

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

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

Curso de Engenharia Civil

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
COM ADIÇÃO DE CAL: UM ESTUDO DE CASO**

ACADÊMICO: ALEX R. GRANICH

PROFESSOR ORIENTADOR: Dr. LUCIANO P. SPECHT

Ijuí/RS

2010

Alex Roberto Granich

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
COM ADIÇÃO DE CAL: UM ESTUDO DE CASO**

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

Ijuí/RS

2010

FOLHA DE APROVAÇÃO

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

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

Banca Examinadora:

Prof. Gustavo Cantarelli, Msc.
UNIJUÍ/DeTec

Dedico este trabalho aos meus pais Sergio Roberto e Ceni, e ao meu irmão Eduardo; que sempre me deram total apoio, me serviram como exemplo e os quais me orgulho muito.

Dedico também aos meus avós Arlindo e Ivone que se fizeram presente em todos os momentos que precisei, além do suporte me cedido.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer profundamente a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho, seja por orientação técnica, ou por amizade, mesmo assumindo o descuido de algum esquecimento, o qual peço que me desculpem.

A toda a minha família, pelo incentivo, compreensão e confiança.

Ao Professor Luciano P. Specht, pela eximia orientação prestada, pelas inúmeras manhãs de dedicação, pela disponibilidade que teve, pelo apoio e incentivo, e pelo exemplo de competência que me serviu.

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

Aos amigos e colegas de pesquisa, que sem a sua ajuda a realização deste trabalho tenho certeza de que seria muito mais difícil: Eduardo Pasche e Fernando Dekeper Boeira.

A secretária Cassiana, que sempre esteve de prontidão e nunca negou auxílio e orientações.

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

Aos laboratoristas do LAPAV Vinícius e Cléber, pelo auxílio durante os ensaios realizados, agradeço todo o apoio e amizade.

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

RESUMO

Considerando o atual quadro brasileiro na pavimentação, com muitos investimentos na área, como por exemplo os *Programas de aceleração do crescimento 1 e 2* através do DNIT e somada a recomendação na utilização de cal em revestimento asfálticos, este trabalho visou contribuir com o entendimento dos mecanismos que atuam quando da adição na mistura. O objetivo geral desta pesquisa tratou-se em avaliar os efeitos (mecânicos e de adesividade) de diferentes teores e tipos de cal nas misturas em questão de Concreto asfáltico (CA). Trata-se também de um estudo de caso, onde na mistura foi adicionada Cal Dolomítica com o teor de 2% de substituição ao pó-de-pedra, de acordo com o projeto original. As outras misturas levaram Cal calcítica nos teores de 1% ou 2%, pois de acordo com bibliografias estadunidenses um teor mínimo de Ca(OH)_2 da ordem de 90%, como é o caso desta cal, é considerado suficiente para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade. Foi ainda realizada uma mistura de referência sem cal para fins de comparação. Nos resultados da dosagem Marshall pode-se perceber que em comparação com a mistura de referência houve uma leve diminuição no consumo de ligante da mistura com 2% de adição de cal Dolomítica e 1% de adição de cal Calcítica. Já na mistura com 2% de adição de cal calcítica houve um leve aumento no consumo do ligante. Porém, considerando um erro tolerável de 0,30%, o qual de acordo com a especificação de serviço do DNIT pode ser levado em conta pela falta de precisão no campo, pôde-se então observar que todos os valores são bastante próximos. No caso em estudo nota-se que as três misturas que possuíam adição de cal, mostraram-se positivas em relação à mistura de referência para o ensaio de resistência a tração. O melhor desempenho teve a mistura com cal dolomítica, a qual obteve uma média 1,41 MPa, seguido da mistura com cal calcítica com 1% de adição onde a média foi 1,31 MPa, seguido da cal calcítica com 2% de adição com 1,26 MPa de média, e por fim a mistura de referência obteve uma média de 1,20 MPa. Para o módulo de resiliência a mistura com 2% de cal calcítica foi a que obteve o maior valor, com média de 4042 MPa, já a mistura com 1% da mesma cal obteve média de 4008 MPa, a mistura com cal Dolomítica obteve 3738 MPa de módulo e a mistura de referência 3496 MPa. As médias dos resultados do ensaio Cantabro apresentaram a sequência crescente de melhor desempenho na seguinte disposição: Mistura de Cal Calcítica 2%, mistura de cal Dolomítica 2%, mistura de cal Calcítica 1% e mistura de referência, porém, considerando o desvio padrão notou-se que houve uma faixa de resultados em comum. Os resultados obtidos no ensaio da metodologia Lottmann modificada ficaram muito dispersos e podem ser justificados pelo fator da forma de incorporação se dar pela substituição de finos, pois pela experiência obtida em Bock (2009), misturas onde a cal é adicionada sobre o agregado seco é, para a propriedade de adesividade, a forma de otimizar o desempenho.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas de um pavimento	17
Figura 2 - Classificação de agregados de acordo com o DNER	19
Figura 3 – Classificação do agregado quanto a quantidade de Sílica presente.	20
Figura 4 – Demonstração do trincamento de um pavimento	30
Figura 5 – Causas e exemplos de defeitos em pavimentos	30
Figura 6 – Característica desejável de materiais na pavimentação em relação a adesividade	32
Figura 7 – Especificação de quantidade de corpos-de-prova por ensaio e por projeto	33
Figura 8 – Característica dos agregados utilizados em relação a três tipos de ensaios	34
Figura 9 – Granulometria do conjunto total de agregados	34
Figura 10 – Granulometria das cales	35
Figura 11 – Finura das cales	35
Figura 12 - Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70)	36
Figura 13 - Composição granulométrica da mistura	37
Figura 14 - Estado de tensões geradas no ensaio brasileiro	38
Figura 15 - Equipamento para realização do ensaio de módulo de resiliência	39
Figura 16 - Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência	40
Figura 17 - Exemplo de equipamento para ensaio de Rt	41
Figura 18 - Equipamento de abrasão <i>Los Angeles</i>	42
Figura 19 - Composição das misturas para moldagem dos corpos-de-prova	43

Figura 20 - Mistura e respectivas faixas de trabalho da especificação do DNIT	43
Figura 21 - Propriedades da mistura de referência	44
Figura 22 - Resumo das propriedades de projeto da mistura de referência	44
Figura 23 - Propriedades da mistura com cal Dolomítica 2%	45
Figura 24 - Resumo das propriedades de projeto da mistura com cal Dolomítica 2%	45
Figura 25 - Propriedades da mistura com cal Calcítica 1%	46
Figura 26 - Resumo das propriedades de projeto da mistura com cal Calcítica 1%	46
Figura 27 - Propriedades da mistura com cal Calcítica 2%	47
Figura 28 - Resumo das propriedades de projeto da mistura com cal Calcítica 2%	47
Figura 29 – Teor de projeto por mistura (%)	48
Figura 30 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração @ 25 °C (MPa)	49
Figura 31 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração @ 25 °C (MPa)	49
Figura 32 - Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência @ 25 °C (MPa)	50
Figura 33 - Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência @ 25 °C (MPa)	50
Figura 34 - Relação Mr/Rt @ 25°C	51
Figura 35 - Resultados do ensaio Cantabro no aparelho de abrasão Los Angeles	52
Figura 36 - Média dos resultados do ensaio Cantabro (%)	53
Figura 37 - Resultado do ensaio de adesividade pela metodologia Lottmann (MPa)	53
Figura 38 - Média dos resultados do ensaio de adesividade pela metodologia Lottmann	54
Figura 39 - Resultados da Resistência Retida à Tração	55

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

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

ANTT: *Agência Nacional de Transporte Terrestre*

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

CA: *Concreto Asfáltico*

CAP: *Cimento Asfáltico de Petróleo*

CEC: *Centro de estudios de carreteras*

CNT: *Confederação Nacional de Transporte*

d: *diâmetro do Corpo-de-Prova*

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

DNER: *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*

DNIT: *Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transportes*

F: *Força Aplicada*

h: *altura do corpo-de-prova*

LEC: *Laboratório de Engenharia da UNIJUÍ*

LPAV: *Laboratório de Pavimentação da UFRGS*

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

Mr: *Módulo de Resiliência*

P' = *peso após a realização do ensaio*

P = *peso inicial do corpo-de-prova*

PM: *Perda de massa*

Rt: *Resistência à Tração por Compressão Diametral*

RRt: *Resistência Retida à Tração*

UFRGS: *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

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

Δ : *Deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga*

μ : *Coefficiente de Poisson*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Tema da pesquisa	13
1.2. Delimitação do tema	13
1.3. Formulação da questão em estudo	13
1.4. Objetivos	13
1.4.1. <i>Objetivos gerais</i>	13
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	13
1.5. Justificativas	14
1.6. Sistematização do TCC	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Materiais para execução de misturas asfálticas	19
2.1.1. <i>Agregados</i>	19
2.1.1.1. <i>Classificação dos agregados</i>	19
2.1.1.2. <i>Produção de agregados britados</i>	20
2.1.1.3. <i>Características dos agregados</i>	21
2.1.2. <i>Ligantes asfálticos</i>	22
2.1.2.1. <i>Ligantes modificados</i>	22
2.1.2.2. <i>Emulsão asfáltica</i>	23
2.1.2.3. <i>Asfalto diluído</i>	23
2.1.2.4. <i>Asfalto-espuma</i>	24
2.1.2.5. <i>Agentes rejuvenescedores</i>	24
2.1.3. <i>Melhoradores de adesividade</i>	24
2.1.3.1. <i>Cal Hidratada</i>	25
2.1.3.2. <i>Dopes</i>	27
2.2. Métodos de dosagem	27
2.3. Propriedades mecânicas	29
2.3.1. <i>Módulo de resiliência</i>	29
2.3.2. <i>Fadiga</i>	29
2.3.3. <i>Deformação plástica</i>	30
2.3.4. <i>Adesividade</i>	31
3. METODOLOGIA	33
3.1. Classificação do estudo	33
3.2. Planejamento do experimento	33
3.3. Materiais utilizados	34
3.3.1. <i>Agregados minerais</i>	34
3.3.2. <i>Cales</i>	35
3.3.3. <i>Ligantes asfálticos</i>	35
3.4. Ensaio e respectivos equipamentos	36
3.4.1. <i>Dosagem Marshall</i>	37
3.4.2. <i>Ensaio de resistência a tração por compressão diametral</i>	37
3.4.3. <i>Ensaio de módulo de resiliência</i>	38
3.4.4. <i>Ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada</i>	40
3.4.5. <i>Perda de massa por desgaste</i>	41

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
4.1. Dosagem Marshall	43
4.2. Propriedades Mecânicas	48
4.2.1. <i>Ensaio de resistência à tração – DNER-ME 138/94</i>	48
4.2.2. <i>Ensaio de Módulo de Resiliência – DNER-ME 133/94</i>	50
4.2.3. <i>Relação Mr/Rt</i>	51
4.3. Propriedades de Adesão e Coesão	52
4.3.1. <i>Perda de Massa – Metodologia Cantabro</i>	52
4.3.2. <i>Adesividade – Metodologia Lottman Modificada</i>	53
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5.1. Conclusões	56
5.1.1. <i>Dosagem Marshall</i>	56
5.1.2. <i>Propriedades mecânicas das misturas</i>	56
5.1.2.1. <i>Resistência a tração</i>	56
5.1.2.2. <i>Módulo de Resiliência</i>	57
5.1.2.3. <i>Relação Mr/Rt</i>	57
5.1.3. <i>Propriedades de adesão e coesão</i>	57
5.1.3.1. <i>Perda de massa</i>	57
5.1.3.2. <i>Adesividade</i>	58
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	58
REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

1.1. Tema da Pesquisa

O tema da pesquisa é: Pavimentação Asfáltica.

1.2. Delimitação do Tema

Este trabalho limita-se a estudar revestimentos asfálticos do tipo concreto asfáltico (CA) executados na BR-285, trecho entre São Luiz Gonzaga/RS e São Borja/RS, no período de 2009/2010.

1.3. Formulação da questão de estudo

Qual o teor e tipo de cal mais interessante levando em consideração: custo, desempenho mecânico e de adesividade da mistura de concreto asfáltico produzidas com o material em estudo?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa trata-se em avaliar os efeitos (mecânicos, de adesividade) de diferentes teores e tipos de cal na misturas em questão de CA.

1.4.2. Objetivos específicos

Verificar a influência dos tipos de cal: Calcítica e Dolomítica, e dos teores de 1% e 2% de cal nos seguinte parâmetros, a partir de uma mistura de referência:

Dosagem Marshall;

Resistência à tração;

Módulo de resiliência;

Resistência ao desgaste;

Adesividade;

1.5. Justificativas

O crescente preço do petróleo tem enfatizado a importância do estudo de materiais de pavimentos que possam atender situações específicas e apresentar uma relação custo/benefício atrativa. As novas exigências de desempenho dos pavimentos flexíveis, tanto funcionais quanto estruturais, têm motivado pesquisas a respeito da utilização de modificadores em ligantes asfálticos (Specht *et al*, 2008).

O modal rodoviário teve e ainda tem papel fundamental no desenvolvimento social e econômico mundial, mas especificamente no Brasil, onde os outros modais não possuem tanta força sua importância é indiscutível, pois mais da metade das cargas são transportadas através das rodovias. Segundo Medina e Motta (2005) as rodovias transportam 60% da carga e 96% dos passageiros no Brasil.

A Rodovia, e em especial o pavimento, em relação à importância do transporte no complexo da atividade sócio-econômica, dentro de uma perspectiva de longo prazo (de ordem de grandeza, por exemplo, secular) deve apresentar permanentemente um desempenho satisfatório (DNIT, 1996).

Este desempenho satisfatório se traduz na oferta, ao usuário, de condições de tráfego seguras, confortáveis e econômicas – atendendo aos preceitos de otimização do custo total de transporte (DNIT, 1996).

A degradação dos pavimentos é causada principalmente pelo tráfego, pois com grande frequência, veículos trafegam nas rodovias com excesso de carga, o que, segundo Medina e Motta (2005) têm como consequência a degradação acelerada dos pavimentos e a sobrecarga de pontes e viadutos, causando um dos danos mais conhecidos do pavimento asfáltico: o trincamento por fadiga, que pode ser definido como o dano causado pelas solicitações repetidas do tráfego, estando este, entre os tipos mais importantes de defeitos levados em consideração quando verificada a necessidade ou não de intervenções de restauração (GRANICH *et al*, 2009).

Conforme Morilha (2004) a adição de modificadores nos ligantes asfálticos, sendo polímeros, proporcionam melhorias físicas, químicas e reológicas ao ligante asfáltico

tradicional capazes de aumentar a sua durabilidade, por meio da recuperação elástica, aumento da resistência à deformação permanente e ao envelhecimento. Também, segundo Specht (2004), a adição de materiais poliméricos traz vários benefícios aos ligantes asfálticos, como a redução da suscetibilidade térmica e o aumento da ductilidade, proporcionando estabilidade em altas temperaturas e reduzindo o risco de fratura em baixas temperaturas, além de contribuir para uma melhor resistência ao intemperismo e uma melhor adesão ligante/agregado.

Porém, segundo BOCK (2009), o uso de ligantes especiais implica em maiores custos iniciais, apresentando ainda dificuldades de transporte, armazenamento e incorporação à mistura. Já a análise de custo de ciclo de vida, como a realizada por Hicks e Scholz (2001) demonstram que a cal também é economicamente vantajosa.

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

Outro problema que incentivou a pesquisa foi o de comparar as ações dos diferentes tipos de cal; sendo elas: A cal calcítica com origem no estado de Minas Gerais (e que a bibliografia estadunidense indica) e a cal dolomítica (a qual possui baixos teores de Ca(OH)_2) (Núñez, 2007; Guimarães, 1997), proveniente do estado do Rio Grande do Sul, e que foi utilizada no caso em estudo. As bibliografias estadunidenses, sugerem que um teor mínimo de Ca(OH)_2 da ordem de 90% parece suficiente para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade.

Considerando ainda o atual quadro brasileiro na pavimentação, com muitos investimentos na área, como por exemplo os *Programas de aceleração do crescimento 1 e 2* através do DNIT e somada a recomendação do mesmo na utilização de cal em revestimento asfálticos, este trabalho visa contribuir com o entendimento dos mecanismos que atuam quando da adição na mistura.

1.6. Sistematização do TCC

A estrutura do trabalho seguiu a seguinte sequência:

1° Capítulo: foi composto pelo tema da pesquisa e sua delimitação, os objetivos e justificativas.

2° Capítulo: traz a revisão de literatura, onde foram abordados os seguintes temas:

- Materiais para execução de misturas asfálticas;
- Métodos de dosagens;
- Propriedades mecânicas;
- Adesividade.

3° Capítulo: abordou a metodologia utilizada no trabalho, também a descrição dos materiais e ensaios utilizados.

4° Capítulo: apresenta a análise, interpretação e comparação dos resultados.

5° Capítulo: mostra as conclusões encontradas, apresentando resultados da comparação entre as diferentes tipos e teores de cales estudadas, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Define-se por pavimento a estrutura de múltiplas camadas capaz de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente (Specht, 2004). Os pavimentos dividem-se, quanto a sua deformabilidade, em rígidos e flexíveis. Diferenciam-se principalmente pelo material utilizado na camada superior, nos rígidos: placa de concreto de cimento; e nos flexíveis do tipo betuminoso.

Outra principal diferença entre os dois tipos de pavimento é a organização das camadas. No pavimento rígido divide-se em: placa de concreto de cimento, a qual faz papel de revestimento e de base; e sub-base.

Já as camadas do pavimento flexível são divididas em: Revestimento, que é a camada que resiste a maior parte das ações do tráfego e o transmite para as camadas inferiores, o revestimento dá conforto e segurança ao usuário e impermeabiliza o pavimento. A base é a camada situada logo abaixo da camada de revestimento, e serve para resistir as ações do tráfego e transferi-la ao subleito, quando viável é executada uma camada de sub-base, que tem o objetivo de diminuir a espessura da camada de base. Quando pavimentos são muito espessos, para se reduzir as espessuras das camadas de base (Figura 1), é que se executa uma camada de reforço do subleito. E quando necessário é feita uma regularização da mesma.

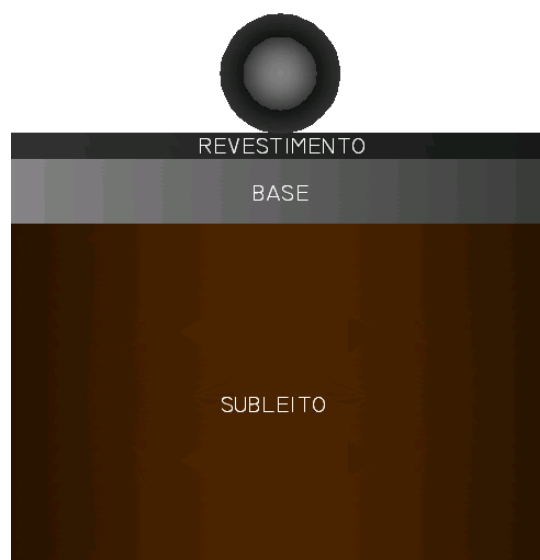


Figura 1 – Camadas de um pavimento

Para a camada de revestimento do pavimento flexível, que é o objeto de estudo, existe uma classificação quanto à sua forma de fabricação: por penetração (quando o ligante asfáltico e agregados são misturados na pista) e por mistura (geralmente usinada, ou então reciclada *in situ*).

Os revestimentos por penetração são também conhecidos como tratamentos superficiais. Os tratamentos superficiais são nada mais que a aplicação de ligante, seguido da aplicação de agregado com posterior compactação da camada. Ele pode ainda ser simples, duplo ou triplo, esses dois últimos consistindo apenas em camadas múltiplas de ligante e agregado anterior a compactação. Os tratamentos possuem espessura da ordem de 5 a 20 mm acabados e, de acordo com Bernucci et al (2006), servem para proporcionar alta resistência ao desgaste, impermeabilizar o pavimento, tornar o pavimento antiderrapante e alta flexibilidade.

Na família dos tratamentos superficiais existem ainda: a capa selante (frequentemente a última camada do tratamento superficial múltiplo, com ou sem cobertura do agregado miúdo), tratamento superficial primário (tratamento para controle de poeira em estradas de terra ou de revestimento primário), lama asfáltica (capa selante por argamassa pré misturada) e macadame betuminoso (usado como base ou *binder* e possui espessuras maiores que 50 mm).

Os revestimentos por mistura se dividem em dois tipos: as usinadas a quente, e as usinadas a frio. Nas misturas usinadas a quente geralmente utiliza-se de concreto asfáltico, também conhecido como CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente), o qual é o resultado da mistura entre determinadas porções granulométricas de agregado e cimento asfáltico, ambos previamente aquecidos. As misturas a quente subdividem-se, de acordo com sua granulometria, em graduação: densa (utilizada em concreto asfáltico), aberta (CPA – camada porosa de atrito) e descontínua (resistência maior a deformação permanente pelo contato entre agregados graúdos, é utilizada no SMA – *Stone matrix asphalt* e *no gap-graded*).

De acordo com Bernucci et al (2006), os pré-misturados a frio (PMF) são agregados graúdos, miúdos e de enchimento misturados com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) à temperatura ambiente. São utilizados em vias de baixo volume de tráfego, ou ainda como camada intermediária (com CA superposto). Dentre suas vantagens estão a utilização de equipamentos simples, boa adesividade com qualquer tipo de agregado, permitir estocagem, baixo consumo de energia elétrica, reduzida emissão de gases tóxicos e poluentes (Abeda,

2001). Dentro das misturas usinadas estão ainda as misturadas imediatamente antes da colocação no pavimento, misturas *in situ*: que se incluem: lama asfáltica e microrevestimento.

2.1. Materiais para execução de misturas asfálticas

2.1.1. Agregados

Material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassa e concreto. (NBR 9935/87).

Todos os revestimentos asfálticos possuem, além de ligante, agregados em sua constituição. Logo, a qualidade deste agregado, para a mistura asfáltica, está diretamente ligada a que as propriedades dele esperadas sejam satisfeitas.

É sempre importante a classificação deste material em laboratório. Desta forma se conhecem as propriedades do agregado, podendo assim compatibilizar o material desejado e a aplicação correta.

Bernucci *et al* (2006) diz que as propriedades geológicas do agregado estão diretamente ligadas ao seu desempenho. Dentre as propriedades estão: composição mineralógica, tipo de rocha, composição química, granulação, tendência a degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

2.1.1.1. Classificação dos agregados

Segue a classificação de agregados de acordo com o DNIT (2006):

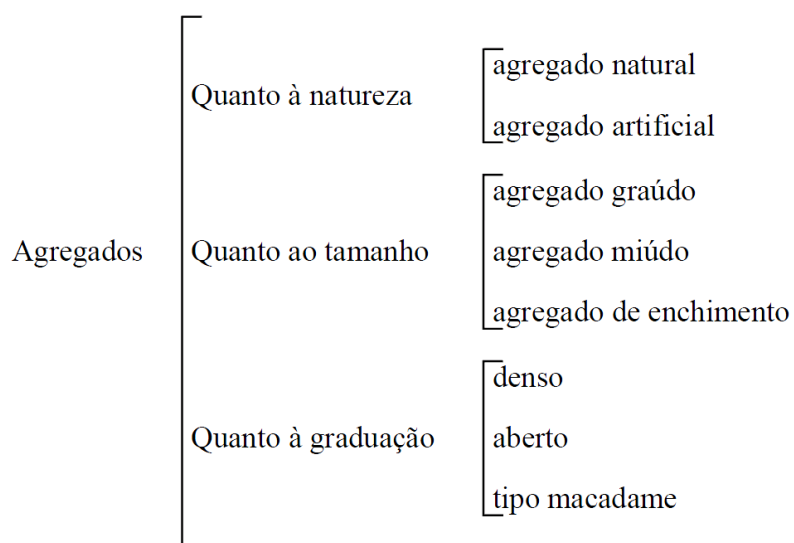


Figura 2 - Classificação de agregados de acordo com o DNIT. (DNER, 1996)

É de extrema importância para a pavimentação uma análise petrográfica mais detalhadas de agregados. Uma análise que gera uma quantidade elevada de informações é a da lâmina delgada.

Outra propriedade muito importante do agregado é a quantidade de sílica presente. Ela dita a adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico, quanto mais ácido é o material menos adesivo ele é, que é o caso de quartzos, arenitos e cascalhos. Já materiais básicos como dolomitas são extremamente adesivos.

Classificação	% Sílica
Ácida	> 65
Neutra	52 a 65
Básica	45 a 52
Ultrabásica	< 45

Figura 3 – Classificação do agregado quanto a quantidade de Sílica presente

Fonte: Bernucci *et al* (2006)

Porém, os termos ácido e básico não possuem ligação com os utilizados na química, e estão relacionados com a carga elétrica superficial do agregado.

Quanto ao tamanho de agregado deve-se dar atenção ao seu tamanho máximo, quando excessivamente grande prejudica a trabalhabilidade do mesmo, já quando muito pequeno torna a mistura instável. E também da porcentagem de finos, que deve ser dosada para maximizar a trabalhabilidade, estabilidade e capacidade de compactação da mistura.

2.1.1.2. Produção de agregados britados

O processo de britagem influi diretamente na qualidade dos agregados, é desejável que o agregado tenha formato cúbico, e não lamelar, achatado ou alongado.

A sequência de produção: desmonte, transporte para o britador por caminhões, peneirador para selecionar o material de melhor qualidade, então vai para o britador primário (de mandíbula), onde após britado o material é novamente separado por peneiras e uma parte (>1”) vai para o britador de cone e então é novamente peneirado. O produto da britagem em um britador primário de mandíbula juntamente com um britador de cone como secundário,

são 4 (quatro) granulações de agregados. Existem ainda outros processo mais complexos que o citado.

2.1.1.3. Características dos agregados

As características de maior importância para os agregados na pavimentação são as características físicas: resistência, porosidade e densidade. Além dessas, as características químicas e físico-químicas também são de extrema importância quando tangenciam a propriedade de adesividade, e ligado a ela a possibilidade de descolamento do agregado a película de asfalto. Devido a esta propriedade deve-se compreender a mineralogia do material a fim de encontrar minerais nocivos.

A propriedade de resistência a abrasão do agregado, é a resistência ao desgaste que ele apresenta. É desejável que essa propriedade seja relativamente alta em revestimentos asfálticos, principalmente nos agregados da superfície. Essa propriedade é medida no ensaio de abrasão Los Angeles que será tratado adiante.

A porosidade variável de um agregado pode torná-lo inaceitável para misturas asfálticas por consumir uma porcentagem ligante, e dessa forma não se ter certeza de qual quantidade dele deve se utilizar.

A falta de adesividade do agregado ao ligante asfáltico está condicionada a presença de água, e de acordo com Bernucci *et al* (2006) classifica-se este agregado como hidrófilo. Já o processo contrário, de agregados com alta adesividade na presença de água é denominado hidrofóbico e são aceitáveis para a utilização em misturas asfálticas.

Ensaio que tratam desta propriedade são:

- DNER-ME 078/94: baseia-se na avaliação visual da mistura asfáltica não-compactada imersa em água.
- ASTM D 1075: são comparadas a resistência à compressão simples de amostras idênticas sem-imersão e após a imersão em água a 50 °C por 24 horas.
- AASHTO T 283 (Lottman modificado): são comparadas a resistência à tração por compressão diametral à temperatura de 25 °C de amostras idênticas sem e após o processo de imersão em água e congelamento a baixas temperatura.

2.1.2. Ligantes asfálticos

Os asfaltos nada mais são que hidrocarbonetos, de origem da destilação do petróleo, de alto e baixo peso molecular, os de alto peso molecular são os asfaltenos. E ainda possui na sua composição as resinas, que são quem possibilita a aderência aos agregados por meio de adsorção (Vinha (1975), *apud* Moura (2001)).

De acordo com Bernucci *et al* (2006), no Brasil, 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico. E os autores defendem que o freqüente uso do asfalto se deve a vantagens, como: proporciona forte integração dos agregados, flexibilidade controlável, impermeabilização, é durável e resistente a ações de ácidos, álcalis e sais e proporcionando utilização em forma de emulsão ou aquecido e com ou sem aditivos.

No Brasil são existentes atualmente 6 tipos de ligantes asfálticos, porém, todos provenientes de CAP (Cimento asfáltico de petróleo). São eles:

- CAP – Cimento asfáltico de petróleo;
- ADP – Asfaltos diluídos;
- EAP – Emulsões asfálticas;
- AMP ou AMB – Asfaltos modificados por polímeros ou por borracha de pneus;
- AR e ARE – Asfaltos rejuvenecedores;
- Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;

Os CAP's são classificados de acordo com a o resultado do ensaio de penetração (NBR 6578/98), em: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100, CAP 150-200.

2.1.2.1. Ligantes Modificados

Quando os asfaltos convencionais não suprem as exigências de condições adversas, os asfaltos modificados por polímeros são ótimas opções, além ainda de diminuir a frequência de manutenções. São classificados de acordo com o seu comportamento em relação a variações térmicas em:

- Termorrígidos: aqueles que não se fundem;
- Termoplásticos: se fundem, mas só se tornam maleáveis reversivelmente quando aquecidos;

- Elastômeros: se decompõem antes de amolecer quando aquecidos;
- Elastômeros termoplásticos: elástico a baixa temperatura e termoelástico quando aquecidos;

Alguns desses modificadores são: Elastômeros, Plastômeros, Borracha de pneu, Negro-de-fumo, Cal, Enxofre, Modificadores químicos, Antioxidante, Melhorador de adesividade, Cal Hidratada.

De acordo com Leite (1999) *apud* Bernucci (2006), em geral, as especificações para polímeros baseiam-se em medidas de tensão *versus* deformação, viscosidade *versus* temperatura, efeito de calor e do ar, estabilidade à estocagem, recuperação elástica, suscetibilidade térmica e módulo de rigidez.

De acordo com Specht (2004), uma solução sustentável que vem sido aplicada hoje em dia é a do asfalto-borracha, que é um ligante modificado por 12% a 18% de borracha de pneus incorporada ao ligante asfáltico, ou misturas tipo agregado-borracha com adição por um processo seco. Gera-se assim uma mistura com maior resistência à fadiga, deformações permanentes e maior durabilidade para o asfalto-borracha, e maior resistência à fadiga e ao trincamento térmico para o agregado-borracha.

2.1.2.2. Emulsão asfáltica

Quando se deseja não aquecer o ligante a altas temperaturas, uma boa solução são os ligantes modificados por dois meios de preparação:

- ADP – asfalto diluído por um componente volátil ao asfalto, ou ainda;
- Emulsionante do asfalto.

Ou seja, emulsão é a dispersão estável de dois ou mais líquidos imiscíveis, neste caso, asfalto e água. E na emulsão, mais um agente emulsionante.

2.1.2.3. Asfalto diluído

Os ADP (Asfaltos diluídos) são nada mais que asfaltos adicionados de um diluente volátil, a fim de se obter um asfalto de baixa viscosidade a temperatura ambiente (Bernucci *et al*, 2006)

Os diluentes evaporam após certo tempo, e é baseado nesta característica que é classificado em:

- Cura rápida (CR): onde o solvente é a gasolina ou a nafta;
- Cura média (CM): onde o solvente é o querosene;

2.1.2.4. Asfalto-espuma

Existe ainda a técnica do asfalto-espuma, lógico que a espumação só é válida quando for planejada para acontecer. A técnica gera um asfalto com menor viscosidade pelo aumento de volume do ligante, melhor envolvimento ao agregado, e é procedida com a adição de água a temperatura ambiente no CAP aquecido, tudo isso dentro de uma câmara desenvolvida para isso. Outras vantagens são: economia de energia, o agregado utilizado pode ser úmido, fresado e não-aquecido, menos suscetível ao efeito climático do que emulsões.

2.1.2.5. Agentes rejuvenescedores

Com o passar do tempo o ligante tende a enrijecer, e para isso que foram criados os agentes rejuvenescedores. Ele funciona como repositor de frações maltênicas. São utilizados em processos a quente, em usina ou *in situ*.

2.1.3. Melhoradores de adesividade

Nos dias de hoje, um dos maiores problemas encontrados em pavimentos se deve a presença de água prejudicando a adesividade entre agregado e ligante asfáltico. Várias soluções tem se mostrado eficiente. Os ligantes asfálticos modificados por polímeros, já citados anteriormente, tornam-se mais estáveis a temperaturas elevadas, apresentando maior ponto de amolecimento, maior resistência ao envelhecimento, alta adesividade e coesão e maior elasticidade e resistência à deformação permanente (Bock, 2009).

Existe ainda o processo de intertravamento, o qual se dá em misturas asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA), onde o esqueleto mineral composto por agregados graúdos em proporção superior em relação as misturas densas e contínuas fornece as misturas um elevado

intertravamento entre os grãos, conferindo as mesmas maior resistência. Já o elevado teor de mástique fornece as misturas uma maior durabilidade (Vasconcelos, 2004).

Os aditivos químicos melhoradores de adesividade de aminas graxas possuem longa cadeia carbônica e são os mais indicado para ligantes asfálticos, pois as aminas graxas, adicionadas ao ligante asfáltico, tem a característica de diminuir a tensão superficial no contato entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado; as aminas graxas receberam este nome por serem obtidas a partir de ácidos graxos em geral de sebo (gordura animal). As aminas têm uma forte, e às vezes permanente, capacidade de se ligar com a sílica (SiO_2). Essa ligação pode permanecer sob a ação da água o que pode aumentar significativamente a adesão entre ligante asfáltico e a superfície do agregado (Neder et al, 1996, apud Moura, 2001).

Ainda segundo os mesmos autores, a estabilidade dos aditivos químicos melhoradores de adesividade é transiente, ou seja, normalmente os aditivos são adicionados ao ligante asfáltico em tanques de estocagem. Esses ligantes asfálticos já com tais aditivos não devem permanecer por longos períodos nesses tanques, pois quanto maior for o tempo de estocagem mais deteriorada estarão as propriedades dos aditivos químicos. Outro fator relevante, mencionado pelos autores, é a temperatura a que o ligante asfáltico deve estar para receber a adição do aditivo, temperatura na qual normalmente parte do aditivo evapora-se.

2.1.3.1. Cal Hidratada

A cal hidratada não é apenas um melhorador de adesividade, ela também auxilia na redução do afundamento de trilha de roda, diminui o trincamento e envelhecimento (oxidação) do ligante (Little e Epps, 2001) e aumenta a vida útil da mistura asfáltica, aliado a viabilidade econômica (Hicks e Scholz, 2001).

De acordo com Little *et al* (2006), ao mesmo tempo em que age sobre o agregado, a cal também reage com as partículas polarizadas do asfalto, evitando que estas formem sabões solúveis em água, o que causaria a perda de adesividade. A dispersão de pequenas partículas de cal hidratada na mistura torna-a mais rígida e dura, reduzindo a possibilidade de ruptura mecânica da ligação entre o CAP e o agregado, mesmo na ausência de água. Este enrijecimento do ligante, que acontece a altas temperaturas, e é provocado pela atividade química da cal, torna-o mais resistente a deformação permanente e a fadiga. Não afetando o ligante a baixas temperaturas, pois a cal torna-se inerte.

Já as moléculas polarizadas do ligante (que quando em contato com o meio ambiente se rompem) reagem com o hidróxido de cálcio, presente na cal, evitando o rompimento e a gradativa fragilização do pavimento, causador do envelhecimento. Além do trincamento por envelhecimento, a cal reduz o trincamento por fadiga, pois, quando em contato com as moléculas polarizadas do ligante asfáltico, o volume efetivo das partículas de cal aumenta e dessa forma desviam as micro-fissuras causadoras do trincamento por fadiga.

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 Ca(OH)_2 não produzirão tais efeitos benéficos. Eles dizem que um teor de Ca(OH)_2 da ordem de 90% (cal calcítica) parece suficiente para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade. Também dizem 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.

Já na pesquisada 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. Ainda o mesmo autor diz que a prática atual de adição de cal como melhorador de adesividade na forma de filer, prática corrente no Brasil, não foi a forma mais satisfatória de adição.

De acordo com Guimarães (1998) a qualidade química da cal classifica-a em:

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

Ou então, de acordo com a norma NBR 7175/2003, classifica-se em CH-I, CH-II e CH-III. Esta classificação refere-se a composição química da cal (quantidade de anidrido carbônico, óxido de magnésio e de cálcio e óxido total na base de não-voláteis).

2.1.3.2. Dopes

Outros melhoradores de adesividade são os Dopes, substâncias tensoativas catiônicas (Bock, 2009). São de fundamental importância na condição de o agregado ser ácido (com preponderância absoluta de cargas negativas), pois os Dopes são compostos de cabeça polar positiva e dessa forma proporcionam a formação de ligações químicas iônicas e pontes de hidrogênio, ou seja, a adesão entre agregado e ligante.

2.2. Métodos de dosagem

- Método Marshall – Segundo Senço (2001), é um método para o projeto e construção de rodovias, que foi utilizado pela U.S. Corps of Engineers durante a 2ª guerra mundial, na construção de aeroportos militares em frentes de batalha no Pacífico.

O método foi desenvolvido por Bruce Marshall, no Mississippi State Highway Department, ele foi selecionado por ter ensaios simples e de fácil transporte, ideal para ser aplicado no campo. Achando-se com ele um teor ótimo de betume para misturas.

A limitação do método dá-se a misturas betuminosas a quente com concretos asfálticos de petróleo, e agregado com diâmetro de pelo menos 1 (uma) polegada (25,4 mm).

Já a norma DNER-ME043-95, diz que este método regulamenta a forma de determinação da estabilidade e da fluência de misturas betuminosas, usinadas a quente, com a utilização do aparelho Marshall.

Estabilidade Marshall, expressa em N (Newton), trata-se da resistência máxima a compressão diametral do corpo-de-prova produto da moldagem com o método Marshall. Já a fluência Marshall trata-se da deformação total do corpo-de-prova submetido a uma carga máxima, expressa em décimos de milímetro.

- Método Hubbard-Field – Hirsch (2007) cita que este ensaio foi um dos primeiros a avaliar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas. O ensaio consiste em determinar a carga máxima resistida por um corpo de prova quando forçado através de

um orifício circular, sendo que esta carga é considerada o valor da estabilidade Hubbard-Field. O ensaio acarreta um tipo de ruptura correspondente ao cisalhamento.

- Método Hveem – Hirsch (2007) cita que 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 (MOTTA, 2000).

- Método triaxial de Smith – Hirsch (2007) também cita que o termo triaxial refere-se à condição em que a pressão de suporte é aplicada ao longo da superfície lateral do corpo de prova cilíndrico, enquanto cargas axiais são aplicadas em sua base. Esse tipo de ensaio é geralmente aplicado para as classes de materiais que se apresentam plásticos no estado natural.

- Método Superpave - O *Strategic Highway Research Program* foi o desenvolvedor deste método, o qual foi criado para substituir os métodos de *Hveem* e *Marshall*. A comum análise volumétrica destes dois métodos serviu de base para o método Superpave.

O método foi concluído em 1993 e nomeado de Superior Performing Asphalt Pavement System (Superpave).

O *Superpave mix design system* é 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.

Os dispositivos utilizados na compactação nos métodos *Hveem* e *Marshall*, foram substituídos neste método pelo compactador giratório e o esforço de compactação no projeto da mistura está ligado ao tráfego esperado.

2.3. Propriedades Mecânicas

2.3.1. Módulo de resiliência

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

O ensaio é normalizado no Brasil pelas prescrições do DNER-ME 133/94. Já nos Estados Unidos é normalizado ASTM D 7369. Mais adiante o esquema de ensaio será exemplificado.

2.3.2. Fadiga

A degradação dos pavimentos é causada principalmente pelo tráfego, pois com grande frequência, veículos trafegam nas rodovias com excesso de carga, o que, segundo Medina e Motta (2005) têm como consequência a degradação acelerada dos pavimentos e a sobrecarga de pontes e viadutos, causando um dos danos mais conhecidos do pavimento asfáltico: o trincamento por fadiga. Que pode ser definido como o dano causado pelas solicitações repetidas do tráfego, estando este, entre os tipos mais importantes de defeitos levados em consideração quando verificada a necessidade ou não de intervenções de restauração.

A Figura 4 demonstra a forma pela qual a fadiga do pavimento ocorre basicamente. Um carregamento vertical é aplicado e como reação tensões de tração e/ou compressão nas fibras inferiores da camada de revestimento de um pavimento causam fissuras, que acumuladas geram o trincamento.

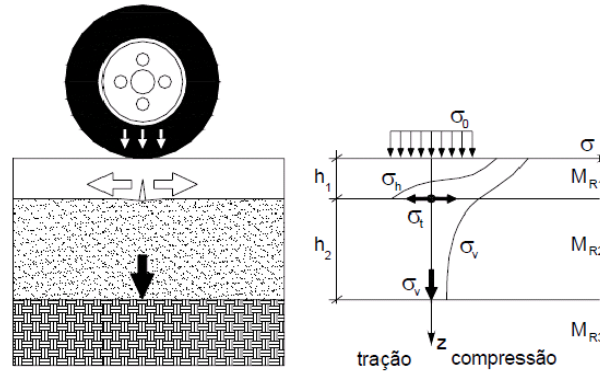


Figura 4 – Demonstração do trincamento de um pavimento

Fonte: Medina, 1997

2.3.3. Deformação plástica

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 (DNIT, 2006). A figura dá mais causas e exemplos de deformações plásticas.

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	Deformação 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

Figura 5 – Causas e exemplos de defeitos em pavimentos

Fonte: DNIT, 2006

2.4. Adesividade

Dá-se o nome de adesão, ao fenômeno físico de atração molecular que se manifesta entre os corpos em contato (Weiszflog, 2007). No caso da pavimentação, a perda de adesão ocorre entre agregado e ligante.

Ela ocorre principalmente por três formas: a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso, a presença de umidade e a presença de sujeira e finos na superfície do agregado.

Muitos dos problemas do pavimento, como deformação permanente e trincamento por fadiga, tem como causa a perda de adesão. Seja ela entre o agregado e o ligante asfáltico (fratura adesiva), ou ainda a fratura do próprio filme do ligante (fratura coesiva) (Lytton 2004, *apud* Oliveira Filho, 2004).

Segundo Moura (2001), a coesão é ainda responsável por uma parcela da estabilidade (resistência) da mistura asfáltica.

Foi criado um termo, pelo *Asphalt Institute*, denominado “poder molhante”. Quanto maior “poder molhante” entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado, melhor se dá o contato entre eles. O “poder molhante” do ligante asfáltico é inversamente proporcional a sua viscosidade. Já a viscosidade do conjunto fíler-ligante, influi no valor da coesão (Terrel & Al-Swailmi *apud* Moura, 1993).

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.

Inúmeros fatores influenciam a adesividade ou o dano induzido pela umidade. Hicks (1991) *apud* Specht (2004) relata que um dos fatores importantes é o volume de vazios, misturas com volume de vazios entre 6 e 13% (aproximadamente) não são nem impermeáveis, nem drenantes e são as mais susceptíveis ao dano por umidade induzida. Outro fator que deve ser mencionado é a eficiência do sistema de drenagem de um pavimento, capaz de evitar o acúmulo de água junto ao revestimento e a umidade ascendente por capilaridade.

Demais propriedades e características desejáveis de materiais, misturas ou condições encontradas no pavimento estão exemplificadas na Figura 6.

<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) fíler 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

Figura 6 – Característica desejável de materiais na pavimentação em relação a adesividade

Fonte: Hicks, 1991 *apud* Bock, 2009

3. METODOLOGIA

3.1. Classificação do Estudo

Esta pesquisa pode ser classificada como estudo de caso. O trecho da obra em estudo localiza-se entre as cidades de São Luiz Gonzaga e São Borja (onde localizava-se a usina).

Já em relação aos procedimentos é laboratorial e de ordem quantitativa, uma vez que serão moldadas as amostras, cujos resultados serão tabelados e graficados, para realizar a análise dos resultados.

3.2. Planejamento do Experimento

A coleta de materiais foi executada, e os mesmos separados por granulometria para moldagem dos corpos-de-prova.

O primeiro procedimento feito foi a análise do projeto atual.

Os próximos passos da pesquisa foram as realizações de novas dosagens. Propondo novos projetos, seguindo a metodologia Marshall, com alteração no teor de cal e no tipo (dolomítica e calcítica), sendo a substituição de 2% da quantia em peso de filler basáltico pela cal dolomítica (utilizada no projeto original) e a substituição de 1% e 2% pela cal calcítica. Com os novos dados de teores de ligante foram então moldados corpos-de-prova para a verificação das propriedades mecânicas (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).

Gerando assim a quantia de corpos-de-prova na moldagem seguiu conforme a figura 7:

Mistura	N° de amostras			
	Dosagem	Mr/Rt	Lottman	Cantabro
Referência	12	4	8	4
Dolomítica	12	4	8	4
Calcítica 1%	12	4	8	4
Calcítica 2%	12	4	8	4
Parcial	48	16	32	16
Total	112			

Figura 7 – Quantidade de corpos-de-prova por ensaio e por projeto

Com os resultados dos novos projetos será feito um confronto com os resultados do projeto atual.

3.3. Materiais Utilizados

3.3.1. Agregados Minerais

Sabe-se que o nível de desempenho de um pavimento está intimamente ligado a qualidade do agregado utilizado, e que quando insatisfatória essa qualidade pode levar, ou acelerar o processo de defeitos como trincamento por fadiga, deformação permanente e a falta de adesividade ao ligante. Esta última, foco principal de estudo neste trabalho.

O agregado mineral utilizado nesta pesquisa é uma rocha basáltica da formação Serra Geral. Os agregados basálticos tem sua jazida localizada no município de São Borja-RS.

Os agregados coletados foram submetidos a ensaios laboratoriais no laboratório próprio da usina da empresa.

Propriedade	Método	Pó-de-pedra	Pedrisco	Brita
Absorção	DAER/RS – EL 105/01	---	1,8 %	1,4%
Massa Específica Real do Grão	DAER/RS – EL 105/01	2,881 kN/m ³	2,875 kN/m ³	2,995 kN/m ³
Massa Específica Aparente do Grão	DAER/RS – EL 105/01	---	3,032 kN/m ³	2,879 kN/m ³

Figura 8 – Característica dos agregados utilizados em relação a três tipos de ensaios

peneiras		% passando			
pol.	milímetros	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra	Cal
1"	25,40	100	100	100	100
3/4"	19,10	100	100	100	100
1/2"	12,70	67,8	100	100	100
3/8"	9,50	38,4	100	100	100
4"	4,80	3,8	43,6	99,7	100
10"	2,00	2,3	6,4	66,8	100
40"	0,42	1,9	3,2	28,4	100
80"	0,18	1,2	2,6	18,9	97,3
200"	0,075	0,8	1,9	9,2	79,6

Figura 9 – Granulometria do conjunto total de agregados

3.3.2. Cales

Neste estudo, além do pó-de-pedra, o outro filler usado foi a cal hidratada. As cales utilizadas no estudo são: uma cal dolomítica produzida no estado do Rio Grande do Sul e uma cal calcítica produzida no estado de Minas Gerais. A escolha pelas cales do Rio Grande do Sul se deu ao fato destas serem de uso corrente em obras de Engenharia e a escolha da cal calcítica fundamentou-se no fato de que a bibliografia internacional, especialmente a estadunidense, indica sempre o emprego de cales com elevados teores de hidróxido de cálcio para a obtenção de melhores resultados referentes à melhoria de adesividade das misturas asfálticas.

As propriedades das cales seguem:

Peneiras		Cal Dolomítica		Cal Calcítica		Cal Calcítica	
		2%		2%		1%	
polegadas	milímetros	% que passa	% da mistura	% que passa	% da mistura	% que passa	% da mistura
3/4"	19,10	100	2,00	100	1,90	100	1,00
1/2"	12,70	100	2,00	100	1,90	100	1,00
3/8"	9,52	100	2,00	100	1,90	100	1,00
4	4,80	100	2,00	100	1,90	100	1,00
10	2,00	100	2,00	100	1,90	100	1,00
40	0,42	100	2,00	100	1,90	100	1,00
80	0,18	97,30	1,95	100	1,90	100	1,00
200	0,075	79,60	1,59	98,49	1,51	99,20	0,80

Figura 10 – Granulometria das cales

Finura	Peso Bruto(g)	Peso Retido(g)	%	Média das %
Cal Dolomítica	50,00	5,68	11,36	12,45
	50,00	6,77	13,54	
Cal Calcítica	50,00	3,49	6,98	7,61
	50,00	4,12	8,24	

Figura 11 – Finura das cales

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 (ROZEK, 2007).

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 apresentado na Figura 10.

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

Figura 12 - Propriedades do ligante convencional (CAP 50/70)

3.4. Ensaios e respectivos equipamentos

O projeto de um concreto asfáltico para pavimentação constitui um estudo de seleção e dosagem dos materiais constituintes, com a finalidade de enquadrá-los economicamente nas especificações estabelecidas (SENÇO, 2001).

A composição granulométrica da mistura foi feita de forma a enquadrar o material no centro da faixa “C” do DNIT 031/2006 ES, na Figura encontra-se a granulometria da mistura de referência (sem cal).

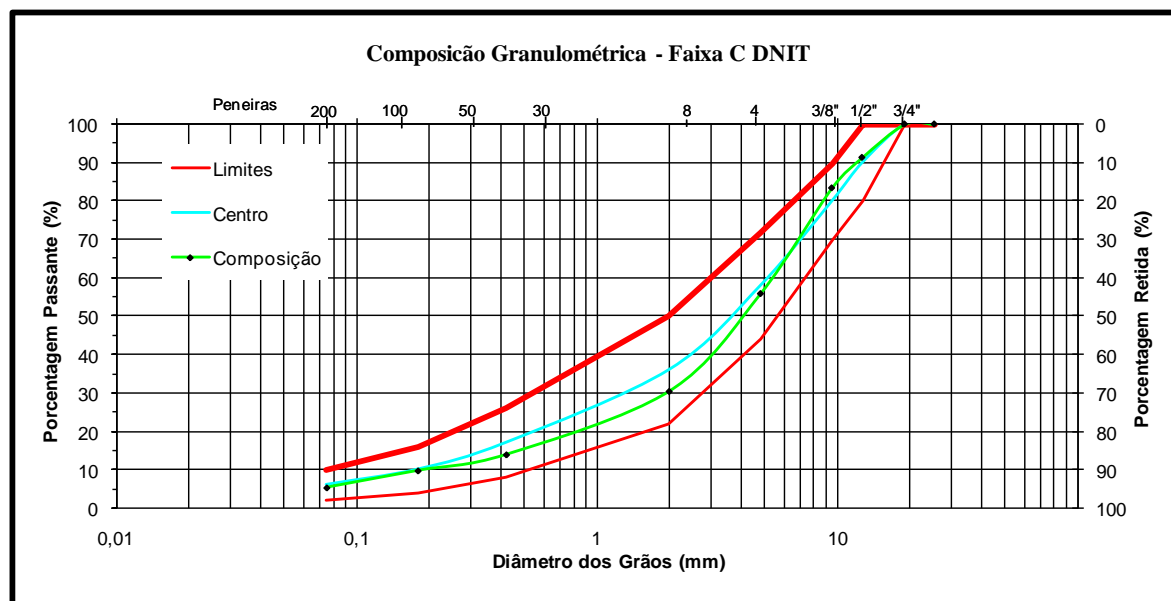


Figura 13: Composição granulométrica da mistura de referência

3.4.1. Dosagem Marshall

Este é o método mais consagrado no Brasil, é regido pela norma DNER-ME 043/95.

Para sua realização foi feita a coleta dos agregados, estes foram separados em peneiras (retida na: #1/2, #3/8, #4, #10, #40, #80 e #200 e fundo), em seguida estes foram lavados e pesados para posterior pesagem das amostras.

A Metodologia Marshall, em síntese, consiste no seguinte: molda-se por compactação a quente, uma série de corpos-de-prova com a mistura de agregados e ligante asfáltico, dentro de moldes cilíndricos metálicos que depois de armazenados, ao ar livre, durante 24 horas são desmoldados, medidos e pesados. O passo seguinte consiste em calcular os parâmetros de dosagem.

3.4.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral foi criado pelo Professor Fernando Luiz Lobo Carneiro, consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas extremidades opostas de um corpo-de-prova com diâmetro 10,20 cm e altura de aproximadamente 63,50 cm, moldadas através do método Marshall, com o intuito de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga. A medida resultante é a resistência à tração - R_t , e

seguirá as especificações da norma DNER-ME 138/94. Na figura 13 há uma exemplificação do estado de tensões pelo qual a amostra é submetida.

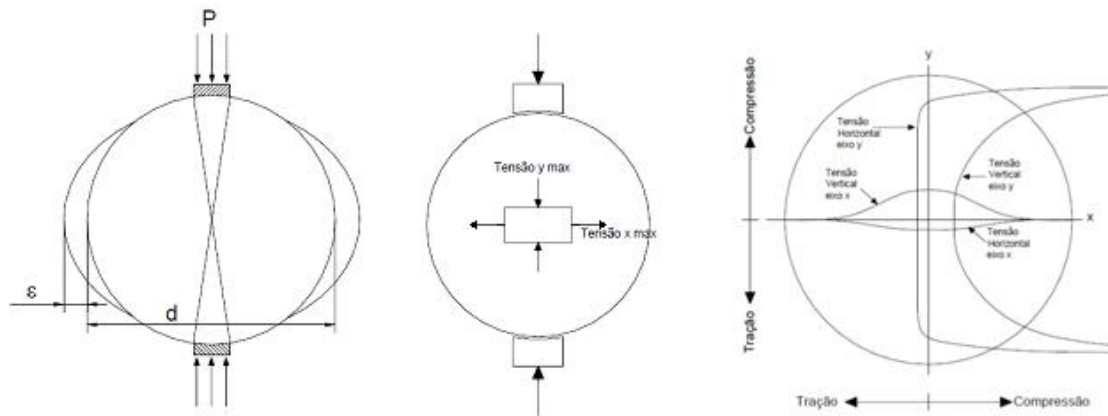


Figura 14: Estado de tensões geradas no ensaio

Fonte: Specht (2004)

3.4.3. Ensaio de Módulo de Resiliência

De acordo com Budny (2009), 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 (com um controlador de tempo e frequência de 1 Hz), a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*), ligado a um microcomputador. O ensaio é realizado em duas direções: após a execução do ensaio a amostra é rotacionada em 90° e o ensaio é novamente conduzido. Nesta pesquisa todos os ensaios foram realizados a 25°C , dentro de uma câmara com temperatura controlada.

Na Figura 13 é mostrada uma ilustração do equipamento:

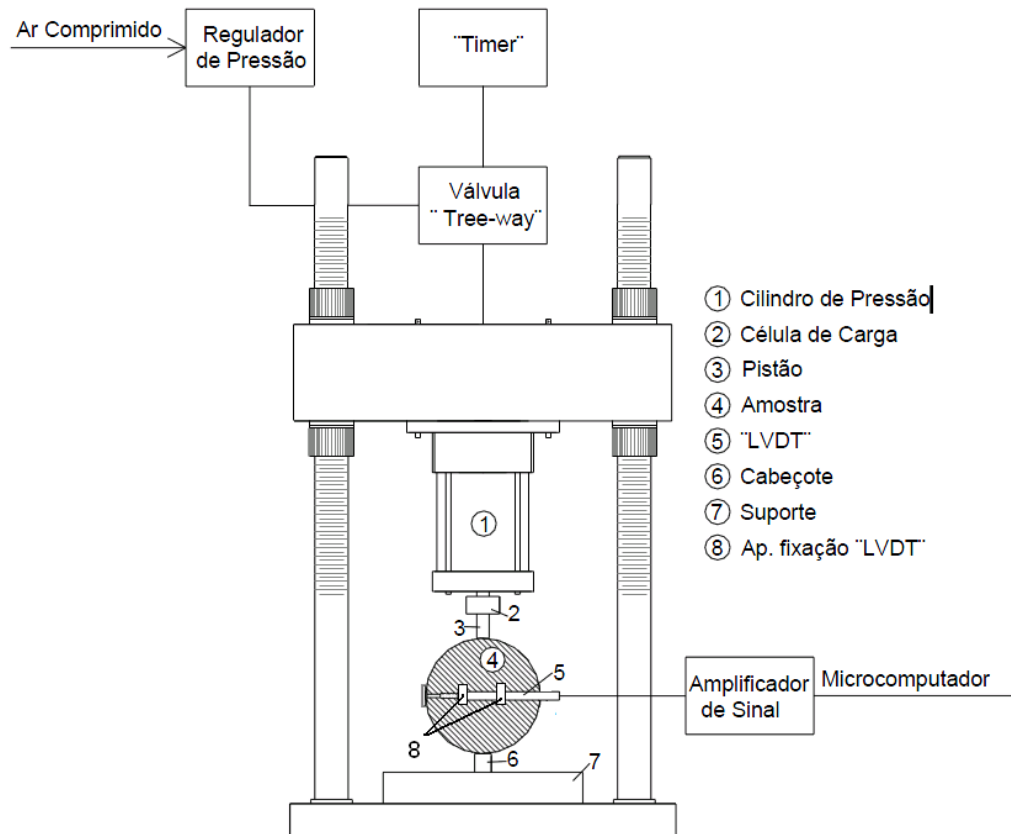


Figura 15 - Equipamento para realização do ensaio de módulo de resiliência

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

$$Mr = \frac{P}{\Delta.h} \cdot (0,2692 + 0,9976 \cdot \mu)$$

onde:

Mr = módulo de resiliência;

P = carga aplicada;

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

h = altura do corpo-de-prova;

μ = coeficiente de Poisson (0,30);

Na Figura 14 estão apresentados o pulso de carga e o pulso de deformação versus tempo, típicos dos ensaios realizados.

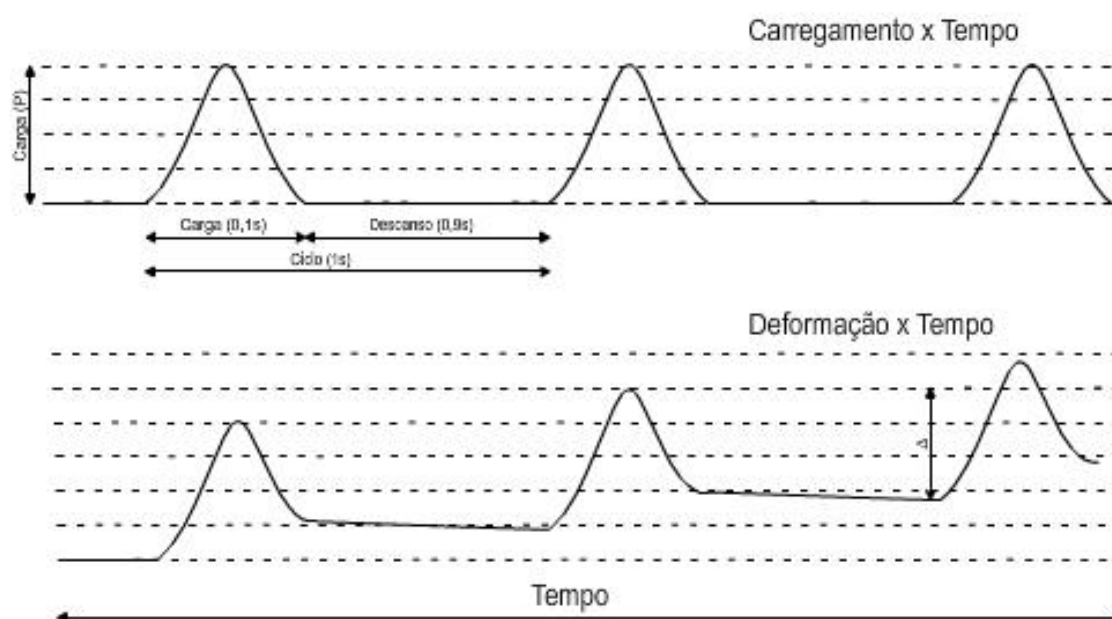


Figura 16: Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência

Fonte: Specht (2004)

3.4.4. Ensaio de adesividade – Metodologia Lottman Modificada

De acordo com Bock, 2009, o ensaio Lottman Modificado é normalizado pela AASHTO T 283-89 ou ASTM D4867, e serve para avaliar as propriedades de adesividade em misturas asfálticas, considerando o efeito deletério da água, em amostras cilíndricas, preparadas através da Metodologia Marshall. A análise é feita pela relação entre a resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento. A Resistência Retida à Tração (RRt):

O valor obtido desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas, quanto a adesividade no período de 4 à 12 anos (Specht, 2004). Na Figura 15 é mostrado o equipamento utilizado para determinar a Resistência a Tração.



Figura 17: Exemplo de equipamento para ensaio de Rt

Os corpos-de-prova foram divididos em grupo 1 e grupo 2. Para o grupo 1 foram estabilizados os corpos-de-prova a temperatura de 25 °C, e então são submetidos a ruptura por compressão diametral, obtém-se o valor de Rt1. Já para o grupo 2, os corpos-de-prova são imersos em água e submetidos a uma pressão de vácuo, de forma que o grau de saturação atinja valores entre 55% e 80%, logo após acondicionam-se os corpos-de-prova “saturados” em sacos plásticos com aproximadamente 3,0 ml de água dentro de cada saco; a seguir, os corpos-de-prova são levados ao refrigerador, onde permanecem por 18 horas a -18 °C, e após, são levados diretamente para um banho de água destilada a 60 °C onde repousam por 24 horas. Após, são também estabilizados a temperatura de 25 °C, e então são submetidos a ruptura por compressão diametral, obtém-se o valor de Rt2.

3.4.5. Perda de massa por desgaste

A perda de massa por abrasão (ou desgaste) foi avaliada pela metodologia Cantabro, no LAPAV (laboratório de pavimentação da UFRGS). Este ensaio foi criado no Centro de Estudios de Carreteras na Espanha (CEC 325/86) e, posteriormente normalizado no Brasil pelas normas DNER – ES 383/99 e DAER – EL 215/01.

O qual consiste em submeter uma amostra de concreto asfáltico à 300 revoluções (33rpm), dentro da máquina de abrasão Los Angeles (Figura 16), 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 18: Equipamento de abrasão *Los Angeles*

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

$$PM = \frac{P - P'}{P} * 100$$

onde:

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

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

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

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados do ensaio da Dosagem Marshall, apresentando os teores ideais de ligante, os quais foram então moldados os corpos-de-prova para realizar os demais ensaios. Os quais também serão, posteriormente, apresentados neste capítulo.

4.1. Dosagem Marshall

Foram elaborados os projetos das misturas, e assim ficaram dispostas suas composições:

Composição das misturas (% de cada material)				
Misturas	BRITA ¾	PEDRISCO	PÓ-DE-PEDRA	CAL
Referência	27%	32%	41%	0%
Dolomítica	27%	32%	39%	2%
Calcítica 1%	27%	32%	40%	1%
Calcítica 2%	27%	32%	39%	2%

Figura 19 – Composição das misturas para moldagem dos corpos-de-prova

Especificação (Faixa C/DNIT) e misturas									
PENEIRA	mm	Limite	centro faixa	Faixa de Trabalho	Referência	Dolomítica 2%	Calcítica 1%	Calcítica 2%	
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	80 - 100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	70 - 90	90,0	80,0	100,0	91,3	91,3	91,3	91,3
3/8"	9,5	50 - 70	80,0	70,0	90,0	83,4	83,4	83,4	83,4
n 4	4,8	35 - 50	58,0	44,0	72,0	55,9	55,9	55,9	55,9
n 10	2	18 - 29	36,0	22,0	50,0	30,1	30,7	30,4	30,7
n 40	0,42	13 - 23	17,0	8,0	26,0	13,2	14,6	13,9	14,5
n 80	0,18	8 - 16	10,0	4,0	16,0	8,9	10,5	9,7	10,4
n 200	0,075	4 - 10	6,0	2,0	10,0	4,6	6,0	5,3	5,9

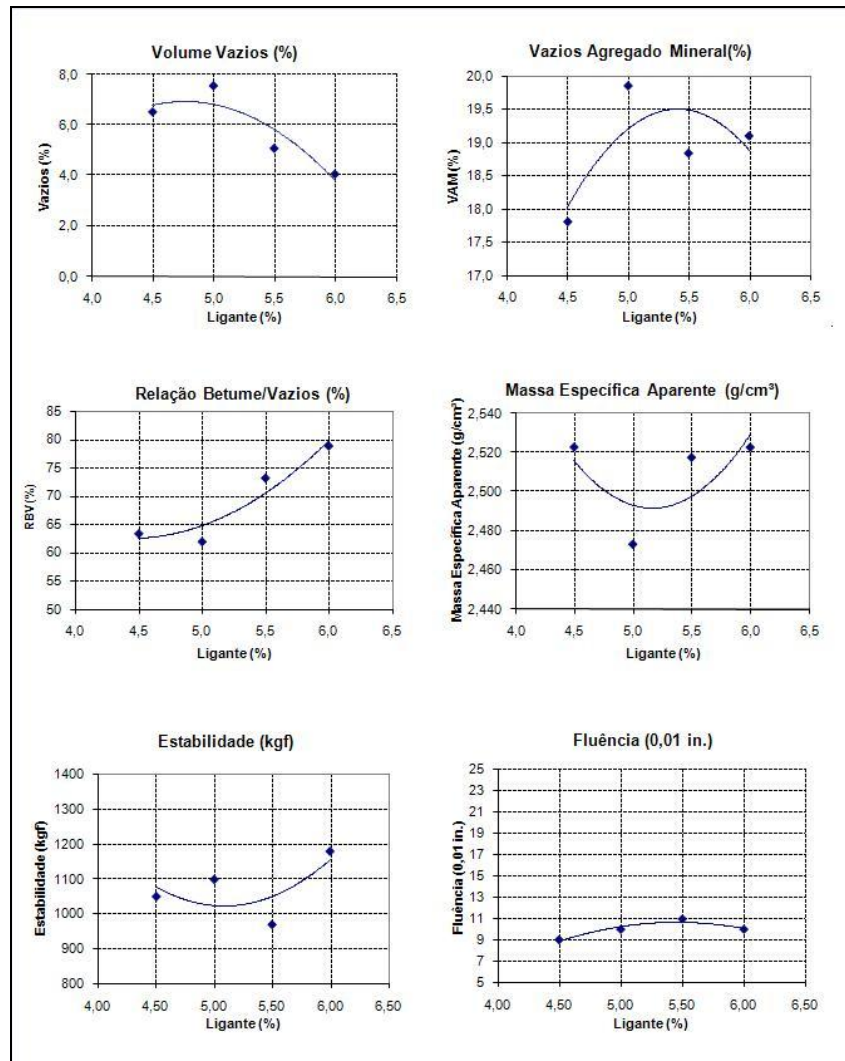
Figura 20 – Mistura e respectivas faixas de trabalho da especificação do DNIT

As porcentagens de ligante utilizadas para moldar os corpos-de-prova para o ensaio Marshall foram definidas em 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%.

De acordo com Budny, 2009, as propriedades que o ensaio Marshall busca são: Máxima massa específica aparente possível para garantir máxima estabilidade; Fluência entre certos limites, para garantir flexibilidade; Volume de vazios entre certos limites para garantir que não ocorra oxidação da massa asfáltica pela ação da água e/ou ar, e que também não ocorra

exsudação e Relação betume vazios entre certos limites, para garantir que exista betume suficiente para unir os agregados e para que não ocorra exsudação.

Nas Figuras 19 a 26 estão apresentados os resultados gerados pela dosagem Marshall para cada tipo de mistura:



Figuras 20 – Propriedades da mistura de referência

Propriedade	ESP 31/06 DNIT	Valor de Projeto
Teor de Betume (%)	--	5,95
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	79,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	--	19,00
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)	--	2,69
Massa Específica Aparente (g/cm³)	--	2,52
Estabilidade (kgf)	>500	1115
Fluência (1/100 in)	--	10

Figura 21 – Resumo das propriedades de projeto da mistura de referência

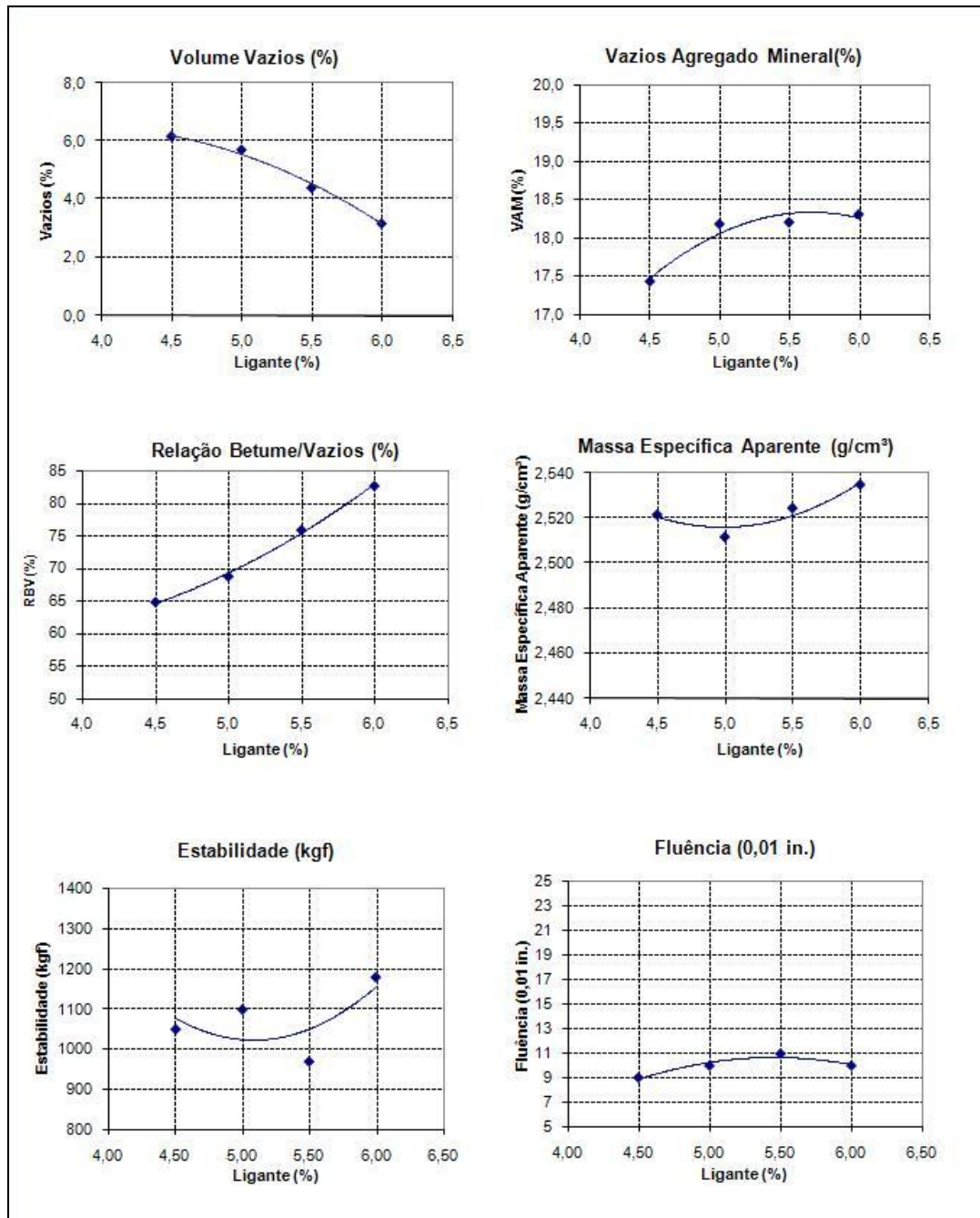


Figura 23 – Propriedades da mistura com cal Dolomítica 2%

<i>Propriedade</i>	<i>ESP 31/06 DNIT</i>	<i>Valor de Projeto</i>
<i>Teor de Betume (%)</i>	--	5,70
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	77,00
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	--	18,40
<i>Massa Específica Máxima Teórica (g/cm³)</i>	--	2,69
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	--	2,53
<i>Estabilidade (kgf)</i>	>500	1108
<i>Fluência (1/100 in)</i>	--	10

Figura 24 – Resumo das propriedades de projeto da mistura com cal Dolomítica 2%

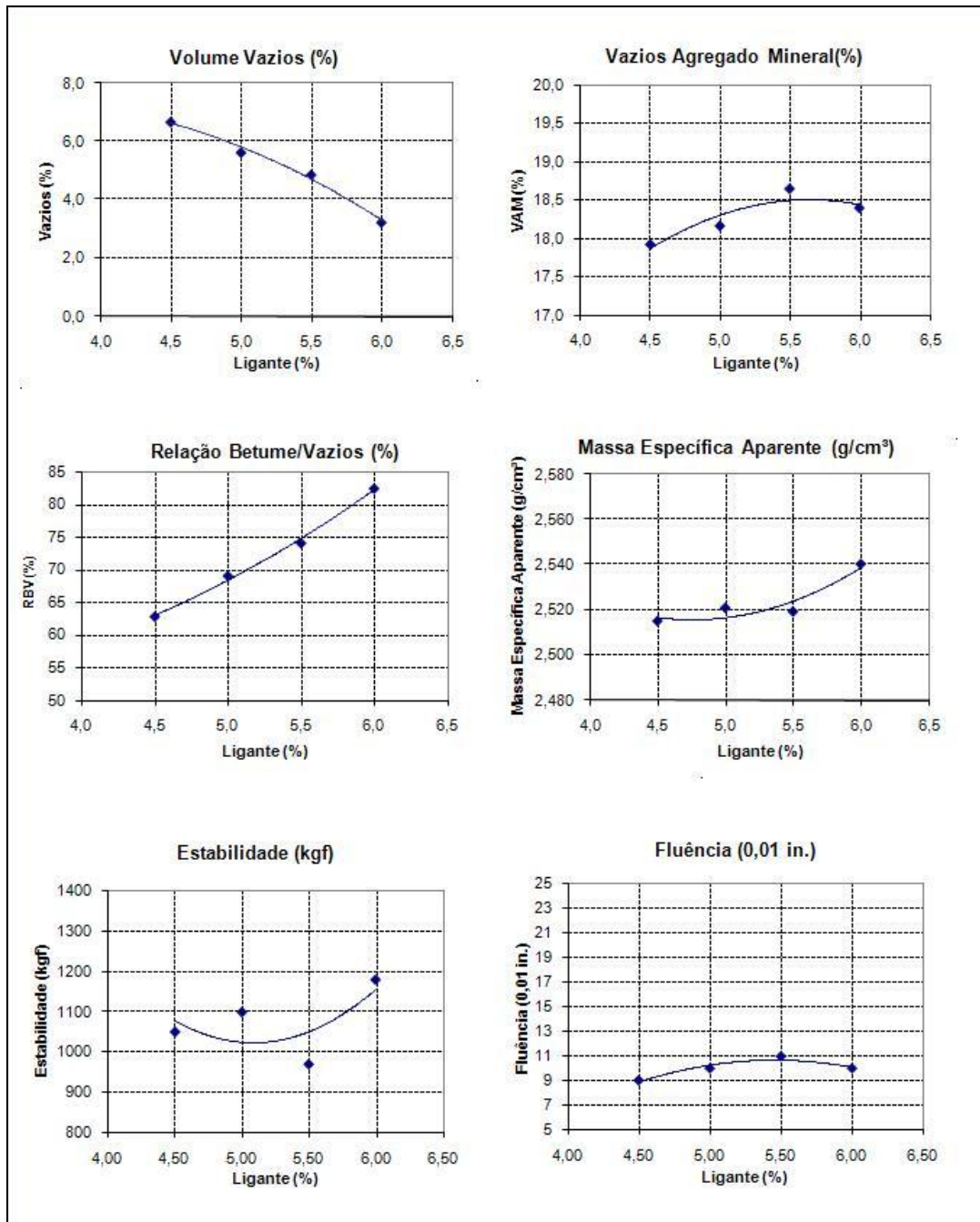


Figura 25 – Propriedades da mistura com cal Calcítica 1%

Propriedade	ESP 31/06 DNIT	Valor de Projeto
Teor de Betume (%)	--	5,75
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	77,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	--	18,50
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	--	2,69
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	--	2,53
Estabilidade (kgf)	>500	1099
Fluência (1/100 in)	--	10

Figura 26 – Resumo das propriedades de projeto da mistura com cal Calcítica 1%

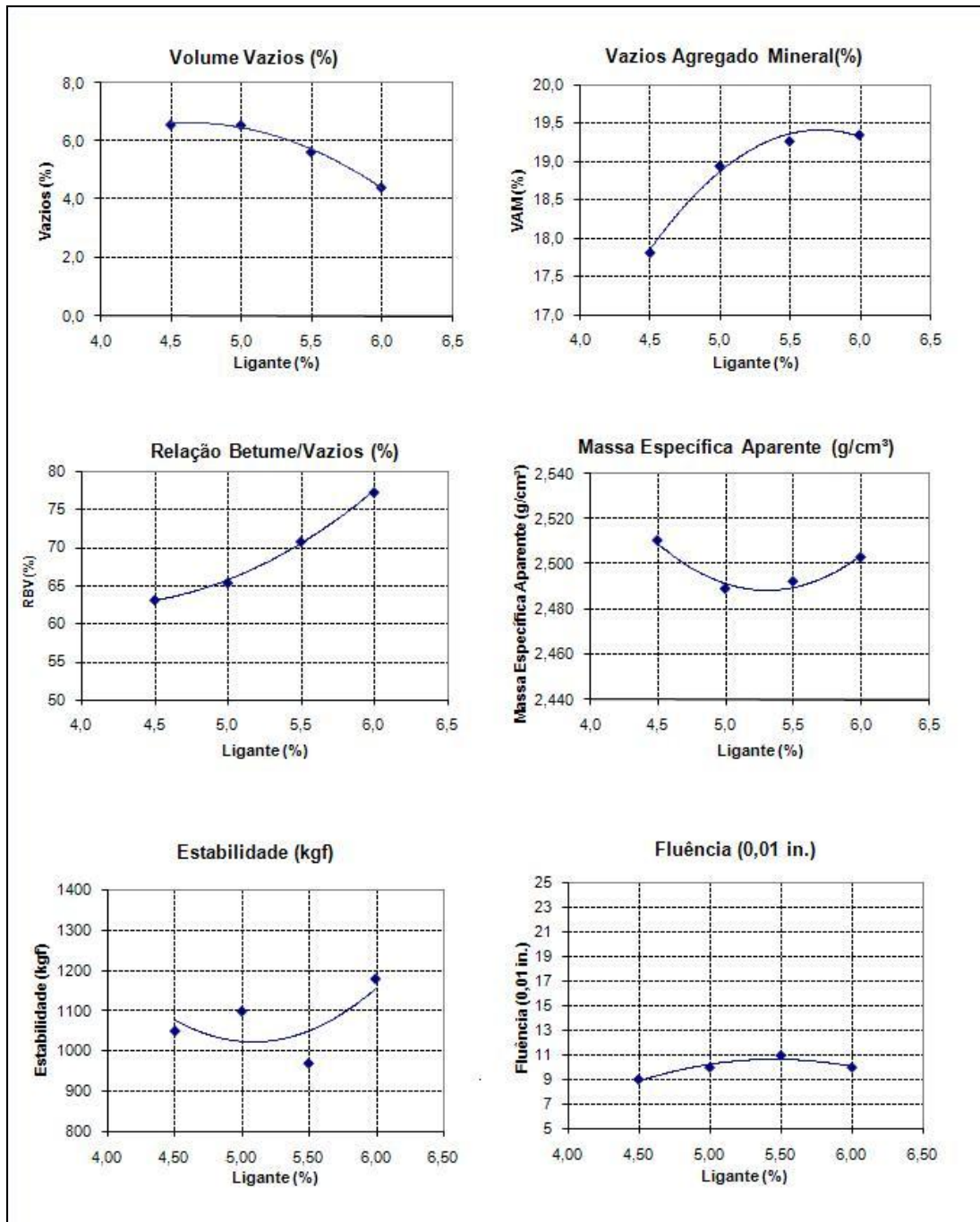


Figura 27 – Propriedades da mistura com cal Calcítica 2%

Propriedade	ESP 31/06 DNIT	Valor de Projeto
Teor de Betume (%)	--	6,10
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	78,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	--	19,30
Massa Específica Máxima Teórica (g/cm ³)	--	2,69
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	--	2,51
Estabilidade (kgf)	>500	1180
Fluência (1/100 in)	--	10

Figura 28 – Resumo das propriedades de projeto da mistura com cal Calcítica 2%

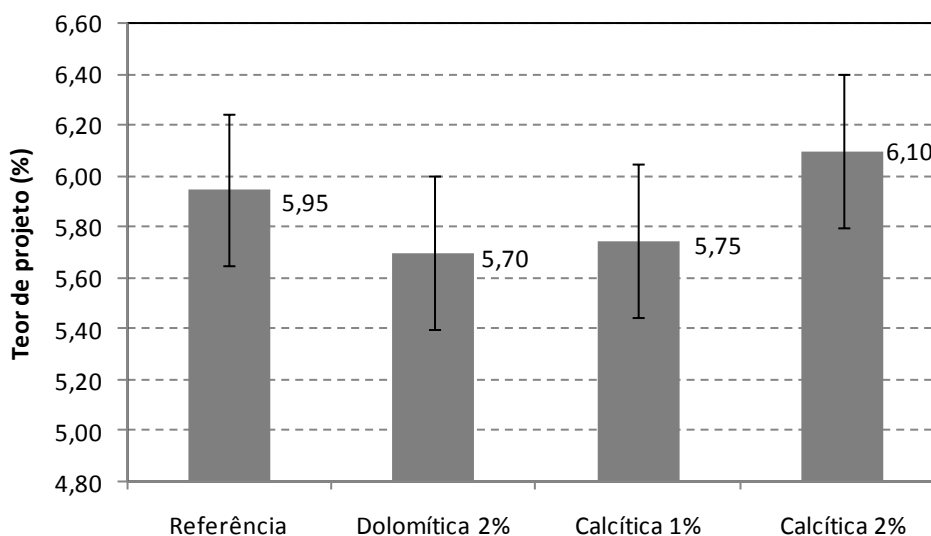


Figura 29 – Teor de projeto por mistura

Conforme apresentado na Figura 29 pode-se perceber que houve uma leve diminuição no consumo das misturas com 2% de adição de cal Dolomítica e 1% de adição de cal Calcítica. Já na mistura com 2% de adição de cal calcítica houve um leve aumento no consumo de ligante. Porém, pela barra de erros, onde de acordo com a especificação construtiva do DNIT pode ser tolerado 0,3% de erro no teor pelo fato da falta de precisão no campo, pôde-se então observar que todos os valores são bastante próximos.

4.2. Propriedades Mecânicas

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

Para avaliar a propriedades mecânica do Ensaio de Resistência à Tração – DNER-ME 138/94, foram moldados 4 corpos-de-prova para cada mistura, totalizando 16 corpos-de-prova.

Nas Figuras 28 e 29 estão os resultados do ensaio:

Propriedade		Mistura			
		Referência	Dolomítica 2%	Calcítica 1%	Calcítica 2%
Resistência à tração (MPa)	leitura 1	1,23	1,46	1,18	1,24
	leitura 2	1,12	1,40	1,19	1,12
	leitura 3	1,24	1,36	1,45	1,38
	leitura 4	1,22	1,42	1,42	1,30
	média	1,20	1,41	1,31	1,26
	σ (MPa)	0,06	0,04	0,14	0,11
	Cv (%)	4,62	2,95	11,06	8,69

Figura 30 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração

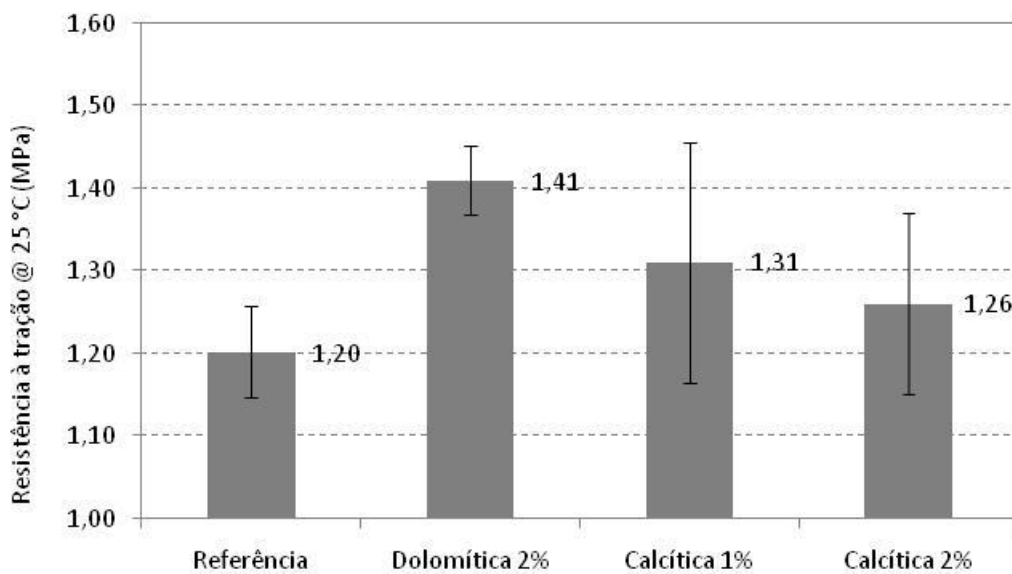


Figura 31 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração

No caso em estudo nota-se que as três misturas que possuíam adição de cal, mostraram-se positivas em relação à mistura de referência. O melhor desempenho teve a mistura com cal dolomítica, a qual obteve uma média 1,41 MPa, seguido da mistura com cal calcítica com 1% de adição com o valor de 1,31 MPa, seguido da cal calcítica com 2% de adição com 1,26 MPa de média, e por fim a mistura de referência obteve uma média de 1,20 MPa. A barra de erros representa neste caso o desvio padrão a partir da média dos resultados de cada mistura.

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

Para avaliar a propriedade mecânicas no Ensaio de Módulo de Resiliência - DNER-ME 133/94, foram utilizados os mesmos 4 corpos-de-prova para cada mistura, totalizando 16 corpos-de-prova.

Nas Figuras 30 e 31 estão os resultados dos ensaios de módulo de resiliência:

Propriedade		Mistura			
		Referência	Dolomítica 2%	Calcítica 1%	Calcítica 2%
Módulo de resiliência (MPa)	Σ leitura 1	3471	3554	3830	3374
	Σ leitura 2	3630	3409	4195	4559
	Σ leitura 3	3386	4250	3999	4193
	média	3496	3738	4008	4042
	σ (MPa)	124	450	183	607
	C_v (%)	3,54	12,03	4,56	15,01

Figura 32 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência

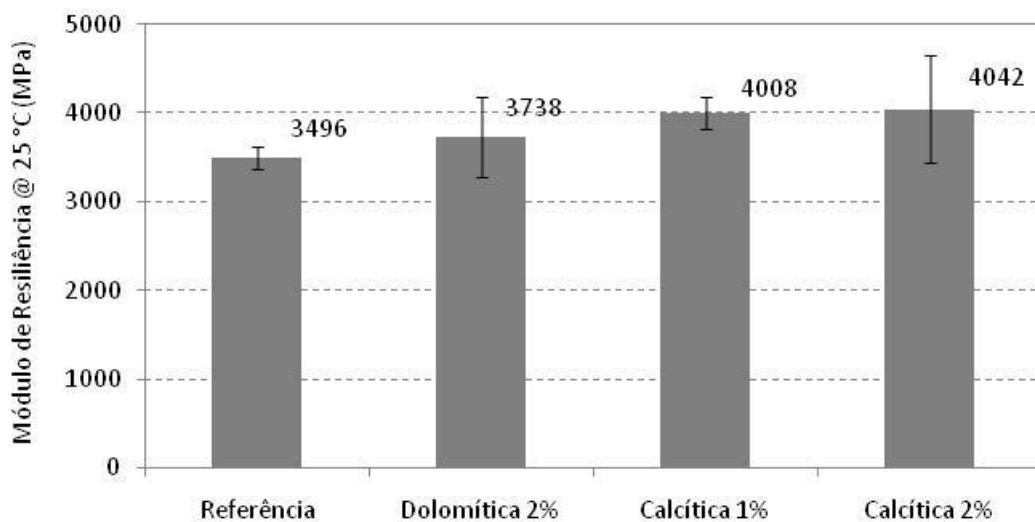


Figura 33 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência é o ensaio que determina a deformabilidade elástica de um concreto asfáltico a temperatura ambiente (25 °C). A barra de erros representa também neste caso o desvio padrão a partir da média dos resultados de cada mistura.

A propriedade utilizada na análise da tensão-deformação das estruturas dos pavimentos, é o Módulo de Resiliência (MEDINA e MOTTA, 2005). Quanto aos resultados deste ensaio, as misturas com adição de cal tiveram resultados inversamente proporcionais aos da resistência a tração por compressão diametral. A mistura com 2% de cal calcítica foi a que obteve o maior valor de módulo, com média de 4042 MPa, já a mistura com 1% da mesma cal obteve média de 4008 MPa. A mistura com cal Dolomítica obteve 3738 MPa de módulo, e a mistura de referência 3496 MPa.

4.2.3. Relação Mr/Rt

A relação Mr/Rt nos dá uma idéia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura; misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido a concentração de esforços em seu interior (Bock, 2009). Logo, a relação Mr/Rt permite inferir o comportamento das misturas asfálticas com relação ao trincamento (Budny, 2009 apud Neves Filho et al, 2004).

Na Figura 34 estão as relações Mr/Rt para as misturas em estudo.

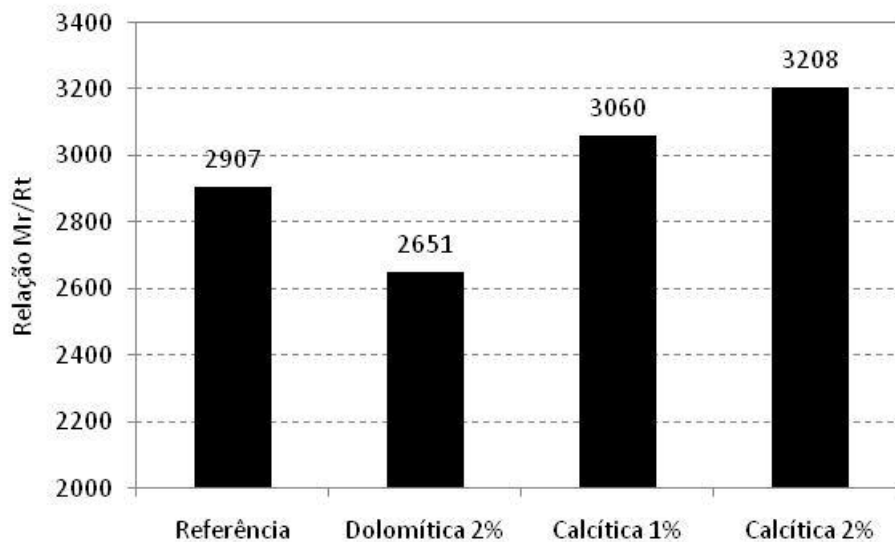


Figura 34 – Relação Mr/Rt @ 25°C (MPa)

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

4.3. Propriedades de Adesão e Coesão

4.3.1. Perda de Massa – Metodologia Cantabro

É comum o desgaste de pavimentos, ou mesmo o deslocamento e arrancamento progressivo de agregados do revestimento, esta patologia principalmente causada atrito entre pneu e pavimento pode ser mensurada através do ensaio de perda de massa pela Metodologia Cantabro, através do aparelho de abrasão Los Angeles, como anteriormente citado.

O resultado dos ensaios serão apresentados na Figura 33:

Mistura	Perda de massa (%)			
	medição 1	medição 2	medição 3	medição 4
Referência	6,01	5,08	13,66	7,51
Dolomítica 2%	5,90	8,83	6,27	4,67
Calcítica 1%	10,43	6,91	6,91	7,50
Calcítica 2%	3,67	4,61	3,73	4,01
Média	8,07	6,42	7,94	4,00
σ (MPa)	2,90	1,74	1,79	1,67
Cv (%)	35,93	27,07	22,55	41,64

Figura 35 – Resultados do ensaio Cantabro no aparelho de abrasão Los Angeles

Para misturas de Pré-misturados a quente, com asfalto polímero, para utilização como camada porosa de atrito, o valor máximo de perda de massa aceitável é de 25% (DNER - ES 386/99).

Nota-se que houve apenas dois corpos-de-prova que obtiveram perda de massa acima de 10%, já as médias dos resultados apresentaram a sequência crescente de melhor desempenho na seguinte disposição: Mistura de Cal Calcítica 2%, mistura de cal Dolomítica, mistura de cal Calcítica 1% e mistura de referência. Dessa maneira, observa-se que as misturas com cal, obtiveram melhor desempenho, porém, pela barra de erros também observa-se que há uma faixa em comum. No gráfico, há uma melhor visualização dos dados:

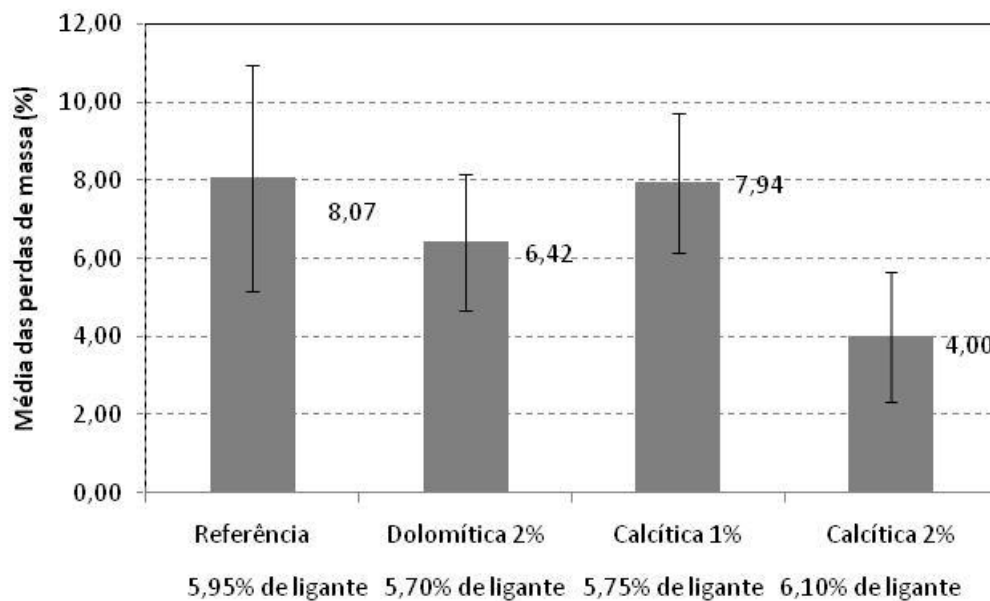


Figura 36 – Média dos resultados do ensaio Cantabro

4.3.2. Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Para a realização deste ensaio foi necessário moldar 24 corpos-de-prova (6 para cada mistura) com o índice de vazios entre 6% a 8%, para isso foi necessário regular o número de golpes, e até mesmo foram moldados novos corpos-de-prova, pois a primeira moldagem não satisfizesse esse requisito. Para que os corpos-de-prova se enquadrassem nesse intervalo de índice de vazios, foi necessário replanejar o número de golpes dados em cada face do corpo-de-prova, os quais ficaram no intervalo de 25 a até 35 golpes.

Na Figura 35 estão representados os resultados obtidos neste ensaio:

Propriedade	Misturas				
	Referência	Dolomítica 2%	Calcítica 1%	Calcítica 2%	
Rt1 (sem cond.) (MPa)	leitura 1	0,98	0,85	0,98	0,86
	leitura 2	0,99	0,99	0,45	0,50
	leitura 3	1,05	0,97	0,79	1,12
	media	1,01	0,94	0,74	0,83
	σ (MPa)	0,04	0,08	0,27	0,31
	Cv (%)	3,83	8,12	36,22	37,35
Rt2 (com cond.) (MPa)	leitura 1	0,61	0,44	0,29	0,45
	leitura 2	0,34	0,62	0,30	0,51
	leitura 3	0,35	0,60	0,29	0,65
	media	0,43	0,56	0,30	0,54
	σ (MPa)	0,16	0,10	0,01	0,10
	Cv (%)	35,88	17,67	2,77	19,10

Figura 37 – Resultado do ensaio de adesividade pela metodologia Lottmann

Para esses resultados pôde-se observar que na Resistência a tração sem condicionamento, as misturas com adição de cal calcítica obtiveram um alto coeficiente de variação. O mesmo aconteceu para a mistura de referencia na Resistência a tração com condicionamento.

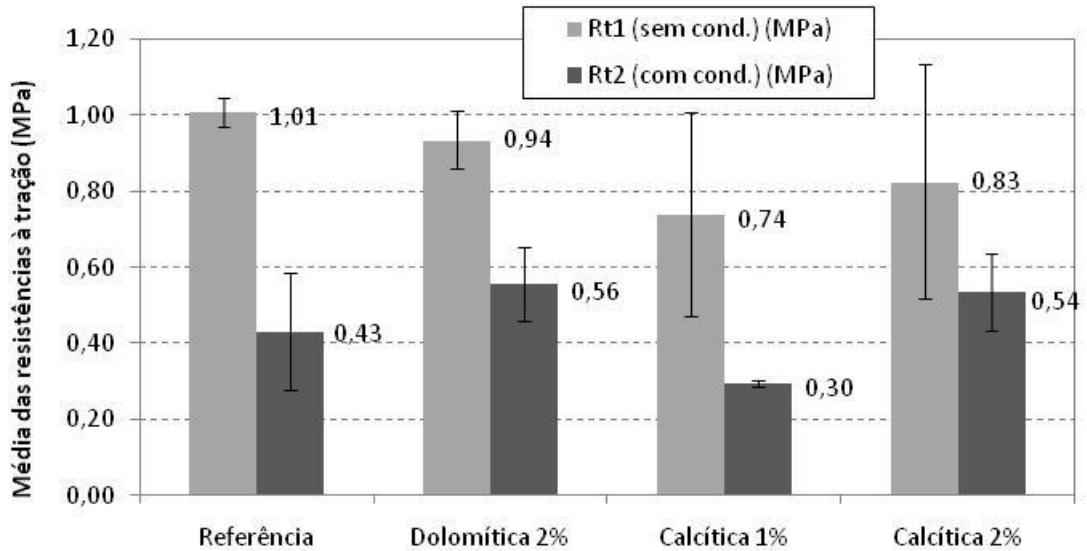


Figura 38 – Média dos resultados do ensaio de adesividade pela metodologia Lottmann

Pela barra de erros observa-se que para a resistência a tração sem condicionamento nas misturas com adição de cal calcítica houve uma grande dispersão nos dados, o que reflete na falta de precisão.

Após todo esse processo, os dados relacionados através da relação entre a resistência à tração de amostras sem condicionamento prévio (Rt1) e amostras com condicionamento (Rt2). Esta relação é denominada Resistência Retida à Tração (RRt), dada em porcentagem.

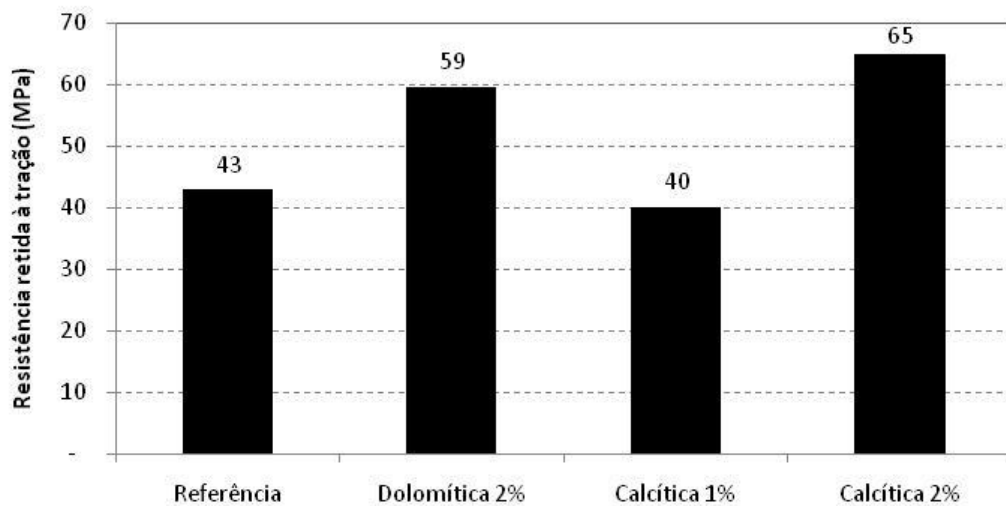


Figura 39 – Resultados da Resistência Retida à Tração

Os resultados obtidos neste ensaio podem ser justificados pelo fator da forma de incorporação se dar pela substituição de finos, pois pela experiência obtida em Bock, 2009, misturas onde a cal é adicionada sobre o agregado seco são, para a propriedade de adesividade, a forma de pior desempenho.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa, que teve como objetivo geral avaliar os efeitos (mecânicos, de adesividade e custo) de diferentes teores e tipos de cal na misturas em questão de CA.

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

5.1. Conclusões

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

5.1.1. Dosagem Marshall;

O efeito da cal foi positivo em duas das misturas estudadas em relação a mistura de referência que não possuía cal. Houve uma leve diminuição no consumo de ligante asfáltico, o qual foi de 4,2% na mistura com 2% de adição de cal Dolomítica, e de 3,4% na mistura com 1% de adição de cal Calcítica. Já na mistura com 2% de adição de cal calcítica houve um leve aumento de 2,5% no consumo de ligante.

5.1.2. Propriedades mecânicas das misturas

5.1.2.1. Resistência à tração;

Pôde-se observar que as três misturas que possuíam adição de cal, tiveram desempenho superior à mistura de referência. O melhor desempenho teve a mistura com cal dolomítica, a qual obteve uma média 1,41 MPa, ou seja, um ganho de 17,5% em relação a mistura de referência, e ainda com desvio padrão, a partir da média, menor do que as outras misturas; Seguido da mistura com cal calcítica com 1% de adição, a qual possuiu um ganho de 9,2% e média de 1,31 MPa; E seguido ainda da cal calcítica com 2% de adição com ganho de 5% e média de 1,26 MPa; e por fim a mistura de referência obteve uma média de 1,20 MPa de resistência.

5.1.2.2. Módulo de resiliência;

Houve um crescimento proporcional da média dos resultados de módulo de resiliência com a quantidade de adição de cal para as misturas com cal calcítica, e o ganho de módulo dos teores de 1% e 2% de adição em relação a mistura sem cal foram de 14,65% e 15,62%. Já para a cal Dolomítica, onde o teor de cal é de 2%, o ganho de módulo em relação a mistura de referência foi menor, de 6,92%.

5.1.2.3. Relação Mr/Rt;

Quanto à relação entre módulo de resiliência e resistência a tração, observou-se uma diminuição na mistura com cal Dolomítica, e ao contrário para as misturas com cal Calcítica, ou seja, um aumento na relação.

No caso da cal Dolomítica, a diminuição foi de 8,80%, e para as misturas com cal Calcítica o aumento da relação foi de 5,26% e 10,35% para as misturas com 1% e 2% de adição, respectivamente.

Enfatiza-se que os resultados desse ensaio não significam perda ou ganho no desempenho da mistura, uma relação Mr/Rt alta ou baixa é selecionada de acordo com um caso específico de aplicação.

5.1.3. Propriedades de coesão e adesão;

5.1.3.1. Perda de massa;

O desvio padrão da mistura com cal dolomítica ficou em sua maior parte dentro do desvio padrão da mistura de referência, ou seja, os resultados ficaram praticamente em um intervalo em comum.

Já para as misturas com adição de cal calcítica, quando do aumento do teor de cal, a perda de massa diminuiu, porém, pode-se observar que quanto maior o teor de cal, neste caso, é maior também o teor de ligante.

5.1.3.2. Adesividade;

Os resultados do ensaio de adesividade pela metodologia Lottmann Modificada, mostraram que para a mistura com adição de cal Dolomítica, houve um ganho de 16,58% na Resistência Retida a Tração. E para a cal calcítica, o teor de 1% de adição ficou com resultados de Resistência Retida a Tração abaixo dos da mistura de referência, com uma perda de 2,92%, já para a mistura com 2% de adição de cal calcítica, o ganho em relação a mesma mistura foi de 21,97%.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros;

- a) Estudar a influência da cal em diversos tipos de agregados, ou ainda diversos tipos de basaltos de diferentes origens e pedreiras, com diversos tipos de forma adição;
- b) Estudar a influência das propriedades de presença sílica (ácido/básico) na superfície do agregado em misturas asfálticas com adição de cal;
- c) Realizar um estudo de comparação entre misturas com adição de cal e adição de Dopes (melhoradores de adesividade);
- d) Verificar a influência do tempo de imersão do agregado em cal nas misturas asfálticas;

REFERÊNCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture Induced Damage. AASHTO T 283.** United States, 1989.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures: ASTM D 1075.** United States, 1996. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Betuminosos – Determinação da Penetração: NBR 6576.** Rio de Janeiro, 1998. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cal Hidratada para argamassas – Requisitos: NBR 7175.** Rio de Janeiro, 2003. 4 p.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et all. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 2008, 504 p.
- 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.
- BOCK, A. L., HARTMANN, D., BUDNY, J., SPECHT, L. P., CERATTI, J. A. P. **Avaliação de diferentes métodos de adição de cal em misturas de concreto asfáltico.** In: IV SINAPRE - Simpósio Internacional de avaliação de pavimentos e projeto de reforço. Fortaleza – CE. UFC, 2009. v.1. p.1 – 14

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso**. DNER – ME 078/94. Rio de Janeiro, 1994, 3p.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Manual de Pavimentação**, Rio de Janeiro, 1996. 320 p.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos**. 2. ed. Rio de Janeiro: 1996, 320 p.

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

GRANICH, A. R.; SPECHT, L. P.; GARCIA, F. H.; **Avaliação do excesso de carga no desempenho a fadiga de pavimentos flexíveis considerando duas formas de modelagem**, In: XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes. Panorama Nacional da Pesquisa em Transporte 2009. Vitória/ES, 2009, CT - 76.

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

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

LITTLE, D. & 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.

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

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.

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

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

OLIVEIRA FILHO, C. M. S.; SOARES, J.B.; **Adesão e coesão em misturas asfálticas (melhoradores de adesividade, ligantes modificados e intertravamento)**, XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, Brasília, 2006.

ROZEK, T. de M. **Estudo laboratorial do envelhecimento de misturas em concreto asfáltico preparadas com diferentes tipos e teores de ligantes**. Trabalho de Conclusão de

Curso em Engenharia Civil – UNIJUI – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2008.

SENÇO, Wlastermir de; **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Volume 2. São Paulo: Ed. Pini, 671p., 2001.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**, Porto Alegre, 2004. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

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

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays - SHRP-A407**. Washington D.C., 1994, 172p.

WEISZFLOG, W.; **Moderno Dicionário da Língua Portuguesa**. São Paulo: Editora Melhoramentos de São Paulo, 2007, 2280p.

VASCONCELOS. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pela metodologia Marshall e superpave com diferentes granulometrias**. Fortaleza, 2004. Dissertação de mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, 132 p.