotas entre 1m e 25m. É formada por sedimentos marinhos, eólicos e lacustres, onde é predominantemente constituída por depósitos arenosos, sílico-argilosos, argilosos e ocasionalmente conglomerados. Pelo ponto de vista da engenharia, o local não possui afloramentos de rochas (PINHEIRO, 2000).

Esta Província é constituída, em parte, pela Bacia de Pelotas, segmento meridional das bacias marginais que compõem a margem continental brasileira. Apoiada sobre um embasamento composto pelo complexo cristalino pré-cambriano e pelas seqüências sedimentares e vulcânicas, paleozóicas e mesozóicas da Bacia do Paraná, a Bacia de Pelotas teve sua origem relacionada com os movimentos tectônicos que, a partir do Cretáceo, conduziram à abertura do oceano Atlântico Sul (Villwock & Tomazelli, 1995).

A Bacia de Pelotas tem suas unidades identificadas, onde são fruto de retrabalho de sistema de leques aluviais gerados por erosão das terras altas adjacentes durante eventos

transgressivo-regressivos que resultaram na formação de sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira (ROISENBERG *et al.*, 2008).

Esses sistemas de leques aluviais, engloba o conjunto de fácies sedimentares, resultantes de processos de transporte, associados aos ambientes de encosta das terras altas adjacentes à planície costeira. As fácies incluem nas partes mais proximais do sistema, depósitos resultantes de processos gravitacionais, como a queda livre de blocos, o rastejamento e o fluxo de detritos (tálus, eluviões e coluviões). Nas partes médias e distais dominam depósitos de correntes trativas (aluviões), associados a fluxos torrenciais e a sistemas fluviais de canais entrelaçados (braided) (ROISENBERG *et al.*, 2008).

Onde que as características composicionais, texturais e estruturais das fácies geradas no sistema de leques aluviais dependem, em grande parte, da natureza da área-fonte submetida à erosão, incluindo-se aí, principalmente, a composição das rochas e a energia de relevo. No setor norte da planície, o sistema de leques é alimentado pelas rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná, uma área fonte de relevo muito acentuado, resultando em leques formados por fácies de natureza lítica e de textura grossa (conglomerados e arenitos líticos, depósitos de fluxo de detritos) (ROISENBERG *et al.*, 2008).

2.2 Misturas Asfálticas

Os revestimentos asfálticos podem ser classificados segundo duas categorias: os revestimentos por penetração e os revestimentos por mistura. Os revestimentos asfálticos por penetração são revestimento que podem tanto ser executados a quente ou a frio e são executados em pista. Podem ser utilizados como revestimento propriamente dito ou como uma camada intermediária. Um dos revestimentos por penetração mais utilizados é o Tratamento Superficial. Trata-se de um revestimento de pequena espessura, executado pelo espalhamento do ligante e de agregados e posteriormente compactação que promove o recobrimento parcial e a adesão entre os agregados e o ligante.

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), as principais funções de um revestimento de Tratamento Superficial é: Proporcionar uma camada de rolamento de pequena espessura, porém, de alta resistência ao desgaste; Impermeabilizar o pavimento e proteger a infraestrutura do pavimento; Proporcionar um revestimento antiderrapante; Proporcionar um revestimento de

alta flexibilidade que possa acompanhar deformações relativamente grandes da infraestrutura. Podem ser executados da forma simples (TSS), dupla (TSD) e tripla (TST).

Já os revestimentos asfálticos classificados como mistura são construídos pela mistura prévia de asfalto com agregados pétreos, em usina apropriada, seguido de espalhamento a quente conformando geometricamente a pista e compactação na temperatura adequada até atingir a espessura de projeto.

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

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

A aplicação mais característica dos materiais asfálticos na engenharia civil é no campo da pavimentação rodoviária. Assim, um dos principais problemas que se apresenta ao engenheiro rodoviário projetista é a forma pela qual se deve projetar, isto é, dosar a mistura asfáltica, de modo a satisfazer a determinadas especificações técnicas.

Os fatores que influem na dosagem das misturas, vinculadas com as propriedades que se busca atingir no conjunto são: granulometria da mistura dos agregados; temperatura e viscosidade do asfalto; quantidade de asfalto usado; grau de compactação. A granulometria do agregado adotada e a quantidade de asfalto utilizado na mistura são os responsáveis pela estabilidade, flexibilidade, impermeabilização, durabilidade e distribuição das tensões no revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al*, 2006).

Na composição da mistura asfáltica entram quase sempre os seguintes materiais:

- Pedra, escória ou cascalho rolado, britados nas granulometrias adequadas, representando o agregado graúdo;
- Areia e/ou pó de pedra, de granulometria adequada, representando o agregado miúdo;
- “Fíler”, material mineral, pulverizado bem fino, representando o “material de enchimento”.

Esses materiais são misturados com o cimento asfáltico (ligante) na porcentagem indicada pelo processo de dosagem. Desta maneira, os materiais são empregados para a execução de vários tipos de base e/ou revestimentos flexíveis, onde a função do agregado, na

mistura asfáltica, é suportar e transmitir as cargas dos veículos à camada subjacente, proporcionando também, quando utilizado no revestimento, resistência ao desgaste por abrasão a ser promovido pelo tráfego.

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

Por sua vez, a função do asfalto, na mistura asfáltica, é aglutinar entre si os agregados, evitando o seu deslocamento relativo e dando impermeabilidade ao pavimento, também contribuindo para o conforto ao rolamento e segurança viária ao tráfego.

Pode-se concluir então, que é de grande importância a correta dosagem de ligante asfáltico, pois uma deficiência ou excesso do mesmo na composição da mistura asfáltica poderá ocasionar problemas relevantes. O excesso de ligante pode acarretar deformações excessivas na camada de revestimento (deformações plásticas), quando submetido à ação do tráfego e, uma insuficiência do mesmo poderá acarretar como consequência um revestimento permeável, pouco durável, sujeito a fissuração e acentuado desgaste superficial. Tais situações poderão comprometer o pavimento no seu desempenho, de forma a reduzir sua vida útil.

2.2.1 Dosagem de Misturas Asfálticas

O principal objetivo da dosagem de misturas asfálticas é produzir uma mistura que possua trabalhabilidade satisfatória e a melhor combinação possível das seguintes características (ROHDE, 2007):

- ✓ Estabilidade (resistência à ação do tráfego sem sofrer distorções ou deslocamento);
- ✓ Durabilidade (resistência à desagregação pela ação do tráfego e/ou do intemperismo);
- ✓ Flexibilidade (resistência à flexão sob ação de carga repetida, sem ocorrência de fissuras);
- ✓ Impermeabilidade (resistência à penetração e à percolação de água) e Resistência ao atrito.

De acordo com o Asphalt Institute (1956), o primeiro procedimento de dosagem documentado para misturas asfálticas foi o conhecido como método Hubbard-Field, onde ele foi originalmente desenvolvido para dosagem de misturas de areia e asfalto (composta por agregados miúdos e ligante).

A seguir estarão descritos os principais métodos para dosagem de misturas asfálticas.

2.2.1.1 Dosagem Marshall

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

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

Nesta perspectiva, realizaram uma pesquisa de caráter nacional, para selecionar aparelhos de ensaio simples e de fácil transporte, para serem utilizados em campo. Então o USACE adotou o aparelho e o método de projeto de misturas betuminosas concebido por Bruce Marshall. Este método se limita a misturas betuminosas a quente, utilizando CAP de penetração compatíveis com as condições ambientais (SENÇO, 2001).

O método Marshall prevê a dosagem das misturas considerando valores admissíveis empíricos para a estabilidade e a fluência. A estabilidade é o valor da máxima carga suportada pelos corpos-de-prova e depende do tipo e das proporções dos materiais granulares, bem como do tipo e, principalmente, da quantidade de ligante asfáltico empregado. A fluência é a deformação sofrida pelo corpo-de-prova quando submetido a uma tensão constante (ROHDE, 2007).

Além da estabilidade e da fluência, são considerados outros parâmetros que são calculados para dosagem das misturas asfálticas tais como: a densidade, volume de vazios e a relação entre vazios do agregado mineral preenchidos por betume (SPECHT, 2004).

O método é executado da seguinte forma: primeiro é realizado a preparação das amostras, onde o agregado e o asfalto são aquecidos separadamente e, então misturados. A mistura é colocada no molde cilíndrico aquecido e compactada com 50 ou 75 golpes por face do corpo-de-prova, com um soquete de 4.540 g, caindo de uma altura de 457,2 mm. São avaliados cinco teores de ligante empregando três amostras para cada porcentagem estudada, de modo a tornar possível a escolha do teor de ligante de projeto. Então os corpos-de-provas moldados são deixados em repouso, ao ar livre, durante 24 horas e extraídos dos moldes. São então pesados (ao ar e imersos em água) para obtenção dos elementos necessários ao cálculo das características físicas. Logo após, as amostras são imersas em água a 60°C, por cerca de 30 a 40 minutos, e então submetidas ao ensaio para a determinação das características mecânicas (estabilidade e fluência) (ROHDE, 2007).

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

2.2.1.2 Método de Hubbard-Field

Hubbard-Field foi primeiro método formal de dosagem a considerar a avaliação quanto à resistência das misturas, em meados dos anos de 1920. O método foi desenvolvido para misturas areia-asfalto com 100% das partículas de agregado menores que 4,75 mm. Desde então, novas sistemáticas têm surgido em função das mudanças ocorridas no volume de tráfego e no peso e na configuração de eixos dos veículos ao longo dos anos. Assim, o método Hubbard-Field foi substituído em meados dos anos 1950 pelos métodos Marshall e pelo método de Hveem.

O ensaio consiste em determinar a carga máxima resistida por um corpo de prova quando forçado através de um orifício circular, sendo que esta carga é considerada o valor da estabilidade Hubbard-Field. O ensaio acarreta um tipo de ruptura correspondente ao cisalhamento (HIRSCH 2007). Pois as condições de tráfego existentes quando se desenvolveu

o método tratavam-se de veículos com rodas de aço, transformando o carregamento em um cisalhamento (SENÇO, 2001).

2.2.1.3 Método de Hveem

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

2.2.1.4 Método de Triaxial Smith

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

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

2.2.1.5 Método SUPERPAVE

Entre os anos de 1940 e 1990, a maioria das misturas asfálticas a quente produzida nos EUA, eram dosada utilizando a metodologia *Marshall* ou *Hveem* (ROBERTS *et al.*, 1996). Desde 1993, as universidades e departamentos de transporte americanos vêm utilizando a metodologia Superpave, ainda em fase de testes no Brasil. O método foi desenvolvido pela *Strategic Highway Research Problem* (SHRP), no qual foi criado para substituir os métodos de *Hveem* e *Marshall*. A análise volumétrica comum a estes dois métodos serviu de base para o método SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement System*).

O SUPERPAVE trata-se de um método que abrange o dimensionamento de misturas asfálticas adaptadas aos requisitos de desempenho ditadas pelo tráfego e ambiente (clima). Ele facilita a escolha e a combinação do ligante asfáltico, agregado, e algum modificante necessário para alcançar o nível requerido do desempenho do pavimento. A metodologia inclui equipamentos de ensaios, métodos e critérios. A aplicação do sistema SUPERPAVE depende do volume de tráfego ou de outra forma de classificação funcional da rodovia.

Foram desenvolvidos três níveis de projeto de misturas:

- ✓ O nível 1 - para tráfego com carga de eixo equivalente (ESAL Equivalent Axle Loads) abaixo de 10^6 . É requerido apenas projeto volumétrico. Engloba moldagem de corpos-de-prova usando o Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) e a seleção do teor de ligante é baseado na % de vazios (V_a), nos vazios do agregado mineral (VAM), na % de vazios preenchido com asfalto e razão filer/asfalto.
- ✓ O nível 2 - para tráfego com ESAL entre 10^6 e 10^7 . Usam-se o projeto volumétrico como ponto de partida e uma bateria de testes com os equipamentos: Analisador de Cisalhamento SUPERPAVE (SUPERPAVE Shear Tester - SST) e Analisador de Tração Indireta (Indirect Tensile Tester - IDT). Estes são testes de predição de desempenho.
- ✓ O nível 3 - para tráfego com ESAL acima de 10^7 . Engloba os passos dos níveis 1 e 2 e testes adicionais com o SST e IDT em uma faixa mais ampla de temperatura e ensaios com corpos-de-prova confinados. A previsão de desempenho do nível 3 é mais confiável, pois se baseia num grupo de ensaios maior (LEITE *et al.*, 1996).

Conforme ressalta Cavalcanti (2010), embora essa metodologia seja recente, no Brasil só é utilizado o método de dosagem SUPERPAVE nível 1, e tem limitação assim como na

metodologia Marshall, de apenas considerar os parâmetros volumétricos, sendo as propriedades mecânicas as que realmente se relacionam diretamente com o desempenho da mistura. O autor comenta ainda que, o SUPERPAVE tem como a diferença mais importante em relação ao Marshall e o Hveem o tipo de compactação, pois utiliza um compactador designado de giratório, conforme demonstrado na Figura 03, que aplica energia por amassamento.



Figura 3: Exemplo de um Compactador giratório – Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM

Este tipo de compactador giratório SUPERPAVE (CGS) foi adotado pelos pesquisadores do SHRP como dispositivo que compacta a amostra de mistura asfáltica mais próxima da compactação de campo, de modo que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento através de condições reais de clima e carregamento. Onde o seu funcionamento se compara a de um rolo compressor que, em vez de aplicar golpes de impacto, faz a compactação exercendo uma tensão de amassamento na mistura. Os parâmetros utilizados na operação do CGS são:

Ângulo de rotação de $1,25 \pm 0,02^\circ$; taxa de 30rpm; tensão de compressão aplicada ao CP durante a rotação de 600KPa e capacidade de reproduzir corpos de provas com diâmetro de 100mm e 150mm (CAVALCANTI, 2010).

2.2.1.6 Método Bailey

O Método Bailey, é um método de seleção de agregados para uso em pavimentos asfálticos, e foi desenvolvido pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transporte de Illinois (IDOT), sendo usado e aprimorado desde a década de 1980.

O método conta com dois princípios básicos, que são o arranjo de agregados e a definição de agregados graúdos e miúdos, que se diferencia das definições utilizadas normalmente. Primeiramente, é selecionado um grau de intertravamento dos agregados, que é o que torna a mistura capaz de resistir à deformação permanente. Para garantir que a quantidade de ligante asfáltico seja suficiente, modifica-se a quantidade de agregados graúdos e miúdos, alterando os Vazios no Agregado Mineral (VAM). Para iniciar a aplicação do método, combinam-se os agregados em volume e a mistura resultante é analisada (MENDES, 2011).

Uma mistura asfáltica é um material composto de partículas de agregado de diferentes tamanhos, asfalto e vazios, cujo desempenho, sendo deformações permanentes, trincas por fadiga e desgaste, depende das propriedades e proporção de cada um dos materiais constituintes, sendo assim, o agregado pode ser considerado como o esqueleto da mistura, pois é responsável pela maior parte da resistência às cargas do tráfego. As propriedades desse esqueleto estão relacionadas, principalmente, com a dureza, a textura superficial, a angularidade, a forma e a distribuição granulométrica dos agregados (CUNHA, 2004).

O método Bailey pode ser utilizado com qualquer método de projeto de misturas (SUPERPAVE, Marshall, Hveem), pois ele relaciona-se diretamente com as características de compactação de cada fração, com os vazios no agregado mineral (VAM) e com os vazios da mistura (Vv), onde o método seleciona a estrutura de agregados da mistura buscando maior intertravamento dos agregados graúdos. A seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas vem sendo feita através de tentativas e erros, sendo, geralmente, usadas distribuições granulométricas desenvolvidas através de anos de experiência (CUNHA, 2004).

2.3 Propriedades Mecânicas e de Adesividade de Misturas Asfálticas

2.3.1 Rigidez

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

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

O módulo de resiliência nada mais é que um análogo ao módulo de elasticidade (E) tendo a mesma definição pela teoria da elasticidade, com a única diferença é que o MR é determinado a partir de cargas repetidas. Sendo que o pico de tensão e deformação recuperável são usados para calcular as constantes elásticas resilientes, mesmo que esses pico de tensão e deformação não ocorram ao mesmo tempo, em um ensaio dinâmico como este (BARKSDALE *et al.* 1997 *apud* BRITO 2006).

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é padronizado no Brasil através da norma DNER-ME 133/94, onde a norma diz que o ensaio é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico regular. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação de carga. Dessa forma mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada.

O módulo de resiliência em misturas asfálticas pode ser realizado com vários tipos de cargas repetidas: Ensaio de tração uniaxial; Ensaio de compressão uniaxial; Ensaio de viga à flexão; Ensaio de tração por compressão diametral (tração indireta) e Ensaio de compressão triaxial.

Brito (2006) enfatiza ainda que um pavimento com camada asfáltica típica está sujeita à flexão quanto à ação de uma carga. Essa ação será resistida pela rigidez radial ao invés da rigidez vertical desta camada, sendo assim, para corpos-de-prova verticais extraídos do pavimento, o ensaio diametral ou viga à flexão seriam mais representativos quanto a rigidez da camada. Contudo o ensaio diametral tem vantagem por utilizar corpos-de-prova delgados, que permite avaliar diversas seções de um pavimento. Outra grande vantagem é o de ser um ensaio não-destrutivo, permitindo que sejam determinadas outras propriedades do material após sua caracterização, como, por exemplo, teor de ligante, resistência à tração, desgaste, densidade, etc.

O MR para misturas asfálticas pode variar: com o tipo de mistura, faixa granulométrica, tipo de ligante, propriedades volumétricas, energia de compactação, temperatura de compactação e pela temperatura do ensaio. O MR para materiais viscoelásticos varia tanto com o tempo de aplicação da carga como com o tempo de repouso, uma vez que o deslocamento recuperável depende dos dois. Para esses materiais, embora o deslocamento total varie com o número de ciclos de aplicação de carga devido ao acúmulo de deslocamentos não-recuperáveis, esse deslocamento não-recuperável deve se manter constante ao longo dos ciclos (BERNUCCI *et al*, 2006).

Núñez *et al* (2007), avaliaram a influência do tipo e do teor de cal no MR, onde os autores constataram aumentos significativos com cales que apresentam teores de óxidos ou hidróxidos de cálcio mais elevados. De acordo com os autores, o teor de 1% mostrou-se suficiente para promover aumentos da ordem de 70% no módulo de resiliência e de 30% na resistência à tração.

2.3.2 Fadiga

Fadiga é a degradação do material sob carregamento repetido, sendo reconhecida como uma das principais causas da deterioração ou degradação dos materiais de pavimentos. Ela é sempre iniciada nas regiões de máximas tensões ou deformações de tração, já que se verifica

que os materiais são mais resistentes a carregamento repetidos de compressão do que de tração. Estas máximas tensões ou deformações ocorrem naturalmente na camada do pavimento com maior rigidez. Ressalta-se a importância do estudo e caracterização deste material em laboratório para que se possam utilizar ferramentas de dimensionamento mais confiáveis (WESSELING, 2002).

A Figura 04 ilustra as solicitações sofridas pelo pavimento quando da repetição das cargas dos veículos. Na superfície do pavimento é aplicada uma carga vertical de compressão, e nas fibras inferiores da camada asfáltica surgem tensões de tração e de compressão devido ao carregamento e descarregamento repetido (SANTOS, 2005).

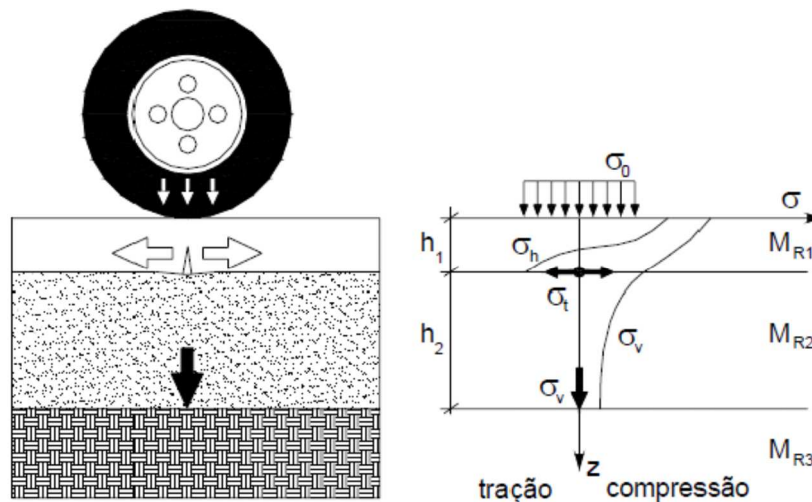


Figura 4: Demonstração do trincamento de um pavimento

Fonte: Medina, 1997

Conforme comentam Bernucci *et al.* (2006) a fadiga se manifesta por meio do surgimento das trincas interligadas, mais conhecidas como “couro de jacaré”, e a intensificação desse fenômeno separa os blocos do revestimento provocando assim a não transmissão de carga entre eles. As causas do trincamento por fadiga podem ser:

- Falta de compactação do subleito e ou das camadas constituintes do pavimento, provocando um enfraquecimento da estrutura como um todo e fissuração precoce do revestimento;

- Drenagem ineficiente, permitindo queda de resistência nas camadas afetadas;
- Incompatibilidade no projeto quanto à natureza e à espessura das camadas, principalmente da camada de revestimento asfáltico, sendo construída com pequena espessura e alta rigidez;
- Revestimento asfáltico executado com teor de ligante abaixo do teor de projeto;
- Projeto inadequado de dosagem da mistura asfáltica, levando à porcentagem de vazios que permite a entrada de água, mas não suficientemente permeável para facilitar a saída, provocando um aumento da pressão neutra na água presa dentro dos vazios;
- Temperatura de usinagem ou de execução do revestimento asfáltico impróprias.

Bock (2009) discorre que a fadiga da camada de revestimento, bem como a reflexão das trincas para a camada de reforço, tem sido uma preocupação constante dos engenheiros rodoviários tanto em nível nacional quanto mundial. Esta preocupação tem levado muitos pesquisadores a buscarem a compreensão do problema, identificando causas, comportamento, leis de crescimento e métodos de remediação avaliando seus mecanismos e formas de atuação, além do incremento da vida de fadiga.

O ensaio que caracteriza o fenômeno de fadiga consiste em submeter corpos-de-prova do material às solicitações repetidas e anotar o número de ciclos até que entre em ruptura. Segundo Pinto (1991), os equipamentos laboratoriais para ensaios dinâmicos permitem a aplicação de carregamentos cíclicos ao material sob o regime de tensão constante ou controlada e de deformação constante ou controlada.

No ensaio de tensão controlada (TC), o qual é o ensaio tradicionalmente realizado no país para definição do número de repetições de carga é feito por compressão diametral, onde o critério de fadiga está associado a fratura da amostra. A tensão é mantida de forma constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o estágio de colapso do corpo-de-prova. Portanto a vida de fadiga (N_f) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à fratura completa da amostra.

O ensaio de deformação controlada (DC) envolve a aplicação de cargas repetidas que produzam uma deformação constante ao longo do ensaio, o que conduz a uma diminuição da carga aplicada, para manter a deformação constante.

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

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

- **Fatores de solicitação:** Durante a evolução do teste de fadiga à tensão controlada a deformação cresce continuamente até a ruptura e no teste à deformação controlada a tensão reduz progressivamente; Desempenho à Fadiga de Misturas em Concreto Asfáltico com Diferentes Formas de Incorporação de Cal; Os concretos asfálticos tendem à duração de vida menores nos ensaios com tensão controlada que com deformação controlada; Os resultados de duração de vida nos testes de tensão controlada, em geral, são menos dispersos que nos ensaios de deformação controlada; Os módulos de rigidez mais altos tendem a produzir duração de vida maior nos ensaios de tensão controlada do que nos ensaios de deformação controlada; Nos ensaios de tensão controlada a deterioração do corpo-de-prova é forte e a propagação das fissuras é rápida, enquanto que nos ensaios de deformação controlada a deterioração é moderada e mais longa.
- **Fatores de formulação do concreto asfáltico:** Existem muitos fatores de formulação que influenciam a fadiga dos concretos asfálticos, a seguir são apresentados os mais importantes: Natureza do Cimento Asfáltico; Teor de Cimento Asfáltico; Tempo de Repouso; Compacidade ou Percentagem de Vazios; Granulometria, e; A Forma e a Textura dos Granulares.
- **Fatores do meio ambiente:** Os dois principais fatores do meio ambiente que afetam a resistência à fadiga dos concretos asfálticos são a temperatura e a velocidade da aplicação da carga (ou frequência).

Bertollo (2002) comenta que a vida de fadiga do revestimento também é afetada pelas características de deformabilidade das outras camadas que compõem a estrutura do pavimento, podendo assim, relacionar o trincamento prematuro das camadas asfálticas com problemas de drenagem do subleito, onde o excesso de umidade enfraquece as camadas subjacentes, submetendo o revestimento a deformações excessivas. Outros fatores relacionados à estrutura do pavimento, são as espessuras e os módulos “elásticos” (rigidez) das camadas, já que uma relação inadequada entre elas reduz a vida de fadiga do revestimento.

Specht (2004), testou a utilização da borracha moída de pneus em misturas asfálticas, na pesquisa o autor avaliou amostras de concreto asfáltico com diferentes traços de ligante contendo borracha moída. A resistência à fadiga das misturas estudadas foi avaliada através do

ensaio de tração por compressão diametral cíclico. Em uma análise direta o autor observou que, para um mesmo estado de tensões, as misturas com asfalto-borracha mostraram um desempenho superior ao da mistura com ligante convencional. Neste mesmo estudo também foi realizada uma análise conjunta das equações de fadiga e de rigidez das misturas através do software FLAPS (*Finite Layer Analysis of Pavement Structures*), onde na análise utilizando o critério de ruptura de tensões, as misturas com borracha levam a um incremento significativo na vida de fadiga em comparação às misturas de referências.

2.3.3 Deformação Permanente

Deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, podendo ser atribuída ao revestimento, ou às subcamadas, ou ainda a uma combinação de efeitos (figura 05). As camadas não-asfálticas abaixo do revestimento podem apresentar deformações permanentes principalmente por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento. Esses problemas podem ser evitados por uma seleção dos materiais e compactação adequada e um bom projeto estrutural de forma a limitar as tensões atuantes aos níveis admissíveis e seguros (BERNUCCI *et al.*, 2006).

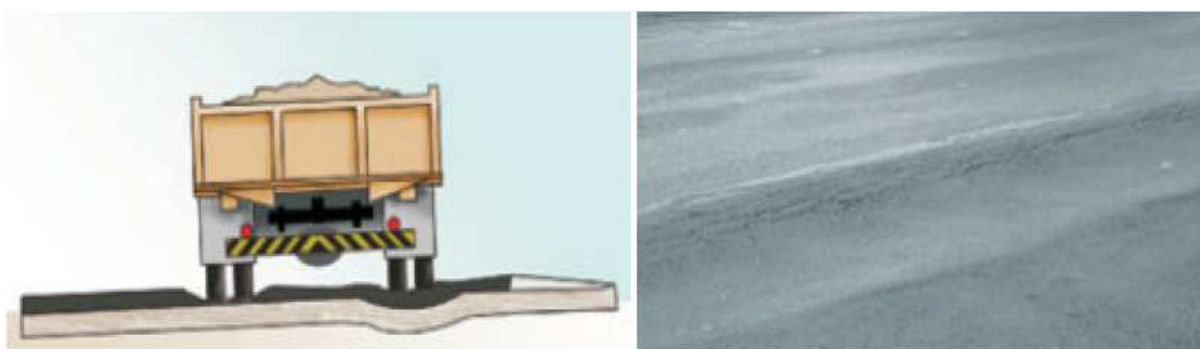


Figura 5: Deformações permanentes em pavimentos asfálticos

Fonte: Bernucci *et al.*, 2006

Segundo Bernucci *et al.* (2006) a deformação permanente em misturas asfálticas ocorre devido a uma combinação do fluxo do material (viscoelástico ou viscoplástico) e do dano neste material, representado pela formação e propagação de trincas. A capacidade de uma mistura de resistir a esse tipo de deformação depende de diversos fatores, entre os quais, a consistência do ligante e a volumetria da mistura (agregados e ligantes). Entre as deformações permanentes em pavimentos incluem-se os afundamentos nas trilhas de roda, deformações plásticas no revestimento e depressões. Esses defeitos causam acréscimos na irregularidade longitudinal afetando a dinâmica das cargas, a qualidade de rolamento, o custo operacional dos veículos e, devido ao acúmulo de água, riscos à segurança dos usuários.

No quadro 01, as causas de alguns defeitos em pavimentos:

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

Quadro 1 - Causas e exemplos de defeitos em pavimentos

Fonte: DNIT, 2006.

A origem das deformações permanentes está ligada a um processo de redução da sua porosidade (pós-compactação) durante os primeiros anos de serviço, e a esforços de cisalhamento que ocorrem perto da superfície do pavimento, na zona que limita a área de contato entre o pneu e o pavimento (SILVA, 2005).

Greco (2004) comenta que a deformação permanente ocasionada pelas camadas de base, sub-base ou do subleito, ocorrem quando o pavimento é submetido a cargas superiores àquelas para quais ele foi projetado, ou ainda quando ocorrem falhas na compactação durante a sua

construção. Esse tipo de deformação gera trincas de tração na parte inferior da camada de revestimento.

De acordo com Motta (1991) para prevenir a deformação permanente é importante ter uma mistura com alto teor de agregados angulosos e baixas porcentagem de ligante e altas porcentagens de vazios, mas, para a fadiga, dada pela deformação elástica, quanto menor a porcentagem de vazios melhor. Por isso é importante compatibilizar a porcentagem de vazios para cada mistura, tendo em vista os dois aspectos estabilidade-durabilidade, que no caso é fadiga versus afundamento de trilha de roda.

Segundo Medina e Motta (2005), a previsão do afundamento de trilha de roda é bastante complexa, especialmente em misturas asfálticas, pois não se tem modelos de comportamento para misturas asfálticas brasileiras, quanto à deformação permanente, pois o problema não se resume apenas na caracterização dos materiais, mas também, na avaliação do impacto das condições ambientais no material, além do cálculo das tensões atuantes durante a vida de serviço do pavimento, no qual, terá a influência do envelhecimento do ligante com o tempo.

Independente de método ou do modelo de previsão utilizado é sempre necessário para a caracterização dos materiais os ensaios laboratoriais. Os principais ensaios utilizados para caracterizar o comportamento das misturas asfálticas quanto a deformação permanente são: ensaios fundamentais (triaxial com carregamento repetido e compressão uniaxial não-confinada (creep estático e creep dinâmico); e ensaios de simulação (simuladores de laboratório) (DE CEZARO JUNIOR, 2008).

Para Bernucci *et al.* (2006) o ensaio triaxial possui a vantagem de reproduzir uma condição de tensão multiaxial mais próxima da condição existente no campo. Para isso as deformações precisam ser monitoradas nos sentidos vertical e horizontal.

Specht (2004) avaliou a resistência ao acúmulo de deformações permanentes de misturas asfálticas com a adição de borracha moída de pneus através do ensaio de creep dinâmico com amostra confinada e do ensaio em simulador de tráfego tipo LCPC, o autor comprovou que ambos os ensaios realizados qualificaram de maneira semelhante às misturas estudadas, sendo as misturas com melhor desempenho aquelas preparadas com ligante asfalto-borracha, seguida da mistura convencional e das misturas tipo borracha-agregado.

2.3.4 Adesividade

Pinilla (1965) discorre que a adesividade entre um ligante asfáltico e um sólido como o agregado pétreo, é definido como a resistência que opõe o ligante a ser afastado do sólido pela ação das forças exteriores. O autor comenta ainda que existem dois tipos de adesividade e que na prática atuam simultaneamente, no qual são: Adesão Mecânica, trata-se da penetração do ligante nos poros e interstícios da pedra. No fim de um certo tempo, o ligante aumenta a consistência por esfriamento ou por perda dos solventes voláteis, tornando-se firme e resistente no interior do sólido, produzindo-se assim uma união física; e a Adesão Físico-Química, que resulta das forças de atração existentes na interface agregado-ligante. A adesividade ótima consegue-se quando o ligante tem a capacidade suficiente para “molhar” e envolver completamente a superfície do agregado.

Moura (2001) ressalta que a adesividade é a capacidade do ligante asfáltico de aderir à superfície do agregado, sendo que vários fatores influenciam este fenômeno, com grau de importância e intensidades diferentes. Trata-se de um dos aspectos mais importante em misturas asfálticas. A verificação da adesividade ligante/agregado é de suma importância para prever o comportamento da mistura quanto a resistência à desagregação e ao descolamento das misturas asfálticas. Com a desagregação da mistura asfáltica pode ocorrer a penetração de água e atingindo camadas inferiores do pavimento, danificando sua estrutura.

A perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados de uma mistura betuminosa pode ser associada a dois mecanismos: perda de adesão e perda de coesão. A perda de adesão está ligada à entrada de água entre o ligante e o agregado e ao descolamento do filme asfáltico da superfície do agregado. A perda de coesão está ligada à redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações ligante/agregado.

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

Já a coesão é a propriedade responsável por deixar os materiais em contato, “ligados” ou coesos uns aos outros, até que forças externas perturbem ou rompam estas ligações. A coesão é responsável por uma parcela da estabilidade (de resistência) da mistura asfáltica, pelo fato do

ligante asfáltico agir como elemento de ligação entre diferentes tipos e tamanhos de agregados, que por sua vez, estão recobertos por ligante asfáltico graças à adesão (MOURA 2001). A adesão e coesão em misturas asfálticas estão intimamente ligadas, pois é a partir destes fenômenos que existe a possibilidade de poder misturar materiais de diferentes estados, em uma mistura com capacidade de suportar cargas sem os materiais separar-se.

Para Oliveira Filho (2006), a perda de adesão entre agregado e ligante está comumente relacionada a três fatores: a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso, a ocorrência de umidade e a presença de sujeira e finos na superfície do agregado.

Essa perda de adesão do ligante asfáltico com a superfície do agregado (fratura adesiva) bem como a fratura do próprio filme de ligante (fratura coesiva), quer seja na presença de água ou não, é a origem de muitos tipos de defeitos em pavimentos, incluindo trincamento por fadiga, deformação permanente e dano por umidade (LYTTON, 2004).

De acordo com Pinilla (1965) existem 4 fatores que influenciam a adesividade do ligante ao agregado, os quais são:

- **Características químicas e geológicas:** Destaca-se que uma classificação baseada somente na composição química não tem grande sentido prático no que diz respeito à adesividade, é necessário o conhecimento da forma como se encontram esses materiais que entram na mistura, da superfície da rocha, sua estrutura, mais ou menos porosa, alveolar ou vítrea e o que é muito importante, das características de sua superfície, isto é, se são lisas ou rugosas, distribuição de componentes ácidos, etc.
- **Presença do pó na superfície:** A presença do pó na superfície dos agregados é desfavorável para misturas asfálticas, quando em presença de grandes quantidades de pó superficial, tendem a absorver o ligante, dificultando assim a adesividade e diminuindo a espessura do filme betuminoso e a possibilidade da obtenção de um filme contínuo. Isto, somado ao fato que o ar pode ficar retido na presença do pó, enfraquecendo a união e facilitando a entrada da água na superfície.
- **Tipo de superfície do agregado:** Se a superfície é muito lisa e de estrutura quase vítrea, a adesividade que existira será quase inteiramente do tipo físico químico e não mecânico. Se a superfície é rugosa, porosa ou provida de capilaridade, os fenômenos da molhagem se complicam, e a adesividade mecânica sobre uma superfície seca, áspera é muito maior que sobre uma superfície lisa.

- **Presença da água na superfície:** Se o agregado se aquece de modo que o filme absorvido possa ser eliminado e o vapor de água escape, desaparecerá a película superficial de água absorvida o que fará com que a tensão interfacial agregado-ligante decresça onde o ligante aplicado a um agregado quente ou recentemente aquecido, se unirá melhor que com um agregado frio e úmido.

A sensibilidade das misturas à umidade associa-se a dois mecanismos que se inter-relacionam: a perda de adesão e a perda de coesão. A perda de adesão está ligada à entrada de água entre o ligante e o agregado e ao descolamento do filme asfáltico da superfície do agregado. A perda de coesão está ligada à redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações ligante/agregado causando uma redução severa na resistência e integridade da mistura (FURLAN *et al*, 2004).

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

Tabela 1 – Fatores intervenientes nas características de adesividade

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

Fonte: Hicks 1991

A causa de defeitos como a desagregação e o *stripping* em revestimentos asfálticos, nada mais é que um problema de ligação adesiva na interface agregado/ligante onde, as ações do tráfego e da água, contribuem para progresso dos danos, surgindo buracos e panelas. A desagregação é a desintegração da camada de rolamento e é caracterizada, pela perda dos finos, evoluindo para o deslocamento dos agregados maiores. Já o *stripping* é caracterizado pelo descolamento do ligante da superfície do agregado devido aos esforços do tráfego que causam tração à película de asfalto (FURLAN *et. al*, 2004).

Mesmo que ambos esses defeitos resultem da “pouca afinidade” ou de ligações deficientes entre os materiais e dos esforços de tração, eles ocorrem de forma diferenciada; na desagregação o agregado descola-se da superfície da camada de rolamento e esse defeito evolui em direção das camadas inferiores; já o *stripping* a evolução é ascendente, iniciando-se na fibra inferior da camada de rolamento. Como já é sabido, o fator comum e acelerador desses defeitos é a presença da água, que pode atuar de diversas formas: infiltrando-se e alojando-se entre agregado e asfalto, descolando-o; “lavando” o asfalto quando aliada às cargas do tráfego;

amolecendo o asfalto por emulsificação, comprometendo a coesão da mistura, entre outras (FURLAN *et. al*, 2004).

Um outro fator importante é o volume de vazios; misturas com volume de vazios entre 6 e 13% (aproximadamente) não são nem impermeáveis nem drenantes e são as mais susceptíveis ao dano por umidade induzida. A susceptibilidade ao dano por umidade está relacionada ao volume de vazios, quando o volume de vazios é em excesso, o mesmo cria lacunas que permitem a entrada da água e do ar, que por muitas vezes até aprisiona. Onde a permeabilidade ao ar promove a aceleração do processo de endurecimento do ligante por oxidação, e a presença da água nesses vazios causa o *stripping* (Huber, 1999).

Dentre as várias metodologias aplicáveis à verificação das características de adesividade de misturas asfálticas estão os métodos empíricos que se baseiam na análise visual onde o contato entre o ligante asfáltico e o agregado é avaliado visualmente e procura-se correlacionar os resultados com o possível desempenho da mistura em campo. Exemplos são os métodos DNER – ME 78/94 e DNER – ME 79/94. O segundo grupo de ensaios é baseado no comportamento mecânico das misturas onde amostras de concreto asfáltico são submetidas a um condicionamento e/ou esforço mecânico para provocar de forma acelerada ou simular o que ocorre em campo. Neste grupo estão, dentre outras, as Metodologias Lottman Modificada (AASHTO T 283-89) e Cântabro (CEC 325/86).

Kandhal (1992) apresenta um estudo sobre a susceptibilidade de misturas asfálticas ao dano induzido pela umidade. O autor afirma que a Metodologia Lottman Modificada (AASHTO T 283-89) tem sido recomendada em vários estados americanos para avaliar o potencial de desagregação de misturas asfálticas. São feitas recomendações sobre a utilização de aditivos e da cal como melhoradores da adesividade das misturas.

FURLAN *et. al*, (2004) comenta ainda que por muitos anos adesão entre asfalto e agregado foi avaliada a partir das propriedades físico-químicas dos materiais utilizados ou fundamentada na termodinâmica. O entendimento do fenômeno da adesão era subjetivo e específico ao par asfalto-agregado e focado em propriedades desejáveis dos materiais para o desenvolvimento da adesão. Entretanto, supondo que a dosagem das misturas seja suficiente para selecionar materiais compatíveis e que o controle tecnológico conduza a revestimentos de qualidade, ficaria por conta dos fatores externos (clima, tráfego e presença de água) a responsabilidade pelo aparecimento de defeitos como desgaste e *stripping*.

2.3.4.1 Processos de perda de adesividade

As condições de ocorrência da ruptura coesiva das misturas são somente explicadas em termos reológicos, enquanto que nas rupturas adesivas, a presença de água nas mistura asfáltica implica no desencadeamento e/ou arrancamento da película de ligante asfáltico da superfície do agregado. Basicamente são cinco os modos de ruptura da ligação adesiva entre ligante e agregado:

- Deslocamento: a água desloca a película do asfalto da superfície do agregado;
- Desprendimento: a umidade do agregado antes da mistura separa-o do asfalto;
- Emulsificação espontânea: a água é incorporada pelo asfalto e emulsifica-o;
- Pressão nos poros: a água aprisionada nos vazios da mistura saturada, aliada as cargas do tráfego percola sob pressão, descolando a película de asfalto;
- Lavagem hidráulica: em condições úmidas as repetições do tráfego pesado proporcionam ciclos de compressão, que expõem o ar dos vazios da mistura, e relaxação, que absorve água pela criação de um vácuo parcial;

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

- Emulsificação: presença de glóbulos de água dispersos em ligante asfáltico. Isto pode ocorrer devido à utilização de alguns tipos de aditivos químicos, com o objetivo de inicialmente corrigir a má adesividade ligante/agregado, mas que, entretanto, depois de um certo período, propiciam a emulsificação do ligante asfáltico. A presença de argilas na superfície dos agregados pode também ser agenciadores de emulsificação.
- Desprendimento: separação do ligante asfáltico da superfície do agregado, devido à presença de uma fina película de água existente na superfície do agregado, antes desse ser envolvido pelo filme de ligante asfáltico, sem necessariamente provocar a ruptura da camada de ligante asfáltico.
- Descolamento: ocorre quando a película de ligante asfáltico é removida da superfície do agregado pela ação da água. A água alcança a superfície do agregado devido à existência de fissuras na camada de ligante asfáltico que recobre o agregado, gerando assim uma forma de stripping.
- Ruptura da película de asfalto: a ruptura pode ser considerada uma forma de stripping mas, na realidade, ela inicia o stripping. A ruptura da camada de ligante asfáltico

pode ocorrer por tensões geradas pelo tráfego, principalmente nas arestas dos agregados onde a espessura do filme de ligante asfáltico é pouco espessa.

- Pressão nos poros: provoca também o stripping. Essa ocorrência é devido ao aprisionamento de água dentro dos poros, que se deu por problemas de projeto da mistura ou por redução de volume de vazios pela ação do tráfego; a água pode ficar oclusa nesses vazios da camada, com dificuldade de percolação rápida, e frente à ação do tráfego, pode sofrer um aumento da pressão intersticial, descolando a película de ligante asfáltico da superfície do agregado.
- Lavagem hidráulica: este tipo de stripping ocorre mais na superfície da camada de rolamento, devido à ação dos pneus, quando a mesma encontra-se saturada; a água ao ser removida da superfície é pressionada e expulsa. Isto ocasiona um tipo de abrasão na superfície, criando uma falha na superfície, descobrindo parte do agregado. Deve-se citar também o efeito abrasivo da poeira depositada na superfície dos pavimentos quando misturada à água de chuva.

2.3.4.2 Melhoradores de adesividade

Uma das principais soluções para problemas de adesividade são os melhoradores de adesividade, que usualmente são usados para resolver os problemas de ligação entre o agregado e o CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo). Os mais utilizados são os Ligantes Modificados, Intertravamento, Dopes e a Cal Hidratada. Estes melhoradores de adesividade podem fazer-se necessários se um determinado projeto de mistura mostrar-se susceptível ao dano por umidade induzida. Então os melhoradores de adesividade líquidos e a cal estão entre os tipos de agentes mais comumente usados. Nos EUA, vários aditivos são utilizados para reduzir a sensibilidade das misturas à umidade, sendo a cal hidratada o mais usado (LITTLE AND EPPS, 2006).

✓ Ligantes Modificados

Polímeros são produtos de origem orgânica, inorgânica ou sintética, de alto peso molecular, cuja estrutura molecular consiste da ligação por reação química de pequenas unidades chamadas monômeros. Esta reação é denominada polimerização e o tamanho final da molécula oriunda da reação com os polímeros é conhecida como macromolécula. Caso o

polímero seja composto de monômeros idênticos, este polímero é classificado como homopolímero e caso seja composto de espécies diferentes de monômeros, é classificado como copolímero (BILLMEYER, 1984 *apud* MORILHA, 2004).

Segundo Moura (2001) os asfaltos modificados por polímero têm suas características reológicas são modificadas, ocorrendo o aumento da viscosidade em elevadas temperaturas e diminuição da viscosidade em baixas temperaturas, o aumento da temperatura do ponto de amolecimento, maior resistência ao envelhecimento, alta adesividade e coesão e maior elasticidade e resistência à deformação permanente.

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

✓ Intertravamento

Consistem basicamente de duas frações de material: agregado graúdo e um elevado teor de mástique, este formado por agregado miúdo, fíler mineral, ligante asfáltico e fibras. O esqueleto mineral composto por agregados graúdos em proporção superior em relação às misturas densas e contínuas fornece às misturas um elevado intertravamento entre os grãos, conferindo às mesmas maiores resistência. Já o elevado teor de mástique fornece às misturas uma maior durabilidade (VASCONCELOS, 2004).

✓ Dopes

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

✓ Cal Hidratada

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

De acordo Nuñez *et al* (2007) cal hidratada é o mais eficiente agente melhorador de adesividade, sendo utilizada em muitos locais onde os agregados apresentam problemas de adesividade. Alguns agregados, como os de granito, são particularmente susceptíveis à perda de adesividade.

Além do fenômeno químico, as características ambientais (calor e chuvas intensas) e o tráfego têm papel importante na perda de adesividade. Essas modificações podem melhorar a adesividade ligante/agregado, reduzindo a formação de afundamentos de trilhas de roda, bem como reduzir o trincamento e o envelhecimento (oxidação) da camada asfáltica (LITTLE E EPPS, 2001).

A cal hidratada tem a capacidade de tornar uma mistura asfáltica mais rígida e resistente às deformações permanentes é um reflexo de seu desempenho superior como fíler mineral ativo. Reage com o ligante, removendo componentes indesejáveis ao mesmo tempo em que suas pequenas partículas se dispersam na mistura asfáltica, tornando-a mais resistente às deformações permanentes e à fadiga. O enrijecimento resultante da adição de cal hidratada melhora o desempenho dos ligantes a temperaturas elevadas, sem tornar a mistura asfáltica mais frágil a temperaturas muito baixas. De fato, a baixas temperaturas, a cal hidratada se torna menos ativa quimicamente e se comporta com qualquer outro fíler inerte (NUÑEZ *et al*, 2007).

Os mecanismos pelos quais a cal hidratada modifica misturas asfálticas são ainda um tanto desconhecidos. Na literatura encontram-se alguns resultados mostrando que a cal hidratada tem de fato diversos efeitos, alguns com consequências no envelhecimento, outros em termos de propriedade mecânicas e na adesividade ligante/agregado. As razões pelas quais a cal hidratada tem demonstrado grande eficácia em misturas asfálticas estão nas fortes interações entre os principais componentes, ou seja, agregado mineral e ligante asfáltico (Bock, 2012).

Segundo Ishai e Craus (1977), a cal hidratada modifica as propriedades superficiais do agregado, permitindo o desenvolvimento de uma composição de superfície e rugosidade mais favoráveis à adesão do ligante. Além disso, a cal hidratada pode tratar partículas argilosas aderidas à superfície do agregado, inibindo seu efeito prejudicial. A maioria dos métodos para adicionar cal hidratada consiste em colocá-la diretamente no agregado graúdo, seco ou úmido, às vezes com marinação. Isso demonstra que a modificação da superfície do agregado é um aspecto fundamental na modificação das misturas.

A elevada porosidade da cal hidratada pode explicar seu efeito no enrijecimento da mistura, como relatado na literatura, ocorrendo um aumento de módulo de resiliência (misturas mais rígidas sem tanta suscetibilidade ao trincamento) efeito este nem sempre observado.

Posteriormente, constatou-se um aumento de módulo dependente da temperatura, sendo a cal mais eficiente em temperaturas elevadas, onde as deformações permanentes são dominantes (Bock, 2012).

A cal hidratada apresenta uma maior porosidade seca (vazios de Rigden) do que outros fíleres minerais, com valores típicos entre 60 e 70% enquanto fíleres minerais têm valores próximos a 30-34%. A diferença vem da elevada porosidade das partículas da cal hidratada.

No fíler mineral, a porosidade, essencialmente, vem dos vazios entre as partículas. Para cal hidratada, a porosidade no interior das partículas soma-se à porosidade entre as partículas, levando a um valor muito maior. Portanto, o efeito do endurecimento provocado pela cal hidratada em temperaturas mais elevadas pode ser explicado, pelo menos em parte, pela maior porosidade de suas partículas (GRABOWSKI *et al.*, 2009).

Ao ser adicionada, a cal reage com os agregados, fortalecendo o vínculo entre estes e o ligante asfáltico. Ao mesmo tempo em que trata os agregados, a cal também reage com as moléculas fortemente polares do ligante, inibindo a formação de sabões solúveis em água, que causariam descolamentos. As interações químicas entre a cal hidratada e os grupos de ácidos do ligante contribuem tanto para o aumento da resistência ao envelhecimento quanto para melhorar a adesividade das misturas modificadas. Além disso, a dispersão de minúsculas partículas de cal hidratada na mistura torna-a mais rígida e mais resistente, reduzindo a probabilidade de o vínculo entre o ligante asfáltico e os agregados ser quebrado mecanicamente, mesmo sem a presença de água (Bock, 2012).

Em uma pesquisa apresentada por Little e Petersen (2005) mostraram uma síntese de possíveis interações entre os íons de cálcio da cal hidratada e vários grupos funcionais do ligante asfáltico. Onde o ácido carboxílico e grupos funcionais do tipo 2-quinolone, presentes nos ligantes asfálticos, reagem irreversivelmente com a cal formando sais a base de cálcio que são insolúveis em água. Essas reações removem componentes ácidos do asfalto pela absorção dos mesmos na superfície das partículas de cal. Pesquisas tem mostrado ainda que em algumas situações a cal e os polímeros quando usados conjuntamente podem gerar misturas com melhor desempenho, em comparação às misturas onde esses são usados isoladamente (Mohammad *et al.*; 2000).

Por todas estas razões, as interações entre a cal hidratada e os outros componentes da mistura asfáltica são bastante intensos, explicando melhorias tão distintas como na resistência à umidade, no envelhecimento e propriedades mecânicas das misturas. Nuñez *et al.* (2007) complementa ainda dizendo que a adição de cal reduz a taxa de oxidação e envelhecimento do ligante. Esta redução é resultado das reações químicas que ocorrem entre o hidróxido de cálcio

e as moléculas altamente polarizadas do ligante. A cal hidratada não reduz apenas o envelhecimento, mas também o decorrente da fadiga e das baixas temperaturas. Embora, via de regra, as misturas asfálticas mais rígidas apresentem maior trincamento, a adição de cal melhora as características de fadiga das misturas e reduz seu trincamento. O trincamento frequentemente ocorre devido à formação de microfissuras. Essas microfissuras são interceptadas e têm sua direção desviada pelas pequenas partículas de cal hidratada.

Conforme apresentado por Bock (2009) a adição de cal calcítica, com elevado teor de hidróxido de cálcio, altera de maneira substantiva e positiva as propriedades das misturas tipo concreto asfáltico. Bock *et al* (2009) complementam que além da qualidade da cal e dos agregados que compõe a mistura, a forma de incorporação da cal exerce grande influência no comportamento das mesmas. As formas de incorporação que tratam com cal o agregado graúdo são as mais eficientes. Porém a prática atual de adição de cal como melhorador de adesividade na forma de fíler, prática corrente no Brasil, não foi a forma mais satisfatória de adição encontrada na pesquisa.

A comparação entre as cales dolimítica e a calcítica, se dá principalmente por causa dessa diferença de composição, ou seja, a cal produzida no Rio Grande do Sul é de baixo teor de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), por outro lado a cal produzida em Minas Gerais tem elevado teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A pesquisa realizada por Núñez *et al* (2007), concluiu que as melhorias das propriedades mecânicas dependem significativamente da qualidade da cal. Cales com baixos teores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ não produzirão tais efeitos benéficos. Os autores comentam que um teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da ordem de 90% (cal calcítica) pode ser suficiente para melhorar as propriedades das misturas asfálticas em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade. Também abordam que o emprego de cal hidratada é muito adequado em pavimentos de elevado desempenho, constituindo as camadas superiores dos mesmos, sujeitas a elevadas tensões de compressão (risco de afundamento nas trilhas de rodas), associada a camadas subjacentes mais flexíveis.

Conforme comenta Grande (2011) há diversas maneiras de incorporação da cal, sendo que as duas mais usuais na indústria do asfalto são: incorporação “a seco”, quando a cal é misturada ao agregado e posteriormente o ligante é misturado ao agregado e, quando a incorporação é feita diretamente ao ligante e depois misturado ao agregado.

Lutif *et al.* (2008) em uma pesquisa concluíram que a adição de cal seca em agregado pré-umedecidos parece ser o método mais eficiente de aplicação. A mistura tratada com cal seca foi a mais resistente ao dano devido à umidade. A mistura tratada com lama de cal pode apresentar bom comportamento se for utilizada com um teor correto da relação cal/água.

Já na pesquisa realizada por Bock *et al* (2009), observa-se que a adição de cal calcítica, com elevado teor de hidróxido de cálcio, altera de maneira substantiva e positiva as propriedades das misturas tipo concreto asfáltico; as formas de incorporação de cal na mistura que tratam com cal o agregado graúdo são as mais eficientes.

Huang *et al.* (2005), em uma pesquisa, onde a adição da cal foi feita diretamente ao ligante asfáltico, sendo antes da mistura com os agregados. Demonstraram que resultados apontaram para uma melhoria da resistência ao dano por umidade induzida, medido através do Lottman, em comparação a misturas onde a cal foi inserida juntamente com os agregados. Já Button (1985) e Paul (1995) mostraram que o método mais eficiente de aplicação da cal é na forma de argamassa. Mohammad *et al* (2008), porém, obtiveram semelhantes resultados de propriedades mecânicas entre misturas onde a cal foi adicionada ao ligante, e misturas onde a cal foi adicionada aos agregados.

A incorporação de cal em misturas asfálticas tem sido intensamente estudado e aplicado nos EUA, onde a cal é especificada em muitos estados, sendo que atualmente estima-se que 10% dos concretos asfálticos produzidos no EUA têm incorporação de cal hidratada (HICKS e SCHOLZ, 2003).

A experiência europeia na utilização da cal em misturas asfálticas ainda não está tão desenvolvida como nos EUA, mas seus efeitos benéficos na durabilidade dos concretos asfálticos também têm sido amplamente divulgados.

Um exemplo disso é a ação de uma concessionária francesa que especifica a abordagem do assunto em uma série de cursos que realiza, pois observou que misturas modificadas com cal apresentavam uma durabilidade de 20% a 25% maior (RAYNAUD, 2009 *apud* EULA, 2010). Observações semelhantes levaram a Holanda a especificar o emprego de cal hidratada em revestimento poroso, presentes atualmente em 70% das rodovias no país.

Porém Bianchetto *et al.* (2007), afirmam que apesar das vantagens, a adição da cal hidratada deve ser racionalmente controlada por causa do tipo e conteúdo do fíler, onde deve ser determinado de acordo com as propriedades físicas e volumétricas desejadas. O uso descontrolado e sem projeto pode causar um efeito contrário ao esperado para a mistura asfáltica. Os autores afirmam ainda que apesar das limitações, o efeito protetor do fíler na mistura convencional com relação ao envelhecimento é compensatório, mesmo com o pequeno ganho na viscosidade do pavimento.

Apesar dos mecanismos pelos quais a cal hidratada modifica os CA serem pouco conhecidos, a sua incorporação proporciona, uma série de efeitos benéficos às misturas. A cal é vista não somente como um aditivo para prevenção de danos causados pela umidade, mas

também como um agente melhorador multifuncional, reduzindo o envelhecimento químico do ligante e melhorando o desempenho dos pavimento no que diz respeito as propriedades mecânicas e de adesividade. Bock (2012) traz uma tabela (tabela 2) resumo apresentando as influências que a cal produz nas misturas asfálticas em diversas propriedades da mesma.

Tabela 2 - Influência da incorporação de cal hidratada em misturas de concreto asfáltico (CA)

<i>Propriedade</i>	<i>Efeito</i>	<i>Fonte</i>
<i>Durabilidade</i>	↑ 2 A 10 ANOS (20% a 50%)	EULA, 2010
<i>Resistência ao envelhecimento</i>	Redução da taxa de oxidação e envelhecimento em alguns ligantes asfálticos.	PETERSEN <i>et al.</i> , 1987 SEBAALY, 2006
<i>Dano por umidade induzida</i>	Menor suscetibilidade aos danos por umidade com efeitos mais pronunciados em misturas submetidas a múltiplos ciclos C-D.	HICKS, 1991 LITTLE e EPPS, 2001 MC CANN 2003 LUTIF <i>et al.</i> , 2007
<i>Resistência à Tração (RT)</i>	Em 113 misturas analisadas apenas 63 apresentaram aumento de RT (56%)(sem descrição do tipo de cal empregado).	EULA, 2010
	Misturas com cal hidratada apresentam melhor manutenção de RT após o processo de condicionamento.	PICKERING, 1992
	Um teor de Ca(OH) ₂ da ordem de 90% é necessário para otimizar a mistura asfáltica em termos de RT, MR e adesividade	NÚÑEZ, 2007
<i>Módulo de Resiliência (MR)</i>	Aumentos de MR em função do enrijecimento provocado pela cal nas misturas.	PICKERING, 1992
	Aumentos mais pronunciadas com cales que apresentam teores de óxidos ou hidróxidos de cálcio mais elevados.	NÚÑEZ, 2007

Fonte: Bock, 2012

3. METODOLOGIA

3.1 Planejamento da Pesquisa

Para alcançar o objetivo dessa pesquisa, primeiramente tratou-se da determinação das propriedades da dosagem Marshall de misturas em concreto asfáltico (CA) tendo em vista a substituição de 1,5% de fíler por diferentes tipos de cales. A utilização da cal nesse estudo tem dupla função: como fíler e como agente melhorador de adesividade ligante/agregado.

Para a realização do estudo, foram utilizados dois tipos de cales, uma dolomítica produzida no estado do Rio Grande do Sul, e outra calcítica provinda esta do estado de Minas Gerais, em várias misturas de concreto asfáltico, onde se utilizou tipos de agregados minerais provenientes de várias formações geológicas do estado do Rio Grande do Sul. Para a realização das moldagens dos corpos-de-prova, foram montadas três tipos de misturas diferentes de concreto asfáltico, para cada tipo de agregado:

- ✓ REFERÊNCIA;
- ✓ 1,5% CAL CALCÍTICA;
- ✓ 1,5% CAL DOLOMÍTICA;

Após a determinação dos parâmetros da dosagem Marshall foram moldados corpos-de-prova para a realização de ensaios para verificação do comportamento mecânico (ensaio de resistência à tração por compressão diametral e ensaio de módulo de resiliência) para a verificação das propriedades de adesividade (Metodologia Lottman Modificada) e Desgaste (Ensaio Cantabro).

Para a realização da pesquisa foram moldados um total de 108 corpos-de-prova para cada tipo de agregado mineral, totalizando 648 corpos-de-prova, sendo que suas respectivas quantidades e ensaios a que foram submetidos estão descritos no quadro 02.

Mistura	Nº de Amostra para cada Agregado			
	Dosagem	Mr/Rt	Lottman	Cantabro
Referência	15	4	8	9
1,5% Dolomítica	15	4	8	9
1,5% Calcítica	15	4	8	9
Parcial	45	12	24	27
Total	108			

Quadro 2 - Número de amostras por agregado

Para comparação do estudo foram utilizados dados da pesquisa anterior (BOEIRA, 2011), com agregados da cidade de Coronel Barros. Onde foram moldados pela mesma metodologia, e ensaiados nos mesmos ensaios para verificação do comportamento mecânico (ensaio de resistência à tração por compressão diametral e ensaio de módulo de resiliência) e para a verificação das propriedades de adesividade (Metodologia Lottman Modificada) e Desgaste (Ensaio Cantabro), porém com uma variação de incorporação das cales, onde no estudo foi utilizado 1% e 2% de incorporação das mesmas cales utilizada nesta pesquisa.

3.3 Materiais Utilizados

3.3.1 Agregados Minerais

Para conhecer o desempenho potencial dos agregados, é importante considerar como são formados e o que aconteceu com eles desde então, antes de serem utilizados em um revestimento asfáltico. O agregado escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície e no interior do pavimento. O desempenho das partículas de agregado é dependente da maneira como são produzidas, mantidas unidas e das condições sob as quais vão atuar. A escolha é feita em laboratório onde uma série de ensaios é utilizada para a predição do seu comportamento posterior quando em serviço (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Os materiais granulares foram coletados diretamente das unidades de produção, de forma a ter sua representatividade adequada, e então foram realizados ensaios de caracterização de cada fração como granulometria, forma, sanidade, abrasão, massa específica, entre outros. Estes ensaios laboratoriais foram realizados no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) da UFSM (Universidade Federal de Santa Maria). Já para a pesquisa anterior (Boeira, 2011), no caso o material de Coronel Barros, os ensaios de caracterização foram realizados no LEC (Laboratório de Engenharia Civil) da UNIJUI (Universidade Regional do Noroeste do estado do Rio Grande do Sul).

A origem dos materiais granulares utilizados nesta pesquisa estão demonstrados na Figura 06.

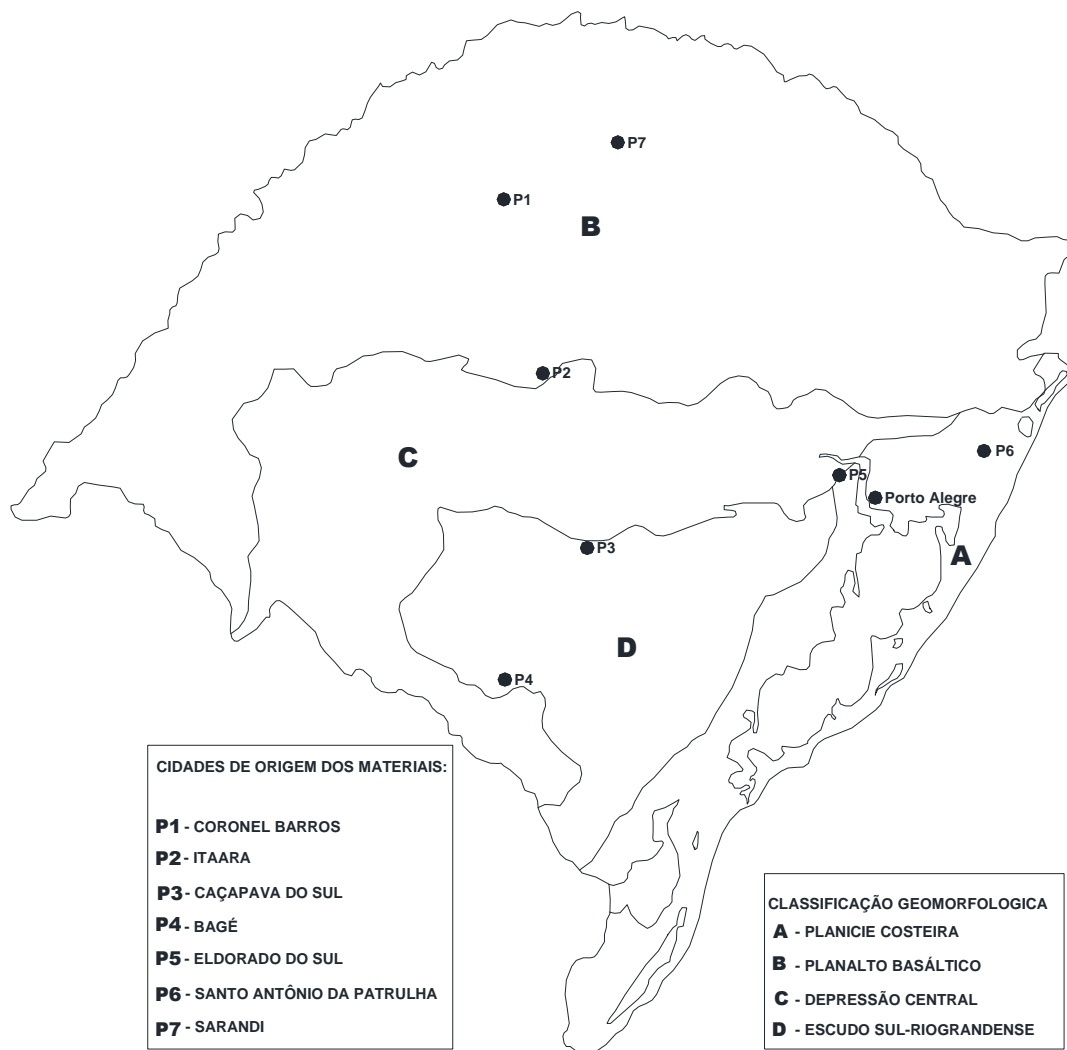


Figura 6: Localização da pedreira de coleta de materiais

Foram escolhidos os sete tipos de agregados provindos do estado do Rio Grande do Sul, tentando dessa forma contemplar assim as várias formações geológicas existentes no estado, no quadro 03 está demonstrado a geologia dos materiais coletados.

	CIDADES DE ORIGEM	GEOLOGIA DOS MATERIAIS
P1	CORONEL BARROS	Basalto (Fanerítica fina à afanítica (maciça com raras amígdalas), poucos feno cristais de plágio, px e opacos. Alteração hidrotermal (argilominerais - clorita e celedonita)
P2	ITAARA	Rocha Vulcânica Ácida (Riodacito)
P3	CAÇAPAVA DO SUL	Rocha Metamórfica (Calcosilicatada com fratura preenchida com calcita, feno de dolomita)
P4	BAGÉ	Rocha Metamórfica (Calcosilicatada com fratura preenchida com calcita, feno de dolomita; raracalcita; diopsídio microclínio;plágio; tremolita; biotita; esfeno)
P5	ELDORADO DO SUL	Rocha Granítica (Granito com cataclase (metasienogranito milonítico) Inequigranular, fanerítica grossa com fên de FK, orientação minerais micáceos)
P6	SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA	Rocha Vulcânica (Dacito (porfírica com matriz afani; feno de plágio e augita; matriz com residuo de FK e O2; opaco magnelita))
P7	SARANDI	Rocha Vulcânica (diabásio)

Quadro 3 – Cidades de origem e a geologia dos materiais

Os agregados coletados nas pedreiras foram submetidos a ensaios laboratoriais para comprovar sua qualidade. Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados nas tabelas de 3 a 6:

Tabela 3 – Propriedade dos agregados de Eldorado do Sul e Itaara

PROPRIEDADES	NORMA	ELDORADO DO SUL		ITAARA	
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo
Absorção (%)	DNER-ME 195/97	0,448	-	2,774	-
Massa Específica Real do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	2,633	2,501	2,658	2,509
Massa Específica Aparente do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	2,602	-	2,476	-
Índice de Lamelaridade	DAER/RS-EL 108/01	20,5	13,3	7,2	14,6
Desgaste ou Perda à Abrasão (%)	DNER-ME 035/98	21,3	28,53	10,67	14,41
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94	0,636	-	1,521	-
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 054/97	-	66,13	-	67,18
Índice de forma	DNER-ME 086/94	1,01	1,42	0,99	1,36

Tabela 4 – Propriedade dos agregados de Sarandi e Santo Antônio da Patrulha

PROPRIEDADES	NORMA	SARANDI		SANTO ANT. DA PATRULHA	
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo
Absorção (%)	DNER-ME 195/97	1,717	-	1,559	-
Massa Específica Real do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	2,995	2,965	2,824	2,793
Massa Específica Aparente do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	2,848	-	2,705	-
Índice de Lamelaridade	DAER/RS-EL 108/01	7,2	-	11,3	-
Desgaste ou Perda à Abrasão (%)	DNER-ME 035/98	16,87	-	9,88	-
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94	1,22	-	3,47	-
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 054/97	-	69,93	-	62,08
Índice de forma	DNER-ME 086/94	2,01	-	2,19	-

Tabela 5 – Propriedade dos agregados de Bagé e Caçapava do Sul

PROPRIEDADES	NORMA	BAGÉ		CAÇAPAVA DO SUL	
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo
Absorção (%)	DNER-ME 195/97	1,499	-	0,616	-
Massa Específica Real do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	2,748	2,745	2,837	2,765
Massa Específica Aparente do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	2,64	-	2,788	-
Índice de Lamelaridade	DAER/RS-EL 108/01	13	-	14,7	-
Desgaste ou Perda à Abrasão (%)	DNER-ME 035/98	26,79	-	14,79	-
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94	19,34	-	4,32	-
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 054/97	-	62,23	-	75,53
Índice de forma	DNER-ME 086/94	2,51	-	2,54	-

Tabela 6 - Propriedade do agregado de Coronel Barros

PROPRIEDADES	NORMA	CORONEL BARROS	
		Graúdo	Miúdo
Absorção (%)	DNER-ME 195/97	1,654	
Massa Específica Real do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	3,017	2,928
Massa Específica Aparente do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	2,874	
Índice de Lamelaridade	DAER/RS-EL 108/01	17,8	-
Desgaste ou Perda à Abrasão (%)	DNER-ME 035/98	9,86	-
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94	2,596	-
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 054/97	-	77,25
Índice de forma	DNER-ME 086/94	2,73	-

Fonte: Boeira, 2011

Os resultados dos ensaios de análise granulométrica (média de duas determinações, realizadas com lavagens) estão apresentados nas tabelas 7 a 13 e figuras 07 a 13.

Tabela 7 – Característica granulométrica dos materiais de Coronel Barros

Peneira	Abertura (mm)	Brita %	Pedrisco	Pó-de-Pedra	Areia	Cal Dolomítica	Cal Calcítica
3/4"	19,1	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	0,0	68,2	100,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	0,0	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/4"	6,35	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
n 4	4,76	0,0	0,6	95,3	100,0	100,0	100,0
n 8	2,38	0,0	0,3	69,4	99,8	100,0	100,0
n 30	0,59	0,0	0,2	32,7	87,1	100,0	100,0
n 50	0,297	0,0	0,2	23,9	30,1	98,9	100,0
n 100	0,149	0,0	0,2	18,0	5,1	94,5	99,9
n 200	0,074	0,0	0,1	14,0	2,4	83,0	96,9

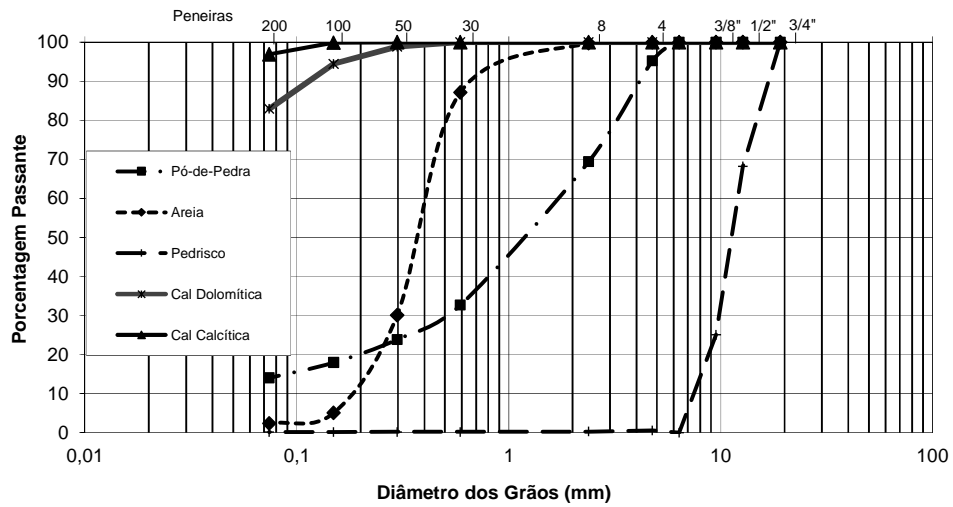


Figura 7: Distribuição granulométrica das cales e agregados de Coronel Barros

Tabela 8 – Característica granulométrica dos materiais de Itaara

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	98,25	100,00	100,00
1/2"	12,7	12,99	100,00	100,00
3/8"	9,5	2,14	91,92	100,00
n 4	4,8	1,08	5,97	98,93
n 10	2,0	1,03	1,51	67,07
n 40	0,42	0,91	1,10	28,37
n 80	0,18	0,76	0,89	17,87
n 200	0,075	0,55	0,71	11,85

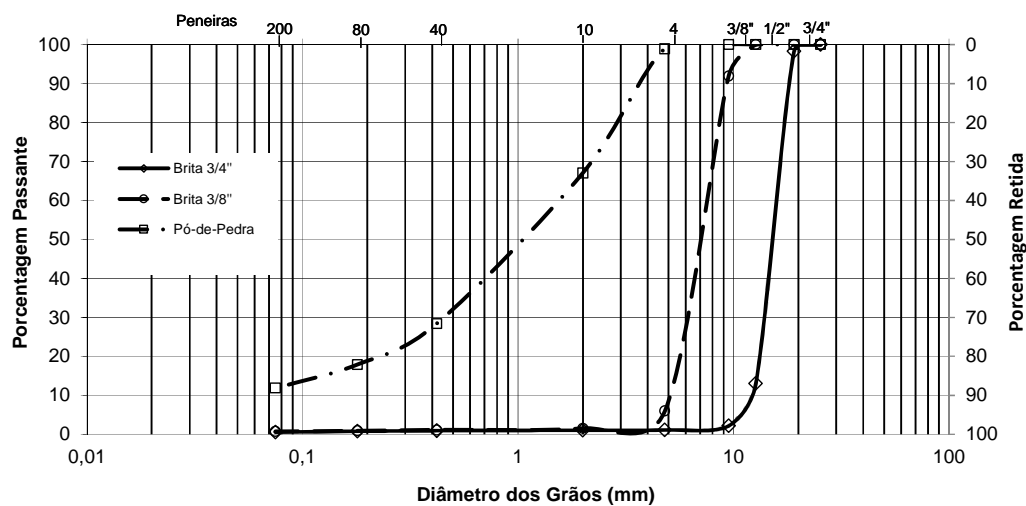


Figura 8: Distribuição granulométrica dos agregados de Itaara

Tabela 9 – Característica granulométrica dos materiais de Eldorado do Sul

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	98,08	100,00	100,00
1/2"	12,7	29,32	100,00	100,00
3/8"	9,5	2,02	91,45	100,00
n 4	4,8	0,37	6,51	95,75
n 10	2,0	0,34	0,48	65,20
n 40	0,42	0,32	0,42	26,03
n 80	0,18	0,28	0,39	15,94
n 200	0,075	0,26	0,00	10,37

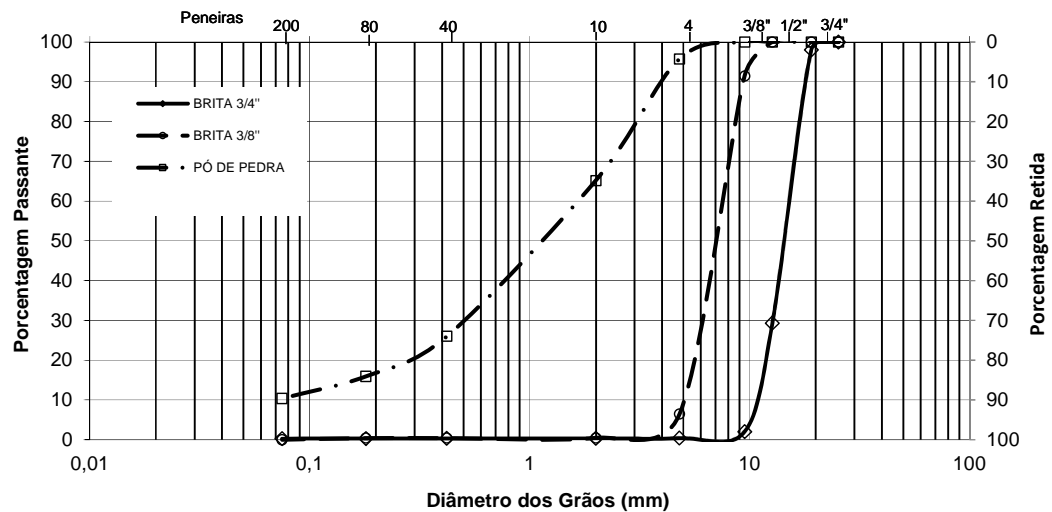


Figura 9: Distribuição granulométrica dos agregados de Eldorado do Sul

Tabela 10 – Característica granulométrica dos materiais de Bagé

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	99,53	100,00	100,00
1/2"	12,7	50,67	100,00	100,00
3/8"	9,5	22,77	99,93	99,95
n 4	4,8	0,45	31,10	99,86
n 10	2,0	0,40	1,09	80,43
n 40	0,42	0,36	0,61	39,81
n 80	0,18	0,32	0,52	20,84
n 200	0,075	0,21	0,35	11,16

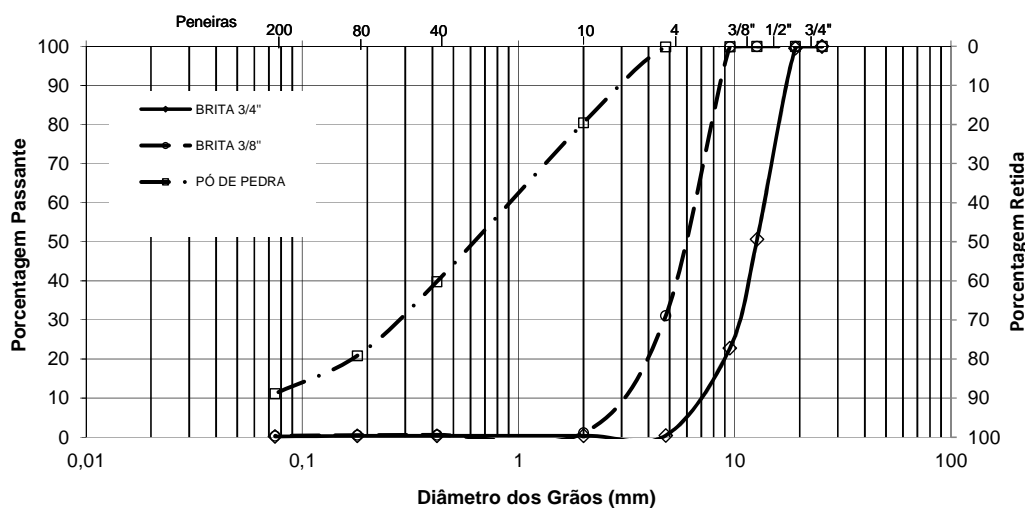


Figura 10: Distribuição granulométrica dos agregados de Bagé

Tabela 11 – Característica granulométrica dos materiais de Caçapava do Sul

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	98,96	100,00	100,00
1/2"	12,7	20,94	98,28	100,00
3/8"	9,5	2,51	73,73	100,00
n 4	4,8	0,21	1,78	95,83
n 10	2,0	0,20	0,71	74,99
n 40	0,42	0,19	0,65	31,06
n 80	0,18	0,17	0,63	15,75
n 200	0,075	0,12	0,54	9,55

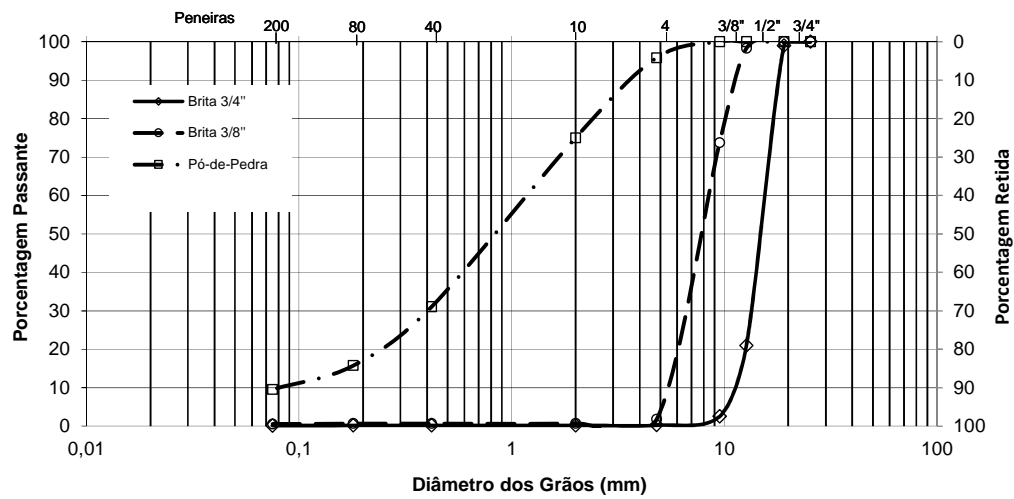


Figura 11: Distribuição granulométrica dos agregados de Caçapava do Sul

Tabela 12 – Característica granulométrica dos materiais de Santo Antônio da Patrulha

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	58,35	98,90	100,00
3/8"	9,5	11,40	95,25	100,00
n 4	4,8	2,30	45,85	100,00
n 10	2,0	1,70	1,80	73,35
n 40	0,42	1,60	1,60	29,70
n 80	0,18	1,45	1,30	19,95
n 200	0,075	1,00	0,90	13,75

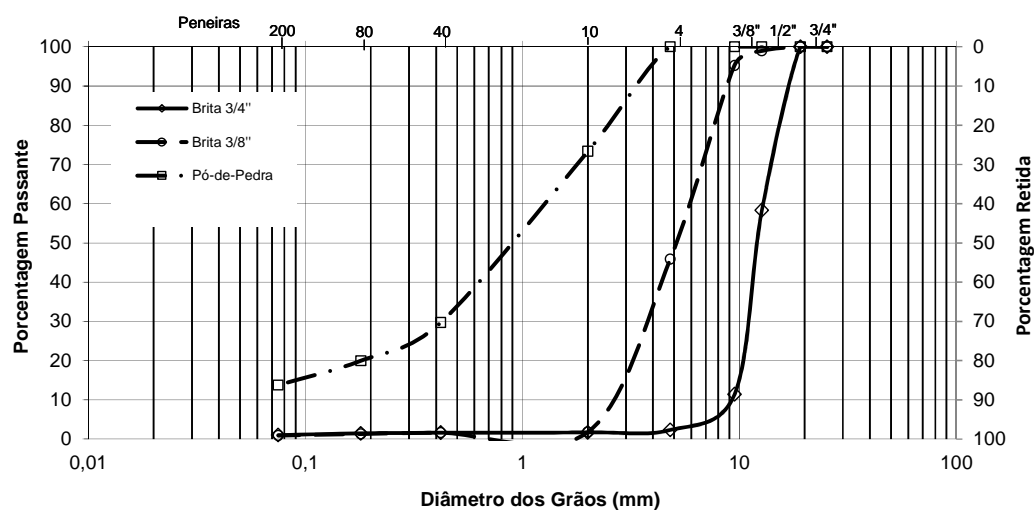


Figura 12: Distribuição granulométrica dos agregados de Santo Antônio da Patrulha

Tabela 13 – Característica granulométrica dos materiais de Sarandi

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	93,39	100,00	100,00
1/2"	12,7	9,07	100,00	100,00
3/8"	9,5	0,32	98,82	100,00
n 4	4,8	0,16	16,85	99,94
n 10	2,0	0,15	0,57	69,25
n 40	0,42	0,14	0,55	37,81
n 80	0,18	0,13	0,54	27,15
n 200	0,075	0,11	0,46	18,73

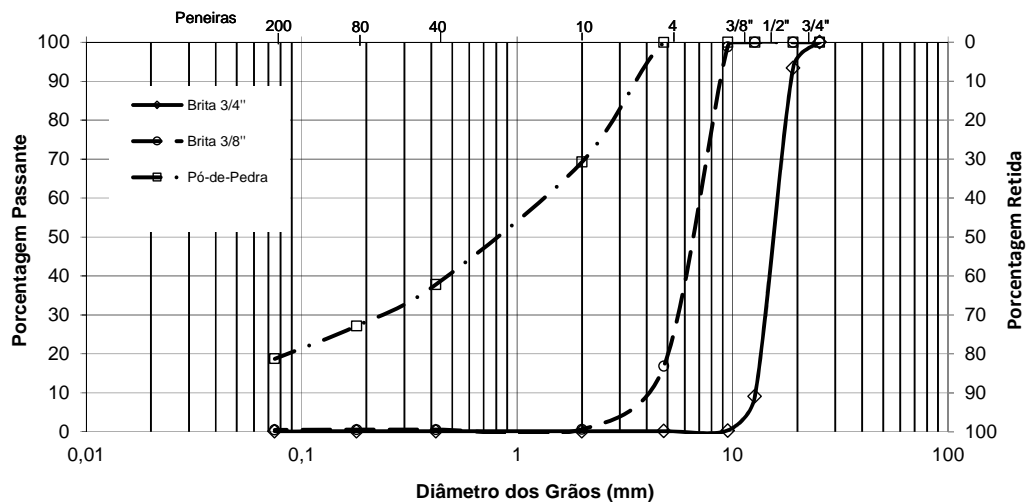


Figura 13: Distribuição granulométrica dos agregados de Sarandi

Para ajudar na caracterização dos agregados coletados, foi realizado o ensaio no equipamento *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), esse equipamento foi desenvolvido para analisar os diversos parâmetros relacionados à forma, à angularidade e à textura superficial de agregados graúdos e miúdos. O procedimento foi realizado no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes), na UFRJ do Rio de Janeiro.

O AIMS é um equipamento que foi desenvolvido para analisar parâmetros de forma de partículas, onde a principal vantagem com relação ao uso desse equipamento é a possibilidade de obtenção de resultados de distribuições de propriedades e não apenas médias de valores, como fornecem ensaios tradicionais. O AIMS é normatizado pela AASHTO TP 81-10 e consiste em, inicialmente, quarterar e fracionar os agregados na série de peneiras americana. Em seguida, os agregados graúdos são posicionados na bandeja de forma que suas partículas estejam separadas umas das outras. Para os agregados miúdos, a disposição das partículas deve ser feita de forma a evitar a formação de aglomerados de partículas na bandeja.

O parâmetro de forma 2D quantifica a forma de imagens bidimensionais de partículas de agregados miúdos. O parâmetro varia de 0 a 20, com partículas circulares (low/baixo) tendo valores de forma 2D mais próximos de zero e partículas mais alongadas (extreme/extremo) mais próximas de 20. No que diz respeito à angularidade, aplicada para agregados graúdos e miúdos, sua escala varia de 0 a 10.000, quanto mais próximo de 0, menos angular será o agregado, ou seja, mais próximo do formato de um círculo.

Já a textura dos agregados é quantificada pelas variações nos níveis de pixels de uma imagem digitalizada, a textura dos agregados descreve o nível de rugosidade da superfície do material. Os valores de textura variam de 0 a 1.000, sendo um agregado totalmente polido aquele que possui valor igual a zero. Em relação a esfericidade, que é capaz de avaliar a tridimensionalidade das partículas. Essa propriedade varia de 0 a 1. Partículas de agregados com forma cúbica possuem valores de esfericidade próximos a 1 (BESSA *et al*, 2013). Na figura 14 estão demonstradas graficamente as especificação para cada resultado obtidos pelo AIMS.

Angularidade

Angularidade dos agregado são apresentados em uma escala de 0 a 1000. As imagens abaixo representam as quatro categorias angularidade (baixo, moderado, alto e extremo) em comparação com as categorias Krumbein que variam de 1,0 a 0.

Escala Krumbein = 0,6



$0 \leq \text{Baixo} \leq 2100$
(Arredondado)

Escala Krumbein = 0,4



$2100 \leq \text{Moderado} \leq 3975$

Escala Krumbein = 0,1



$3975 \leq \text{Alto} \leq 5400$

Escala Krumbein = sem escala



$5400 \leq \text{Extremo} \leq 10000$
(extremamente angular)

Forma Agregado Miúdo (Forma 2D)

Forma agregado miúdo (bidimensional) é apresentado em uma escala de 0-20. Valores baixos Forma 2D indicam partículas circulares (esféricas) enquanto altos valores de forma indicam partículas alongadas. As imagens abaixo fornecem uma representação visual das categorias Forma 2D.



$0 \leq \text{Baixo} \leq 6,5$
(Circular)



$6,5 \leq \text{Moderado} \leq 8$



$8 \leq \text{Alto} \leq 10$

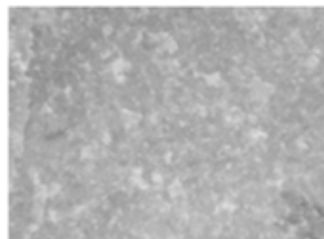


$10 \leq \text{Extremo} \leq 20$
(Alongado)

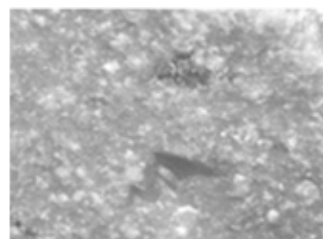
Angularidade Agregado Fino e Grosso

Textura do Agregado Graúdo

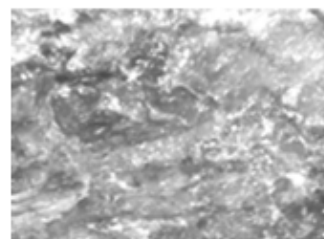
Agregado graúdo superfície microtextura é apresentado em uma escala de 0 a 1000. As imagens abaixo fornecem representações de categorias de textura.



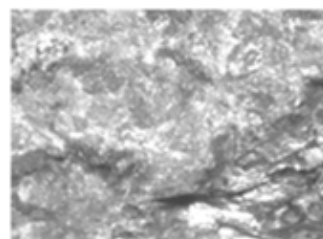
$0 \leq \text{Baixo (Suave)} \leq 200$



$200 \leq \text{Moderado} \leq 500$



$500 \leq \text{Alto} \leq 750$



$750 \leq \text{Extremo} \leq 1000$

Figura 14: Especificação dos resultados do AIMS

Nos quadros 04 e 05 estão demonstrados os resultados obtidos no AIMS.

Ensaio	Materiais			
	Mat. Bagé	Mat. Santo Antônio da Patrulha	Mat. Sarandi	Mat. Itaara
Forma 2D	Moderado (30,7%)	Alto (36,3%)	Alto (36,2%)	Alto (41%)
Angularidade	Moderado (67,4%)	Moderado (60,3%)	Moderado (41,3%)	Moderado (64%)
Textura	Baixo (76,1%)	Moderado (80,7%)	Moderado (74,7%)	Moderado (79,2%)
Esfericidade	Alto (44,5%)	Alto (76%)	Alto (81,3%)	Alto (57,7%)
Distribuição plano e alongado	L/S ≥ 1:1 (100%)	L/S ≥ 1:1 (100%)	L/S ≥ 1:1 (100%)	L/S ≥ 1:1 (100%)
Distribuição plano ou alongado	F or E ≥ 1:1 (100%)	F or E ≥ 1:1 (100%)	F or E ≥ 1:1 (100%)	F or E ≥ 1:1 (100%)

Quadro 4 - Resultados do equipamento AIMS

Ensaio	Materiais					
	Mat. Caçapava do Sul			Mat. Eldorado do Sul		
	3/4"	3/8"	Pó de Pedra	3/4"	3/8"	Pó de Pedra
Forma 2D	-	-	Alto (32,1%)	-	-	Alto (41,5%)
Angularidade	Moderado (81,6%)	Moderado (76,6%)	Moderado (53,6%)	Moderado (80,1%)	Moderado (83%)	Moderado (56,2%)
Textura	Moderado (65,3%)	Moderado (65,5%)	Moderado (68%)	Moderado (89,4%)	Moderado (73%)	Baixo (64%)
Esfericidade	Moderado (44,9%)	Alto (49,2%)	Alto (44%)	Alto (61,6%)	Alto (43,3%)	Alto (48%)
Distribuição plano e alongado	L/S ≥ 1:1 (100%)	L/S ≥ 1:1 (100%)	L/S ≥ 1:1 (100%)	L/S ≥ 1:1 (100%)	L/S ≥ 1:1 (100%)	L/S ≥ 1:1 (100%)
Distribuição plano ou alongado	F or E ≥ 1:1 (100%)	F or E ≥ 1:1 (100%)	F or E ≥ 1:1 (100%)	F or E ≥ 1:1 (100%)	F or E ≥ 1:1 (100%)	F or E ≥ 1:1 (100%)

Quadro 5 - Resultados do equipamento AIMS

3.3.2 Fíleres

Na pesquisa foram utilizados os fíleres: pó-de-pedra e a cal hidratada. O pó de pedra é resultante da britagem das rochas usadas neste estudo, as cales utilizadas é uma produzida no estado do Rio Grande do Sul produzida pela empresa Fida, e, outra calcítica, proveniente do estado de Minas Gerais, que foi fornecida pela Mineração Belocal Ltda.

A escolha pela cal dolomítica se deu pelo fato desta ser de uso corrente em obras de engenharia no Rio Grande do Sul, pois há somente a ocorrência deste tipo de cal no estado. Este tipo de cal tem sido adicionado como material de enchimento (fíler) em diversas obras de pavimentação, sem avançar-se na discussão sobre a sua qualidade e os efeitos de sua incorporação no desempenho de misturas de concreto asfáltico (CA).

A cal calcítica produzida no estado de Minas Gerais (com alto teor de Ca(OH)_2) foi escolhida pelo fato que no Rio Grande do Sul são produzidas apenas cales com baixos teores

de hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 . A bibliografia internacional, especialmente a estadunidense, indica sempre o emprego de cales com elevados teores de hidróxido de cálcio para a obtenção de melhores resultados quanto a melhorias de adesividade e desempenho das misturas asfálticas. Um teor de Ca(OH)_2 da ordem de 90% é necessário para otimizar as misturas asfálticas em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade.

As massas específicas encontradas para essas cales são de $2,60\text{g/cm}^3$ para cal dolomítica e $2,40\text{g/cm}^3$ para a cal calcítica. Suas propriedades granulométricas descritas na tabela 14 e na figura 15.

Tabela 14 – Característica granulométrica das cales

Peneira	Abertura (mm)	Cal Dolomítica	Cal Calcítica
1"	25,4	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00
1/2"	12,7	100,00	100,00
3/8"	9,5	100,00	100,00
n 4	4,8	100,00	100,00
n 10	2,0	100,00	100,00
n 40	0,42	100,00	100,00
n 80	0,18	99,00	97,85
n 200	0,075	80,05	88,22

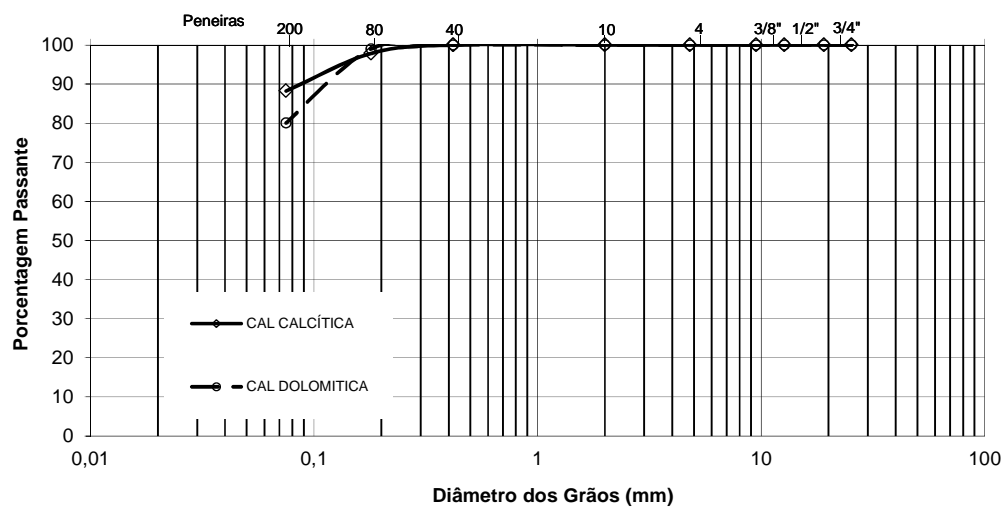


Figura 15: Distribuição granulométrica das cales

Para caracterização das cales, foi realizado ainda o ensaio de difração de raios X. Onde os difratogramas foram obtidos pelo equipamento D8 ADVANCE, operando a 40kV e 40mA, ângulo de varredura de 5° a 60° 2θ (ângulo de difração), passo de 0,02 e tempo de contagem de 0,5s por passo, ou seja, $2^\circ/\text{min}$. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Magnetismo da Física da UFSM.

A técnica de difração de raios X (DRX) é uma maneira prática para se fazer a análise mineralógica de sólidos cristalinos. Se um mineral é exposto a raios X de um comprimento de onda específico, as camadas de átomos difratam os raios e produzem um padrão de picos que é característico do mineral. A escala horizontal (ângulo de difração) de um padrão DRX típico fornece o espaçamento do arranjo cristalino, e a escala vertical (altura do pico) fornece a intensidade do raio difratado. Quando a amostra bombardeada com raios X tem mais de um mineral, a intensidade de picos característicos dos minerais individuais é proporcional às suas quantidades (CORRÊA, 2005). Desta forma, como resultado do ensaio de difração de raios-X, obtém-se um diagrama registrado (figura 16) em um sistema de eixos XY, onde no eixo das ordenadas encontra-se a intensidade do raio-X difratado, em intensidade de contagens por segundo (c.p.s.), e no eixo das abscissas encontra-se os valores de 2θ .

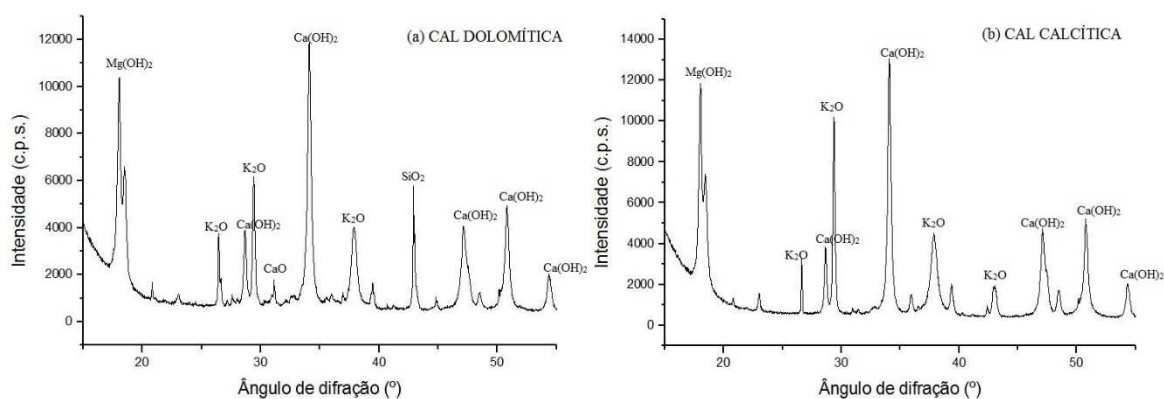


Figura 16: Difratogramas da cal Dolomítica (a) e da cal Calcítica (b).

Através da figura 16 nota-se nitidamente a diferença entre as cales, onde a intensidade dos picos da cal calcítica são superiores que a cal dolomítica, mostrando dessa forma a os altos teores de Hidróxido de Cálcio (Ca(OH)_2). Além de mostrar os outros componentes, como por exemplo: Hidróxido de Magnésio (Mg(OH)_2); Óxido de Potássio (K_2O); Óxido de Cálcio (CaO) e do Dióxido de silício (SiO_2).

As cales foram adicionadas na mistura sobre o agregado graúdo seco, sendo esta a forma mais eficiente estudada por Bock (2009), onde nessa pesquisa foram estudadas diferentes formas de incorporação de cal em CA. No estudo se viu que a melhor forma de adição é a do agregado graúdo seco, realizadas da seguinte forma: misturava-se a cal no agregado graúdo seco, e posteriormente colocava-se com o restante da mistura.

3.3.3 Ligante Asfáltico

O cimento asfáltico ou ligante asfáltico pode ser considerado um material viscoelastoplástico e termosensível, ou seja, possuem uma parcela viscosa, elástica e plástica; é sensível a mudança de temperatura, em altas temperaturas (acima de 100 °C) se torna plástico, quando recebe um carregamento, o material deforma e não volta ao estado original, o cimento asfáltico atua como um fluido viscoso e em baixas temperaturas (abaixo de 0 °C), o cimento se torna elástico, atuando como uma borracha: quando recebe um carregamento, o material se deforma, quando o carregamento é retirado, o material volta ao estado original.

O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi o CAP 50/70, produzido na Refinaria Alberto Pasqualini, em Canoas (RS). Esse é o tipo de ligante asfáltico convencionalmente empregado em obras de pavimentação no Rio Grande do Sul, os resultados dos ensaios estão apresentados no Quadro 06.

PROPRIEDADES	NORMA	CAP 50/70	
		ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
Penetração (0,1mm)	NBR 6576	50 a 70	62
Ponto de Amolecimento (°c)	NBR 6560	46 min	47,8
Viscosidade Brookfield 135°C (cp)	NBR 15184	274 min	317,5
Viscosidade Brookfield 150°C (cp)	NBR 15184	112 min	158,5
Viscosidade Brookfield 177°C (cp)	NBR 15184	57 a 285 min	59,5
Ductilidade a 25°C (cm)	NBR 6293	60 min	>147
Ponto de Fulgor (°c)	NBR 11341	235 min	>236

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

3.4 Procedimentos de Ensaio e Descrição dos Equipamentos

3.4.1 Dosagem Marshall

A dosagem das misturas asfálticas e a moldagem das amostras, juntamente com a obtenção dos parâmetros de dosagem Marshall (DNER – ME 043/95 e DAER/RS – ES – 16/98) foram realizadas no LMCC. Para a realização de cada composição granulométrica das misturas, foram adequadas de forma a enquadrar o material no centro da faixa “C” do DNIT (Figura 17), com tamanho máximo de granulares de 19mm. O concreto asfáltico foi projetado seguindo as recomendações do Asphalt Institute (1995) e de acordo com ASTM D6926-04 e ASTM D 6927-05; foi adotado o volume de vazios (VV) de 4% como critério de dosagem.

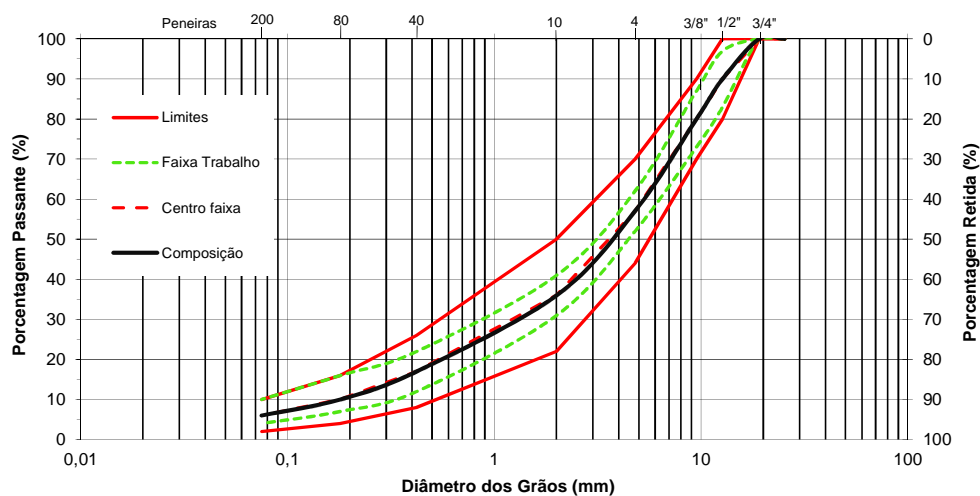


Figura 17: Composição granulométrica das misturas (faixa C DNIT 031/2006-ES)

Já para a pesquisa anterior (Boeira, 2011), no caso o material de Coronel Barros, a composição granulométrica da mistura foi realizada de forma a enquadrar o material no centro da faixa “B” do DAER/RS ou na faixa “IV B” do Instituto do Asfalto (Figura 18), com tamanho máximo de granulares de 19mm.

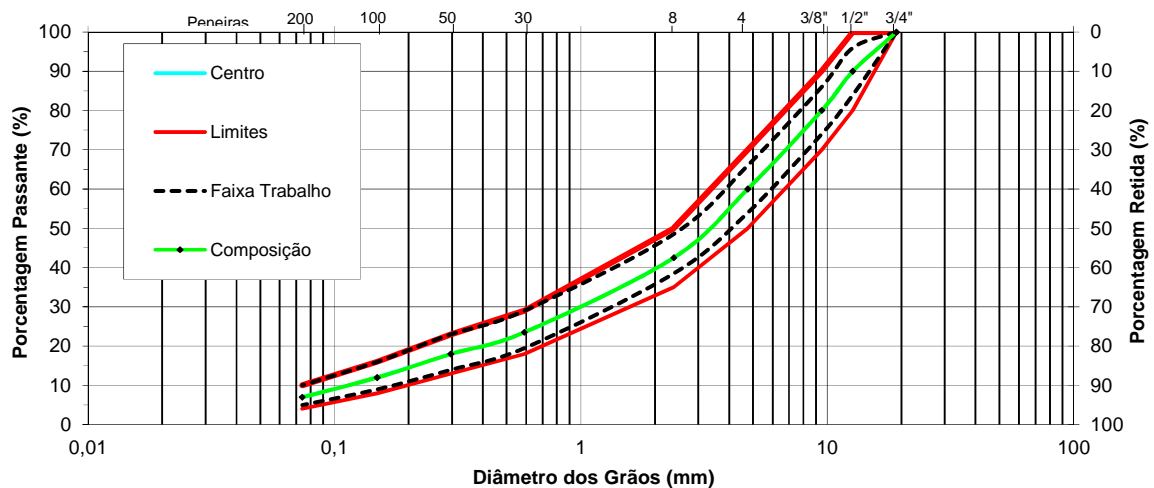


Figura 18: Composição granulométrica da mistura de Coronel Barros (faixa B DAER/RS)

Apesar da metodologia Marshall, ser contestada por muitos autores, em virtude da dispersão de seus resultados (principalmente nos valores de estabilidade e fluência), e do confinamento do corpo-de-prova na determinação da estabilidade (que não representa modos de ruptura da mistura no campo), e da forma de compactação, a dosagem Marshall é o procedimento mais utilizado para dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas no Brasil, principalmente devido à simplicidade e o baixo custo dos equipamentos.

Para confecção das amostras feita a coleta do agregado e então estes foram separados em peneiras (retida na: # 1/2, # 3/8, # 4, # 10, #40, # 80 e # 200), em seguida foram lavados e pesados para posterior moldagem das amostras de acordo com a Metodologia Marshall.

A incorporação de cal às misturas asfálticas foi anterior à adição do ligante asfáltico, sendo adicionada ao agregado gráudo seco (1,5% do peso total da mistura mineral, em substituição do fíler mineral), em seguida a cal foi revolvida de maneira a recobrir todo o agregado (figura 19), após esta etapa o material fino foi adicionado, para em seguida aquecer-se toda a mistura até a temperatura de usinagem e então acrescentar o ligante, e na sequência realizar a mistura de forma que todo o material estivesse envolvido com o ligante, e então realizou-se a compactação.



Figura 19: Esquema de adição de cal na mistura

A moldagem dos corpos-de-prova decorreu do seguinte modo: foram moldados por compactação (75 golpes por face) a quente, uma série de corpos-de-prova (3 cp's para cada teor) com a mistura de agregados, ligante asfáltico e cal hidratada, sendo que, após a adição do ligante na mistura, foram deixados na estufa durante duas horas, para simulação do envelhecimento do ligante na mistura; então a mistura foi colocada dentro de moldes cilíndricos metálicos que depois de compactados foram armazenados, ao ar livre (durante 24 horas), e então desmoldados, medidos e pesados. O passo seguinte consistiu em calcular os parâmetros de dosagem.

Para o cálculo dos parâmetros de dosagem, os corpos-de-prova são medidos e pesados para a coleta (volume de vazios, densidade, entre outros), então são levados para imersão banho de 60°C de temperatura por 30 a 40 minutos, e imediatamente, submetidos a uma compressão diametral, aplicada por uma prensa, através de um molde de compressão cilíndrico, idealizado por Marshall. Os valores retirados são: estabilidade que nada mais é que o valor da carga máxima suportada pelos corpos-de-prova e a fluência que é a deformação de ruptura, onde

juntamente com os parâmetros de densidade, volume de vazios e a relação entre vazios do agregado mineral preenchido por ligante, são calculados os parâmetros de dosagem Marshall.

3.4.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Este ensaio foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, através de solicitação estática. É conhecido em vários centros de pesquisa no exterior como “ensaio brasileiro” (Medina e Motta, 2005). Segundo Bernucci *et. al* (2006), a resistência à tração (R_t) tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização de materiais como o concreto de cimento Portland e misturas asfálticas.

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral nas amostras com diâmetro 10,20 cm e altura variável, moldadas através do método Marshall, seguira as prescrições da norma DNER-ME 138/94 e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão, com velocidade de 0,8mm/s, distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga (Figura 20). A medida resultante é a resistência à tração (R_t), dada pela equação 1:

$$RT = \frac{2F}{\pi.d.h} \quad (1)$$

Onde:

RT= Resistência à Tração

F= força aplicada

h= altura do corpo-de-prova

d= diâmetro do corpo-de-prova

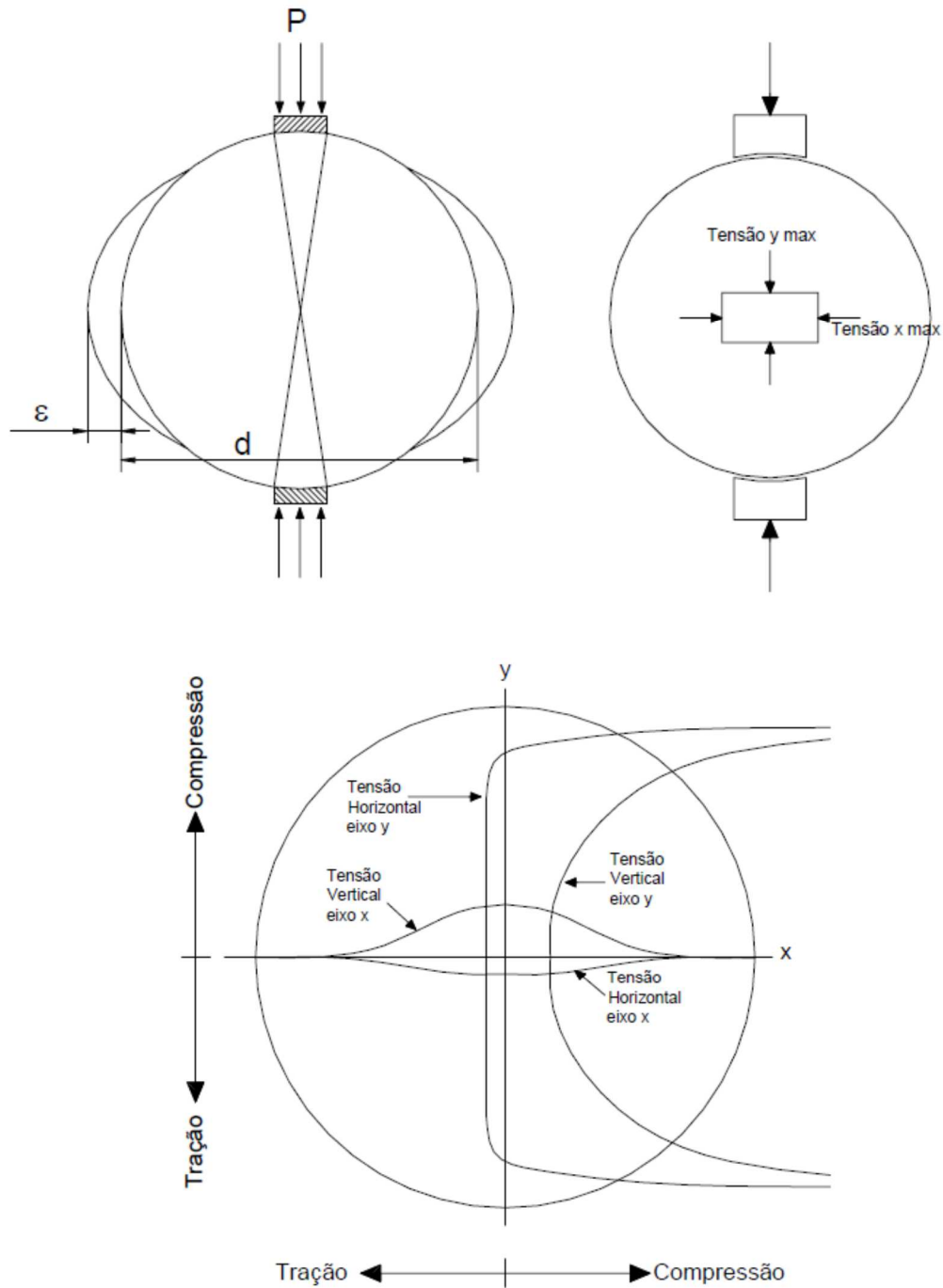


Figura 20: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro

Fonte: Specht (2004)

Para a realização da Resistência à Tração como para a realização do ensaio de Módulo de Resiliência, as amostras foram condicionadas a uma temperatura de 25°C pelo menos 12 horas.

3.4.3 Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência é determinado através das prescrições da norma do DNER-ME 135/2010 e ASTM D 4123:1982. O equipamento utilizado (figura 21) é uma UTM – 25, que no qual é composto por um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada; isso permite ensaios em diversas temperaturas.

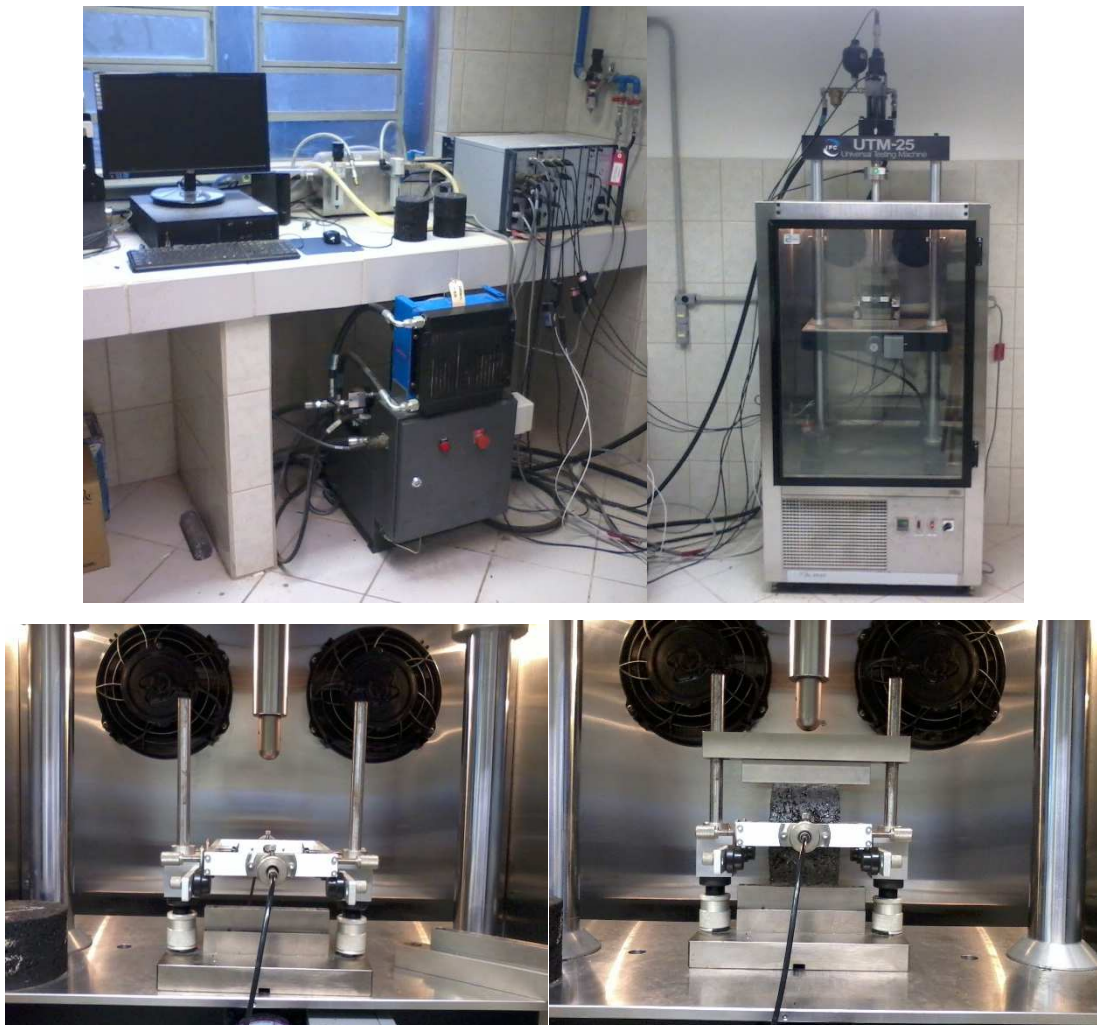


Figura 21: Imagem de equipamento utilizado

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

- ✓ Condicionar as amostras à 25°C por pelo menos 12 horas;
- ✓ Colocar o corpo-de-prova sobre a base da estrutura de suporte, entre os dois cabeçotes curvos;
- ✓ Fixar e ajustar os transdutores LVDT de modo a se obter registro no microcomputador;

O módulo de resiliência (M_r) é medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*), ligado a um microcomputador. O princípio de aplicação de carga é o mesmo do ensaio de compressão diametral, porém para o M_r o carregamento é pulsante (o que não leva a ruptura do CP), e não como no ensaio de compressão que é estático e monotônico. O carregamento utilizado é equivalente a um percentual de 10% da resistência à tração da mistura. Para execução do ensaio o coeficiente de Poisson foi fixado em 0,30 para 25°C (DNER-ME 135/2010). A equação 2 foi utilizada para o cálculo do M_r .

$$M_r = \frac{P}{\Delta \cdot h} \cdot (0,9976 \cdot \mu + 0,2692) \quad (2)$$

Onde:

M_r = módulo de resiliência, MPa

P = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova;

Δ = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga;

h = altura do corpo-de-prova;

μ = o coeficiente de Poisson (0,30 para 25°C).

Na Figura 22 está demonstrado um resultado típico das curvas de carga e deslocamento durante um ensaio de módulo de resiliência. Sendo a aplicação da carga a linha mais grossa (com marcas com bolas), com a duração de tempo de 0,1s. Já o deslocamento demonstrado na linha mais fina (com marcas em x), mostrando o tempo de repouso da amostra.

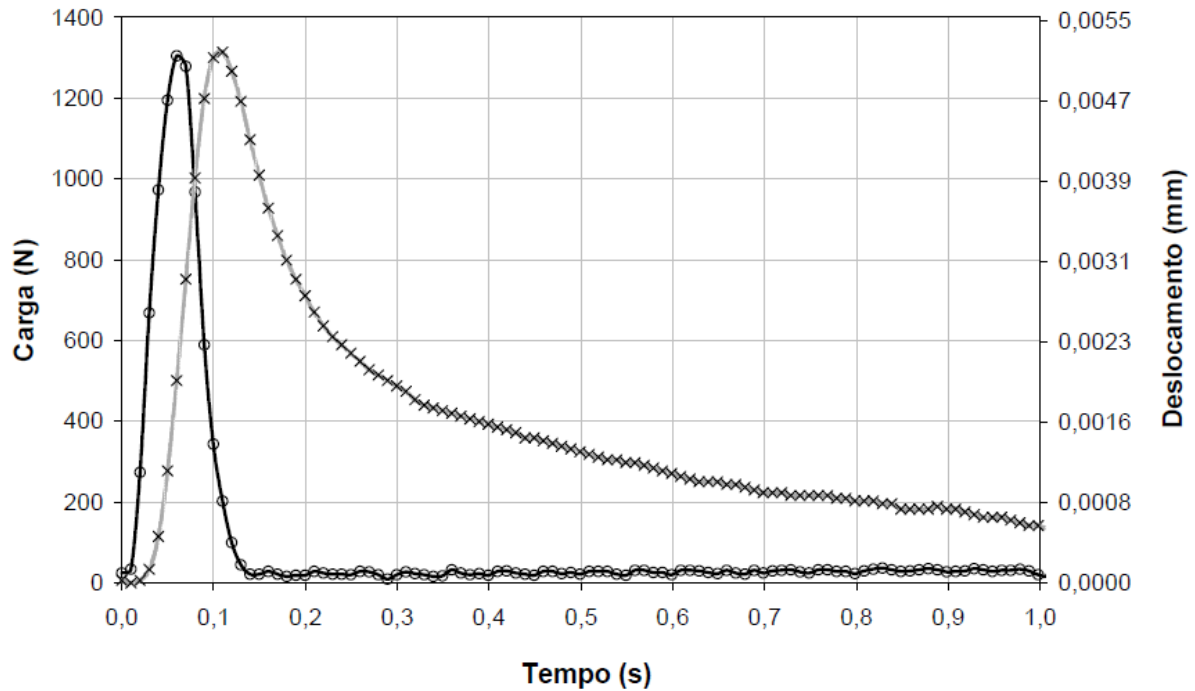


Figura 22: Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência

Fonte: Brito (2006)

O módulo de resiliência em misturas asfálticas é influenciado por diversas variáveis, como o tipo de mistura, faixa granulométrica, tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas, a energia e a temperatura de compactação, são alguns exemplos que podem modificar os resultados do módulo de resiliência. Outros fatores que podem influenciar no módulo de resiliência, tais como as variáveis ambientais, como temperatura, umidade e qualquer outro fator que altere as propriedades do material durante a vida de serviço.

3.4.4 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

O ensaio Lottman Modificado é normatizado pelas normas AASHTO T 283-89 ou ASTM D4867 e também pela norma brasileira ABNT NBR 15617:2011 e trata em avaliar as propriedades de adesividades em misturas asfálticas, considerando o efeito deletério da água, em amostras cilíndricas, preparadas através da Metodologia Marshall, com volume de vazios

de aproximadamente 7% ($\pm 1\%$). A análise é feita pela relação entre a resistência à tração por compressão diametral de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento. Esta relação é denominada Resistência Retida à Tração (RRt).

Para a realização do ensaio, foram moldados dois grupos com quatro corpos-de-prova cada, onde foram moldadas seguindo a Metodologia Marshall para atingirem um teor de vazios entre 6 a 8%.

Para o primeiro grupo é condicionado pela saturação com a aplicação de vácuo entre 55% e 80% (essa aplicação de vácuo tem que ser durante 30 minutos a 600mmHg) e em seguida, aplica-se ciclos de congelamento, onde primeiramente os corpos-de-prova são colocados em sacos plásticos com aproximadamente 3 ml de água destilada dentro de cada, e então são condicionados à -18°C durante um período de 16 horas, passadas essas 16 horas os corpos-de-prova são retiradas da refrigeração e imediatamente colocadas em imersão em banho de água a 60°C por um período de 24 horas. Após as 24 horas, os corpos-de-prova são transferidos para outro banho de água por mais 2 horas a 25°C e então são rompidos à Tração.

Para o grupo dois são submetidos ao ensaio de resistência à tração após a imersão em água à 25°C por duas horas, em sacos plásticos impermeáveis e então rompidos.

O valor obtido desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas, em campo (4 à 12 anos), face a adesividade ligante/agregado e também para verificar o efeito da adição de aditivos químicos ou pulverulentos, na adesividade da mistura (Specht, 2004). Essa análise é feita pela relação entre resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento, onde os valores encontrados na literatura como referência de misturas com bom desempenho quanto a adesividade é de 70% (Hicks, 1991), e a Metodologia SUPERPAVE recomenda valores acima de 80%. Na Figura 23 está representado o equipamento utilizado para determinar a Resistência à Tração.



Figura 23: Equipamento para ensaio de Rt.

3.4.5 Perda de Massa por Desgaste

A metodologia Cantabro foi selecionada para avaliar a perda de massa por desgaste ou abrasão. Este ensaio, desenvolvido para avaliar misturas abertas, foi criado e normalizado, inicialmente, no Centro de Estudios Carreteras na Espanha (CEC 325/86) e, posteriormente normalizado e no Brasil sob as normas DNER – ES 383/99 e DAER – EL215/01.

O ensaio consiste em submeter amostras (uma por vez) de concreto asfáltico à 300 revoluções (33rpm), dentro da máquina de abrasão Los Angeles (Figura 24), sem as esferas metálicas. A massa das amostras é determinada antes e depois do ensaio e é calculada a perda de massa por desgaste. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas.



Figura 24: Equipamento de abrasão Los Angeles da UFSM

Após o ensaio, quantifica-se a perda de massa do corpo-de-prova. O desgaste da mistura betuminosa por abrasão, em percentagem, é dado pela Equação 3:

$$PM = \frac{P - P'}{P} * 100 \quad (3)$$

Onde:

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

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

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

O desgaste máximo admitido, segundo a norma do DNER, é de 25% para misturas asfálticas porosas e o desgaste para cada teor de ligante deve ser realizado a partir da média de três corpos-de-prova. Já o valor individual de cada um deles não deve ser superior a 20% do valor médio.

Para a realização do ensaio, foram feitas algumas alterações, onde foram condicionados em três grupos de três corpos-de-prova, sendo o primeiro condicionamento a 5°C, o segundo a 25°C (conforme a norma) e o terceiro em 45°C. Foram condicionados por pelo menos 12 horas e então levados um-a-um para o equipamento de abrasão Los Angeles. O valor do desgaste é dado pela média entre os três corpos-de-prova de cada mistura para cada temperatura.

3.4.6 Ensaio de Adesividade a Ligante Betuminoso (Agregado Graúdo)

A adesividade ligante-agregado, é preconizado de acordo com a norma DNER-ES 78/94, deve ser ensaiada com 500g do material passante na peneira de 19mm e retido na de 12,7mm e com 18g do ligante.

Para avaliação da adição da cal na adesividade do ligante-agregado, o ensaio ocorreu da mesma maneira, sendo adicionada a mesma quantidade de cal (1,5%) sobre o agregado graúdo. Foi determinado dessa maneira, pois como a adição da cal na mistura, se dá sobre o agregado graúdo seco essa foi a melhor forma de avaliar essa adesividade do agregado.

Primeiramente, as 500g de agregado são aquecidos à 100°C e o ligante à 120°C, feito isso mistura-se os dois de forma a recobrir toda a superfície do agregado com o ligante. A amostra de agregados envolvida pelo ligante deve ser colocada sobre uma placa de vidro de superfície lisa ou papel siliconado, a fim de que o ligante betuminoso esfrie ou cure ou se rompa. Em seguida, a amostra deve ser colocada no béquer de vidro e ser totalmente recoberta com água destilada. O recipiente é colocado na estufa a 40°C e mantido em repouso durante 72 h.

A análise do resultado é visual. Se, após as 72h, não houver deslocamento da película, o resultado é satisfatório, e não satisfatório quando houver deslocamento total ou parcial da película betuminosa. Para avaliação visual, os agregados foram colocados sobre uma cerâmica e identificados pelo material e pela mistura. Na figura 25 está demonstrado como foi feita a avaliação visual das misturas.



Figura 25: Avaliação visual das misturas

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos na parte experimental da pesquisa, tais como: definições das abordagens adotadas para verificação da influência da incorporação de diferentes tipos de cal nos concretos asfálticos, definição de teor de cal a ser incorporado nas misturas, resultados de caracterização mecânica e de verificação da adesividade das misturas, em sua forma pura e com incorporação de cal hidratada.

Estes resultados permitem a verificação das características volumétricas, determinadas a partir do ensaio de dosagem Marshall e das propriedades mecânicas, pelos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração e das propriedades de adesividade através do dano por umidade induzida (Ensaio Lottman), pela perda de massa por desgaste (Cantabro) e pelo ensaio de Adesividade a Ligante Betuminoso (Agregado Graúdo).

4.1 Dosagem Marshall

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

O objetivo do método consiste em determinar-se o teor de ligante de projeto que deverá ser adicionado à mistura de agregados (que respeita a faixa granulométrica pré-fixada), a fim de que sejam satisfeitas às seguintes condições, conforme prescrito na Especificação de Serviço (DNIT 031/2006-ES):

Porcentagem de Vazios (% V_v)

- ✓ CAMADA DE ROLAMENTO: 3 % a 5 %
- ✓ CAMADA DE LIGAÇÃO: 4 % a 6 %

Relação Betume-Vazios (RBV)

- ✓ CAMADA DE ROLAMENTO: 75 % a 82 %
- ✓ CAMADA DE LIGAÇÃO: 65 % a 72 %

Estabilidade mínima

- ✓ CAMADA DE ROLAMENTO: 800 kgf (75 golpes)
- ✓ CAMADA DE LIGAÇÃO: 600 kgf (75 golpes)

A mistura a ser dosada deve manter na pista a percentagem de vazios dentro do projeto, pois com o tempo os agregados tendem a se compactar sob a ação do tráfego e o asfalto tende a subir para a superfície da capa de rolamento (exsudação). Este fato cria o conhecido problema das pistas derrapantes, devido à película de asfalto que aparece no topo de uma camada de concreto asfáltico. Outra razão de se manter os vazios em certo intervalo de valor é a característica da variação de volume do asfalto por influência da temperatura, o que causaria o mesmo problema, se os vazios não existissem. A relação betume-vazios (RBV) fixa a proporção de betume dentro dos vazios deixados pelos agregados e se deve ao mesmo fato anterior. A estabilidade corresponde à ruptura do corpo de prova devido ao esforço de compressão, valor expresso em kgf, exercido durante o ensaio de compressão diametral.

Nas tabelas 15 a 21 estão os resumos com os parâmetros encontrados em cada mistura.

Tabela 15 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Eldorado do Sul

<i>Propriedades</i>	<i>Especificação</i>	<i>Material de Eldorado do Sul</i>		
		<i>Referência</i>	<i>1,5 % Cal Calcítica</i>	<i>1,5 % Cal Dolomítica</i>
<i>Teor de Ligante (%)</i>	--	4,85	4,90	4,95
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	4,00	4,00	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	75,00	74,00	74,00
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>16	15,30	15,30	15,40
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	--	2,39	2,39	2,39
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	97% (mínimo)	2,30	2,29	2,29
<i>Estabilidade (kgf)</i>	>800	1136	1129	1121
<i>Fluência (mm)</i>	2 a 4,5	5,00	5,40	5,60

Tabela 16 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Itaara

<i>Propriedades</i>	<i>Especificação</i>	<i>Material de Itaara</i>		
		<i>Referência</i>	<i>1,5 % Cal Calcítica</i>	<i>1,5 % Cal Dolomítica</i>
<i>Teor de Ligante (%)</i>	--	6,50	6,45	6,75
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	4,00	4,00	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	78,00	77,80	78,00
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>16	18,20	17,60	18,20
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	--	2,29	2,29	2,28
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	97% (mínimo)	2,19	2,19	2,19
<i>Estabilidade (kgf)</i>	>800	1040	960	1040
<i>Fluência (mm)</i>	2 a 4,5	5,90	5,90	5,70

Tabela 17 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Sarandi

<i>Propriedades</i>	<i>Especificação</i>	<i>Material de Sarandi</i>		
		<i>Referência</i>	<i>1,5 % Cal Calcítica</i>	<i>1,5 % Cal Dolomítica</i>
<i>Teor de Ligante (%)</i>	--	5,15	5,20	5,00
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	4,00	4,00	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	81,00	75,10	75,20
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>16	17,20	17,30	16,80
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	--	2,67	2,67	2,68
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	97% (mínimo)	2,56	2,56	2,57
<i>Estabilidade (kgf)</i>	>800	1225	1070	1240
<i>Fluência (mm)</i>	2 a 4,5	4,70	4,50	4,00

Tabela 18 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Santo Antônio da Patrulha

<i>Propriedades</i>	<i>Especificação</i>	<i>Material de Santo Antônio da Patrulha</i>		
		<i>Referência</i>	<i>1,5 % Cal Calcítica</i>	<i>1,5 % Cal Dolomítica</i>
<i>Teor de Ligante (%)</i>	--	5,30	5,35	5,15
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	4,00	4,00	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	75,00	74,50	75,00
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>16	16,90	17,00	16,50
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	--	2,54	2,53	2,54
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	97% (mínimo)	2,43	2,42	2,44
<i>Estabilidade (kgf)</i>	>800	980	1160	1090
<i>Fluência (mm)</i>	2 a 4,5	4,50	4,50	5,00

Tabela 19 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Bagé

Propriedades	Especificação	Material de Bagé		
		Referência	1,5 % Cal Calcítica	1,5 % Cal Dolomítica
Teor de Ligante (%)	--	4,70	4,90	4,90
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	77,00	75,00	75,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	15,40	15,80	15,70
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	--	2,52	2,51	2,51
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	97% (mínimo)	2,42	2,42	2,42
Estabilidade (kgf)	>800	1240	1060	1180
Fluência (mm)	2 a 4,5	4,70	5,50	4,80

Tabela 20 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Caçapava do Sul

Propriedades	Especificação	Material de Caçapava do Sul		
		Referência	1,5 % Cal Calcítica	1,5 % Cal Dolomítica
Teor de Ligante (%)	--	4,50	4,45	4,40
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	74,00	75,00	74,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	15,20	15,10	14,80
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	--	2,59	2,59	2,59
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	97% (mínimo)	2,49	2,49	2,49
Estabilidade (kgf)	>800	1120	1080	1000
Fluência (mm)	2 a 4,5	4,60	4,20	4,40

Tabela 21 – Resumo dos parâmetros de dosagem do material de Coronel Barros

Propriedades	Especificação	Material de Coronel Barros				
		Referência	1% Cal Calcítica	2% Cal Calcítica	1% Cal Dolomítica	2% Cal Dolomítica
Teor de Ligante (%)	--	5,65	5,40	5,55	5,50	5,55
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	77,00	75,15	76,00	76,00	75,15
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	17,15	16,42	16,85	16,75	16,82
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	--	2,65	2,64	2,64	2,64	2,63
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	97% (mínimo)	2,57	2,56	2,56	2,56	2,55
Estabilidade (kgf)	>800	800	990	1080	990	980
Fluência (mm)	2 a 4,5	3,00	3,00	3,00	4,00	3,90

Para obtenção destes parâmetros, foram elaboradas as curvas de resultados dos cálculos e medidas feitas durante o ensaio Marshall (anexo), em que conforme já citado, o teor de ligante de projeto satisfizesse como critério o volume de vazios com 4%.

Através da figura 26, podemos perceber a grande variação da influência das cales nas diversas misturas, onde que se compararmos os materiais com a sua rocha de origem como por exemplo os materiais de Bagé, Caçapava do Sul e Eldorado do Sul, materiais de origem granítica/metamórficas. Nota-se que apenas o material de Caçapava do Sul (material de origem metamórfica) com a incorporação das cales, houve uma redução no teor de ligante, ficando a maior redução com a mistura com adição da cal dolomítica (4,40%) quando comparada com a mistura de referência (sem adição de cal). Já para as misturas com o material de Bagé (material de origem metamórfica) houve um aumento no teor de ligante em ambas as adições de cal, quando comparadas com a mistura de referência. O mesmo acontece com o material de Eldorado do Sul (material de origem granítica), havendo um aumento no teor de ligante de projeto com a adição das cales.

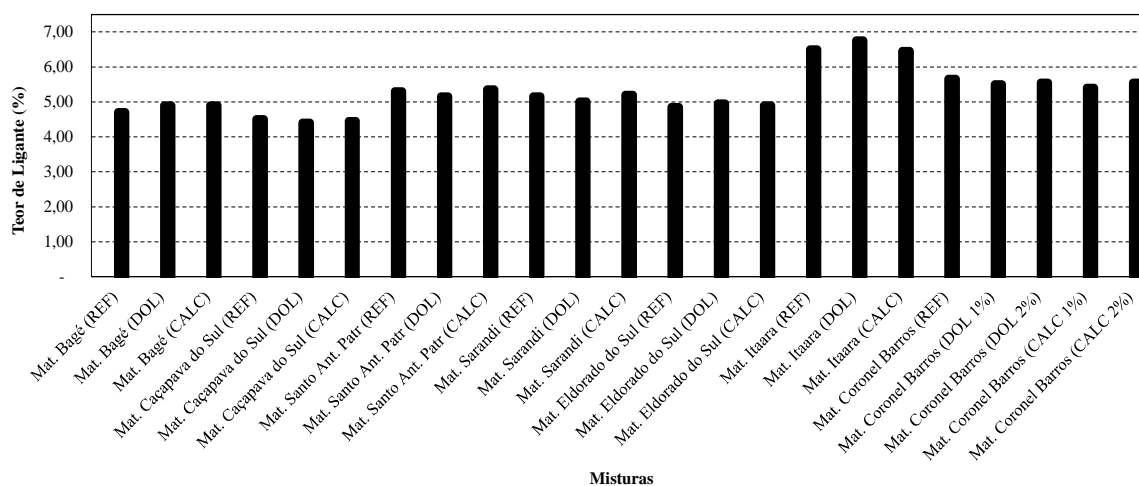


Figura 26: Gráfico dos Teores de Ligante de cada Mistura

Já para os materiais de Santo Antônio da Patrulha, Sarandi e Itaara (materiais de origem vulcânica), entre as cales há distinção nos resultados. Onde que para os materiais de Santo Antônio da Patrulha e Sarandi houve uma redução no teor de ligante nas misturas com a incorporação da cal dolomítica e um aumento no teor de ligante nas misturas com a cal calcítica. O que acontece ao contrario com o material de Itaara, a mistura com cal dolomítica houve um aumento no teor de ligante e a mistura com cal calcítica diminuiu o teor de ligante de projeto.

Já para o material de Coronel Barros, percebe-se uma redução significativa no consumo de ligante em ambas as misturas com adição das cales, levando em consideração a mistura de

referência. Porém pela figura pode-se perceber ainda, que com o aumento da porcentagem de cal adicionada houve um aumento no consumo de ligante, mas mesmo assim ficando abaixo da referência. A mistura com o menor consumo de ligante foi a de 1% Calcítica.

Percebe-se então que não são possíveis generalizações de que o consumo de ligante irá diminuir ou aumentar com a adição das cales, todavia pode-se afirmar que para os materiais de origem granítica/metamórfica há aumento de ligante com adição das cales, e para os materiais de origem vulcânica há uma redução.

Esse aumento/redução do consumo de ligante nas misturas dependerá da origem de formação das rochas. Por outro lado, vale citar que as diferenças foram pequenas (menores que a tolerância de execução que é de 0,3%). Todavia dado o volume e os custos de CAP envolvidos, estas reduções podem indicar economia de insumos.

4.2 Propriedades Mecânicas das Misturas

Nesta parte do trabalho, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas através da resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

Os corpos-de-prova foram moldados com os teores de ligante de projeto ($v_v=4\%$), conforme apresentado anteriormente. Foram utilizados 4 corpos-de-prova de cada mistura, totalizando 92 corpos-de-prova para a realização de módulo de resiliência e resistência à tração. Como o ensaio de módulo de resiliência é um ensaio não destrutivo dos corpos-de-prova, os mesmo foram usados para realizar o ensaio de resistência à tração. Dessa maneira pode-se realizar também uma relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração (MR/RT).

4.2.1 Módulo de Resiliência e Resistência à Tração

Na tabela 22 e figura 27 estão demonstrados os resultados encontrados para módulo de resiliência e resistência à tração. Sabe-se que o módulo de resiliência varia com o tipo de mistura, a faixa granulométrica, o tipo de ligante, as propriedades volumétricas, com a temperatura de compactação, energia de compactação, com a temperatura do ensaio, entre

outras variáveis. É possível dosar uma mistura asfáltica para se obter um determinado MR, conforme solicitado ou especificado para o projeto.

Por esse motivo, uma análise primária que pode ser realizada é a variação dos módulos de resiliência para as misturas de referência (sem adição de cal) nos diferentes agregados (tabela 22).

Tabela 22 – Resumo dos resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração das Misturas

<i>MISTURA</i>	<i>Média RT (MPa)</i>	<i>Média MR (MPa)</i>	<i>σ (MPa)</i>	<i>Cv (%)</i>
<i>Mat. Bagé (REF.)</i>	1,67	7878	293,77	3,82
<i>Mat. Bagé (DOL.)</i>	1,73	8476	321,15	3,87
<i>Mat. Bagé (CALC.)</i>	1,63	8194	297,23	3,67
<i>Mat. Caçapava do Sul (REF.)</i>	1,38	8052	322,79	4,05
<i>Mat. Caçapava do Sul (DOL.)</i>	1,61	8478	316,88	3,66
<i>Mat. Caçapava do Sul (CALC.)</i>	1,57	7684	347,69	4,48
<i>Mat. Sto. Ant. da Patr.(REF.)</i>	1,44	5345	194,71	3,59
<i>Mat. Sto. Ant. da Patr. (DOL.)</i>	1,44	5945	244,35	4,09
<i>Mat. Sto. Ant. da Patr. (CALC.)</i>	1,41	5703	235,73	4,17
<i>Mat. Sarandi (REF.)</i>	1,55	5613	232,82	4,17
<i>Mat. Sarandi (DOL.)</i>	1,49	5756	197,81	3,41
<i>Mat. Sarandi (CALC.)</i>	1,48	5665	158,01	2,81
<i>Mat. Eldorado do Sul (REF.)</i>	1,70	7644	299,34	3,89
<i>Mat. Eldorado do Sul (DOL.)</i>	1,76	8229	376,69	4,55
<i>Mat. Eldorado do Sul (CALC.)</i>	1,80	8231	209,37	2,57
<i>Mat. Itaara (REF.)</i>	1,27	4788	152,98	3,28
<i>Mat. Itaara (DOL.)</i>	1,43	5137	168,25	3,32
<i>Mat. Itaara (CALC.)</i>	1,38	5387	149,11	2,75
<i>Mat. Coronel Barros (REF)</i>	1,30	3742	705,12	18,85
<i>Mat. Coronel Barros (DOL 1%)</i>	1,52	3828	992,49	25,93
<i>Mat. Coronel Barros (DOL 2%)</i>	1,46	3625	727,13	20,06
<i>Mat. Coronel Barros (CALC 1%)</i>	1,44	3872	462,32	11,94
<i>Mat. Coronel Barros (CALC 2%)</i>	1,35	3707	696,55	18,79

Nota: σ (MR) e Cv (MR)

Para a mesma faixa granulométrica, variando apenas o tipo de agregado, obteve-se diversos módulos de resiliência mostrando assim os valores típicos dos módulos de resiliência do Rio Grande do Sul, no qual varia entre 3742 a 7878 MPa. Com esses valores, pode-se fazer um levantamento dos tipos de agregados existentes no Rio Grande do Sul, onde que para realização de algum projeto para um determinado MR, já pode-se saber (nessas condições de mistura) qual tipo de agregado utilizar. Conforme Bernucci *et al.* (2006), demonstra os valores

típicos de MR na faixa de 2000 a 8000 MPa para concretos asfálticos a 25°C, onde os menores valores correspondem a misturas com asfaltos modificados por polímero ou borracha e os maiores a misturas de consistência dura. Sempre considerando a influência da distribuição granulométrica e do tamanho máximo de agregado.

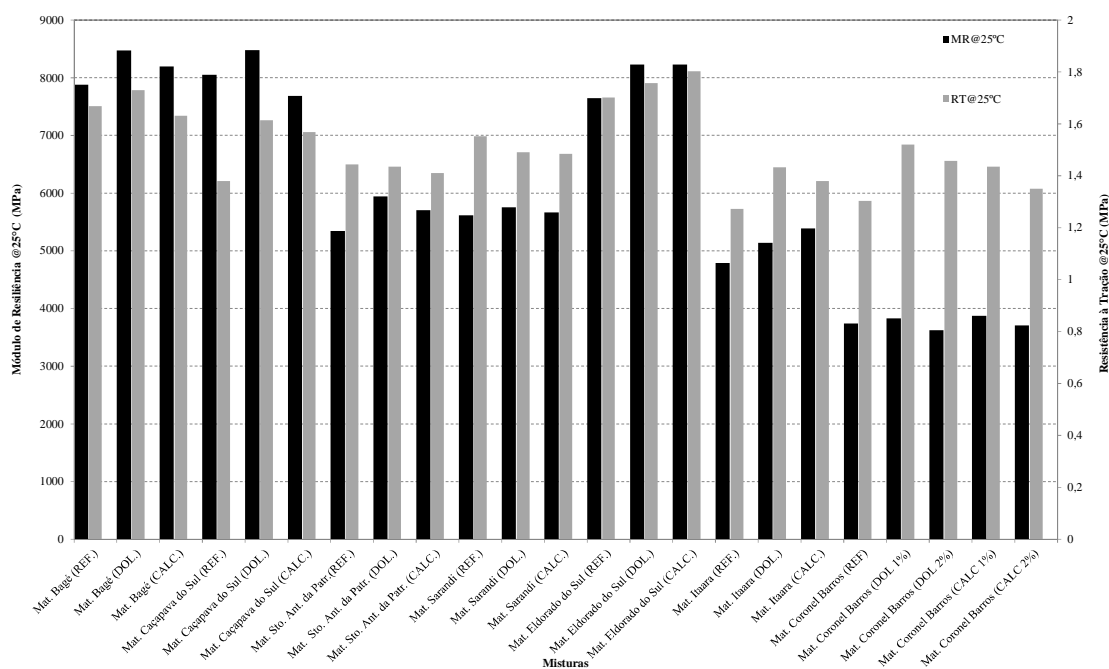


Figura 27: Resistência à Tração e Módulo de Resiliência

Ao analisarmos a influência promovida pela cal nas misturas, observa-se que é possível a produção de misturas asfálticas de elevado módulo e desempenho através da incorporação de cal hidratada. Pois com os resultados apresentados na figura 27, percebe-se que a adição das cales dolomítica e calcítica nos materiais estudados tem influência positiva, onde no conjunto das amostras, os módulos de resiliência e resistência à tração foram superiores quando comparados com a mistura de referência.

Para esse aumento nos valores de módulo de resiliência e resistência à tração, uma justificativa plausível é a influência do teor de fíler na rigidez das misturas. Por outro lado, vale salientar também que, se a mistura aumentar a rigidez e diminuir a resistência ou não mudar é um fator prejudicial, misturas asfálticas mais rígidas sem aumento de resistência para

acompanhar este aumento de rigidez proporcionam um comportamento mais frágil, consequentemente há uma maior suscetibilidade ao trincamento.

Apesar do aumento em todas as misturas tanto na resistência à tração como para módulo de resiliência, percebemos que para o material de Santa Antônio da Patrulha e para o material de Sarandi, as cales não tem muita influência, onde a resistência à tração para o material de Santo Antônio da Patrulha com adição da cal dolomítica não alterou, já para a mistura com a adição da cal calcítica, aconteceu que reduziu a resistência à tração, e, por outro lado o módulo de resiliência aumentou. Já para o material de Sarandi ambas as misturas com adição das cales diminuíram a resistência à tração, e, para o módulo de resiliência, houve um acréscimo, porém sem muita significância.

Outro ponto que podemos perceber é em relação ao material de Coronel Barros, onde além da adição das cales, houve uma variação no teor de cal incorporado nas misturas. Com isso então é nítido que a influência da porcentagem de cal também tem importância, onde percebe-se pelos resultados que as misturas com ambas as cales (dolomítica e calcítica) com o teor de adição de cal em 2%, houve uma redução tanto na resistência à tração quanto no módulo de resiliência quando comparadas com as misturas com a adição de 1% de cal, porém quando comparadas com a mistura referência (sem adição de cal), mesmo assim continuam com resultados acima da mesma.

4.2.2 Relação entre Módulo de Resiliência e Resistência à Tração (MR/RT)

A relação Mr/Rt nos dá uma ideia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura; misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido a concentração de esforços em seu interior. Essa relação permite inferir o comportamento das misturas asfálticas com relação ao trincamento. Quanto menor o valor da relação, maior flexibilidade terá a mistura, unida a uma boa resistência à tração. A análise desta relação já foi avaliada por alguns pesquisadores, que acreditam que quanto menor a razão Mr/Rt , maior será a vida de fadiga obtida para esse mesmo tipo de mistura asfáltica. Na figura 28 está demonstrado graficamente esta relação.

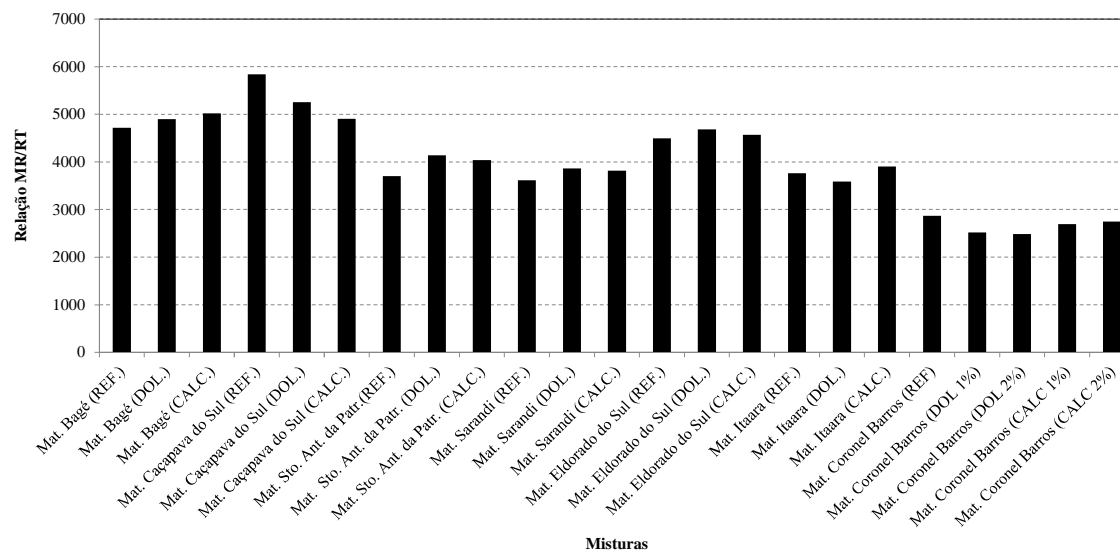


Figura 28: Relação entre MR/RT

De acordo com estudos de Ceratti (1996) e Oliveira (1997) a relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração de misturas confeccionadas com ligantes asfálticos convencionais se situa entre 4500 e 5000 MPa e para misturas elaboradas com ligantes asfálticos modificados por polímero está relação assume valores entre 3000 e 3500 MPa. As misturas utilizadas nesse estudo ficaram com a relação entre 3600 a 5900 MPa, o que nos demonstra que as misturas ficaram entre as dos ligantes convencionais, o que demonstra a influência positiva da incorporação de cal nas misturas, no que diz a respeito da rigidez das misturas.

Em uma análise geral, as misturas com a adição das cales houve aumento da relação MR/RT. Sendo apenas os agregados provenientes de Caçapava do Sul e de Coronel Barros que houve uma redução na relação quando incorporado ambas as cales (dolomítica e calcítica).

Um ponto apresentados nos resultados foi o acréscimo da resistência à tração nas misturas com a adição de ambas as cales, pois se haver aumento no módulo de resiliência, aliado a esse acréscimo de resistência, teremos misturas mais rígidas, porém aliados com boas resistência à tração. Comparando as relações de MR/RT, como foi comentado anteriormente “Quanto menor o valor da relação, maior flexibilidade terá a mistura, unida a uma boa resistência à tração” o material de Caçapava do Sul obteve redução dessa relação com ambas as cales, ficando o menor valor com a mistura com incorporação de cal calcítica, e, a mesma

teve aumento na resistência à tração. Outro material que obteve o mesmo resultado foi com o material proveniente de Coronel Barros.

Vale lembrar também que nesta relação, os resultados não significam perda ou ganho no desempenho da mistura, uma relação M_r/R_t alta ou baixa é selecionada de acordo um caso específico de aplicação. Como por exemplo, um determinado tipo de tráfego, ou de clima ou ainda do tipo da estrutura.

4.3 Propriedades de Adesividade

Serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades de adesividade das misturas asfálticas através da metodologia Cantabro, ensaio de Adesividade a Ligante Betuminoso (Agregado Graúdo) e pela metodologia Lottman Modificada.

Onde o objetivo é interpretar o comportamento das propriedades de adesão e coesão em laboratório das misturas asfálticas produzidas neste trabalho. Pois em misturas asfálticas, a perda de adesão entre agregado e ligante está comumente relacionada a três fatores: a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso, a ocorrência de umidade e a presença de sujeira e finos na superfície do agregado. Essa perda de adesão do ligante asfáltico com a superfície do agregado (fratura adesiva) bem como a fratura do próprio filme de ligante (fratura coesiva), quer seja na presença de água ou não, é a origem de muitos tipos de defeitos em pavimentos, incluindo trincamento por fadiga, deformação permanente e dano por umidade (Lytton, 2004).

Para a realização dos ensaios, os corpos-de-prova foram moldados com o teor de ligante de projeto encontrado na dosagem. Onde que para o ensaio da metodologia Cantabro foram moldados três corpos-de-prova para cada temperatura de condicionamento (5°C , 25°C , 45°C), totalizando um total de 189 corpos-de-prova. Já para a metodologia Lottman modificada, foram moldados 8 corpos-de-prova para cada mistura, sendo que esses 8 corpos-de-prova foram divididos em dois grupos de 4 corpos-de-prova (grupo condicionado, grupo sem condicionamento), totalizando um total de 168 corpos-de-prova.

4.3.1 Perda de Massa – Metodologia Cantabro

A metodologia trata de avaliar a perda de massa por desgaste ou abrasão. A massa das amostras é determinada antes e depois do ensaio e é calculada a perda de massa por desgaste. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas. Pois o desgaste é uma patologia muito comum nos revestimentos asfálticos, processo pelo qual ocorre arrancamento progressivo de agregados do revestimento causado pelo atrito entre pneu e pavimento.

O ensaio de Cantabro foi realizado segundo a norma DNER – ES 386/99, a qual diz que o valor máximo de perda de massa para misturas pré-misturadas a quente, com asfalto polímero é aceitável 25%. Na tabela 23 está o resumo dos resultados encontrados com a realização do ensaio.

Tabela 23 – Resumo dos resultados da Metodologia Cantabro

MISTURA	Perda de massa (%)								
	5°C	σ (%)	Cv (%)	25°C	σ (%)	Cv (%)	45°C	σ (%)	Cv (%)
<i>Mat. Bagé (REF.)</i>	19,99	1,18	5,92	7,38	0,88	11,97	2,26	0,25	11,28
<i>Mat. Bagé (DOL.)</i>	19,98	1,07	5,34	6,68	0,59	8,82	1,89	0,59	31,07
<i>Mat. Bagé (CALC.)</i>	18,87	0,09	0,49	7,04	0,71	10,13	1,69	0,43	25,17
<i>Mat. Caçapava do Sul (REF.)</i>	21,49	0,70	3,26	8,18	0,23	2,79	2,88	0,66	22,73
<i>Mat. Caçapava do Sul (DOL.)</i>	17,29	1,53	8,87	7,94	0,29	3,67	2,55	0,20	7,79
<i>Mat. Caçapava do Sul (CALC.)</i>	19,85	0,97	4,88	11,69	0,40	3,38	5,50	0,72	13,19
<i>Mat. Sto. Ant. da Patr.(REF.)</i>	13,53	1,09	8,02	5,90	1,15	19,46	0,43	0,05	10,50
<i>Mat. Sto. Ant. da Patr. (DOL.)</i>	15,51	0,66	4,26	5,17	0,36	7,03	0,56	0,13	23,83
<i>Mat. Sto. Ant. da Patr. (CALC.)</i>	17,36	2,26	13,00	4,51	0,16	3,47	0,52	0,16	31,51
<i>Mat. Sarandi (REF.)</i>	12,91	0,37	2,85	4,41	0,06	1,33	0,77	0,16	21,14
<i>Mat. Sarandi (DOL.)</i>	12,83	0,86	6,71	4,32	0,68	15,74	0,87	0,06	6,97
<i>Mat. Sarandi (CALC.)</i>	13,24	0,54	4,07	4,03	0,35	8,72	0,81	0,13	15,74
<i>Mat. Eldorado do Sul (REF.)</i>	17,91	2,47	13,78	10,29	0,24	2,31	1,76	0,54	30,76
<i>Mat. Eldorado do Sul (DOL.)</i>	15,52	2,58	16,64	8,12	0,71	8,69	2,04	0,50	24,61
<i>Mat. Eldorado do Sul (CALC.)</i>	15,62	0,96	6,14	9,33	1,00	10,73	3,14	0,92	29,21
<i>Mat. Itaara (REF.)</i>	12,55	1,11	8,88	5,23	2,18	41,72	0,45	0,16	35,30
<i>Mat. Itaara (DOL.)</i>	11,09	0,75	6,76	4,59	0,55	11,93	0,55	0,01	1,73
<i>Mat. Itaara (CALC.)</i>	11,94	0,35	2,91	5,65	1,02	18,06	1,13	0,30	26,47
<i>Mat. Coronel Barros (REF)</i>				6,91	0,80	11,59			
<i>Mat. Coronel Barros (DOL 1%)</i>				4,17	0,76	18,15			
<i>Mat. Coronel Barros (DOL 2%)</i>				4,24	0,58	13,57			
<i>Mat. Coronel Barros (CALC 1%)</i>				4,62	0,58	12,47			
<i>Mat. Coronel Barros (CALC 2%)</i>				3,93	0,99	25,09			

A Figura 29 apresenta graficamente os valores de perda de massa para cada mistura, realizado com condicionamento prévio a três temperaturas: 5°C, 25°C e 45°C. Estas temperaturas de condicionamento foram adotadas para simular as condições que o pavimento pode estar submetido.

A temperatura de 5°C foi adotada pois representa as temperaturas a que chegam os pavimentos no sul do país em épocas de inverno; A temperatura de 25°C é a temperatura preconizada em norma para execução do ensaio; a temperatura de 45°C foi adotada pois representa a temperatura média em que os pavimentos possam chegar em dias quentes e é o limite que se pode considerar o material elástico. Para o material de Coronel Barros foi realizado apenas na temperatura especificada pela norma.

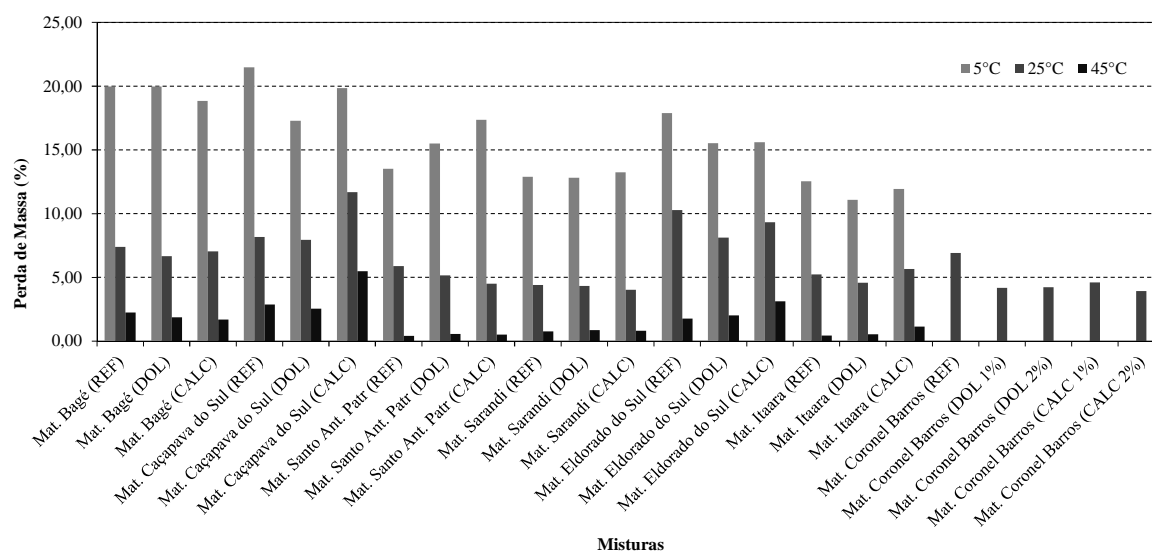


Figura 29: Perda de massa das misturas

Observa-se que para uma temperatura mais elevada, as amostras apresentaram uma menor perda de massa, isso ocorre devido ao fato das misturas se tornarem mais elásticas. Isso acontece pois a variação da viscosidade do ligante asfáltico com a temperatura implica também em variações na coesão que proporciona à mistura, a qual é definida aqui pela resistência à perda por desgaste que a mistura apresentará no ensaio cantabro, desta forma em altas temperaturas as amostras sofrem apenas deformações, não ocorrendo uma desagregação no mesmo nível do que em amostras submetidas ao ensaio a temperaturas mais baixas.

Em temperaturas mais baixa (5°C) percebe-se que as cales melhoram o desgaste do que comparadas com as misturas de referência. Isso demonstra que as misturas sem cal apresentam um comportamento mais frágil e ao incorporar cal essa fragilidade é reduzida, gerando um percentual de melhoria mais acentuado nesta situação. A cal é conhecida por ser um fíler ativo que manifesta suas propriedades multifuncionais em temperaturas mais elevadas, e a temperaturas mais baixas comportando-se como fíler inerte. Neste caso, porém a cal mostrou grande influência nas propriedades de coesão das misturas, no caso dependendo do tipo de agregado (rocha vulcânica, metamórfica e granítica). Uma das explicações para isso é que a cal está aumentando o poder coesivo da mistura.

Na figura 30 está o exemplo de como as amostras ensaiadas se comportam nas diferentes temperaturas, sendo as primeiras a 5°C (com maior desagregação), seguida das amostras a 25°C e no fundo as amostras ensaiadas a 45°C .



Figura 30: Amostras ensaiadas em diferentes temperaturas

Em uma avaliação geral as misturas com adição das cales obtiveram redução na perda de massa quando comparadas com a mistura de referência, com as maiores reduções de perda de massa quando o ensaio é feito com condicionamento á 5°C (cerca de 10%), claro que dependendo do tipo de agregado a mistura com cal dolomítica houve maior redução (média de 8%) e para outros a cal calcítica (média de 12%). Isso se dá pelo fato de que as misturas com

algum tipo de mástique asfáltico (formado pela incorporação de cal na mistura) apresentam um maior poder de coesão (maior resistência ao desgaste) do que as misturas sem nenhuma incorporação de cal, demonstrando que essa parcela contribui de maneira significativa na resistência à degradação da mistura.

Um ponto interessante de se observar é em relação ao material de Santo Antônio da Patrulha, que no condicionamento a 5°C houve um aumento na perda de massa com a incorporação de cal e, ficando o maior valor com a mistura com cal calcítica. Por outro lado, quando realizado o ensaio a temperatura de 25°C, a mistura com cal calcítica é a que houve maior redução de perda de massa. De modo contrário, este mesmo fenômeno acontece com o material de Caçapava do Sul, com a temperatura de 5°C as misturas com incorporação de cal reduz a perda de massa, ficando a mistura com cal dolomítica com a maior redução e, com a temperatura de 25°C e 45°C aumentando a perda de massa, ficando a mistura com adição de cal calcítica com a maior perda de massa.

Segundo prescrições da norma DNER – ES 386/99 qual diz que o valor máximo de perda de massa para misturas pré-misturadas a quente, com asfalto polímero é aceitável 25%, onde percebe-se que todas as misturas ficaram abaixo dessa prescrição, mesmo no condicionamento a 5°C, onde a maior perda de massa ficou com o material de Caçapava do Sul na mistura referência com 21,49% de perda de massa.

4.3.2 Ensaio de Adesividade Ligante - Agregado

Adesividade de agregado ao material betuminoso é a propriedade do agregado ser aderido por material betuminoso, é verificada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado quando a mistura agregado/ligante é imersa em água destilada a 40°C durante 72 horas.

Nas figuras abaixo (figuras 31 a 36) estão as fotos com as amostras ensaiadas. Como já foi mostrado anteriormente, após passar as 72 horas as amostras foram colocadas em cerâmica e então foi realizado a análise puramente visual, juntamente com o registro fotográfico das amostras.



Figura 31: Ensaio de adesividade com agregados de Eldorado do Sul



Figura 32: Ensaio de adesividade com agregados de Itaara



Figura 33: Ensaio de adesividade com agregados de Bagé



Figura 34: Ensaio de adesividade com agregados de Caçapava do Sul



Figura 35: Ensaio de adesividade com agregados de Santo Antônio da Patrulha



Figura 36: Ensaio de adesividade com agregados de Sarandi

Em uma avaliação geral dos materiais, podemos perceber que a adição das cales tem um efeito positivo perante a adesividade, pois quando comparadas com as misturas de referência (sem adição de cal), ambas as misturas com adição das cales (dolomítica e calcítica) melhoraram a adesividade agregado/ligante, mesmo percebendo através do Quadro 7, o qual nos demonstra os resultados visuais do ensaio, onde todas as misturas obtiveram o resultado de não satisfatório.

MISTURAS		RESULTADO
Mat. Bagé	Referência	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Dolomítica	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Calcítica	NÃO SATISFATÓRIO
Mat. Caçapava do Sul	Referência	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Dolomítica	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Calcítica	NÃO SATISFATÓRIO
Mat. Sto. Ant. da Patrulha	Referência	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Dolomítica	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Calcítica	NÃO SATISFATÓRIO
Mat. Sarandi	Referência	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Dolomítica	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Calcítica	NÃO SATISFATÓRIO
Mat. Eldorado do Sul	Referência	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Dolomítica	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Calcítica	NÃO SATISFATÓRIO
Mat. Itaara	Referência	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Dolomítica	NÃO SATISFATÓRIO
	1,5% Calcítica	NÃO SATISFATÓRIO

Quadro 7 - Resultados da análise visual do ensaio de adesividade agregado-ligante betuminoso

Outro ponto é a diferença entre os materiais de origem granítica/metamórficas quando comparados com os de origem vulcânica. Os materiais de Eldorado do Sul, Bagé e Caçapava do Sul obtiveram um descolamento da película betuminosa muito mais acentuada quando comparadas com os materiais de Itaara, Santo Antônio da Patrulha e Sarandi (materiais de origem vulcânica).

De acordo com a bibliografia, alguns agregados, como os de granito, são particularmente susceptíveis à perda de adesividade, e essa perda de adesão entre agregado e

ligante está comumente relacionada aos seguintes fatores: a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso.

Conforme comenta Santana (1992) essa adesividade apresentada neste ensaio pode ser caracterizada com adesividade ativa ou passiva, onde a adesividade ativa é desenvolvida quando o ligante vai cobrir a partícula de agregado. Para que haja essa adesividade, a condição imprescindível é que haja “molhagem”, isto é, que o ligante consiga envolver todo o agregado. Já a adesividade passiva é a resistência apresentada ao descolamento da película de ligante da superfície do agregado já envolvido. Como o autor comenta ainda, que, na prática uma viscosidade mais alta do ligante, a textura rugosa e a porosidade (ao contrário da adesividade ativa) favorecem a adesividade passiva, porém é importantíssimo que não haja a presença de água.

Como é visto através das figuras (31 a 36) e do quadro (7) todos os resultados foram não satisfatórios, mesmo com alguns materiais tendo pouco descolamento da película de ligante, recomenda-se o uso de dope ou de ligantes modificados, para que não haja descolamento de nenhuma película de ligante sobre os agregados.

4.3.3 Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Para a realização deste ensaio foi necessário moldar 168 corpos-de-prova (8 para cada mistura) com o índice de vazios entre 6% a 8%, para isso foi necessário ajustar o número de golpes. Para que os corpos-de-prova se enquadrassem nesse intervalo de volume de vazios, foi necessário replanejar o número de golpes dados em cada face do corpos-de-prova, os quais ficaram no intervalo de 16 a 30 golpes, variando dentro desse intervalo de material para material.

Os 8 corpos-de-prova foram divididos em dois grupos, sendo o primeiro com condicionamento prévio (Grupo 1), e o segundo grupo sem condicionamento prévio (Grupo 2). Em síntese o condicionamento das misturas ocorreu levando primeiramente as amostras a 16 horas a temperatura de -18 °C, após esse tempo as amostras são colocadas submerso a 60 °C por 24 horas e para finalizar o ensaio as amostras são estabilizadas a 25 °C a duas horas e então são rompidas. Já as amostras sem condicionamento prévio, ficam duas horas a 25 °C para estabilizar, porém sem o contato direto da água, sendo assim rompidas a seco.

O valor obtido nessa relação, pode ser utilizado para prever o desempenho das misturas asfálticas perante a adesividade ligante/agregado e de certa forma também verificar a influência de aditivos na adesividade das misturas.

A tabela 24 apresenta as médias dos resultados da resistência à tração por compressão diametral das amostras com condicionamento e sem condicionamento (Grupo I e Grupo II, respectivamente), bem como os resultados da Resistência Retida à Tração. A resistência retida à tração é dada pela relação (em porcentagem) entre a resistência à tração das amostras condicionadas e a resistência à tração das amostras não condicionadas, onde dessa forma podemos avaliar a adesividade das misturas asfálticas perante o dano por umidade induzida.

Tabela 24 – Resumo dos resultados da Metodologia Lottman Modificada

<i>MISTURAS</i>	<i>GRUPO I (MPa)</i>	<i>σ (%)</i>	<i>Cv (%)</i>	<i>GRUPO II (MPa)</i>	<i>σ (%)</i>	<i>Cv (%)</i>	<i>RRT (%)</i>
<i>Mat. Bagé (REF)</i>	0,74	0,074	9,90	1,09	0,015	1,41	68,24
<i>Mat. Bagé (DOL)</i>	0,86	0,059	6,82	1,11	0,048	4,35	77,35
<i>Mat. Bagé (CALC)</i>	0,81	0,033	4,10	1,08	0,034	3,18	75,53
<i>Mat. Caçapava do Sul (REF)</i>	0,62	0,056	9,10	0,89	0,043	4,84	69,55
<i>Mat. Caçapava do Sul (DOL)</i>	0,67	0,036	5,32	0,77	0,047	6,16	86,90
<i>Mat. Caçapava do Sul (CALC)</i>	0,63	0,036	5,65	0,81	0,066	8,16	77,62
<i>Mat. Santo Ant. Patr (REF)</i>	0,87	0,033	3,80	0,89	0,047	5,34	98,12
<i>Mat. Santo Ant. Patr (DOL)</i>	0,78	0,074	9,45	0,86	0,014	1,65	90,96
<i>Mat. Santo Ant. Patr (CALC)</i>	0,86	0,042	4,86	0,96	0,034	3,52	89,28
<i>Mat. Sarandi (REF)</i>	0,88	0,037	4,16	0,93	0,106	11,40	95,07
<i>Mat. Sarandi (DOL)</i>	0,76	0,023	3,10	0,86	0,059	6,80	87,66
<i>Mat. Sarandi (CALC)</i>	0,81	0,042	5,26	0,94	0,042	4,46	85,56
<i>Mat. Eldorado do Sul (REF)</i>	0,51	0,022	4,36	0,87	0,066	7,56	58,59
<i>Mat. Eldorado do Sul (DOL)</i>	0,79	0,029	3,71	1,00	0,031	3,08	78,84
<i>Mat. Eldorado do Sul (CALC)</i>	0,57	0,008	1,34	0,79	0,016	2,01	72,78
<i>Mat. Itaara (REF)</i>	0,29	0,044	15,15	0,60	0,073	12,30	48,37
<i>Mat. Itaara (DOL)</i>	0,35	0,047	13,41	0,59	0,050	8,48	59,09
<i>Mat. Itaara (CALC)</i>	0,23	0,078	33,86	0,51	0,078	15,08	44,53
<i>Mat. Coronel Barros (REF)</i>	0,72	0,039	5,34	0,75	0,008	1,11	96,27
<i>Mat. Coronel Barros (DOL 1%)</i>	0,50	0,032	6,41	0,69	0,045	6,49	72,20
<i>Mat. Coronel Barros (DOL 2%)</i>	0,55	0,064	11,52	0,68	0,086	12,56	80,93
<i>Mat. Coronel Barros (CALC 1%)</i>	0,67	0,102	15,39	0,66	0,087	13,20	100,77
<i>Mat. Coronel Barros (CALC 2%)</i>	0,71	0,061	8,62	0,73	0,105	14,32	97,06

A figura 37, nos demonstra a resistência à tração dos grupos com e sem condicionamento, onde em um olhar geral podemos perceber que as cales tem comportamentos distintos para cada agregado. Primeiramente nota-se a diferença entre os tipos de agregado quanto a suscetibilidade a água, onde os agregados provenientes de Bagé, Eldorado do Sul e Itaara, obtiveram grande diferença na resistência à tração entre os dois grupos de condicionamentos.

Avaliando de uma forma geral, podemos perceber a influência da adição das cales (dolomítica e calcítica) nos agregados, pois houve um aumento na resistência à tração tanto para os grupo com condicionamento (Grupo I) como os sem condicionamento (Grupo II). Para os agregados provenientes de Bagé, Caçapava do Sul e Eldorado do Sul, os quais não são de origem basáltica, houve um aumento no ganho da resistência à tração para ambas as cales quando comparadas com a mistura referência (sem adição de cal).

Já para os materiais provenientes de Santo Antônio da Patrulha, Sarandi e Itaara pode-se perceber a distinção dos resultados, onde os materiais de Santo Antônio da Patrulha e Sarandi obtiveram redução na resistência à tração para as misturas com a adição da cal dolomítica e aumento na resistência com a adição da cal calcítica. Para o material proveniente de Itaara acontece ao contrário, a mistura com a adição da cal dolomítica houve um aumento na resistência à tração, e diminuição na resistência com a mistura com adição da cal calcítica.

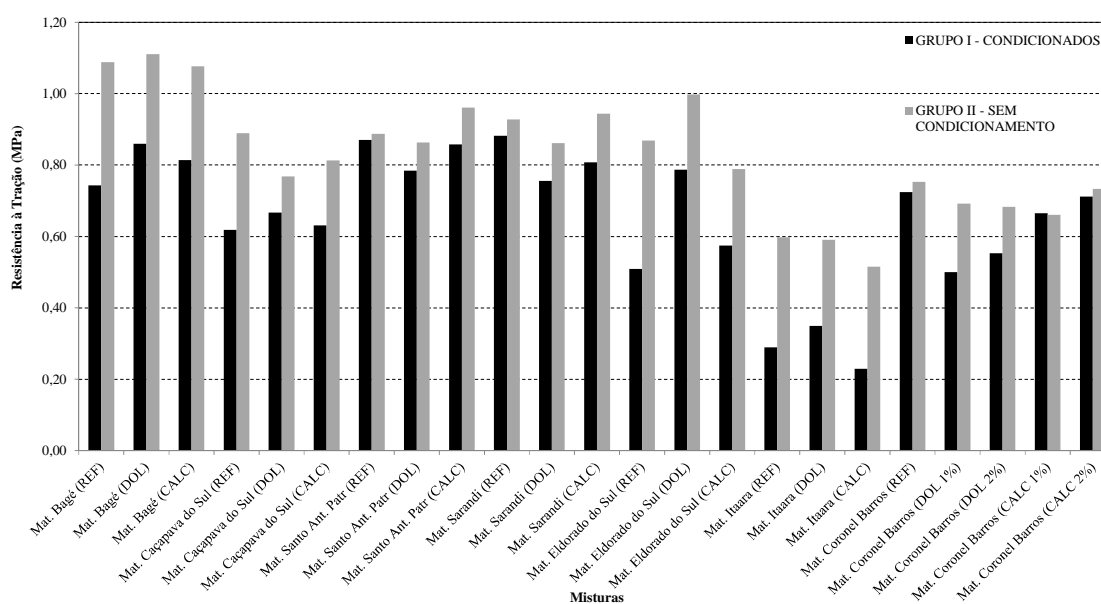


Figura 37: Resistência à tração de corpos-de-prova com volume de vazios entre 6% a 8%

Podemos perceber ainda a influência no teor de adição das cales com a pesquisa de Boeira (2011) com o material proveniente de Coronel Barros, onde as misturas com 2% de ambas as cales houveram aumento na resistência à tração, ficando as misturas com cal calcítica maiores que as misturas com cal dolomítica.

Com relação a Resistência Retida à Tração, tem-se como valor de referência, para aceitação de uma mistura segundo este método, a metodologia SUPERPAVE preconiza valores acima de 80%, por outro lado Hicks (1991) afirma que a maioria dos departamentos estaduais de transportes norte-americanos utilizam valores de 70%. No geral, a resistência à ação deletéria da água das misturas asfálticas é influenciada por vários fatores, dentre eles estão as propriedades dos agregados, as propriedades do ligante asfáltico e as propriedades das misturas.

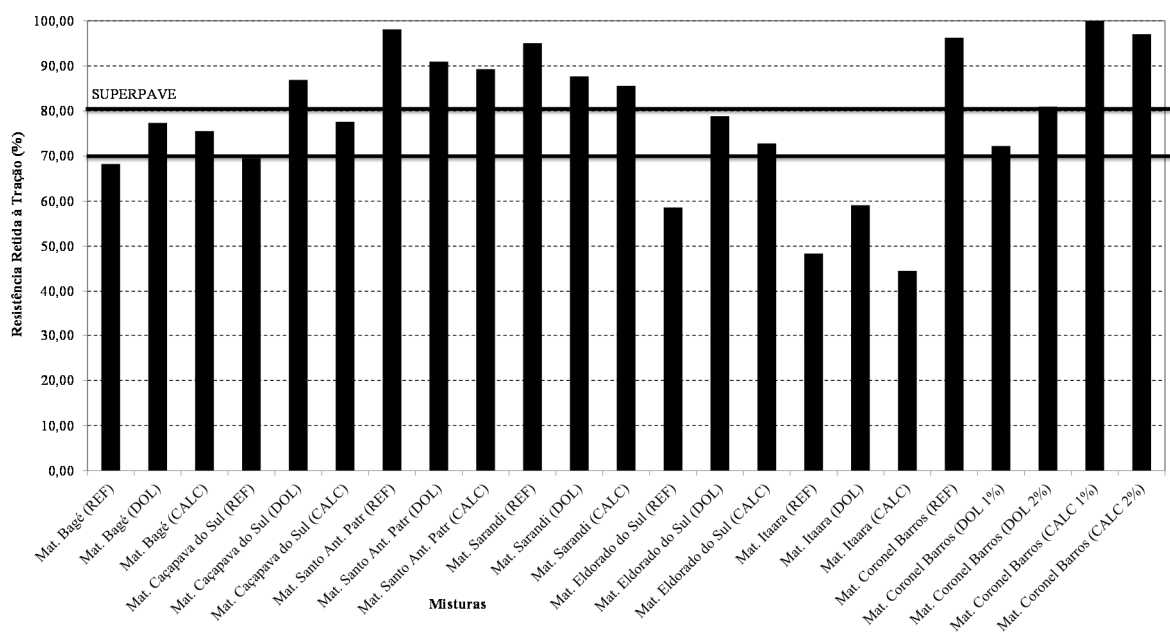


Figura 38: Resistência Retida à Tração das misturas.

Como é visto através da figura 38, as misturas com adição da cal dolomítica e calcítica para os materiais de Bagé, Caçapava do Sul, Eldorado do Sul obtiveram os melhores resultados, quando comparados com a mistura de referência, ficando ainda as misturas com a adição da cal dolomítica com os maiores resultados, sendo ainda que, para o material de Caçapava do Sul a mistura com adição da cal dolomítica ultrapassando a especificação do SUPERPAVE que é de $RRt \geq 80\%$. Dessa forma podemos perceber a influência positiva da incorporação de cal nestes tipos de materiais, sendo que estes materiais de origem granítica/mármore, de acordo com a literatura deveriam ter problemas de adesividade.

Pode-se perceber ainda, que, os materiais de Santo Antônio da Patrulha e Sarandi (rochas vulcânicas), tiveram uma redução na resistência retida à tração com a incorporação das cales, porém como pode ser visto pelas misturas de referência (no qual já tem bons resultados

quanto a resistência retida à tração), estes materiais nem precisariam da adição das cales, para melhorar a adesividade. Já para o material de Coronel Barros, podemos perceber uma redução com as misturas de 1% e 2% de cal dolomítica, porém o material também não precisaria da adição de cal, mas percebe-se que as adições de 1% e 2% de cal calcítica obtiveram melhores resultados quando comparadas com a mistura de referência.

Nota-se ainda os baixos resultados obtidos com o material de Itaara, ficando todas as misturas (referência, dolomítica e calcítica) bem abaixo das especificações. O que pode explicar tal comportamento é a alta absorção do material de Itaara, o que está ocasionando uma fragilidade na adesividade entre o ligante e o agregado. Mesmo assim, a cal dolomítica melhorou sensivelmente a adesividade, mostrado pelo aumento na resistência retida à tração.

Levando em consideração a especificação SUPERPAVE, teríamos o material de Santo Antônio da Patrulha e Sarandi com todas as misturas (Referência, Dolomítica e Calcítica) passadas na especificação, e mais o material de Caçapava do Sul com a mistura com a cal dolomítica e ainda o material de Coronel Barros com as misturas de referência, dolomítica 2% e as calcíticas 1% e 2%.

Uma comparação que pode ser feita, é a grande diferença entre os ensaios de adesividade (Ensaio de adesividade Ligante-Agregado e Metodologia Lottman Modificada). Onde que pelo ensaio de adesividade, por análise visual, os materiais obtiveram resultados não satisfatório, mesmo podendo ser visualizada que a adição das cales tem um efeito positivo perante a adesividade, pois quando comparamos com as misturas de referência (sem adição de cal), ambas as misturas com adição das cales (dolomítica e calcítica) melhoraram a adesividade agregado-ligante, mesmo quando as avaliações sendo não satisfatória para todas as misturas, que no caso pela norma seriam reprovadas.

Por outro lado, pelo ensaio de Lottman pode se perceber a grande melhoria que as cales ofereceram para os agregados (principalmente de origem granítica/mármore), com algumas misturas até passando a especificação. Isto comprova que o ensaio de adesividade Ligante-Agregado não pode ser levado como parâmetro único de avaliação de adesividade.

4.4 Resumo dos Resultados

Devido a quantidade de dados encontrados, julgou-se necessária a confecção de uns quadros resumos. Nos quadros estão demonstrados as porcentagens de ganho ou perda das

propriedades (adesividade, mecânica e da dosagem) das misturas com a incorporação da cal dolomítica e da cal calcítica, levando em consideração a mistura de referência.

Para um melhor entendimento dos efeitos da incorporação das cales, os materiais foram divididos conforme a origem. Sendo assim analisados em duas etapas, com a primeira apresentadas no quadro 8, com as propriedades dos materiais de origem granítica/metamórfica, com os materiais das cidades de Bagé, Caçapava do Sul e Eldorado do Sul.

MATERIAIS/MISTURAS			Ensaio						
			Teor de Ligante			Perda de Massa			
			MR	RT	5°C	25°C	45°C	RRT	
MATERIAIS DE ORIGEM GRANÍTICA/METAMÓRFICA	Mat. Bagé	DOLOMÍTICA	↑ 4,26%	↑ 7,59%	↑ 3,66%	↓ -0,09%	↓ -9,58%	↓ -16,25%	↑ 13,35%
		CALCÍTICA	↑ 4,26%	↑ 4,01%	↓ -2,26%	↓ -5,64%	↓ -4,61%	↓ -24,97%	↑ 10,68%
	Mat. Caçapava do Sul	DOLOMÍTICA	↓ -2,22%	↑ 5,29%	↑ 17,01%	↓ -19,53%	↓ -2,94%	↓ -11,66%	↑ 24,96%
		CALCÍTICA	↓ -1,11%	↓ -4,58%	↑ 13,66%	↓ -7,64%	↑ 42,83%	↑ 90,48%	↑ 11,61%
	Mat. Eldorado do Sul	DOLOMÍTICA	↑ 2,06%	↑ 7,65%	↑ 3,32%	↓ -13,33%	↓ -21,06%	↑ 15,83%	↑ 34,56%
		CALCÍTICA	↑ 1,03%	↑ 7,67%	↑ 5,94%	↓ -12,79%	↓ -9,31%	↑ 78,85%	↑ 24,22%

Quadro 8 - Quadro resumo do efeito da adição das cales nos materiais de origem granítica/metamórfica

De uma maneira geral, percebe-se que para esses materiais a incorporação de cal, tanto dolomítica quanto a calcítica, melhoram positivamente as misturas. Pois como pode ser observado pelos resultados dos materiais de origem granítica/metamórfica no quadro 8, o teor de ligante com a adição da cal dolomítica sobe em média cerca 1,36% e para cal calcítica em média cerca de 1,40%. Pode-se afirmar que a incorporação das cales aumentam a resistência à tração e o módulo de resiliência, já que com a incorporação da cal dolomítica a resistência à tração aumentou cerca 8% e o módulo de resiliência 6,85%; e com a incorporação da cal calcítica houve um aumento de 5,80% para resistência à tração e 2,40% para o módulo de resiliência.

Dessa forma mostra que a adição das cales melhoram as propriedades da mistura, que na prática, isso representa uma mistura mais resistente à diversos mecanismos de degradação, pode-se relatar isso pelo fato de as misturas com incorporação de cal se tornarem mais rígidas, porém menos suscetíveis ao trincamento devido a ação da cal.

Com relação à perda de massa, dos 18 resultados encontrados (dentro das temperaturas e dos materiais), nota-se que apenas 4 resultados aumentaram o desgaste, mostrando que a

adição das cales tem grande influência nas propriedades de coesão das misturas. Uma das explicações para isso é que a cal está aumentando o poder coesivo da mistura.

Já para os resultados da metodologia Lottman Modificada (RRT), a incorporação da cal dolomítica mostrou um aumento na resistência retida à tração de 24,30%, e para as misturas com adição da cal calcítica um aumento em média de 15,50%. Dessa forma podemos perceber a influência positiva da incorporação de cal nestes tipos de materiais, sendo que estes materiais de origem granítica/metamórfica, de acordo com a literatura deveriam ter problemas de adesividade.

Já para os materiais de Santo Antônio da Patrulha, Sarandi, Itaara e Coronel Barros, nos quais são de origem vulcânica, estão apresentados no quadro 9.

MATERIAIS/MISTURAS			Ensaio						
						Perda de Massa			
			Teor de Ligante	MR	RT	5°C	25°C	45°C	RRT
MATERIAIS DE ORIGEM VULCÂNICA	Mat. Santo Antônio da Patrulha	DOLOMÍTICA	↓ -2,83%	↑ 11,21%	↓ -0,56%	↑ 14,61%	↓ -12,40%	↑ 28,72%	↓ -7,29%
		CALCÍTICA	↑ 0,94%	↑ 6,70%	↓ -2,24%	↑ 28,24%	↓ -23,54%	↑ 19,89%	↓ -9,00%
	Mat. Sarandi	DOLOMÍTICA	↓ -2,91%	↑ 2,56%	↓ -3,93%	↓ -0,67%	↓ -2,12%	↑ 12,21%	↓ -7,79%
		CALCÍTICA	↑ 0,97%	↑ 0,94%	↓ -4,35%	↑ 2,55%	↓ -8,60%	↑ 4,42%	↓ -10,00%
	Mat. Itaara	DOLOMÍTICA	↑ 3,85%	↑ 7,30%	↑ 12,57%	↓ -11,57%	↓ -12,32%	↑ 22,92%	↑ 22,16%
		CALCÍTICA	↓ -0,77%	↑ 12,52%	↑ 8,43%	↓ -4,79%	↑ 8,08%	↑ 152,13%	↓ -7,94%
	Mat. Coronel Barros	1% DOLOMÍTICA	↓ -2,65%	↑ 2,31%	↑ 16,61%		↓ -39,59%		↓ -25,00%
		2% DOLOMÍTICA	↓ -1,77%	↓ -3,12%	↑ 11,83%		↓ -38,63%		↓ -15,93%
		1% CALCÍTICA	↓ -4,42%	↑ 3,48%	↑ 10,07%		↓ -33,17%		↑ 4,68%
		2% CALCÍTICA	↓ -1,77%	↓ -0,92%	↑ 3,56%		↓ -43,07%		↑ 0,82%

Quadro 9 - Quadro resumo do efeito da adição das cales nos materiais de origem vulcânica

Analisando de forma geral os materiais de origem vulcânica, nota-se que a uma redução no teor de ligante de 1,26% com adição da cal dolomítica e de um 1% com a adição da cal calcítica. Para o módulo de resiliência houve aumento com ambas as cales, sendo que para adição da cal dolomítica cerca de 4,05% e para a cal calcítica 4,54%, acontecendo o mesmo para a resistência à tração, ficando as misturas com cal dolomítica com uma média de 7,30% e para cal calcítica 3,09%.

Nas propriedades de adesividade, percebe-se para o ensaio de perda de massa dos 22 resultados encontrados, 10 houve aumento na perda de massa. E com relação a resistência retida à tração acontece uma redução, com cerca de 6,77% para as misturas com cal dolomítica e 4,29% para as misturas com cal calcítica.

No que diz respeito à resistência retida à tração, na família dos materiais de origem vulcânica; tirando o material de Itaara, no qual obteve resultados muito abaixo das especificações; percebe-se através dos resultados das misturas de referência, que são materiais que não precisariam da adição das cales para melhorar a adesividade, com resultados na ordem de 95% a 98% de resistência retida à tração. O que acontece ao contrario com os materiais de origem granítica/mármore, que traz resultados nas misturas de referência em torno de 58% a 69% de resistência retida à tração, e que, com a adição das cales foi até a 87% de resistência retida à tração, conseguindo passar a especificação do SUPERPAVE.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa que teve como objetivo geral avaliar o efeito de dois tipos de cal, em misturas do tipo Concreto Asfáltico, produzidas no Rio Grande do Sul, avaliando dessa forma as características mecânicas e de adesividade destas misturas.

5.1 Conclusões

O estudo teve por meio experimental a avaliação dos efeitos da adição das cales dolomítica e calcítica em misturas asfálticas confeccionadas com vários agregados do estado do Rio Grande do Sul. O estudo teve por característica a avaliação dos parâmetros de dosagem (Marshall), das propriedades mecânica das misturas (Módulo de Resiliência e Resistência à Tração) e de adesividade (metodologia Cantabro, metodologia Lottman).

I. DOSAGEM MARSHALL

- Destaca-se as variações nos valores típicos dos teores de projeto de ligante das misturas de referência dos materiais utilizados, dos agregados produzidos no Rio Grande do Sul encontram-se entre 4,50% (Mat. de Caçapava do Sul) até a um material com alta absorção como o material de Itaara com 6,50%.
- Para os materiais de origem granítica/metamórfica, de uma forma geral, houve aumento no teor de ligante de projeto, visto que apenas o material de Caçapava do Sul houve redução.
- Para os materiais de origem vulcânica, de uma maneira geral há uma redução no teor de projeto de ligante asfáltico.

II. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS

- Constata-se os valores típicos de Módulo de Resiliência das misturas de referência para o estado do Rio Grande do sul, fica entre 3700 MPa (Material de Coronel Barros) a 8500 MPa (Material de Bagé e Caçapava do Sul). E os valores típicos para a resistência à tração, ficando com valores entre 1,27 MPa (Material de Itaara) a 1,67 MPa (Material de Bagé).
- A adição das cales dolomítica e calcítica nos materiais estudados tem influência positiva nas misturas, onde analisando o conjunto das amostras, há um aumento nos módulos de resiliência, e ao mesmo tempo um ganho de resistência à tração.

III. PROPRIEDADES DE ADESIVIDADE

- Os valores típicos para as misturas de referência encontrados para resistência retida à tração, variam entre 48% (Material de Itaara) e 96,30% (Material de Coronel Barros).
- Com relação ao ensaio de perda de massa (metodologia Cantabro), para os materiais de origem granítica/metamórfica percebe-se uma redução na perda de massa por desgaste; O mesmo ocorre com os materiais de origem vulcânica, desta forma mostra que a adição das cales tem grande influência nas propriedades de coesão das misturas dos materiais de origem granítica/metamórfica e vulcânica. Uma das explicações para isso é que a cal está aumentando o poder coesivo das misturas.
- Já para os resultados da metodologia Lottman Modificada, para os materiais de origem granítica/metamórfica, a incorporação das cales mostrou um aumento na resistência retida à tração. Dessa forma percebe-se a influência positiva da incorporação de cal nestes tipos de materiais, com algumas misturas passando da especificação SUPERPAVE, sendo que estes materiais de origem granítica/metamórfica, de acordo com a literatura deveriam ter problemas de adesividade. Já para os materiais de origem vulcânica acontece uma redução na resistência retida à tração, porém com os resultados obtidos com as misturas de referência, nota-se que esses materiais nem precisariam da adição das cales para melhorar adesividade.

Em uma análise geral da influência da incorporação das cales (dolomítica e calcítica) nas misturas asfálticas estudadas, é possível perceber que a melhoria das propriedades depende além do tipo de cal utilizado, também do tipo de agregado utilizado. Onde para um determinado agregado a adição da cal (dolomítica ou calcítica) pode ser determinante para o sucesso da mistura.

Através da metodologia Lottman Modificada, pode-se perceber a influência positiva que as cales oferecem para os agregados, principalmente os de origem granítica/metamórfica, nos quais obtiveram melhorias nas misturas com adição das cales, quando comparados com a mistura de referência, ficando ainda as misturas com a adição da cal dolomítica com os maiores resultados, sendo que, para o material de Caçapava do Sul a mistura com adição da cal dolomítica ultrapassou a especificação do SUPERPAVE que é de $RR_t \geq 80\%$. Já para os materiais de origem vulcânica, tiveram uma redução na resistência retida à tração com a incorporação das cales, porém como pode perceber pelas misturas de referência (no qual já tem bons resultados quanto a resistência retida à tração, acima das especificações), estes materiais nem precisariam da adição das cales, para melhorar a adesividade.

É possível afirmar que os efeitos da incorporação de cal em concretos asfálticos melhoram o comportamento mecânico e de adesividade.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Em função das observações realizadas durante este trabalho sugere-se:

- Realizar ensaio de Fadiga, para avaliar a resistência e a influência das cales hidratada na vida de fadiga;
- Verificar a influência da cal hidratada no comportamento mecânico e de adesividade nas misturas com ligantes modificados;

- Realizar ensaios de Módulo Dinâmico para contabilizar os efeitos da temperatura e do tempo de carregamento nas propriedades dos materiais asfálticos com incorporação de cal hidratada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture Induced Damage**. AASHTO T283-89. In: American Association of State Highway Transportation Officials, 1989.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Method of Indirect Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixture**. D 4123-82. In: ASTM...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1982.

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

ASPHALT INSTITUTE. **Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types**. Lexington, Manual Series No2 (MS-2), 6 ed. 1995a, 141p.

ASPHALT INSTITUTE. **The asphalt handbook**. Manual Series, n. 4 (MS-4), College Park, 1956. P. 46-8

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Misturas Asfálticas – Determinação do Dano por Umidade Induzida**: ABNT/NBR 15617:2011. Rio de Janeiro, 2011.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V.T.F. ; SOARES, J. B. . **Análise da Influência do Tamanho nas Propriedades de Forma de Agregados Analisados Através do Processamento Digital de Imagens**. In: 8o Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões (CBR), 2013, Santos.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 2006, 504p.

BERTOLLO, Sandra A. Margarido. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com Borracha Reciclada de Pneus**, São Carlos, 2002. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2002.

BIANCHETTO, H.; MIRÓ, R.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MARTÍNEZ, A.H. **Effect of Calcareous Fillers on Bituminous Mix Aging**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n° 1998, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, 2007, p. 140-148.

BLASS, L. **Modelagem matemática de respostas estruturais em pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperatura**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2011.

BOCK, A., L. **Efeitos Da Incorporação De Cal Hidratada Em Concretos Asfálticos Elaborados Com Ligante Convencional E Modificado**. 2012. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BOCK, A. L. **Desempenho À Fadiga De Misturas Em Concreto Asfáltico Com Diferentes Formas De Incorporação De Cal**, Trabalho de conclusão de curso, UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

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

BOEIRA, F. D. **Estudo laboratorial do desempenho de misturas asfálticas com diferentes tipos e teores de cal**. Trabalho de conclusão de curso, UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2011.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas.** 2006. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BUTTON, J. W. **Maximizing the Beneficial Effects of Lime in Asphalt Paving Mixtures.** ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION, 899, 134-146, 1985.

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

CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS (CEC). (1986) Propuesta de Norma de Ensayo – **Determinacion de la perdida por Desgaste de Mezeclas Bituminosas mediante el empleo de la Maquina de Los Angeles (Ensayo Cantabro).** NLT – 325/86. Madri, 3p.

CERATTI, J. A., RUWER, P.M. & OLIVEIRA, J.A. **Estudo do Comportamento Mecânico de Concreto Asfáltico com Ligante Modificado por Polímero.** 13º Encontro de Asfalto, IBP Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro/RJ, 1996.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT). **Uma pesquisa a favor do Brasil.** Disponível em <http://www.cnt.org.br/informacoes/revista.asp> (acessado em 05/05/2014).

CORRÊA, S. M. **Compósito à Base de Resíduos de Concreto e Resíduos de Produção de Cal.** 2005. 117f. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CUNHA, M. B. **Avaliação do método bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas.** São Carlos, 2004. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 118p.

DE CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. 2008. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Adesividade de Agregado Graúdo a Ligante Betuminoso**. DNER – ME 78/94. Rio de Janeiro, 1994, 2p.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. DNER - ME 135/2010. Rio de Janeiro, 2010, 6p.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Adesividade de Agregado a Ligante Betuminoso**. DNER – ME 79/94. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

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

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfáltico: Especificação de Serviço: DNIT 031/2006 - ES.** Rio de Janeiro, 2006.

EULA - European Lime Association. **Hydrated lime: a proven additive for durable asphalt pavements.** Critical literature review. Report to the European Lime Association /Asphalt Task Force. September, 2010.

FURLAN, Ana Paula et al. **Influência de Características dos Agregados na Susceptibilidade a Dano por Umidade de Misturas Asfálticas.** In: 17º ENCONTRO DE ASFALTO, 2004, Rio de Janeiro.

FURLAN, A. P. **Condições acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas.** São Carlos, 2006. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 120p.

GRANDE, W. R. de. **Efeito da cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas e suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas.** São Carlos, 2006. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 159p.

GRECO, J. A. S. **Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GUSMÃO, R. P.; MAIO, S.R.; CARREIRA, M. E. S.; ESTEVES, M. G.; AMÊNDOLA P. L. 1990. Diagnóstico Brasil. **A ocupação do território e o meio ambiente.** IBGE. Rio de Janeiro, 170 p.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** São Paulo: Editora PINI, 1998. 285 p.

GRABOWSKI, W.; WILANOWICZ, J; SOBOL, T. **Structural and functional properties of mineral fillers modified with hydrated lime.** Proc. 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), Torino (Italy), paper 78, July 2009.

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

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

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

HUANG, S.-C., ROBERTSON, R. E., BRANTHAVER, J. F., and PETERSEN, J. C. **Impact of Lime Modification of Asphalt and Freeze--Thaw Cycling on the Asphalt--Aggregate Interaction and Moisture Resistance to Moisture Damage.** Journal of Materials in Civil Engineering, 711-718, 2005.

HUBER, G. A. **Methods to Achieve Rut-Resistant Durable Pavementes.** National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 274, 1999.

ISHAI, I.; CRAUS, J. **Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures.** Proc. Association Asphalt Paving Technologists 43, pp.228–258, 1977.

KANDHAL, P. E. P.S. **Moisture Suscebility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions.** NCAT – National Center for Asphalt Tecnology, report n. 92-1, 1992.

LEINZ, V. **Geologia Geral.** Segunda edição, revista. São Paulo, editora Nacional, 1963.

LEITE, F.L.M.; MOTTA, L.M.G.; CONSTANTINO, R.S.; TONIAL, I.A. **Curso sobre o programa SHRP: Aplicação a ligantes, agregados e misturas betuminosas**. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. **The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt**. Report for National Lime Association, 2001.

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

LITTLE, D. N.; PETERSEN, J. C. **Unique Effects of Hydrated Lime on the Performance Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited**. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 17(2), 207-218, 2005.

LUTIF, J. E. S.; KIM, Y-R; SOARES, B. S. **Influência do método de adição de cal hidratada em misturas asfálticas para reduzir os danos devido à umidade em pavimentos flexíveis**. Anais do XXII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Fortaleza/CE, 2008.

LYTTON, R.L. **Adhesive Fracture in Asphalt Concrete Mixtures**. Chapter in book edited by J. Youtcheff, In Press, 2004.

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

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

MENDES, L. de O. **A utilização do método bailey para a seleção de agregados em misturas asfálticas**. 2011. 131f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MENEGAT, R.; PORTO, M., L.; CARRARO, C., C.; FERNANDES, L., A., D. **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1998.

MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M.; NARDY, A. J. R. **Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin** – An Introduction. In. PICCIRILLO, E. M.; MELFI, A. J. The Mesozoic Flood Volcanism Of The Paraná Basin: Petrogenic and Geophysical Aspects. São Paulo: IAG/USP, 1988. 600 p.

MOHAMMAD, L. N., ABADIE, C., GOKMEN, R., and PUPPALA, A. J. **Mechanistic Evaluation of Hydrated Lime in Hot-Mix Asphalt Mixtures**. Transportation Research Record, 1723, 26- 36, 2000.

MOHAMMAD, L. N., SAADEH, S., KABIR, M., OTHMAN, A., and COOPER, S. **Mechanistic Properties of Hot-Mix Asphalt Mixtures Containing Hydrated Lime**. Transportation Research Record, 2051, 49-63, 2008.

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

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

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

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

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

NASCIMENTO, V. B. do; WERLANG, M. K; FACCO, R; GROSS, J. A. **Compartimentação Do Relevo De Um Setor A Leste Da Área Urbana De Santa Maria-Rs, No Bairro De Camobi.** Revista Geonorte, Edição Especial, V2, N4, p310-319, 2012

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

OLIVEIRA, A. M. dos S.; DE BRITO, A. N. S.; **Geologia de Engenharia.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

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

OLIVEIRA, P.M.F. **Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas preparadas com asfalto-polímero.** Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1997.

PAUL, H. R. **Compatibility of Aggregate, Asphalt Cement and Antistrip Materials.** LTRC Report No. 292, Louisiana Department of Transportation and Development / Louisiana Transportation Research Center, 1995.

PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. **Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): Classification of magma types and their spatial distribution.** Bull. Volcanol., Napoli, v. 55, p. 119-139, 1992.

PINHEIRO, R. J. B. **Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da serra geral no estado do Rio Grande do Sul,** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

PINILLA, Alfredo. **A Aderência entre Betumes Asfálticos e Agregados Pétreos.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Conselho Nacional de Pesquisas, 36p, 1965.

PINTO, Salomão. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**, Rio de Janeiro, 1991. (Tese de Doutorado) – COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN T. H. **Para entender a Terra**. Rio Grande do Sul: Instituto de Geociência da UFRGS, 2008.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D-Y; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction**. 2 ed. Laham: Napa Education Foundation, 1996.

ROISENBERG, A.; MARQUES, J. C.; BACHI, F. A.; FRANTZ, J. C.; **Geologia da Folha Gravataí*SH.22-X-C-V**. Programa Geologia do Brasil. Levantamentos Geológicos Básicos. Brasília, 2008.

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

SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio**. Rio de Janeiro, IBP/Comissão de Asfaltos, 1992.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. São Carlos, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 123p.

SENÇO, Wlastermir de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Volume 2, Ed. Pini, São Paulo, 2001.

SILVA, H. M. R. D. **Caracterização do masticque betuminoso e da ligação agregado-Masticque**. Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas. 2005. Tese (doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Ninho, Portugal.

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

VASCONCELOS, C. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pela metodologia Marshall e superpave com diferentes granulometrias.** Fortaleza, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 132 p. 2004.

VIERO, Ana Cláudia. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul /** Organização Ana Cláudia Viero [e] Diogo Rodrigues Andrade da Silva. – Porto Alegre: CPRM, 2010.

VILLWOCK, J. A. & TOMAZELLI, L. J. **Geologia Costeira do Rio Grande do Sul.** Notas Técnicas, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS. Porto Alegre, 8:1-45. 1995.

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

ANEXOS

ANEXO A – Tabelas dos Parâmetros de Dosagem Marshall do Material de Eldorado do Sul

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA REFERÊNCIA					
<u>PROPRIEDADE</u>	<u>TEOR DE BETUME (%)</u>				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,1	5,0	3,3	2,5	0,7
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	60	67	78	83	95
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	15,12	15,26	14,78	15,17	14,66
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,42	2,41	2,39	2,37	2,35
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,28	2,28	2,31	2,31	2,34
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1300	1130	1323	1145	1240
<i>Fluência (mm)</i>	5	5	5	5	5

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DOLOMÍTICA					
<u>PROPRIEDADE</u>	<u>TEOR DE BETUME (%)</u>				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,6	5,5	3,6	2,9	1,4
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	58	65	76	81	91
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	15,65	15,70	15,09	15,54	15,27
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,42	2,41	2,39	2,37	2,36
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,26	2,27	2,30	2,30	2,32
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1084	1078	996	1132	1150
<i>Fluência (mm)</i>	4	4	6	6	5

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA CALCÍTICA					
<u>PROPRIEDADE</u>	<u>TEOR DE BETUME (%)</u>				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	7,4	5,0	4,1	2,3	0,9
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	55	67	74	85	94
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	16,28	15,19	15,45	14,93	14,80
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,42	2,40	2,39	2,37	2,35
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,24	2,28	2,29	2,32	2,33
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1074	1098	994	1174	1166
<i>Fluência (mm)</i>	4	4	6	6	5

ANEXO B – Tabelas dos Parâmetros de Dosagem Marshall do Material de Itaara

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA REFERÊNCIA							
PROPRIEDADE	TEOR DE BETUME (%)						
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Volume de Vazios (%)	8,9	7,7	5,8	4,8	4,6	4,9	3,2
Relação Betume Vazios (%)	49	56	65	71	74	74	83
Vazios do Agregado Mineral (%)	17,48	17,42	16,77	16,90	17,70	18,93	18,53
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	2,37	2,35	2,33	2,32	2,30	2,29	2,27
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,16	2,17	2,20	2,20	2,20	2,17	2,20
Estabilidade (kgf)	841	952	1064	1000	1074	899	1094
Fluência (mm)	4	5	5	7	7	5	5

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DOLOMÍTICA							
PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)						
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Volume de Vazios (%)	9,9	7,8	6,7	5,5	4,8	4,8	3,5
Relação Betume Vazios (%)	46	55	62	68	73	75	81
Vazios do Agregado Mineral (%)	18,43	17,53	17,50	17,53	17,91	18,89	18,76
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	2,37	2,35	2,33	2,32	2,30	2,29	2,27
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,13	2,17	2,18	2,19	2,19	2,18	2,19
Estabilidade (kgf)	773	880	900	931	989	924	1109
Fluência (mm)	5	6	5	6	5	5	6

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA CALCÍTICA							
PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)						
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Volume de Vazios (%)	9,1	8,8	7,2	5,4	4,4	3,9	3,4
Relação Betume Vazios (%)	48	52	60	69	75	78	82
Vazios do Agregado Mineral (%)	17,69	18,40	18,00	17,38	17,51	18,10	18,70
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	2,36	2,35	2,33	2,32	2,30	2,28	2,27
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,15	2,14	2,16	2,19	2,20	2,20	2,19
Estabilidade (kgf)	844	899	634	913	1019	1102	1001
Fluência (mm)	6	5	6	6	6	5	5

ANEXO C – Tabelas dos Parâmetros de Dosagem Marshall do Material de Sarandi

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA REFERÊNCIA					
PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,3	5,7	4,4	3,0	2,0
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	62	67	74	82	88
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	16,50	17,10	17,12	17,14	17,42
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,73	2,70	2,68	2,66	2,63
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,55	2,55	2,56	2,58	2,58
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1189	1167	1245	1251	1169
<i>Fluência (mm)</i>	4	5	4	5	5

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DOLOMÍTICA					
PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,6	5,7	4,1	2,5	2,0
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	61	67	76	85	89
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	16,74	17,08	16,86	16,69	17,37
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,72	2,70	2,68	2,65	2,63
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,54	2,55	2,57	2,59	2,58
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1162	1151	1214	1332	1223
<i>Fluência (mm)</i>	4	4	4	4	5

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA CALCÍTICA					
PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,9	5,9	4,8	2,6	1,9
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	59	66	73	85	89
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	17,02	17,27	17,51	16,70	17,32
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,72	2,70	2,68	2,65	2,63
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,53	2,54	2,55	2,58	2,58
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1255	1168	1071	1345	1263
<i>Fluência (mm)</i>	4	4	4	5	5

ANEXO D – Tabelas dos Parâmetros de Dosagem Marshall do Material de Santo Antônio da Patrulha

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA REFERÊNCIA

PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	7,2	6,5	4,9	3,1	2,1
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	57	62	71	81	87
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	16,78	17,29	17,01	16,50	16,79
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,59	2,57	2,55	2,53	2,51
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,41	2,40	2,42	2,45	2,46
<i>Estabilidade (kgf)</i>	989	1034	959	956	1033
<i>Fluência (mm)</i>	6	4	4	5	5

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DOLOMÍTICA

PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	7,1	6,3	4,3	2,6	2,0
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	57	63	74	84	88
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	16,68	17,05	16,43	16,10	16,67
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,59	2,57	2,55	2,53	2,51
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,41	2,41	2,44	2,46	2,46
<i>Estabilidade (kgf)</i>	925	1013	1121	1061	1000
<i>Fluência (mm)</i>	4	4	5	6	5

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA CALCÍTICA

PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	7,2	6,4	5,0	3,4	2,3
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	57	63	71	80	86
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	16,78	17,20	17,03	16,75	16,95
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,59	2,57	2,55	2,53	2,51
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,40	2,40	2,42	2,44	2,45
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1072	1066	1158	1203	1003
<i>Fluência (mm)</i>	4	6	4	4	5

ANEXO E – Tabelas dos Parâmetros de Dosagem Marshall do Material de Bagé

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA REFERÊNCIA					
<u>PROPRIEDADES</u>	<u>TEOR DE BETUME (%)</u>				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,3	4,8	3,1	1,9	1,4
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	60	69	79	87	91
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	15,79	15,56	15,23	15,29	15,91
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,55	2,53	2,51	2,49	2,47
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,39	2,41	2,43	2,44	2,44
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1221	1187	1262	1172	1058
<i>Fluência (mm)</i>	4	5	4	4	6

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DOLOMÍTICA					
<u>PROPRIEDADES</u>	<u>TEOR DE BETUME (%)</u>				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,9	5,3	3,5	2,6	1,5
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	58	67	77	84	91
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	16,31	15,98	15,54	15,87	16,02
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,55	2,53	2,51	2,49	2,47
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,37	2,39	2,42	2,42	2,43
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1009	1105	1227	1115	1125
<i>Fluência (mm)</i>	4	5	5	5	6

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA CALCÍTICA					
<u>PROPRIEDADES</u>	<u>TEOR DE BETUME (%)</u>				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	6,8	5,5	3,4	2,4	1,5
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	58	66	78	85	91
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	16,22	16,21	15,46	15,64	15,99
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,55	2,53	2,51	2,49	2,47
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,37	2,39	2,42	2,43	2,43
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1034	1085	1181	1154	1130
<i>Fluência (mm)</i>	5	5	6	7	7

ANEXO F – Tabelas dos Parâmetros de Dosagem Marshall do Material de Caçapava do Sul

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA REFERÊNCIA

PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	5,1	4,3	2,6	1,3	0,5
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	66	72	83	91	97
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	14,99	15,39	15,08	15,09	15,48
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,61	2,59	2,57	2,55	2,53
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,48	2,48	2,50	2,52	2,52
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1169	1058	1142	1104	1054
<i>Fluência (mm)</i>	5	4	5	4	5

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DOLOMÍTICA

PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	5,4	4,1	2,0	0,8	0,1
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	65	73	86	94	100
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	15,23	15,19	14,52	14,65	15,14
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,61	2,59	2,57	2,55	2,53
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,47	2,49	2,52	2,53	2,53
<i>Estabilidade (kgf)</i>	954	1031	1014	1057	1030
<i>Fluência (mm)</i>	4	5	5	5	7

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA CALCÍTICA

PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>Volume de Vazios (%)</i>	5,4	4,2	2,3	1,1	0,1
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	65	73	84	93	100
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	15,22	15,29	14,80	14,89	15,14
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,61	2,59	2,57	2,55	2,53
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,47	2,48	2,51	2,52	2,52
<i>Estabilidade (kgf)</i>	1071	1059	1104	1014	1040
<i>Fluência (mm)</i>	4	4	5	6	6

ANEXO G – Tabelas dos Parâmetros de Dosagem Marshall do Material de Coronel Barros

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA REFERÊNCIA					
PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Volume de Vazios (%)	8,1	6,0	4,8	2,8	2,1
Relação Betume Vazios (%)	55	65	73	84	88
Vazios do Agregado Mineral (%)	18,04	17,41	17,46	16,91	17,48
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	2,729	2,705	2,681	2,658	2,635
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,509	2,541	2,553	2,584	2,580
Estabilidade (kgf)	817	854	671	924	816
Fluência (mm)	4	4	3	4	4

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DOLOMÍTICA 1%					
PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Volume de Vazios (%)	7,6	4,9	4,0	3,3	1,2
Relação Betume Vazios (%)	57	70	76	81	93
Vazios do Agregado Mineral (%)	17,54	16,32	16,69	17,29	16,67
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	2,712	2,688	2,665	2,642	2,619
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,506	2,557	2,559	2,554	2,587
Estabilidade (kgf)	790	1115	943	848	934
Fluência (mm)	4	3	4	4	3

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DOLOMÍTICA 2%					
PROPRIEDADES	TEOR DE BETUME (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Volume de Vazios (%)	8,7	6,3	4,7	2,1	2,4
Relação Betume Vazios (%)	53	64	73	87	86
Vazios do Agregado Mineral (%)	18,53	17,56	17,25	16,17	17,59
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	2,705	2,682	2,658	2,636	2,613
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,470	2,512	2,535	2,582	2,551
Estabilidade (kgf)	734	845	885	1073	842
Fluência (mm)	3	3	4	4	3

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA CALCÍLICA 1%

<u>PROPRIEDADES</u>	<u>TEOR DE BETUME(%)</u>				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
<i>Volume de Vazios (%)</i>	8,4	6,4	3,3	1,8	1,3
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	54	64	80	89	92
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	18,28	17,64	16,07	15,94	16,67
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,705	2,681	2,658	2,635	2,613
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,477	2,509	2,571	2,588	2,579
<i>Estabilidade (kgf)</i>	696	755	1021	1069	852
<i>Fluência (mm)</i>	4	3	3	4	4

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MISTURA CALCÍLICA 2%

<u>PROPRIEDADES</u>	<u>TEOR DE BETUME (%)</u>				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
<i>Volume de Vazios (%)</i>	8,8	6,0	4,2	2,8	1,3
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	53	65	75	83	92
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	18,68	17,36	16,93	16,89	16,77
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	2,717	2,693	2,669	2,646	2,624
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	2,477	2,530	2,557	2,572	2,589
<i>Estabilidade (kgf)</i>	838	1011	1084	1060	1057
<i>Fluência (mm)</i>	4	3	3	3	4