

UNIJUÍ – UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO
RIO GRANDE DO SUL

DETEC – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO LABORATORIAL
DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS
EM CONCRETO ASFÁLTICO

DIEGO HENRIQUE WESSELING

PROFESSOR ORIENTADOR:

LUCIANO PIVOTO SPECHT

Ijuí, RS, dezembro de 2002.

DIEGO HENRIQUE WESSELING

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO
COMPORTAMENTO DE MISTURAS EM
CONCRETO ASFÁLTICO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de Tecnologia
da UNIJUÍ – Universidade Regional do
Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul,
curso de Engenharia Civil, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Professor Orientador: Luciano Pivoto Specht

Ijuí, RS, dezembro de 2002.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 19/12/2001 pela banca examinadora.

Prof. M. Sc Eng. Luciano Pivoto Specht – Orientador (DETEC/EGC)

Prof. M. Sc Eng. Cristina Eliza Pozzobon – (DETEC/EGC)

Prof. D. Sc Eng. Antônio Thomé – (DETEC/EGC)

Prof. M. Sc Eng. Cristina Eliza Pozzobon – (DETEC/EGC)

Coordenadora do Colegiado do Curso de Engenharia Civil da UNIJUÍ

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Bruno A. Wesseling (in memoriam) e Nair Wesseling,
e ao meu irmão Daniel.*

AGRADECIMENTOS

Desejo extremar os mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma auxiliaram na realização deste trabalho. Seja através da orientação técnica, seja através de apoio, do incentivo e da amizade, muitas pessoas tiveram papel importante neste trabalho.

Mesmo correndo o risco de um indesculpável esquecimento, julgo importante particularizar alguns sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador, professor Luciano Pivoto Specht, pelo incentivo, motivação e pela orientação segura durante a realização deste trabalho.

Aos técnicos Ivan F. D. Stroschoein e Salete Zaltron, pelo auxílio na consecução dos ensaios. Sem a experiência de vocês as coisas teriam sido bem mais complicadas.

À funcionária Cláudia Stroschoen que sempre esteve disponível nos momentos em que precisei.

Ao amigo Jair C. Schneider pelo convívio e amizade conquistada durante o período em que moramos junto.

Ao Carlos Costa (Costinha) e a esposa Elisabete (Beti), e os filhos Alexandre e Guilherme pela amizade conquistada ao longo destes anos.

Aos amigos e colegas: Angela G. Coró, César A. C. Monteiro, Jadir A. Diniz Jr e Matias S. Feil pelo convívio ao longo desta jornada.

A todos os demais colegas e professores do Curso de Engenharia Civil pelo convívio ao longo destes cinco anos.

Aos meus tios Luciano e Eloni, Valdir e Mara, Wilson e Clair, pelo incentivo e confiança depositados em mim.

Por fim, agradeço a minha mãe e meu irmão pelo incentivo e confiança depositados em mim ao longo desta jornada. Tenho certeza que este trabalho também é de vocês.

RESUMO

Este estudo visa avaliar o comportamento mecânico de concreto asfáltico com a utilização dos materiais pétreos disponíveis na região de Ijuí com a adição de cimento e cal. A moldagem dos corpos de prova das misturas estudadas foi realizada através da Metodologia Marshall; foram determinados, também, o módulo de resiliência e resistência à tração das misturas estudadas. Foram realizados, ainda, ensaios de adesividade através da Metodologia Lottman Modificada. A mistura de referência obteve o maior consumo de ligante em relação às misturas de cimento e cal, o que se deve ao fato do fíler ser incorporado ao ligante, aumentando seu volume; as misturas com adição de fíler apresentaram módulo superior a mistura de referência, ou seja, o fíler atuou como enrijecedor da mistura. Quanto aos ensaios de resistência à tração a mistura com cal obteve um incremento de 9,2% em relação à mistura de referência, enquanto que a adição de cimento possibilitou um incremento de 25,9%. A adição de cal levaria a uma mistura com uma combinação de módulo de resiliência (M_r) e resistência à tração (R_t) mais adequadas para utilização como camada de revestimento sobre camadas granulares, pois do ponto de vista estrutural, deve haver compatibilização entre a rigidez e a resistência da mistura, uma vez que um aumento do módulo de resiliência deixa o material mais suscetível ao trincamento por fadiga. No ensaio de adesividade, pode-se verificar, que a mistura com adição de cal teve perda de adesividade, enquanto a mistura com adição de cimento teve um ganho mínimo de adesividade quando comparados com a mistura de referência. As três misturas estudadas apresentaram sérios problemas de adesividade (medidas através da resistência retida à tração) o que elevaria as chances de ocorrerem problemas de desagregação da mistura em campo.

SUMÁRIO

| | |
|---------------------|-----------|
| RESUMO | IV |
|---------------------|-----------|

| | |
|---------------------|----------|
| SUMÁRIO..... | V |
|---------------------|----------|

| | |
|-------------------------------|------------|
| LISTA DE FIGURAS | VII |
|-------------------------------|------------|

| | |
|------------------------------|----------|
| LISTA DE TABELAS..... | X |
|------------------------------|----------|

| | |
|-------------------------------|-----------|
| LISTA DE QUADROS | XI |
|-------------------------------|-----------|

| | |
|----------------------------|----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
|----------------------------|----------|

| | |
|--|----------|
| 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA | 1 |
| 1.2 FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO | 1 |
| 1.3 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DO ESTUDO | 1 |
| 1.3.1 OBJETIVO GERAL | 1 |
| 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 1 |
| 1.4 JUSTIFICATIVA..... | 1 |
| 1.5 SISTEMATIZAÇÃO DO ESTUDO | 3 |

| | |
|---------------------------------------|----------|
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 5 |
|---------------------------------------|----------|

| | |
|--|-----------|
| 2.1 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS | 5 |
| 2.1.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS..... | 5 |
| 2.1.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS | 5 |
| 2.1.3 CAMADAS | 6 |
| 2.1.4 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS | 6 |
| 2.1.4.1 MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS E ESTATÍSTICOS | 7 |
| 2.1.4.2 MÉTODOS RACIONAIS | 7 |
| 2.1.5 AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA (ATR) | 9 |
| 2.1.6 FADIGA | 9 |
| 2.1.7 ADESIVIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS..... | 10 |
| 2.2 MATERIAIS PARA CONCRETO ASFÁLTICO..... | 12 |
| 2.2.1 LIGANTE ASFÁLTICO | 12 |
| 2.2.2 AGREGADO..... | 13 |
| 2.2.3 FÍLER..... | 14 |
| 2.3 CONCRETO ASFÁLTICO | 16 |

| | |
|--|------------------|
| 2.3.1 DOSAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO | 17 |
| 2.3.2 MÉTODO MARSHALL..... | 18 |
| <u>3. METODOLOGIA</u> | <u>20</u> |
| 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL | 20 |
| 3.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS..... | 20 |
| 3.2.1 AGREGADOS MÍNERAIS | 20 |
| 3.2.2 CIMENTO ASFÁLTICO | 23 |
| 3.2.3 FÍLER UTILIZADO | 24 |
| 3.3 ENSAIOS REALIZADOS | 24 |
| 3.3.1 METODOLOGIA MARSHALL..... | 24 |
| 3.3.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA | 26 |
| 3.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO – TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL | 27 |
| 3.3.4 ENSAIO DE ADESIVIDADE – METODOLOGIA LOTTMAN MODIFICADA | 27 |
| <u>4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</u> | <u>30</u> |
| 4.1 MISTURA DE REFERÊNCIA | 30 |
| 4.2 MISTURA COM CAL | 35 |
| 4.3 MISTURA COM CIMENTO | 40 |
| <u>5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</u> | <u>46</u> |
| <u>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</u> | <u>53</u> |
| 6.1 CONCLUSÕES | 53 |
| 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 54 |
| <u>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> | <u>55</u> |
| <u>8. ANEXO I.....</u> | <u>58</u> |
| <u>9. ANEXO II</u> | <u>66</u> |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Defeito provocado por falta de adesividade; entroncamento da Rua do Comércio com RS 342, próximo ao Campus da UNIJUÍ. | 12 |
| Figura 2.2: Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ (Fonte: FHWA 2002) | 17 |
| Figura 3.1: Localização da jazida e do derrame basáltico. | 21 |
| Figura 3.2: Curvas Granulométricas dos agregados utilizados no estudo. | 22 |
| Figura 3.3: Prensa para rompimento dos corpos-de-prova Marshall. | 25 |
| Figura 3.4: Agregados utilizados no estudo, separados por peneira. | 26 |
| Figura 3.5: Prensa para rompimento dos corpos-de-prova à tração. | 29 |
| Figura 4.1: Curva do volume de vazios, para mistura de referência. | 30 |
| Figura 4.2: Curva dos vazios do agregado mineral, para mistura de referência. | 30 |
| Figura 4.3: Curva da relação betume/vazios, para mistura de referência. | 31 |
| Figura 4.4: Curva da massa específica aparente para mistura de referência. | 31 |
| Figura 4.5: Curva de estabilidade para mistura de referência. | 32 |
| Figura 4.6: Curva de fluência ($1/100$ in) para mistura de referência. | 32 |
| Figura 4.7: Curva da relação estabilidade/fluência para mistura de referência. | 33 |
| Figura 4.8: Curva do volume de vazios, para mistura com cal. | 35 |
| Figura 4.9: Curva dos vazios do agregado mineral, para mistura com cal. | 35 |
| Figura 4.10: Curva da relação betume/vazios, para mistura com cal. | 36 |
| Figura 4.11: Curva da massa específica aparente para mistura com cal. | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.12: Curva de estabilidade para mistura com cal..... | 37 |
| Figura 4.13: Curva de fluência ($1/100$ in) para mistura com cal..... | 37 |
| Figura 4.14: Curva da relação estabilidade/fluência para mistura com cal..... | 38 |
| Figura 4.15: Curva do volume de vazios, para mistura com cimento. | 40 |
| Figura 4.16: Curva dos vazios do agregado mineral, para mistura com cimento. | 40 |
| Figura 4.17: Curva da relação betume/vazios, para mistura com cimento. | 41 |
| Figura 4.18: Curva da massa específica aparente para mistura com cimento. | 41 |
| Figura 4.19: Curva de estabilidade para mistura com cimento..... | 42 |
| Figura 4.20: Curva de fluência ($1/100$ in) para mistura com cimento. | 42 |
| Figura 4.21: Curva da relação estabilidade/fluência para mistura com cimento..... | 43 |
| Figura 5.1: Resultado do teor de ligante para as três misturas estudadas..... | 46 |
| Figura 5.2: Resultado da percentagem de vazios do agregado mineral no teor ótimo para as três misturas estudadas..... | 47 |
| Figura 5.3: Resultado da relação betume vazios no teor ótimo para as três misturas estudadas..... | 47 |
| Figura 5.4: Resultado da massa específica aparente no teor ótimo para as três misturas estudadas. | 48 |
| Figura 5.5: Resultado da estabilidade Marshall no teor ótimo para as três misturas estudadas..... | 48 |
| Figura 5.6: Resultado da fluência no teor ótimo para as três misturas estudadas. | 49 |
| Figura 5.7: Resultado da relação estabilidade/fluência no teor ótimo para as três misturas estudadas. | 49 |
| Figura 5.8: Resultado do ensaio de módulo de resiliência para as três misturas..... | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.9: Resultado do ensaio de resistência à tração para as três misturas..... | 50 |
| Figura 5.10: Resultado da relação módulo de resiliência e resistência à tração para as três misturas. | 51 |
| Figura 5.11: Resultados obtidos no ensaio de adesividade Lottman Modificado | 51 |
| Figura 5.12: Resultados da relação fíler/betume para as três misturas estudadas | 52 |
| Figura 5.13: Resultados da superfície específica versus rigidez das misturas estudadas..... | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1.1: Divisão modal no transporte de cargas do país. (Fonte MELLO, 2001). | 02 |
| Tabela 2.1: Fatores intervenientes nas características de adesividade (Fonte Specht et al, 2002)..... | 11 |
| Tabela 3.1: Composição das misturas estudadas. | 20 |
| Tabela 3.2: Índice de lamelaridade..... | 22 |
| Tabela 3.3: Características do CAP utilizado | 23 |
| Tabela 4.1: Resultado dos ensaios de módulo de resiliência da mistura de referência..... | 33 |
| Tabela 4.2: Resultado dos ensaios de resistência à tração da mistura de referência. ... | 33 |
| Tabela 4.3: Resultados obtidos no ensaio de adesividade Lottman Modificado para mistura de referência. | 34 |
| Tabela 4.4: Resultado dos ensaios de módulo de resiliência da mistura com cal. | 38 |
| Tabela 4.5: Resultado dos ensaios de resistência à tração da mistura com cal..... | 38 |
| Tabela 4.6: Resultados obtidos no ensaio de adesividade Lottman Modificado para mistura com cal. | 39 |
| Tabela 4.7: Resultado dos ensaios de módulo de resiliência da mistura com cimento. | 43 |
| Tabela 4.8: Resultado dos ensaios de resistência à tração da mistura com cimento.... | 44 |
| Tabela 4.9: Resultados obtidos no ensaio de adesividade Lottman Modificado para mistura com cimento. | 44 |
| Tabela 5.1: Resultados da superfície específica das misturas estudadas | 52 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| QUADRO 2.1: Variáveis que afetam as propriedades da mistura (Fonte: Monismith <i>et al.</i> , 1989)..... | 16 |
| Quadro 4.1: Resumo dos resultados das propriedades finais da mistura de referência..... | 34 |
| Quadro 4.2: Resumo dos resultados das propriedades finais da mistura com cal | 39 |
| Quadro 4.3: Resumo dos resultados das propriedades finais da mistura com adição de cimento..... | 45 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Delimitação do Tema

Visando verificar o comportamento mecânico de misturas de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), realizou-se um estudo, utilizando os materiais pétreos disponíveis na região de Ijuí, adicionando-se às misturas percentagens de cimento e cal, além de uma mistura sem adição.

1.2 Formulação da Questão de Estudo

QUAIS AS CARACTERÍSTICAS DO CBUQ PRODUZIDO NA REGIÃO DE IJUÍ E QUAL INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE DIFERENTES FÍLERS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE ADESIVIDADE DESTES CBUQ?

1.3 Definição dos Objetivos do Estudo

1.3.1 Objetivo Geral

Este estudo visa avaliar o comportamento mecânico de concreto asfáltico com a utilização dos materiais pétreos disponíveis na região de Ijuí com a adição de cimento e cal.

1.3.2 Objetivos Específicos

Este estudo tem os seguintes objetivos específicos:

- Verificar as características do CBUQ produzido na região de Ijuí;
- Verificar as propriedades do CBUQ com a adição de cimento;
- Verificar as propriedades do CBUQ com a adição da cal.

1.4 Justificativa

Ao analisar-se o atual sistema rodoviário brasileiro, torna-se evidente a pequena extensão de rodovias pavimentadas, que totalizam apenas 9,5% do total da malha rodoviária existente. A razão para tal fato está diretamente relacionada com a escassez de recursos públicos e com os altos custos dos materiais empregados na pavimentação de estradas.

Há uma profunda relação entre transportes e desenvolvimento econômico, uma vez que sem transportes não há qualquer possibilidade de pleno aproveitamento do potencial de uma região ou país.

Os transportes são atividades-meio no espaço econômico, ligam mercados consumidores a mercados fornecedores. Deste modo os sistemas de transportes têm que se adequar às necessidades dos produtores e dos consumidores.

Felizmente há uma ampla gama de possibilidades no transporte tanto de pessoas quanto de mercadorias, o que permite escolhas racionais em função de cada situação.

O transporte rodoviário é bastante flexível, tanto em relação à qualidade das vias quanto ao tamanho e valor das cargas, além de ser o único que permite operações de transportes desde a origem até o destino final, o porta a porta. A opção rodoviária acabou prevalecendo na repartição modal das cargas, mais pela deficiência dos demais modais do que pelas suas próprias virtudes, conforme representado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Divisão modal no transporte de cargas do país

| MODAL | % do tráfego |
|--------------|---------------------|
| Aéreo | 0,3 |
| Aquaviário | 11,7 |
| Dutoviário | 4,0 |
| Ferrovário | 21,0 |
| Rodoviário | 63,0 |

(Fonte MELLO, 2001)

As decisões para a realização de uma obra rodoviária devem ser tomadas em função do objetivo da estrada e de sua influência na economia da região a ser atendida.

Por isso, os investimentos em projetos rodoviários devem ajustar-se às peculiaridades das regiões beneficiadas, levando em conta o seu atual estágio de desenvolvimento e a rentabilidade dos investimentos, medida em termos de contribuição à economia.

Pode-se afirmar que a maioria dos investimentos em rodovias tendem a ser realizados nas regiões mais desenvolvidas. Em razão da necessidade de corrigir o desequilíbrio na malha rodoviária nacional, os órgãos rodoviários nacionais e

estaduais desde as últimas décadas vêm procurando promover a interligação da rede rodoviária existente, através da pavimentação de rodovias secundárias.

Uma vez que se tenham estabelecidos estes canais de escoamento e integração, os benefícios serão evidentes, já que se estará propiciando a conquista e ocupação de regiões isoladas, promovendo a ligação entre os centros produtores e os centros de consumo, ou ainda a aproximação e desenvolvimento de várias comunidades que passarão a contar com transporte mais barato e seguro.

O desempenho de um pavimento é fortemente condicionado pelas características que suas camadas exibem. Essas características dependem dos materiais utilizados (solo, agregados, finos e ligantes), da dosagem da mistura betuminosa, de suas condições de compactação e do processo construtivo. No caso de falha, principalmente no que diz respeito às camadas asfálticas e cimentadas, por serem componentes de alto custo e com importante função estrutural, o insucesso no desempenho de pavimento é marcante.

Torna-se evidente a importância do estudo de novos materiais e/ou novas combinações para que seja possível o desenvolvimento de novos materiais que possam apresentar boa performance e custo atrativo.

1.5 Sistematização do Estudo

O trabalho apresenta a seguinte estrutura:

No primeiro capítulo são apresentadas a delimitação do tema, seguido da questão que fundamenta o estudo, dos objetivos geral e específicos e da justificativa.

No segundo capítulo, a partir do referencial teórico, são comentados temas que envolvem o estudo, como classificação dos pavimentos, materiais utilizados em uma mistura, dosagem de concreto asfáltico e algumas considerações sobre o Método Marshall.

No terceiro capítulo apresenta-se a metodologia utilizada, o método escolhido para o estudo, e a forma de coleta de dados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados de cada uma das dosagens de CBUQ.

O quinto capítulo faz a análise dos resultados das dosagens procurando identificar a influência das composições de cada mistura nas propriedades mecânicas do CBUQ.

Finalmente, o capítulo seis contém considerações finais do trabalho e apresenta as principais contribuições do mesmo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pavimentos Rodoviários

No caso de rodovias, o pavimento é a superestrutura, constituído por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infra-estrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito (MOURÃO et al, 2002).

O subleito, limitado assim superiormente pelo pavimento, deve ser estudado e considerado até a profundidade onde atuam, de forma significativa, as cargas impostas pelo tráfego.

De uma forma geral, os pavimentos são classificados em flexíveis e rígidos.

2.1.1 Pavimentos Flexíveis

É uma estrutura constituída de uma ou mais camadas de espessura finita, assente sobre um semi-espaço infinito, cujo revestimento é do tipo betuminoso. Em um pavimento flexível, o dimensionamento é comandado pela resistência do subleito, e, num pavimento rígido pela resistência do próprio pavimento; não sendo assim, permanecem as expressões vagas, como semi-rígido e semiflexível. Contudo, quando uma das camadas subjacentes ao revestimento betuminoso for cimentada, diz-se que o pavimento é semi-rígido.

No caso geral, o pavimento flexível é constituído das seguintes camadas: Revestimento, Base, Sub-base, Reforço do Subleito e Subleito.

2.1.2 Pavimentos Rígidos

É formado, predominantemente, por camadas que trabalham sensivelmente a tração. Exemplo típico são os pavimentos de concreto de Cimento Portland. Embora nos casos extremos seja fácil fazer a distinção, há situações intermediárias em que é difícil estabelecer um limite entre as duas famílias de pavimento. Os materiais tratados com cimento, cal, entre outros, bem como certas misturas betuminosas, resistem apreciavelmente a tração.

A consideração simultânea de deformabilidade e resistência dos diferentes materiais permite fazer uma caracterização melhor de rigidez ou flexibilidade dos pavimentos.

O pavimento rígido é constituído de:

- **Placa de Concreto de Cimento** – camada que desempenha ao mesmo tempo a função de revestimento e base.

- **Sub-base** – camada empregada, com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte do subleito e/ou evitar o fenômeno de bombeamento dos solos subjacentes a placa de concreto.

2.1.3 Camadas

A seguir estão descritas as definições de cada uma das camadas constituintes da estrutura de um pavimento:

- **Revestimento:** Camada destinada a resistir diretamente as ações do tráfego, a impermeabilizar o pavimento, a melhorar as condições de rolamento, no que se refere ao conforto e a segurança, e a transmitir, de forma atenuada, as ações do tráfego as camadas inferiores.

- **Base:** Camada destinada a resistir diretamente as ações dos veículos e a transmiti-las, de forma conveniente, ao subleito.

- **Sub-Base:** Camada complementar a base, com as mesmas funções desta e executada quando, por razões de ordem econômica, for conveniente reduzir a espessura da base.

- **Reforço do Subleito:** Camada existente, no caso de pavimentos muito espessos, executada com o objetivo de reduzir a espessura da própria sub-base.

- **Regularização do Subleito:** Camada de espessura variável, executada quando se torna necessário preparar o leito da estrada para receber o pavimento; a regularização não constitui, propriamente, uma camada do pavimento, pois tem espessura variável, podendo ser nula em um ou mais pontos da seção transversal.

2.1.4 Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

Os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, adaptados para utilização com base de solo-cimento, podem ser classificados em duas categorias. Na primeira, estão os métodos semi-empíricos e estatísticos, baseados em informações

obtidas a partir da observação do comportamento de pavimento. Na segunda categoria, estão os métodos que consideram o comportamento do pavimento de acordo com a teoria das camadas elásticas.

2.1.4.1 Métodos semi-empíricos e estatísticos

A maioria dos métodos empíricos, de alguma forma, considera a possibilidade da base ser de solo estabilizado quimicamente; para tal, incluem em suas formulações coeficientes de equivalência estrutural desses materiais. A seguir, será apresentado um dos métodos mais comuns usados no Brasil, o método do DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

O método do DNER é baseado no trabalho de Porter, em 1949, sobre o dimensionamento de pavimentos flexíveis a partir do índice de suporte Califórnia (CBR), acrescentando conceitos mais modernos como a equivalência de operações de diferentes cargas por eixo em relação à carga por eixo padrão, os coeficientes de equivalência estrutural dos diferentes materiais componentes do pavimento e fatores climáticos.

A capacidade de suporte do subleito e dos materiais granulares sem adições é medida pelo ensaio CBR (Índice de Suporte Califórnia) em laboratório. Exige-se que os materiais de sub-base e base tenham, respectivamente, um valor de CBR mínimo de 20% e 80%. Se os materiais forem melhorados com cal, mantêm-se as exigências para a base e o CBR mínimo da sub-base passa para 30%. São fixados, ainda, limites para a expansão volumétrica (subleito, sub-base e base) e para índices de consistência (base).

Nas duas versões do método, o dimensionamento do pavimento faz-se pela resolução de um sistema de inequações, devendo-se determinar, de antemão, a espessura total do pavimento como se todas as camadas fossem granulares, ou seja, tivessem K igual a unidade. Determina-se então a espessura do pavimento necessária para proteger a camada de subleito contra deformações plásticas excessivas.

2.1.4.2 Métodos Racionais

Os métodos baseados em modelos matemáticos da teoria da elasticidade são posteriores aos chamados métodos empíricos e representam um esforço no sentido

de racionalizar o dimensionamento de pavimentos; são baseados na análise estrutural de tensões e deformações de sistemas em camada, iniciadas em 1943 por Burmister. Tais métodos consideram critérios de ruptura obtidos a partir de propriedades fundamentais dos materiais utilizados.

Uma das grandes vantagens dos métodos racionais sobre os métodos puramente empíricos de dimensionamento de pavimentos é a sua adaptabilidade a novos materiais e métodos construtivos. O método racional apoiado em um modelo matemático é versátil, podendo ser usado tanto no projeto de reforço de pavimentos existentes como em projetos de pavimentos novos.

Os modelos matemáticos, baseados na teoria da elasticidade, foram, em uma primeira fase, equacionados, de onde surgiram as tabelas e gráficos de dimensionamento. Numa segunda fase, com o advento da computação, foram desenvolvidos programas que incorporaram estas equações tornando menos trabalhoso o dimensionamento.

Resiliência é a capacidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente e então, após o descarregamento, ter sua energia recuperada (PINTO & PREUSSLER, 2001). A propriedade associada é o módulo de resiliência ou resiliente, o qual é a energia de deformação por unidade de volume requerida para tensionar um material de um estado descarregado até o ponto limite da tensão de escoamento.

O módulo resiliente pode ser medido através da compressão diametral e serve para solos cimentados e misturas asfálticas, sendo a aplicação deste ensaio sob carregamento dinâmico a misturas betuminosas. A carga distribuída num friso estreito causa compressão na direção vertical e tração na horizontal. Medindo-se o deslocamento horizontal e a deformação específica em cada ponto do diâmetro horizontal, pode-se, pela teoria da elasticidade, calcular o módulo de elasticidade.

Os dois principais mecanismos de degradação de pavimentos flexíveis observados no Brasil são Afundamento de Trilha de Roda e Trincamento por Fadiga. O terceiro fenômeno é o trincamento térmico, o qual ocorre também no Rio Grande do Sul. A ocorrência destes fenômenos leva a necessidade de se dar a devida importância quando da realização de dosagens de Concreto Asfáltico. Outro fenômeno comum em nossas rodovias é a desagregação, causada pela falta de adesividade ligante/agregado.

2.1.5 Afundamento de Trilha de Roda (ATR)

A seguir estão apresentadas as principais causas, as conseqüências e a previsão de ocorrência de Afundamentos em Trilha de Roda (ATR):

- a) *Principais Causas:* A presença de afundamentos em trilha de roda (ATR) na superfície do pavimento é conseqüência das deformações plásticas que se desenvolvem nas diferentes camadas que constituem a estrutura. O acúmulo de deformações permanentes em uma camada de concreto asfáltico é causado por uma combinação de densificação (redução do volume) e deformação cisalhante.
- b) *Conseqüências Desfavoráveis:* A presença significativa de ATR pode levar ao comprometimento estrutural do pavimento e, também, elevar o potencial para a ocorrência do fenômeno da hidroplanagem.
- c) *Previsão da Ocorrência de Deformações Plásticas:* A previsão da evolução de ATR é um problema complexo e requer a caracterização detalhada das propriedades elásticas, plásticas e de viscosidade dos materiais que constituem as camadas do pavimento.

2.1.6 Fadiga

Fadiga é a degradação do material sobre 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 carregamentos repetidos de compressão do que de tração. Estas máximas tensões ou deformações ocorrem naturalmente na camada do pavimento com maior rigidez. Ressalta-se aqui a importância do estudo e caracterização deste material em laboratório para que se possa utilizar ferramentas de dimensionamento mais adequadas e confiáveis.

Patologias bastante comuns encontradas em regiões de clima temperado são a fissuração por retração térmica e a fissuração por fadiga induzida por variações de temperatura. Fissuras de retração ocorrem em temperaturas extremamente baixas (abaixo de -7 °C) ou em condições de quedas abruptas de temperatura e as fissuras térmicas de fadiga ocorrem em temperaturas entre -7 °C e 21 °C (Epps 1997).

Quando o concreto asfáltico envelhece torna-se mais frágil e suscetível a fissuras térmicas.

2.1.7 Adesividade de Misturas Asfálticas

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 a entrada de água entre o ligante e o agregado e ao deslocamento do filme asfáltico da superfície do agregado. A perda de coesão está ligada a redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações ligante/agregado.

Estes dois mecanismos estão intimamente relacionados e, então, o dano causado pela umidade em misturas asfálticas é a combinação entre estes dois fatores.

Inúmeros fatores influenciam a adesividade ou o dano induzido pela umidade. Hicks (citado por Specht et al, 2002) resumiu e classificou estes fatores que estão apresentados na Tabela 2.1. Um dos fatores importantes é o volume de vazios; misturas com volumes 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.

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 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 similar o que ocorre em campo. Neste grupo estão, dentre outras, as Metodologias Lottman Modificada da AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORT OFFICIALS (AASHTO T283-89) e Cântabro (CEC325/86).

Tabela 2.1: Fatores intervenientes nas características de adesividade

| Fator | Característica Desejável |
|--|---|
| 1. Agregados a) textura superficial b) porosidade c) mineralogia d) cobertura do agregado por pó e) umidade superficial f) composição química superficial g) filer 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 Cimáticas a) temperatura b) precipitações durante construção c) precipitações após construção d) ciclos de gelo/degelo | quente nenhuma mínima mínimo |
| 5. Trafego a) volume de tráfego | baixo tráfego |

(Fonte Specht et al, 2002)

Kandhal 1992 (citado por Specht et al, 2002) 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.

A perda de adesividade em misturas asfálticas é um problema comum nos pavimentos da região conforme representado na Figura 2.1, sendo este, portanto, um fator importante e que deve ser levado em consideração na realização de um projeto de misturas asfálticas.



Figura 2.1: Defeito provocado por falta de adesividade; entroncamento da Rua do Comércio com RS - 342, próximo ao Campus da UNIJUÍ.

2.2 Materiais para Concreto Asfáltico

2.2.1 Ligante Asfáltico

O cimento asfáltico é o asfalto obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos, podendo ser obtido por destilação do petróleo em refinarias ou do asfalto natural encontrado em jazidas. O cimento asfáltico de petróleo recebe o símbolo CAP e o cimento asfáltico natural recebe o símbolo CAN. São semi-sólidos à temperatura ambiente, e necessitam de aquecimento para terem consistência apropriada ao envolvimento de agregados, possuem características de flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis.

Os cimentos asfálticos de petróleo são classificados pelo seu “grau de dureza” retratado no ensaio de penetração ou pela sua viscosidade. A penetração de um CAP é definida como a distância em décimos de milímetro que uma agulha padronizada penetra verticalmente em uma amostra de cimento asfáltico, sob condições especificadas de carga, tempo e temperatura. Quanto menor a penetração, “mais .duro” é o cimento asfáltico.

O cimento asfáltico pode ser considerado um material viscoelástico, por apresentar comportamento elástico e viscoso simultaneamente, quando submetido a temperaturas intermediárias (BERTOLLO, 2002). Em altas temperaturas (acima de

100°C), o cimento asfáltico atua como um fluido viscoso. Em baixas temperaturas (abaixo de 0°C), o cimento asfáltico torna-se um sólido elástico, atuando como uma borracha: quando recebe um carregamento, o material se deforma; quando o carregamento é retirado, o material volta ao estado original.

Durante os serviços de pavimentação, os cimentos asfálticos devem apresentar as seguintes características:

- o devem tornar-se suficientemente líquidos para facilitar a mistura com os agregados pétreos e o lançamento na pista;
- o após o lançamento, devem tornar-se suficientemente sólidos para permitir que as camadas asfálticas de pavimentação resistam às ações das cargas do tráfego, mesmo sob altas temperaturas, sem sofrerem deformações excessivas ou prematuras;
- o sob baixas temperaturas, devem possuir flexibilidade suficiente para impedir a desintegração e/ou o aparecimento de trincas nas camadas asfálticas.

2.2.2 Agregado

Os materiais pétreos usados em pavimentação normalmente conhecidos sob a denominação genérica de agregados, podem ser naturais ou artificiais. Os primeiros são aqueles utilizados como se encontram na natureza, como o pedregulho e os seixos rolados, ao passo que os segundos compreendem os que necessitam uma transformação física e química do material natural para sua utilização, como a escória e a argila expandida (PINTO, 1998).

Os agregados representam a maior parcela constituinte de um pavimento, chegando a valores superiores a 90% em peso do conjunto asfalto agregado. Logo, as propriedades dos agregados utilizados nas misturas asfálticas preparadas a quente são muito importantes para o desempenho dos pavimentos.

Defeitos no pavimento, como desagregação e deformação permanente, podem estar diretamente relacionados à escolha inadequada dos agregados. Deste modo, é fundamental que os agregados possuam propriedades geométricas físico-químicas e mecânicas adequadas e que garantam o bom desempenho do pavimento.

Os agregados usados em pavimentação podem ser classificados segundo a natureza, tamanho e distribuição dos grãos conforme apresentados a seguir:

✓ **Quanto à natureza das partículas:**

○ Agregados naturais são constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo ou produzidos por processos de britagem: pedregulhos, seixos, britas, areias, entre outros.

○ Agregados artificiais são aqueles em que os grãos são provenientes de sub produtos de processo industrial por transformação física e química do material natural: escória de alto forno, argila calcinada, argila expandida, entre outros.

✓ **Quanto ao tamanho individual dos grãos:**

○ Agregado graúdo é o material retido na peneira nº 10 (2,0mm): britas, cascalhos, seixos.

○ Agregado miúdo é o material que passa na peneira nº 10 (2,0mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,074mm): pó-de-pedra, areia.

○ Agregado de enchimento ou material de enchimento (fíler) é o que passa pelo menos 65% na peneira nº 200 (0,074mm): cal extinta, cimento portland, pó de chaminé.

Os agregados graúdos, miúdos e o material de enchimento são não plásticos e nem inertes em relação aos demais componentes de uma mistura de agregados.

✓ **Quanto à distribuição ou graduação dos grãos:**

○ Agregado de graduação densa é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, principalmente na peneira nº 200, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

○ Agregado de graduação aberta é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, principalmente na peneira nº 200, para preencher os vazios entre as partículas maiores.

○ Agregado tipo macadame é aquele que possui partículas de um único tamanho. Trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é aproximadamente o dobro do diâmetro mínimo.

2.2.3 Fíler

O fíler, ou material de enchimento, tem recebido dos pesquisadores uma atenção especial devido à importância que essa fração tem demonstrado ter nas

características das misturas, e conseqüentemente, no desempenho dos concretos asfálticos. É um material que possui a maior parte de suas partículas (no mínimo 65%) com dimensão nominal inferior a 0,075 mm. Segundo ISHAI & CRAUS (citado por BERTOLLO, 2002) uma parcela do fíler atua como material inerte e, preenchendo vazios; a outra parcela, denominada fíler ativo, fica em suspensão no ligante asfáltico.

Estudos conduzidos por TAYEBALI et al (citado por BERTOLLO, 2002) indicam que o aumento da quantidade de fíler nas misturas asfálticas não compromete o desempenho em termos de deformação permanente. Ao contrário, resultados do estudo mostram que o aumento da quantidade de alguns tipos de fíler, dentro de certos limites, tem efeito benéfico em termos de deformação permanente, por aumentar a rigidez do ligante asfáltico.

2.3 Concreto Asfáltico

São inúmeras as variáveis que influenciam as propriedades de uma mistura, conforme apresentado no Quadro 2.1.

QUADRO 2.1: Variáveis que afetam as propriedades da mistura

| <i>Propriedade</i> | <i>Definição</i> | <i>Exemplo de variáveis de mistura que têm influência</i> |
|----------------------------|---|---|
| Rigidez | $S_{mix}(t, T) = \sigma/\varepsilon$ relação entre tensão e deformação à determinada temperatura e tempo de carregamento | granulometria rigidez do asfalto grau de compactação sensibilidade à água teor de ligante |
| Estabilidade | resistência à deformação permanente (geralmente a altas temperaturas e longos tempos de carregamento) | textura sup. do agregado granulometria rigidez do asfalto grau de compactação sensibilidade à água teor de ligante |
| Durabilidade | Resistência ao intemperismo (ar, água) e a ação abrasiva do tráfego | teor de ligante granulometria grau de compactação sensibilidade à água |
| Resistência à fadiga | Abilidade da mistura deformar sob carregamento repetido sem romper | granulometria teor de ligante grau de compactação rigidez do asfalto sensibilidade à água |
| Características de fratura | Resistência da mistura sobre aplicação de carga | granulometria tipo de agregado teor de ligante grau de compactação rigidez do asfalto sensibilidade à água |
| Atrito | Abilidade da mistura de prover adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado | textura do agregado e resistência ao polimento granulometria teor de ligante |
| Permeabilidade | Abilidade do ar, água e vapor d'água mover-se através da mistura | granulometria teor de ligante grau de compactação |

(Fonte: Monismith *et al.*, 1989)

Hunter (1994) separa de forma bem clara, dentro de certos limites, o comportamento das misturas betuminosas como dependentes das características dos agregados, (características de deformabilidade plástica) e do ligante (características

de fadiga). Torna-se evidente a importância da seleção destes materiais, bem como sua interação, para o bom desempenho da mistura final. Na Figura 2.2 está apresentada uma tentativa de quantificação do percentual de influência de agregados e ligante para cada uma das patologias mais comuns em pavimentos asfálticos.

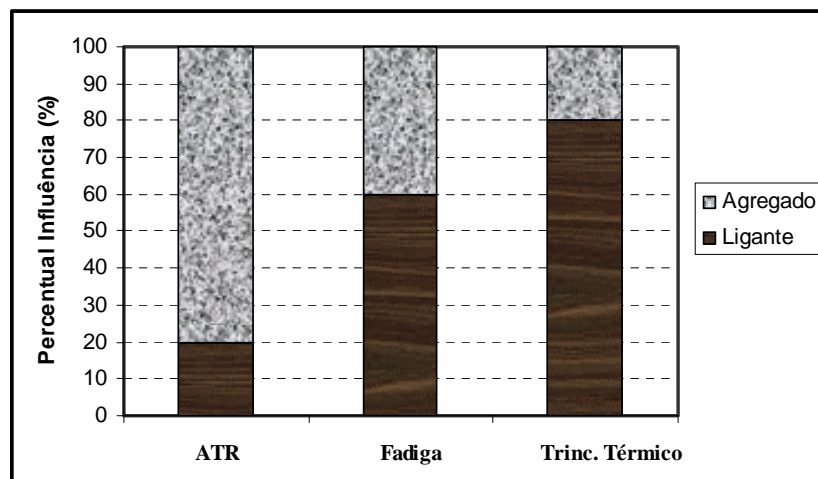


Figura 2.2: Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ (Fonte: FHWA 2002)

2.3.1 Dosagem de Concreto Asfáltico

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).

Os principais métodos de projeto são:

- **Método Marshall:** É baseado nas medidas de estabilidade e fluência Marshall, além de propriedades volumétricas da mistura.
- **Método Hubbard-Field:** Este ensaio foi um dos primeiros à 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:** 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 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 et al, 2000).

- **Método triaxial de Smith:** 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.

Cada um desses métodos possui critérios próprios que objetivam o estabelecimento de relações entre os ensaios de laboratório e os resultados obtidos no campo, sob condições usuais de serviço.

2.3.2 Método Marshall

O método Marshall foi originalmente desenvolvido na década de 1930 por Bruce G. Marshall do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Mississippi, EUA – Mississippi State Highway Department – conforme SIDDIQUI et al (citado por OGURTSOVA et al, 1999).

Este método foi idealizado por seu autor para a determinação da quantidade ótima de ligante betuminoso a ser utilizada numa mistura betuminosa. O critério usado por Marshall, para a obtenção desse parâmetro, baseava-se nos resultados da estabilidade, obtidos num ensaio de compressão diametral.

A simplicidade, rapidez de execução e o baixo custo dos equipamentos requeridos pelo ensaio Marshall, proporcionaram a propagação e a adoção do método por diversos organismos rodoviários do mundo todo, inclusive no Brasil.

O Método Marshall, mais utilizado no Brasil, consiste inicialmente em estabelecer uma composição granulométrica de agregado que se enquadre numa faixa especificada. Em seguida, procura-se determinar a quantidade de cimento asfáltico que, misturado ao agregado, proporcione uma boa mistura, ou seja,

satisfazendo os requisitos das especificações. A dosagem de misturas asfálticas é feita considerando-se valores admissíveis empíricos para a estabilidade e fluência. Estabilidade pode ser definida como a capacidade da mistura em deformar-se (plasticamente) pouco sob ação das cargas. A fluência pode ser definida como a deformação lenta sofrida pela mistura compactada quando submetida a uma tensão constante.

3. METODOLOGIA

3.1 Programa Experimental

O planejamento do experimento contempla a dosagem de três misturas em concreto asfáltico através da Metodologia Marshall, denominadas de mistura de referência, mistura com cal e mistura com cimento, para determinação do teor ótimo de ligante.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as composições de cada uma das misturas estudadas.

Portanto foi substituído 1,5% do pó de pedra pela mesma quantidade de cal e cimento, denominados de fíler. Se considerarmos o conceito de fíler como material passante na peneira 200, a mistura de referência também possui uma quantidade de fíler.

Tabela 3.1: Composição das misturas estudadas

| Denominação | % Brita 1 | % Pedrisco | % Pó de Pedra | % Areia Fina | % Fíler | % Pass #200 |
|--------------------|------------------|-------------------|----------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| referência | 11,0 | 41,0 | 40,0 | 8,0 | 0,0 | 7,0 |
| cal | 11,0 | 41,0 | 38,5 | 8,0 | 1,5 | 7,1 |
| cimento | 11,0 | 41,0 | 38,5 | 8,0 | 1,5 | 8,3 |

Após esta etapa foram moldadas amostras no teor ótimo de ligante, sendo três amostras para cada uma das misturas estudadas, para verificação da resistência à tração e módulo de resiliência. Foram preparados, também, seis corpos-de-prova para cada uma das misturas para verificação da adesividade (dano induzido por umidade) – Metodologia Lottman Modificada,

3.2 Descrição dos Materiais Utilizados

A seguir são apresentados os materiais empregados no estudo.

3.2.1 Agregados Minerais

O agregado mineral utilizado nesta pesquisa é uma rocha basáltica da formação Serra Geral, semelhante à encontrada em outros pontos do estado e considerada a mais representativa desta região do país. Foi utilizada também areia de várzea, extraída na região de Santa Maria – RS. A localização da jazida e a

representatividade do derrame basáltico no estado do Rio Grande do Sul podem ser observados na Figura 3.1. O derrame basáltico cobre aproximadamente 54% do território gaúcho.

Segundo ABGE (1998) os basaltos são rochas ígneas vulcânicas mais abundantes e sua maior ocorrência é na forma de derrames. No Brasil, constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, onde perfazem mais de 90% das rochas vulcânicas aí existentes. A mineralogia essencial é o plagioclásio cálcico (labradorita) (35-50%), augita (20-40%), magnetita ou ilemita (5-10%) e quantidades muito variáveis de matriz vítrea. A textura é afanítica, microgranular, por vezes amigdaloidal.

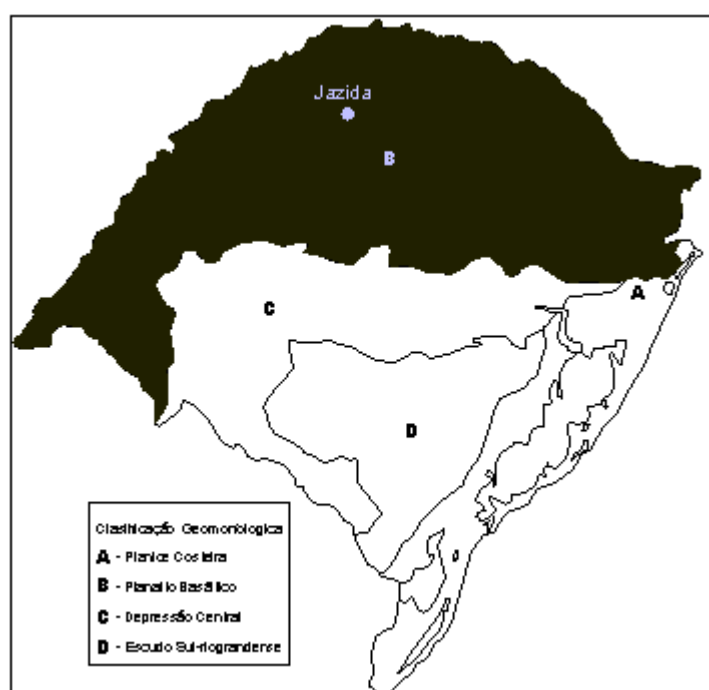


Figura 3.1: Localização da jazida e do derrame basáltico

Na Figura 3.2 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados utilizados, calculadas a partir da média de duas determinações. As fichas de ensaio encontram-se no Anexo I.

Na Tabela 3.2 são apresentados, os índices de lamelaridade dos agregados utilizados no estudo. Nota-se um alto valor de lamelaridade, visto que o valor recomendado para o projeto (DAER ESP 16/01) é no máximo de 50%.

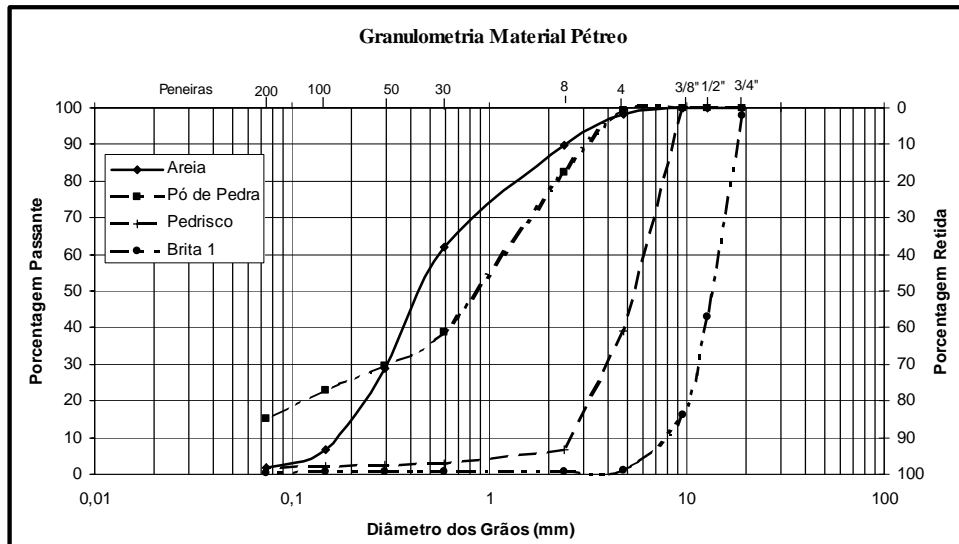


Figura 3.2: Curvas Granulométricas dos agregados utilizados no estudo

Tabela 3.2: Índice de lamelaridade

| Propriedade | Método | Brita 1 | Pedrisco |
|------------------------|-------------|---------|----------|
| Índice de Lamelaridade | DAER 108/01 | 55,66 | 67,45 |

3.2.2 Cimento Asfáltico

O CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) utilizado na pesquisa foi o CAP 20 da Refinaria Alberto Pasqualini. As características do ligante utilizado estão sumarizadas na Tabela 3.3. A caracterização do ligante foi feita pela Ipiranga Asfaltos.

Tabela 3.3: Características do CAP utilizado

| <i>Propriedade</i> | <i>Método</i> | <i>Unid</i> | <i>Especificação CAP 20</i> | <i>CAP 20</i> | <i>CAP 20 (Após o ECA¹)</i> |
|---|-----------------------|-------------------|-----------------------------|---------------|--|
| Ponto de amolecimento | NBR 6560 | °C | --- | 49,1 | 54,3 |
| Penetração (100g, 5s, 15°C) | NBR 6576 | dmm | 50 mín. | 20 | 14 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) | NBR 6576 | dmm | --- | 56 | 26 |
| Penetração (100g, 5s, 35°C) | NBR 6576 | dmm | --- | 161 | 75 |
| Índice de Penetração | --- | --- | --- | -0,98 | -1,00 |
| Viscosidade Absoluta 60°C | NBR 5847 | P | 2000 a 3500 | 2270 | 7530 |
| 135°C | --- | | --- | 3,4 | --- |
| 145°C | --- | | --- | 2,1 | --- |
| 155°C | --- | | --- | 1,4 | --- |
| Viscosidade Saybolt-Furol 135°C | MB 517 | ssf | 120 mín | 158 | 231,7 |
| 145°C | | | --- | 98,2 | 143,7 |
| 155°C | | | 30 – 150 | 66,5 | 89,4 |
| 165°C | | | --- | 47,1 | 58,0 |
| 177°C | | | --- | 32,6 | 40,8 |
| n/n | --- | --- | --- | 3,32 | |
| Recuperação Elástica (10°C, 20cm) | --- | % | --- | 8,30 | --- |
| Ductilidade 25°C | NBR 6293 | cm | 20 mín. | >120 | >120 |
| Densidade Relativa (25°C/25°C) | DNER – DPT M 16-64 | g/cm ³ | --- | 1,0731 | --- |
| Ponto de Fulgor | NBR 11341 | °C | 235 mín. | 297 | |
| Ponto de Ruptura Fraas | --- | - 10°C | --- | -12,0 | -7,00 |
| Efeito Calor e Ar, Penetração Original | --- | % | --- | 46,5 | |
| Efeito Calor e Ar, Variação em Peso | MB 425 | % | 1,0 máx. | 0,4 | |
| Teor de Betume, % em Peso | MB 166 | % | 99,5 mín. | 100 | --- |

Nota: ¹ ECA – Efeito Calor e AR

3.2.3 Fíler Utilizado

Nas misturas estudadas, foram adicionados dois tipos de fíler. Na mistura com adição de cal foi utilizada a Cal Hidratada, conhecida comercialmente por Primor Extra, do tipo CH II. Na mistura com adição de cimento foi utilizado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI), tipo CP-V. Foi caracterizado também a densidade dos fílers e determinado o módulo de finura do cimento. Os resultados das análises granulométricas encontram-se no Anexo I.

3.3 Ensaios Realizados

3.3.1 Metodologia Marshall

A seguir é descrito, de forma sucinta, o processo de moldagem de corpos-de-prova de misturas betuminosas através do Método Marshall:

- (a) preparação e separação de material granular para a confecção de no mínimo de 15 corpos de prova (3 para cada teor de ligante);
- (b) estimativa do percentagem ótima de ligante;
- (c) moldagem por compactação dinâmica, com o equipamento de Marshall dos ternos de corpos de prova com os teores de ligante estimados;
- (d) extração dos corpos de prova dos moldes cilíndricos e cura, ao ar livre, durante 24 horas;
- (e) pesagem e cubicagem dos corpos de prova para a determinação dos elementos para o cálculo de suas características físicas [D_A (massa específica aparente), V_V (%) (volume de vazios) e RBV(%) (relação betume vazios)];
- (f) imersão dos corpos de prova em banho-maria, a 60°C, durante 30 minutos, após as amostras são imediatamente submetidos ao ensaio Marshall, conforme Figura 3.3, para determinação de suas características mecânicas [(E) estabilidade e (F) fluência];
- (g) plotagem das curvas de variação de E, F, D_A , V_V (%) e RBV(%), em função das percentagens de ligante empregadas e determinação da percentagem ótima de ligante em função dos critérios definidos pelo DNER.



Figura 3.3: Prensa para rompimento dos corpos-de-prova Marshall do LEC – Laboratório de Engenharia Civil

A temperatura de mistura ficou entre 150 e 156°C e a temperatura de compactação, entre 138 e 143°C. Estas temperaturas foram indicadas pelo ensaio de viscosidade Seybolt Furol. As amostras foram preparadas em recipientes individuais e aquecidas em estufa; a compactação foi realizada com compactador manual, com 75 golpes por face de cada amostra.

Os agregados utilizados no estudo foram separados por peneira, sendo lavados para eliminação do pó que fica aderido nas partículas maiores ($\leq \#200$), conforme mostra a Figura 3.4, permitindo assim que todas as misturas fossem moldadas com as frações exatas de cada peneira.



Figura 3.4: Agregados utilizados no estudo, separados por peneira

3.3.2 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência das amostras foi determinado através das prescrições do DNER-ME 133/94. O ensaio foi realizado no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Resiliência (segundo o dicionário “Aurélio”) é definida como a propriedade pela qual a energia armazenada em um corpo deformado é devolvida quando cessa a tensão causadora da deformação elástica. Portanto, o termo deformação resiliente passou a significar a deformação recuperável dos pavimentos quando submetidos a carregamentos repetidos, isto, como uma forma de distingui-la daquelas que ocorrem em outras estruturas onde as cargas não são repetidas tão aleatoriamente quanto à frequência, duração e intensidade como a do tráfego de veículos.

Utilizaram-se para este ensaio, corpos-de-prova de 10,2 cm de diâmetro e alturas variáveis, moldados conforme a Metodologia Marshall. Os ensaios foram realizados a temperatura de 25°C. O equipamento utilizado é composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. Com o carregamento de, no máximo 30% da carga de ruptura, a amostra sofre deformações horizontais, as quais são medidas através de um transdutor tipo L.V.D.T. ligado a um microcomputador. O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,30. Para o cálculo foi utilizado a equação 3.1:

$$Mr = \frac{P}{\Delta.h} \cdot (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (3.1)$$

onde: M_r é o módulo de resiliência dado em MPa, P é a carga aplicada, em N, Δ a deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga, em cm, h a altura do corpo-de-prova, também em cm e μ o coeficiente de Poisson.

3.3.3 Resistência à Tração – Tração por Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta, conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido inicialmente pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova de concreto através de solitação estática.

O ensaio foi realizado no LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral realizadas em amostras com 10,20 cm de diâmetro e altura variável seguiram as prescrições do DNER – ME 138/94, sendo realizados a temperatura de 25°C. Utilizou-se uma prensa com capacidade para 70kN, marca Contenco, seguindo-se as prescrições da norma DNER-ME 138/86. A formulação utilizada para o cálculo de R_t foi a seguinte:

$$R_t = \frac{2F}{\pi.d.h} \quad (3.1)$$

onde: R_t é a resistência à tração por compressão diametral, F é a força aplicada, h e d são a altura e o diâmetro do corpo-de-prova, respectivamente.

3.3.4 Ensaio de Adesividade – Metodologia Lottman Modificada

Este ensaio avalia a propriedade de adesividade em misturas asfálticas, considerando o efeito deletério de água em amostras cilíndricas preparadas através da Metodologia Marshall com volume de vazios de aproximadamente 7% ($\pm 1\%$). A análise é feita pela relação entre a resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento. O ensaio foi realizado conforme a norma AASHTO T 283-89).

O valor obtido desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas face a adesividade ligante/agregado e também para verificar o efeito da adição de aditivos químicos ou pulverulentos na adesividade da mistura.

A ordem do ensaio é a seguinte:

- i) preparam-se seis amostras, seguindo a Metodologia Marshall, com volume de vazios entre 6% e 8% separam-se em dois grupos com três amostras cada;
- ii) o primeiro grupo é submetido ao ensaio de resistência à tração (ensaio de tração por compressão diametral – ensaio brasileiro). Para realização dos ensaios à tração foi utilizada uma prensa tipo Marshall, marca Solotest, conforme mostra a Figura 3.5, após a imersão em água à 25°C por duas horas em sacos plásticos impermeáveis; determina-se o valor Rt_1 (média dos três valores);
- iii) as amostras do segundo grupo são, inicialmente, saturadas (o grau de saturação deve ficar entre 55% e 80%). Esta saturação é conseguida com a aplicação de pressão de vácuo;
- iv) acondicionam-se os corpos-de-prova em sacos plásticos com aproximadamente 3ml de água destilada dentro de cada saco;
- v) colocam-se, então, os corpos-de-prova sob refrigeração à temperatura de -18°C durante um período de 16 horas;
- vi) as amostras são removidas da refrigeração e imediatamente imersas em banho (em água destilada) à temperatura de 60°C por um período de 24 horas;
- vii) transfere-se, cuidadosamente, as amostras para um banho à temperatura de 25°C por um período de 2 horas;
- viii) rompem-se os corpos-de-prova submetidos ao condicionamento e determina-se o valor de Rt_2 ; ix) calcula-se, através do quociente entre Rt_2 e Rt_1 (em percentagem), o valor de RRT – Resistência Retida à Tração.

Este ensaio pode, também, ser realizado com amostras extraídas da pista. O valor encontrado na literatura como referência de misturas com bom desempenho quanto a adesividade é de 70%, e a Metodologia Superpave recomenda o valor de 80% como alvo.



Figura 3.5: Prensa para rompimento dos corpos-de-prova à tração do LEC

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Mistura de referência

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a mistura de referência. As fichas resumos encontram-se no Anexo II.

Na Figura 4.1 está representada a percentagem de vazios *versus* percentagem de ligante, sendo que o volume de vazios diminuiu com o teor de ligante. O teor de ligante de projeto, considerando 4,00% de vazios foi de 5,95%. O valor de 4,00% de vazios foi adotado em função de ser a média da especificação (3 a 5%).

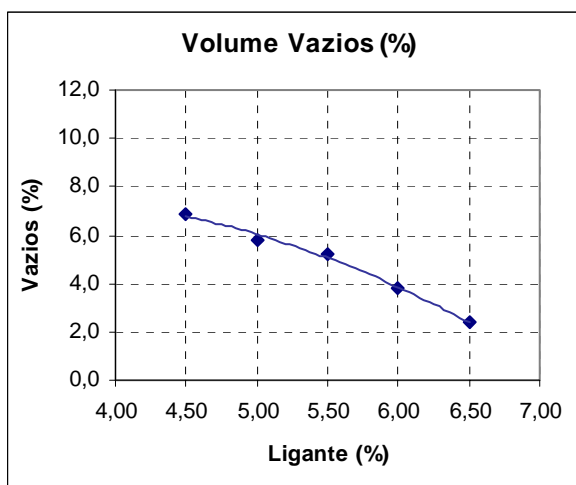


Figura 4.1: Curva do Volume de Vazios, para mistura de referência

Estão representados, na Figura 4.2, a percentagem de vazios do agregado mineral, atingindo o valor 18,20% para o teor de ligante de 5,95%. A especificação recomenda valores maiores que 16.

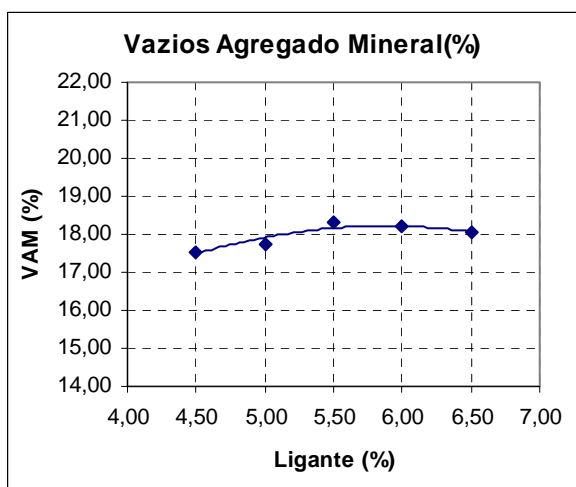


Figura 4.2: Curva dos vazios do agregado mineral, para mistura de referência

Verifica-se na Figura 4.3 que a relação betume/vazios aumenta com o acréscimo do teor de ligante para a mistura de referência, o que já era esperado. A especificação fixa valores entre 75 e 82. O valor de projeto foi de 79.

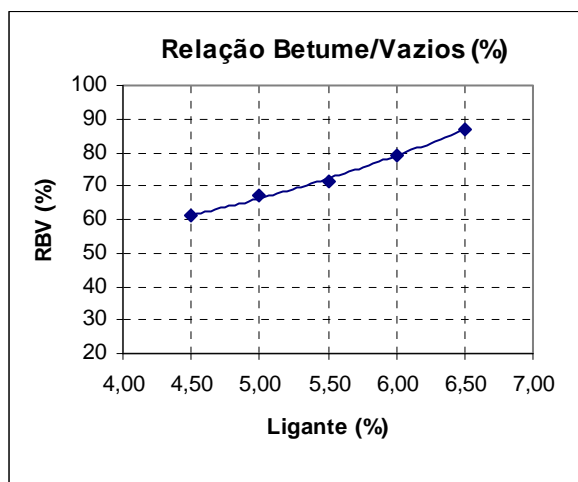


Figura 4.3: Curva da relação betume/vazios, para mistura de referência

Na Figura 4.4 esta representada a curva da massa específica aparente da mistura, podendo-se observar a tendência do aumento da densidade com o aumento do teor de ligante. Este parâmetro é utilizado para o controle de qualidade do CBUQ em campo.

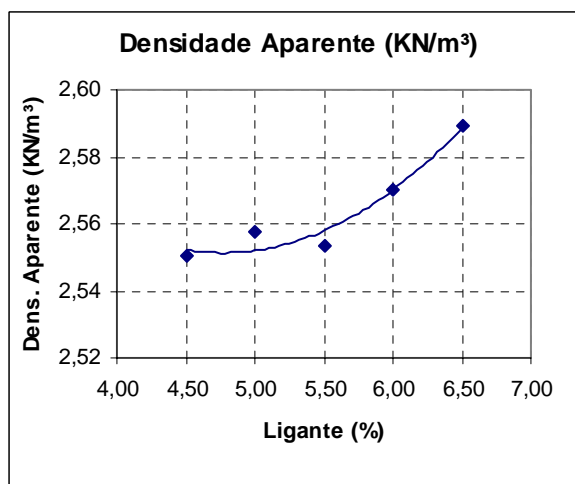


Figura 4.4: Curva da massa específica aparente para mistura de referência

Está representada na Figura 4.5, a curva de estabilidade para a mistura de referência, com os valores variando entre 985 e 1372 kgf. A especificação recomenda valores acima de 800 kgf, como desejável para a mistura.

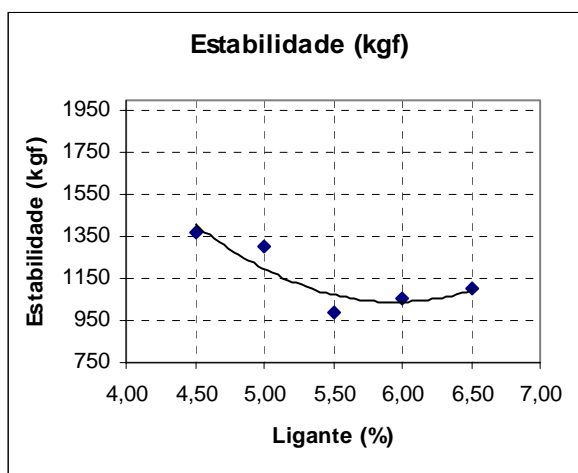


Figura 4.5: Curva de estabilidade para mistura de referência

Na Figura 4.6, está representada a curva da fluência para a mistura de referência, sendo que os valores variaram de 6 a 8 ¹/₁₀₀in, sendo que o valor mínimo especificado para fluência é de 8 ¹/₁₀₀in e o máximo de 18.

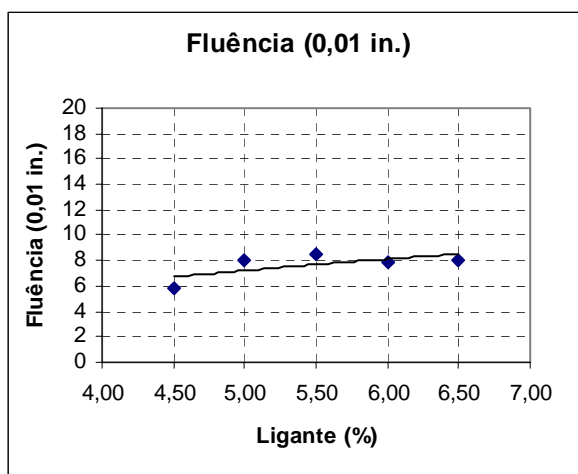


Figura 4.6: Curva de Fluência (¹/₁₀₀in) para mistura de referência

Está representada na Figura 4.7, a curva da relação estabilidade/fluência, onde se pode observar uma pequena dispersão do valor para o teor de 5,00% de ligante.

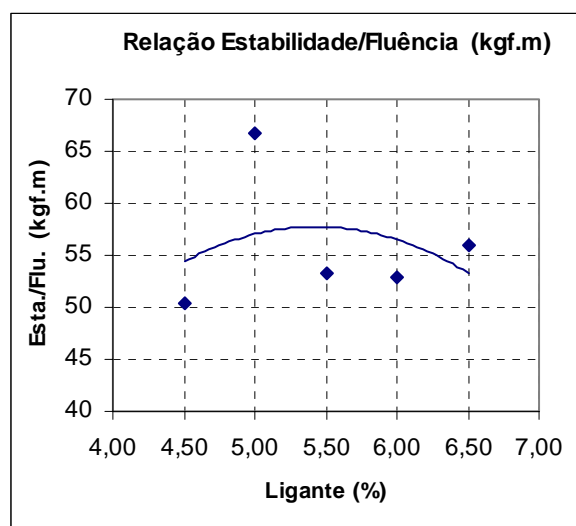


Figura 4.7: Curva da relação estabilidade/fluência para mistura de referência

Na Tabela 4.1, encontram-se sumarizados, os resultados dos ensaios de módulo de resiliência sendo que, para o cálculo foi utilizado o valor do coeficiente de Poisson igual a 0,30.

Tabela 4.1: Resultado dos ensaios de módulo de resiliência da mistura de referência

| Nº CP | %CAP | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Leituras de Mr (3 em cada posição) | | | Mr (MPa) | Mr Médio (MPa) |
|--------|------|---------------|-------------|------------------------------------|------|------|----------|----------------|
| | | | | | | | | |
| 01 REF | 5,95 | 10,20 | 6,08 | 2478 | 2580 | 2276 | 2445 | 2724 |
| | | | | 3150 | 3489 | 2817 | | |
| 02 REF | 5,95 | 10,20 | 6,10 | 2645 | 2991 | 2606 | 2950 | |
| | | | | 2448 | 2439 | 2386 | | |
| 03 REF | 5,95 | 10,20 | 6,06 | 3366 | 2940 | 3093 | 2779 | |
| | | | | 2958 | 2349 | 2655 | | |

Através da Tabela 4.2 pode-se observar os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração.

Tabela 4.2: Resultado dos ensaios de resistência à tração da mistura de referência.

| Nº CP | %CAP | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Leitura | Carga (Kgf) | Rt Médio (MPa) |
|--------|------|---------------|-------------|---------|-------------|----------------|
| 01 REF | 5,95 | 10,20 | 6,08 | 519 | 1042 | 1,08 |
| 02 REF | 5,95 | 10,20 | 6,10 | 498 | 999 | |
| 03 REF | 5,95 | 10,20 | 6,06 | 554 | 1112 | |

Na Tabela 4.3, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de adesividade (dano induzido por umidade – Metodologia Lottman Modificada). Estão tabelados as médias dos valores de resistência à tração com e sem condicionamento.

Tabela 4.3: Resultados obtidos no ensaio de adesividade Lottman Modificado para mistura de referência

| Nº CP | Rt (sem cond.) (Mpa) | Rt (com cond.) (Mpa) | RRT (%) |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| 01 REF | 0,46 | 0,24 | 56 |
| 02 REF | 0,49 | 0,29 | |
| 03 REF | 0,54 | 0,30 | |

Nota: Rt – resistência à tração; RRT – Resistência Retida à Tração.

No Quadro 4.1 estão sumarizadas as propriedades finais da mistura de referência.

Quadro 4.1: Resumo dos resultados das propriedades finais da mistura de referência

| <u>Propriedade</u> | <u>ESP 16/91 DAER</u> | <u>Valor de Projeto</u> |
|--|------------------------------|--------------------------------|
| 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 (%) | >16 | 18,20 |
| Massa Máxima Teórica (KN/m ³) | --- | 2,67 |
| Massa Específica Aparente (KN/m ³) | 97% (mínimo) | 2,57 |
| Estabilidade (kgf) | >800 | 1050 |
| Fluência (1/100 in) | 8 a 16 | 8 |
| Resistência à Tração (MPa) | --- | 1,08 |
| Módulo de Resiliência (MPa) | --- | 2724 |
| Relação Mr/Rt (adm) | --- | 2522 |
| Relação Est/Fluência (kgf.m) | --- | 57 |
| Relação Fíler/Betume (%) | 0,6 a 1,6 (Superpave) | 1,17 |
| RRT (%) | Mín. 80% (Superpave) | 56 |

4.2 Mistura com cal

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a mistura com adição de 1,5% de cal. As fichas resumos encontram-se no Anexo II.

Na Figura 4.8 está representada a curva percentagem de vazios *versus* percentagem de ligante utilizada nas amostras, sendo que o volume de vazios diminuiu com o aumento do teor de ligante. O teor de ligante de projeto, considerando-se 4,00% de vazios, foi de 5,20%.

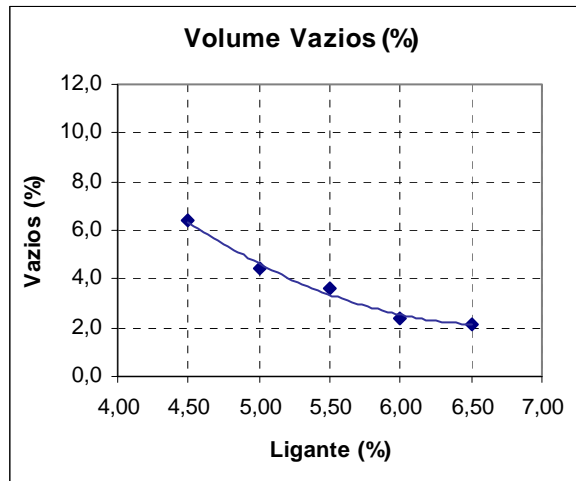


Figura 4.8: Curva do volume de vazios, para mistura com cal

Estão representados, na Figura 4.9, a percentagem de vazios do agregado mineral, atingindo o valor 16,90% para o teor de ligante de 5,50%.

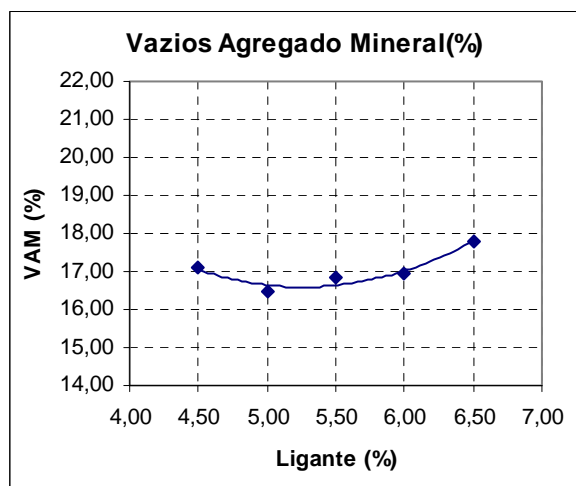


Figura 4.9: Curva dos vazios do agregado mineral, para mistura com cal

Verifica-se na Figura 4.10 que a relação betume/vazios aumenta com o acréscimo do teor de ligante para a mistura com adição de cal, o que já era esperado.

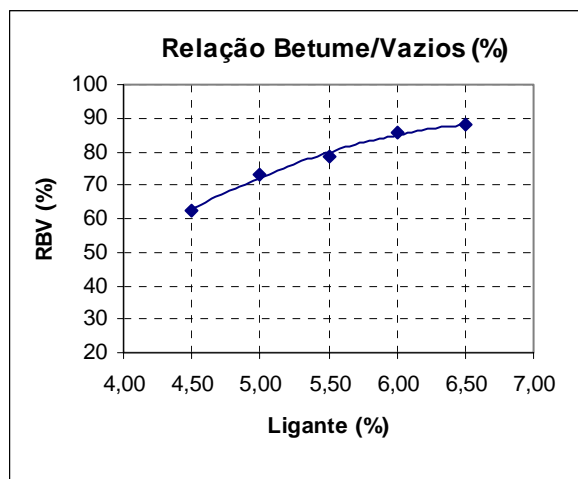


Figura 4.10: Curva da relação betume/vazios, para mistura com cal

Na Figura 4.11 esta representada a curva da massa específica aparente da mistura com adição de cal, podendo-se observar a tendência do aumento da densidade com o aumento do teor de ligante, sendo que para o teor de 6,50% houve um pequeno decréscimo. Este parâmetro é de grande importância, pois é utilizado no controle da qualidade do CBUQ em campo.

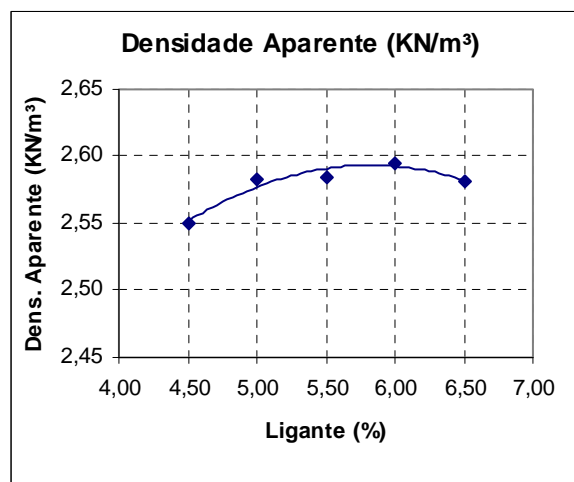


Figura 4.11: Curva da massa específica aparente para mistura com cal

Está representada na Figura 4.12, a curva de estabilidade para a mistura com cal, com os valores variando entre 900 e 1200 kgf. A especificação recomenda valores acima de 800 kgf, como desejável para a mistura. Portanto, todos os teores estão acima do mínimo especificado.

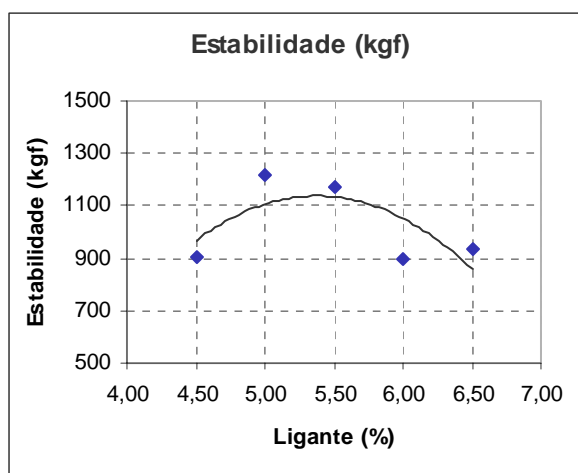


Figura 4.12: Curva de estabilidade para mistura com cal

Na Figura 4.13, está representada a curva da fluência para a mistura com cal, sendo que os valores variaram de 5 a 9 $\frac{1}{100}$ in, sendo que o valor mínimo especificado para fluência é de 8 $\frac{1}{100}$ in e o máximo de 18 $\frac{1}{100}$ in. Pode-se observar que para o teor ótimo de ligante (5,20%), a fluência foi de 6,8 $\frac{1}{100}$ in, ficando abaixo do valor especificado.

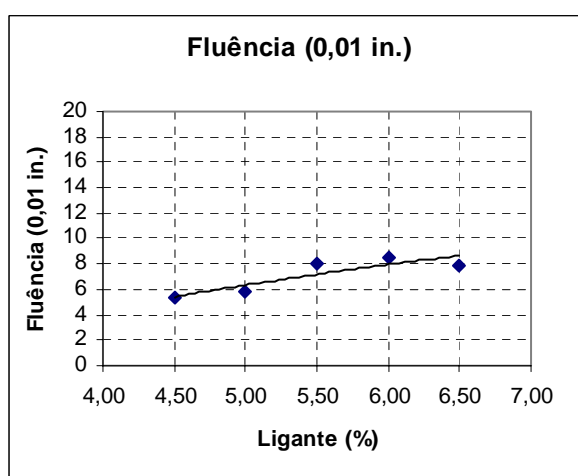


Figura 4.13: Curva de fluência ($\frac{1}{100}$ in) para mistura com cal

Está representada na Figura 4.14, a curva da relação estabilidade/fluência, onde se pode observar um aumento da relação para os teores iniciais, sendo que a partir do teor de 5,5% houve um decréscimo da relação.

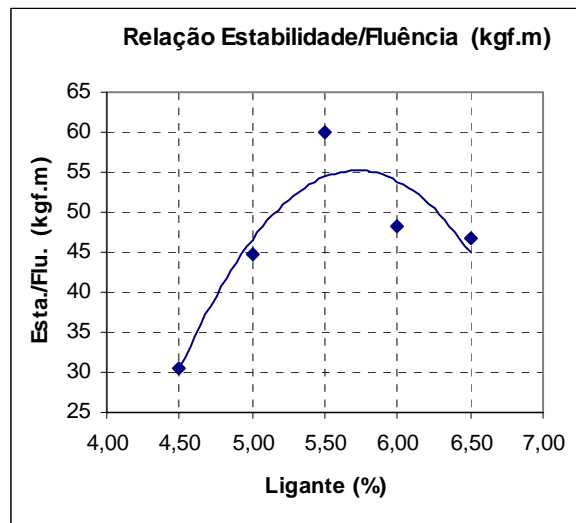


Figura 4.14: Curva da relação estabilidade/fluência para mistura com cal

Na Tabela 4.4, encontram-se sumarizados, os resultados dos ensaios de módulo de resiliência sendo que, para o cálculo foi utilizado o valor do coeficiente de Poisson igual a 0,30.

Tabela 4.4: Resultado dos ensaios de módulo de resiliência da mistura com cal

| Nº CP | %CAP | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Leituras de Mr (3 em cada posição) | | | Mr (MPa) | Mr Médio (MPa) |
|--------|------|---------------|-------------|------------------------------------|------|------|----------|----------------|
| | | | | | | | | |
| 01 CAL | 5,20 | 10,20 | 6,08 | 4433 | 4471 | 4106 | 3998 | 3652 |
| | | | | 3929 | 3285 | 3762 | | |
| 02 CAL | 5,20 | 10,20 | 6,06 | 3928 | 3413 | 3446 | 3491 | |
| | | | | 3791 | 3068 | 3300 | | |
| 03 CAI | 5,20 | 10,20 | 6,06 | 4604 | 3850 | 3352 | 3466 | |
| | | | | 3329 | 2974 | 2689 | | |

Através da Tabela 4.5 pode-se observar os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração.

Tabela 4.5: Resultado dos ensaios de resistência à tração da mistura com cal

| Nº CP | %CAP | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Leitura | Carga (Kgf) | Rt Médio (MPa) |
|--------|------|---------------|-------------|---------|-------------|----------------|
| 01 CAL | 5,20 | 10,20 | 6,08 | 583 | 1170 | 1,19 |
| 02 CAI | 5,20 | 10,20 | 6,06 | 554 | 1112 | |
| 03 CAI | 5,20 | 10,20 | 6,06 | 585 | 1174 | |

Na Tabela 4.6, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de adesividade (dano induzido por umidade – Metodologia Lottman Modificada). Estão tabelados as médias dos valores de resistência à tração com e sem condicionamento.

Tabela 4.6: Resultados obtidos no ensaio de adesividade Lottman Modificado para mistura com cal

| Nº CP | Rt (sem cond.) (Mpa) | Rt (com cond.) (Mpa) | RRT (%) |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| 01 CAL | 0,64 | 0,30 | 49 |
| 02 CAL | 0,64 | 0,34 | |
| 03 CAL | 0,73 | 0,35 | |

Nota: Rt – resistência à tração; RRT – Resistência Retida à Tração.

No Quadro 4.2 estão sumarizadas as propriedades finais da mistura com adição de cal.

Quadro 4.2: Resumo dos resultados das propriedades finais da mistura com cal

| <u>Propriedade</u> | <u>ESP 16/91 DAER</u> | <u>Valor de Projeto</u> |
|--|------------------------------|--------------------------------|
| Teor de Betume (%) | --- | 5,20 |
| Volume de Vazios (%) | 3 a 5 | 4,00 |
| Relação Betume Vazios (%) | 75 a 82 | 75,00 |
| Vazios do Agregado Mineral (%) | >16 | 16,60 |
| Massa Máxima Teórica (KN/m ³) | --- | 2,69 |
| Massa Específica Aparente (KN/m ³) | 97% (mínimo) | 2,58 |
| Estabilidade (kgf) | >800 | 1120 |
| Fluência (1/100 in) | 8 a 16 | 6,8 |
| Resistência à Tração (MPa) | --- | 1,19 |
| Módulo de Resiliência (MPa) | --- | 3652 |
| Relação Mr/Rt (adm) | --- | 3069 |
| Relação Est/Fluência (kgf.m) | --- | 51 |
| Relação Fíler/Betume (%) | 0,6 a 1,6 (Superpave) | 1,36 |
| RRT (%) | Mín. 80% (Superpave) | 49 |

4.3 Mistura com cimento

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a mistura com adição de 1,5% de cimento. As fichas resumos encontram-se no Anexo II.

Na Figura 4.15 está representada a curva percentagem de vazios *versus* percentagem de ligante utilizada nas amostras, sendo que o volume de vazios diminuiu com o aumento do teor de ligante. O teor de ligante de projeto, considerando-se 4,00% de vazios, foi de 5,45%.

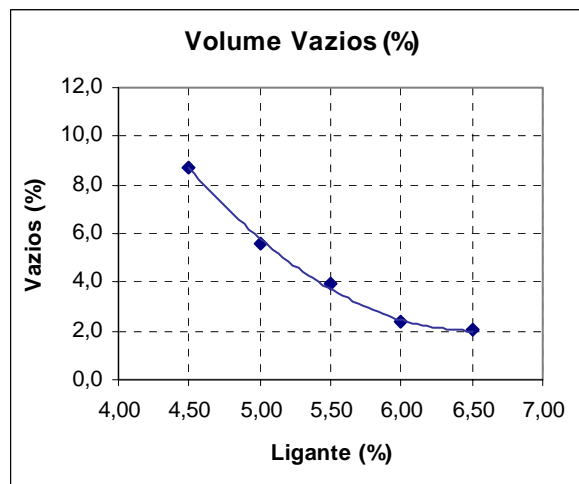


Figura 4.15: Curva do volume de vazios, para mistura com cimento

Estão representados, na Figura 4.16, a percentagem de vazios do agregado mineral, atingindo o valor 19,20% para o teor de ligante de 4,50% e 17,90% para 6,50% de ligante.

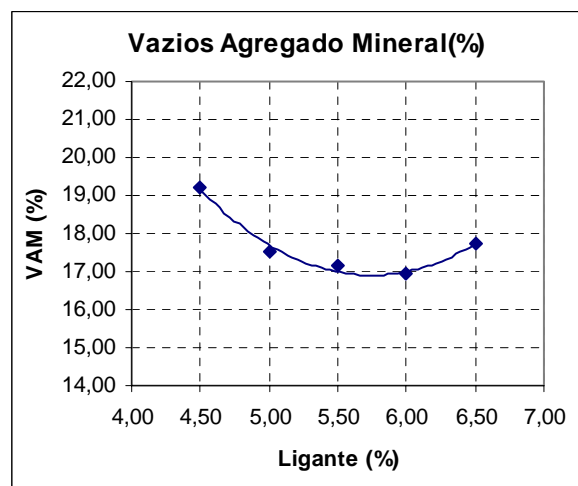


Figura 4.16: Curva dos vazios do agregado mineral, para mistura com cimento

Verifica-se na Figura 4.17 que a relação betume/vazios aumenta com o acréscimo do teor de ligante para a mistura com adição de cimento, o que já era esperado.

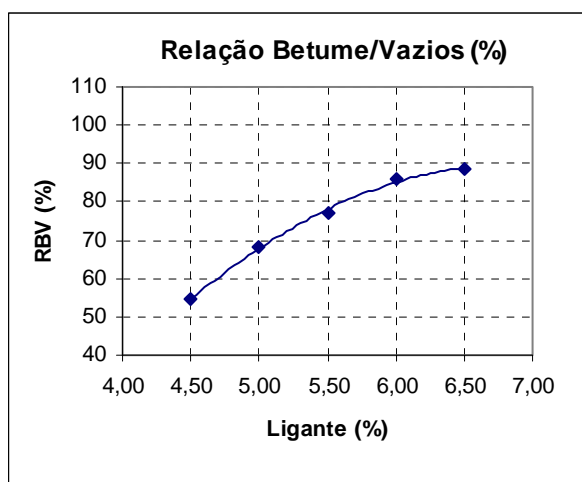


Figura 4.17: Curva da relação betume/vazios, para mistura com cimento

Na Figura 4.18 esta representada a curva da massa específica aparente da mistura com adição de cimento, podendo-se observar a tendência do aumento da densidade com o aumento do teor de ligante, sendo que para o teor de 6,50% houve um pequeno decréscimo, sendo que este parâmetro é de grande importância, pois é utilizado no controle da qualidade do CBUQ em campo.

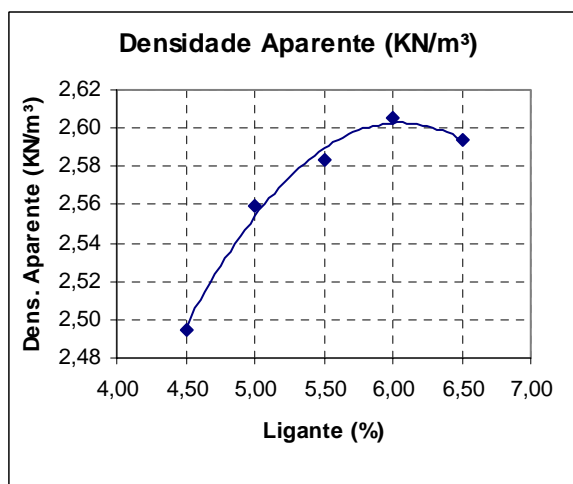


Figura 4.18: Curva da massa específica aparente para mistura com cimento

Está representada na Figura 4.19, a curva de estabilidade para a mistura com adição de cimento, sendo que todos os valores ficaram acima de 1000kgf. A especificação recomenda valores acima de 800 kgf.

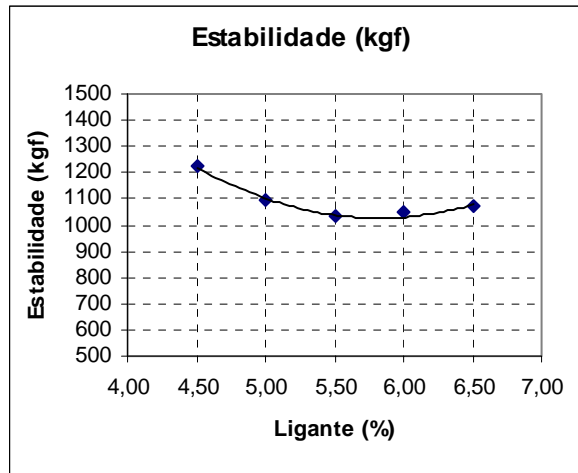


Figura 4.19: Curva de estabilidade para mistura com cimento

Na Figura 4.20, está representada a curva da fluência para a mistura com cimento, sendo que todos os valores ficaram acima de $12 \frac{1}{100}$ in, sendo que o valor mínimo especificado para fluência é de $8 \frac{1}{100}$ in e o máximo de $18 \frac{1}{100}$ in.

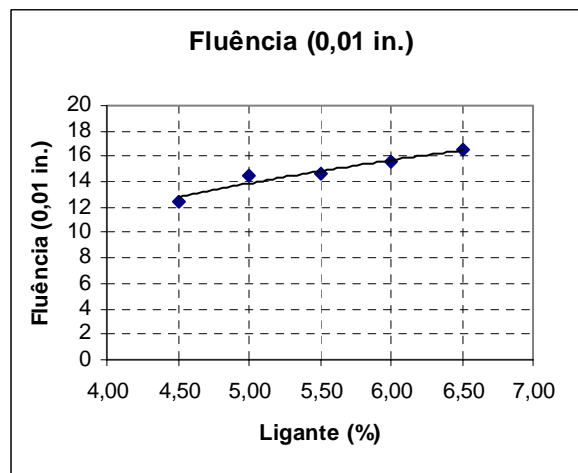


Figura 4.20: Curva de Fluência ($\frac{1}{100}$ in) para mistura com cimento

Está representada na Figura 4.21, a curva da relação estabilidade/fluência, onde se pode observar um aumento da relação com a elevação do teor de ligante.

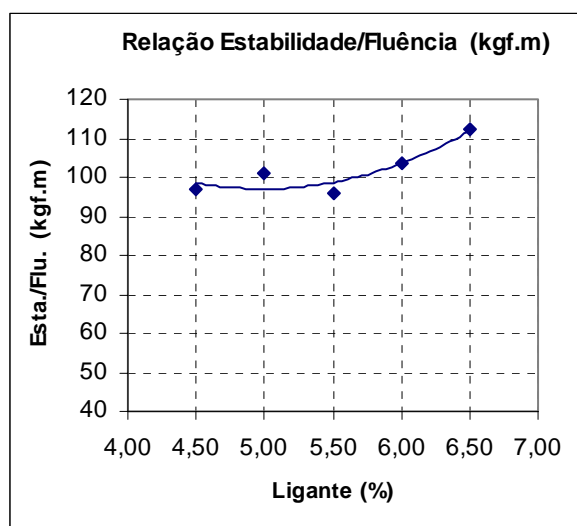


Figura 4.21: Curva da Relação estabilidade/fluência para mistura com cimento

Na Tabela 4.7, encontram-se sumarizados, os resultados dos ensaios de módulo de resiliência sendo que, para o cálculo foi utilizado o valor do coeficiente de Poisson igual a 0,30.

Tabela 4.7: Resultado dos ensaios de módulo de resiliência da mistura com cimento

| Nº CP | %CAP | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Leituras de Mr (3 em cada posição) | | | Mr (MPa) | Mr Médio (MPa) |
|-----------|------|---------------|-------------|------------------------------------|------|------|----------|----------------|
| | | | | | | | | |
| 01 CIM | 5,45 | 10,20 | 6,02 | 5027 | 5653 | 5848 | 5039 | 6789 |
| | | | | 5634 | 4054 | 4017 | | |
| 02 CIM | 5,45 | 10,20 | 5,96 | 6067 | 9124 | 9750 | 7445 | |
| | | | | 6699 | 6952 | 6079 | | |
| 03 CIM | 5,45 | 10,20 | 5,97 | 9089 | 9376 | 9330 | 7883 | |
| | | | | 6389 | 7138 | 5977 | | |

Através da Tabela 4.8 pode-se observar os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração.

Tabela 4.8: Resultado dos ensaios de resistência à tração da mistura com cimento

| Nº CP | %CAP | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Leitura | Carga (Kgf) | Rt Médio (MPa) |
|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| 01 CIM | 5,45 | 10,20 | 6,02 | 519 | 1042 | 1,36 |
| 02 CIM | 5,45 | 10,20 | 5,96 | 690 | 1385 | |
| 03 CIM | 5,45 | 10,20 | 5,97 | 737 | 1479 | |

Na Tabela 4.9, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de adesividade (dano induzido por umidade – Metodologia Lottman Modificada). Estão tabelados as médias dos valores de resistência retida à tração com e sem condicionamento.

Tabela 4.9: Resultados obtidos no ensaio de adesividade Lottman Modificado para mistura com cimento

| Nº CP | Rt (sem cond.) (Mpa) | Rt (com cond.) (Mpa) | RRT (%) |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| 01 CIM | 0,59 | 0,38 | 58 |
| 02 CIM | 0,62 | 0,37 | |
| 03 CIM | 0,68 | 0,35 | |

Nota: Rt – resistência à tração; RRT – Resistência Retida à Tração.

No Quadro 4.3 estão sumarizadas as propriedades finais da mistura de cimento.

Quadro 4.3: Resumo dos resultados das propriedades finais da mistura com adição de cimento.

| <u>Propriedade</u> | <u>ESP 16/91 DAER</u> | <u>Valor de Projeto</u> |
|--|------------------------------|--------------------------------|
| Teor de Betume (%) | --- | 5,45 |
| Volume de Vazios (%) | 3 a 5 | 4,00 |
| Relação Betume Vazios (%) | 75 a 82 | 78,00 |
| Vazios do Agregado Mineral (%) | >16 | 17,00 |
| Massa Máxima Teórica (KN/m ³) | --- | 2,69 |
| Massa Específica Aparente (KN/m ³) | 97% (mínimo) | 2,59 |
| Estabilidade (kgf) | >800 | 1035 |
| Fluência (1/100 in) | 8 a 16 | 15,2 |
| Resistência à Tração (MPa) | --- | 1,36 |
| Módulo de Resiliência (MPa) | --- | 6789 |
| Relação Mr/Rt (adm) | --- | 4992 |
| Relação Est/Fluência (kgf.m) | --- | 98 |
| Relação Fíler/Betume (%) | 0,6 a 1,6 (Superpave) | 1,51 |
| RRT (%) | Mín. 80% (Superpave) | 58 |

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo anterior, os resultados foram apresentados e analisados preliminarmente com o objetivo de identificar os fatores que exercem influência nas propriedades do Concreto Asfáltico. No entanto faz-se necessário uma comparação entre as misturas estudadas.

Na Figura 5.1 é apresentado o teor ótimo de ligante para cada uma das misturas estudadas, sendo que a mistura de referência obteve o maior consumo de ligante (5,95%), já as misturas com adição de fíler tiveram um consumo menor, o que se deve ao fato do fíler ativo ser incorporado ao ligante, aumentando seu volume. A mistura com adição de cal obteve teor ótimo de 5,20% e a mistura com adição de cimento teve como teor 5,45% de ligante.

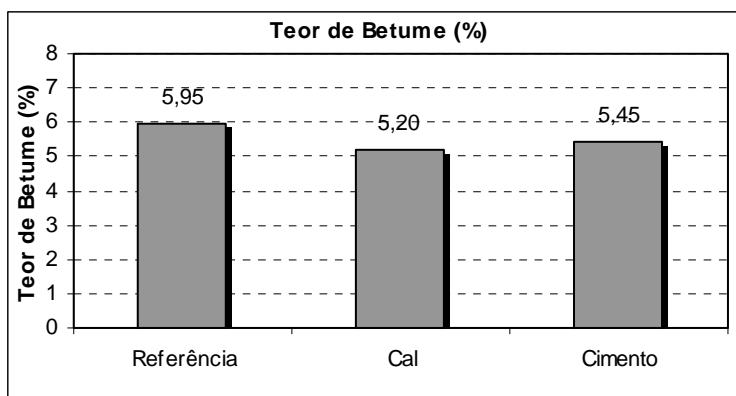


Figura 5.1: Resultado do teor de ligante para as três misturas estudadas.

Na Figura 5.2 esta representada a percentagem de vazios do agregado mineral das três misturas estudadas, apresentando 18,20% para a mistura de referência, 16,60% para a mistura com cal e 17,00% para a mistura contendo cimento. A especificação recomenda valores acima de 16,00%, portanto, as misturas encontram-se dentro da especificação.

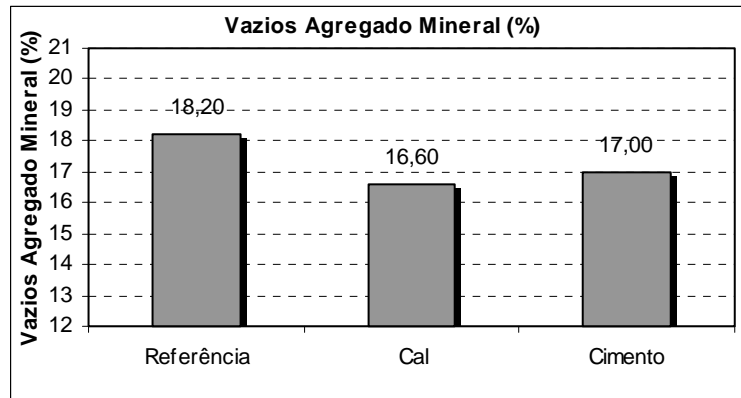


Figura 5.2: Resultado da percentagem de vazios do agregado mineral no teor ótimo para as três misturas estudadas.

Está representado na Figura 5.3, o resultado da relação betume vazios para as misturas estudadas. A mistura de referência obteve 79,00% e a mistura com adição de cimento 78,00%, enquanto a mistura com cal teve uma relação betume vazios de 75,00%, sendo que as três misturas ficaram com valores dentro da faixa especificada pelo DAER/RS (75 a 82%).

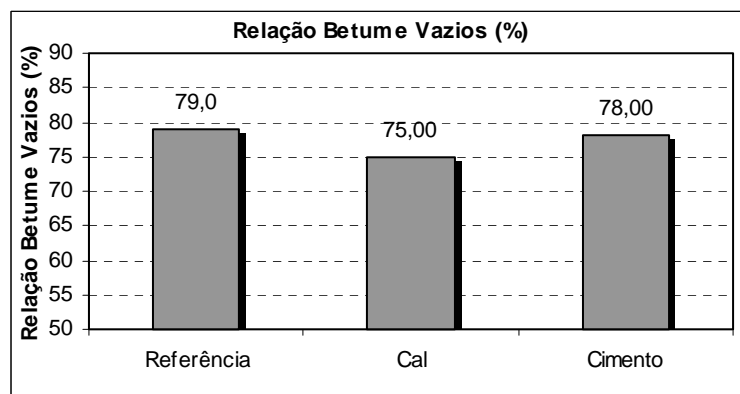


Figura 5.3: Resultado da relação betume vazios no teor ótimo para as três misturas estudadas.

Estão representadas, na Figura 5.4, as massas específicas aparentes para as misturas estudadas, sendo que a mistura de referência obteve massa específica aparente inferior as demais ($2,57 \text{ kN/m}^3$), enquanto as misturas com cal e cimento apresentaram $2,58$ e $2,59 \text{ kN/m}^3$ respectivamente.

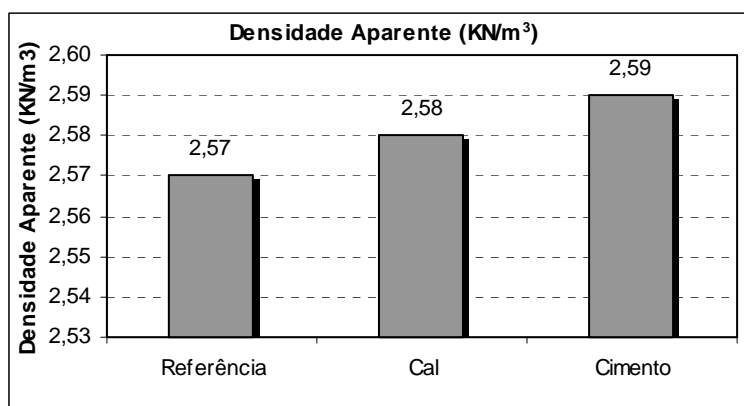


Figura 5.4: Resultado da massa específica aparente no teor ótimo para as três misturas estudadas.

Na Figura 5.5 estão representados os resultados da estabilidade para o teor ótimo de ligante das três misturas estudadas, sendo que os valores tiveram pequena dispersão, ficando todos acima do valor especificado pelo DAER que é de 800kgf, sendo a estabilidade do teor ótimo da mistura de referência de 1050kgf.

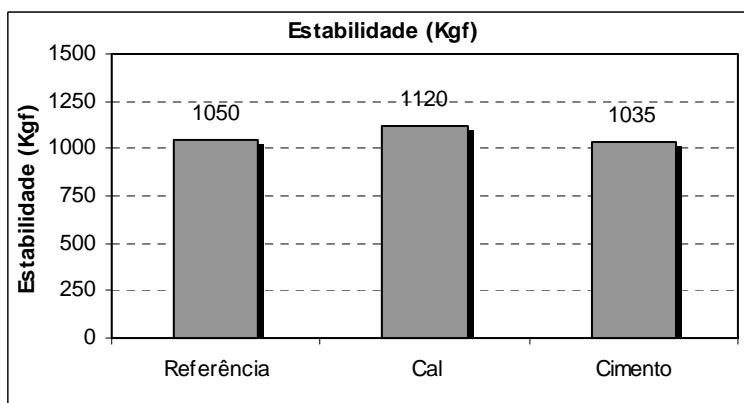


Figura 5.5: Resultado da estabilidade Marshall no teor ótimo para as três misturas estudadas

Estão representados, na Figura 5.6, os valores da fluência para o teor ótimo de ligante de cada uma das três misturas estudadas, sendo que a mistura de referência ficou no limite inferior da especificação que é de $8 \frac{1}{100}$ in, a mistura com adição de cal obteve fluência inferior ao especificado, ficando com $6,8 \frac{1}{100}$ in, porém obteve bom desempenho nas demais propriedades. Já a mistura com cimento ficou próxima ao limite superior da especificação, obtendo uma fluência de $15,2 \frac{1}{100}$ in.

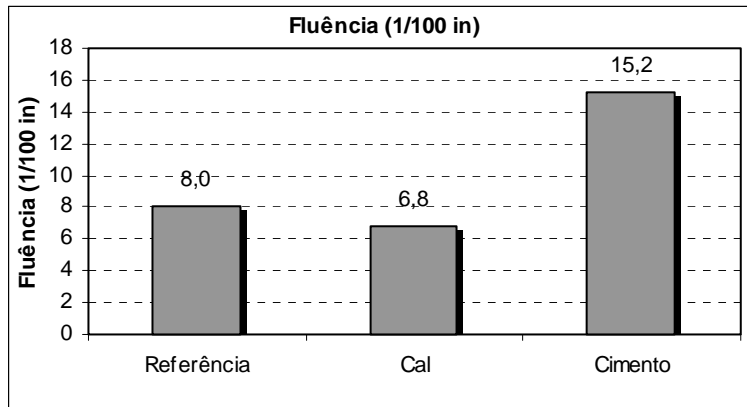


Figura 5.6: Resultado da fluência no teor ótimo para as três misturas estudadas

Na Figura 5.7 está representado o resultado da relação estabilidade/fluência para o teor ótimo de cada uma das misturas estudadas. A mistura de referência obteve uma relação de 57 kgf.m, enquanto a mistura com cal obteve uma relação de 51kgf.m. A mistura com adição de cimento proporcionou a maior relação estabilidade fluência, chegando a 98 kgf.m.

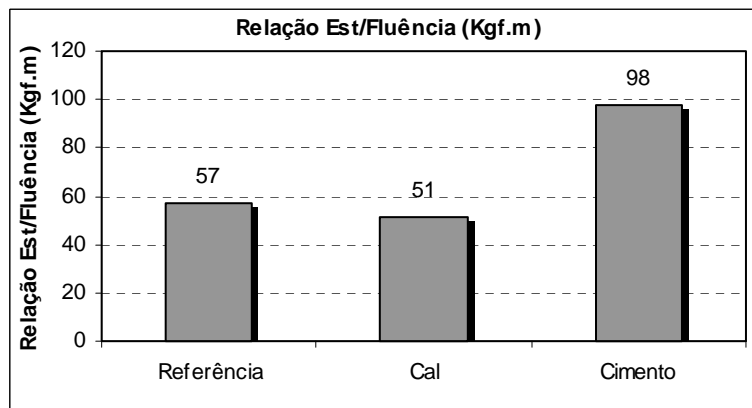


Figura 5.7: Resultado da relação estabilidade/fluência no teor ótimo para as três misturas estudadas

Estão representados, na Figura 5.8, os valores dos ensaios de módulo de resiliência para as três misturas estudadas. A mistura de referência apresentou o menor módulo de resiliência (2724 MPa). As misturas com adição de fíler apresentaram módulo superior a mistura de referência, ou seja, o fíler atuou como enrijecedor da mistura. A mistura com adição de cal obteve módulo de resiliência de 3652 MPa e a mistura com adição de cimento obteve o maior módulo, 6789 MPa.

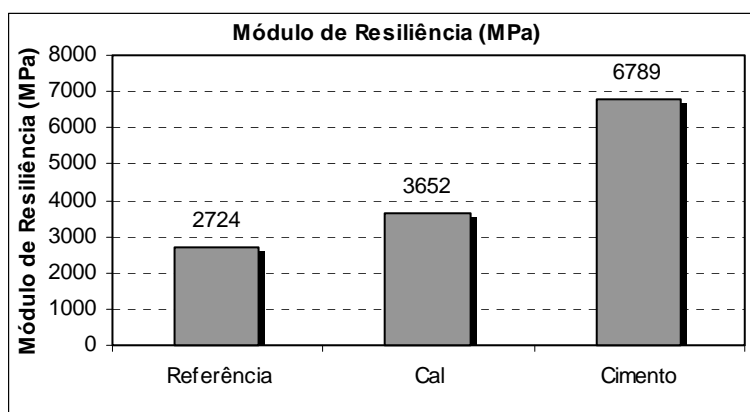


Figura 5.8: Resultado do ensaio de módulo de resiliência para as três misturas

Na Figura 5.9 está representado o resultado obtido no ensaio de resistência à tração realizado nas três misturas estudadas. A mistura de referência apresentou uma resistência à tração de 1,08 MPa. As misturas com adição de fíler apresentaram desempenho superior, sendo que a mistura com cal obteve 1,19 MPa de resistência à tração e a mistura com cimento apresentou 1,36 MPa.

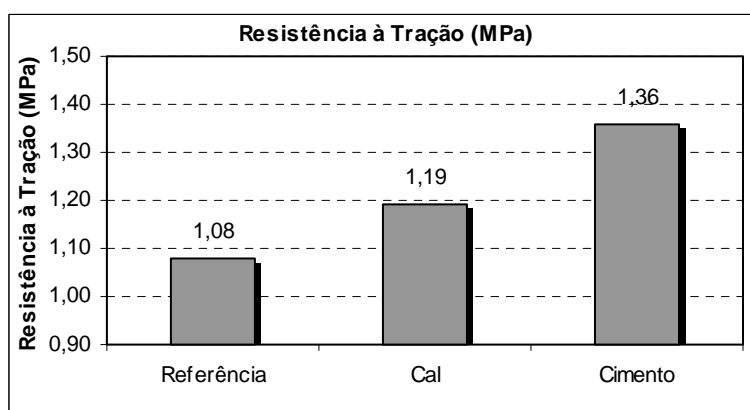


Figura 5.9: Resultado do ensaio de resistência à tração para as três misturas

Estão representados, na Figura 5.10, os valores da relação módulo de resiliência/resistência à tração, observando-se um valor menor para a mistura de referência (2522) e valores superiores para as misturas com adição de fíler. A adição de cal levaria a uma mistura com uma combinação de módulo de resiliência (M_r) e resistência à tração (R_t) mais adequadas, pois houve uma maior compatibilização entre a rigidez e a resistência da mistura, já que um aumento do módulo de resiliência deixa o material mais suscetível ao trincamento por fadiga.

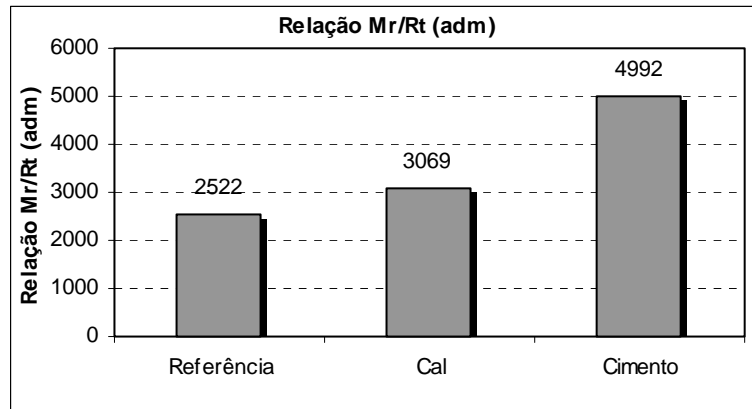


Figura 5.10: Resultado da relação módulo de resiliência e resistência à tração para as três misturas

Na Figura 5.11 estão plotados os valores de resistência retida à tração, obtidos no ensaio de adesividade, através da Metodologia Lottman Modificada. Pode-se verificar, que a mistura com adição de cal apresentou um menor valor de RRT, enquanto a mistura com adição de cimento teve um ganho mínimo de adesividade quando comparados com a mistura de referência. As três misturas apresentaram resultado bastante insatisfatório, pois as misturas obtiveram RRT inferior ao valor prescrito na literatura que recomenda 70 ou 80%.

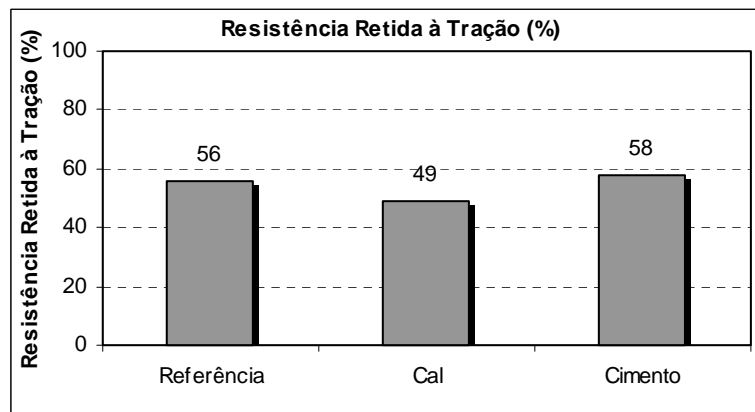


Figura 5.11: Resultados obtidos no ensaio de adesividade Lottman Modificado

Na Figura 5.12 estão apresentados os valores da relação fíler/betume para as misturas estudadas, sendo que a mistura de referência obteve a menor relação (1,17%) e a mistura com adição de cimento a maior relação (1,51%), em função da quantidade de material passante na peneira 200mm contida em cada mistura. A mistura com cal obteve uma relação de 1,36%.

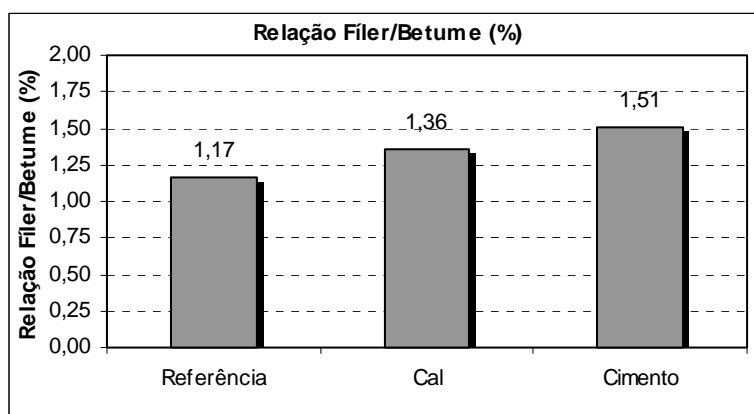


Figura 5.12: Resultados da relação fíler/betume para as três misturas estudadas

A superfície específica do agregado é a relação entre a área das partículas e sua massa (somatório). O cálculo foi feito baseado na granulometria e na massa específica de cada mistura. Na Tabela 5.1 encontram-se os valores calculados de superfície específica das misturas estudadas.

Tabela 5.1: Resultados da superfície específica das misturas estudadas.

| Mistura/Denominação | Superfície Específica (m ² /kN) |
|---------------------|--|
| referência | 32982,32 |
| cal | 34491,76 |
| cimento | 36209,85 |

Na Figura 5.13 estão apresentados os valores da superfície específica das misturas estudadas *versus* rigidez das misturas, onde nota-se uma proporcionalidade entre as variáveis. Quanto maior a superfície específica, maior a rigidez da mistura.

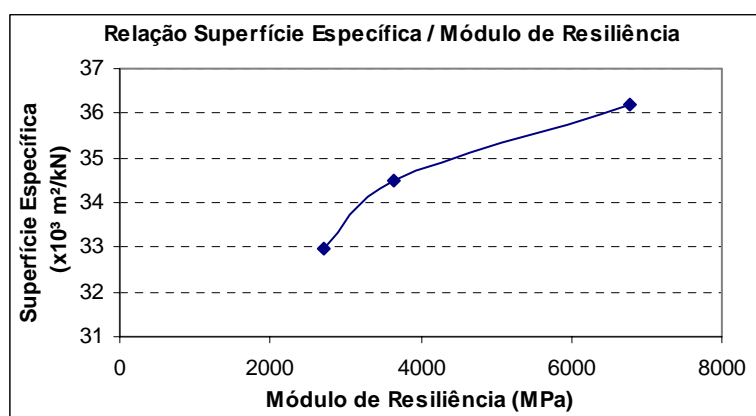


Figura 5.13: Resultados da superfície específica *versus* rigidez das misturas estudadas

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

A seguir encontram-se as principais conclusões deste estudo.

➤ Os materiais pétreos estudados apresentaram granulometria adequada, que se enquadram nas especificações, porém apresentaram uma lamelaridade alta.

➤ A adição de fíler ao Concreto Asfáltico diminui o teor de ligante das misturas. A mistura com adição de cal teve um consumo de ligante 12,60% inferior a mistura de referência e a mistura com adição de cimento de 8,40%.

➤ A proximidade dos resultados das misturas com fíler não permite afirmar, de forma conclusiva, qual das adições reduzirá de forma mais efetiva o teor de ligante.

➤ A adição de cal levaria a uma mistura com uma combinação de módulo de resiliência (M_r) e resistência à tração (R_t) mais adequadas para utilização como camada de revestimento sobre camadas granulares, pois do ponto de vista estrutural, deve haver compatibilização entre a rigidez e a resistência da mistura, uma vez que um aumento do módulo de resiliência deixa o material mais suscetível ao trincamento por fadiga.

➤ Quanto a resistência à tração (R_t), as três misturas apresentaram desempenho semelhante, desempenho este, que não foi diretamente proporcional à variação obtida na rigidez das misturas, medidas através do ensaio de módulo de resiliência (M_r).

➤ Das misturas com adição de fíler, esperava-se que a mistura com adição de cimento reduzisse ainda mais a quantidade de ligante. Quanto à rigidez, a mistura com cimento apresentou o resultado esperado. Isso leva a crer que não basta a caracterização dos finos até a #200. É necessária uma análise por outra técnica para avaliação da distribuição granulométrica e atividade dos finos.

➤ As três misturas estudadas apresentaram sérios problemas de adesividade (resistência retida à tração) Para melhorar esta propriedade da mistura,

seria necessária adição de DOPE (adição de aditivo químico), o qual melhoraria esta propriedade, caso contrário, às chances de ocorrerem problemas de desagregação da mistura em campo são grandes.

➤ A mistura com cimento praticamente manteve a adesividade, quando comparada com a mistura de referência, enquanto a mistura com adição de cal piorou a adesividade da mistura.

➤ Da mistura com adição de cal esperava-se um melhor desempenho nas propriedades de adesividade. O mau desempenho da mistura nestas propriedades pode estar ligado ao agregado e a cal utilizados no estudo.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com a finalidade de dar continuidade a esta pesquisa, sugerem-se os seguintes temas:

- Estudo das misturas com uso de ligante com DOPE.
- Mistura com ligante modificado com polímeros.
- Tentar correlacionar os resultados com as características individuais de cada fíler (caracterização química e física).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 283-89. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.** In: American Association of State Highway Transportation Officials. (1989).

ABGE. **Geologia de Engenharia.** Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p.13-38. 1998.

BERTOLLO, Sandra Aparecida M. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com Borracha Reciclada de Pneus.** São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS (CEC). (1986) **Propuesta de norma de ensayo – determinacion de la perdida por desgaste de mezclas bituminosas mediante el empleo de la maquina de Los Angeles (Ensayo Cantabro).** NLT – 325/86. Madrid, 3p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. (2001) **Concreto Asfáltico:** DAER/RS – ES-P 16/91. Porto Alegre 1991, 21p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. (2001) **Determinação do índice de lamelaridade:** DAER/RS – EL 108/01. Porto Alegre 2001, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **Adesividade de agregado à ligante betuminoso:** DNER – ME 79/94. Rio de Janeiro 1994, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral:** DNER – ME 138/94. Rio de Janeiro 1994, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **Adesividade de agregado graúdo à ligante betuminoso**: DNER – ME 78/94. Rio de Janeiro 1994, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência**: DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro 1994, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral**: DNER – ME 138/94. Rio de Janeiro 1994, 4p.

EPPS, A. L. **Thermal Behavior of crumb-rubber modified asphalt concrete mixtures**. Berkeley, 1997. Dissertation (Doctor of Philosophy) – ITS/UCB. 391p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Superpave binder specification**. FHWA. Washington, 2002, 115p. www.tfhrc.gov/. (artigo consultado em Junho de 2002).

HUNTER R. N. **Bituminous mixtures in road construction**. London: Thomas Telford. 1994. 441p.

MELLO, José Carlos. **Transporte: Presente e Futuro**. In: ABPv – 33º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 20 a 23 de novembro de 2001, Florianópolis, **Anais...** 2001 p. 31 – 39.

MONISMITH, C. L.; FINN F. N.; VALLERGA B. A. A comprehensive asphalt concrete design system. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed, ASTM STP 1041. p.39-71. 1989.

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

MOURÃO, Silvio Figueiredo et al. **Coletânea de Normas do DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem**. Rio de Janeiro, 2002, 1CD.

OGURTSOVA, J.; BIRMAN S.; COELHO V. **Concreto Asfáltico – Boletim Técnico nº 8**. 2ª edição, Revisada e Aumentada. Departamento de estradas de Rodagem do Paraná, 153p. 1999.

PINTO, Salomão. **Materiais Pétreos e Concreto Asfáltico: Conceituação e Dosagem**. Departamento de Engenharia de Fortificação – IME Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 81p. 1998.

PINTO, S; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Impressão Copiarte, 259p. 2001.

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

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P.; PALUDO, I. **Estudo Laboratorial da Adesividade e do Desgaste de Misturas Asfálticas com Borracha**. In: ANPET – XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Volume 1. 14 a 17 de outubro de 2001, Natal – RN, **Anais...** 2002. p. 195 – 206.

8. ANEXO I



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
Fone: 0xx 55 3332 0505



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS

Operador: DIEGO / IVAN / SALETE

Data: 14/08/2002 Material: BRITA 01 – PAIM

| Peneira n° ou " | Abertura (mm) | Amostra 1 | | | Amostra 2 | | |
|--------------------|------------------|---------------------|------------|----------|---------------------|------------|----------|
| | | Massa Seca: 4983,35 | | | Massa Seca: 5599,04 | | |
| | | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido |
| 2'' | 50,8 | | | | | | |
| 1 1/2'' | 38,1 | | | | | | |
| 1'' | 12,7 | | | | | | |
| 3/4'' | 19,1 | 147,0 | 4836,35 | 2,95 | 55,0 | 5544,04 | 0,98 |
| 1/2'' | 12,7 | 2758,0 | 2078,35 | 58,29 | 3075,0 | 2469,04 | 55,90 |
| 3/8'' | 9,5 | 1218,0 | 860,35 | 82,74 | 1606,0 | 863,04 | 84,59 |
| 1/4'' | 6,35 | | | | | | |
| 4 | 4,76 | 814,0 | 46,35 | 99,07 | 808,64 | 54,40 | 99,03 |
| 8 | 2,38 | 7,0 | 39,35 | 99,21 | 8,42 | 45,98 | 99,18 |
| 10 | 2,00 | | | | | | |
| 16 | 1,20 | 1,82 | 37,53 | 99,25 | 1,81 | 44,17 | 99,21 |
| 30 | 0,59 | 1,95 | 35,58 | 99,29 | 2,07 | 42,10 | 99,25 |
| 40 | 0,42 | | | | | | |
| 50 | 0,297 | 2,84 | 32,74 | 99,34 | 3,34 | 38,76 | 99,31 |
| 80 | 0,18 | | | | | | |
| 100 | 0,149 | 4,28 | 28,46 | 99,43 | 5,41 | 33,35 | 99,40 |
| 200 | 0,074 | 4,50 | 23,96 | 99,52 | 6,01 | 27,34 | 99,51 |



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
Fone: 0xx 55 3332 0505



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS

Operador: DIEGO / IVAN / SALETE

Data: 14/08/2002 Material: PEDRISCO – PAIM

| Peneira n° ou " | Abertura (mm) | Amostra 1 | | | Amostra 2 | | |
|--------------------|------------------|---------------------|------------|----------|---------------------|------------|----------|
| | | Massa Seca: 3143,78 | | | Massa Seca: 3649,28 | | |
| | | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido |
| 2'' | 50,8 | | | | | | |
| 1 1/2'' | 38,1 | | | | | | |
| 1'' | 12,7 | | | | | | |
| 3/4'' | 19,1 | | | | | | |
| 1/2'' | 12,7 | | | | | | |
| 3/8'' | 9,5 | 2,68 | 3141,10 | 0,09 | 1,00 | 3648,28 | 0,03 |
| 1/4'' | 6,35 | 678,0 | 2463,10 | 21,65 | 1311,0 | 2337,28 | 35,95 |
| 4 | 4,76 | 1047,0 | 1416,10 | 54,96 | 1138,0 | 1199,28 | 67,14 |
| 8 | 2,38 | 1100,0 | 316,10 | 89,95 | 1003,0 | 196,28 | 94,62 |
| 10 | 2,00 | | | | | | |
| 16 | 1,20 | 166,47 | 149,63 | 95,24 | 94,13 | 102,15 | 97,20 |
| 30 | 0,59 | 40,19 | 109,44 | 96,52 | 21,07 | 81,08 | 97,78 |
| 40 | 0,42 | | | | | | |
| 50 | 0,297 | 13,68 | 95,76 | 96,95 | 7,48 | 73,60 | 97,98 |
| 80 | 0,18 | | | | | | |
| 100 | 0,149 | 11,24 | 84,52 | 97,31 | 6,78 | 66,82 | 98,17 |
| 200 | 0,074 | 15,50 | 69,02 | 97,80 | 9,06 | 57,76 | 98,42 |



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
Fone: 0xx 55 3332 0505



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS

Operador: DIEGO / IVAN / SALETE

Data: 14/08/2002 Material: PÓ-DE-PEDRA – PAIM

| Peneira n° ou " | Abertura (mm) | Amostra 1 | | | Amostra 2 | | |
|--------------------|------------------|--------------------|------------|----------|--------------------|------------|----------|
| | | Massa Seca: 1110,0 | | | Massa Seca: 1098,0 | | |
| | | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido |
| 2" | 50,8 | | | | | | |
| 1 1/2" | 38,1 | | | | | | |
| 1" | 12,7 | | | | | | |
| 3/4" | 19,1 | | | | | | |
| 1/2" | 12,7 | | | | | | |
| 3/8" | 9,5 | | | | | | |
| 1/4" | 6,35 | | | | | | |
| 4 | 4,76 | 7,90 | 1102,10 | 0,71 | 2,04 | 1095,96 | 0,19 |
| 8 | 2,38 | 194,03 | 908,07 | 18,19 | 178,85 | 917,11 | 16,47 |
| 10 | 2,00 | | | | | | |
| 16 | 1,20 | 304,49 | 603,58 | 45,62 | 264,17 | 652,94 | 40,53 |
| 30 | 0,59 | 184,76 | 418,82 | 62,27 | 196,48 | 456,46 | 58,43 |
| 40 | 0,42 | | | | | | |
| 50 | 0,297 | 97,67 | 321,15 | 71,07 | 112,17 | 344,29 | 68,64 |
| 80 | 0,18 | | | | | | |
| 100 | 0,149 | 71,70 | 249,45 | 77,53 | 78,82 | 265,47 | 75,82 |
| 200 | 0,074 | 50,10 | 199,35 | 82,04 | 4,46 | 261,01 | 76,23 |



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
Fone: 0xx 55 3332 0505



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS

Operador: DIEGO / IVAN / SALETE

Data: 20/08/2002 Material: AREIA – PAIM

| Peneira n° ou " | Abertura (mm) | Amostra 1 | | | Amostra 2 | | |
|--------------------|------------------|---------------------|------------|----------|---------------------|------------|----------|
| | | Massa Seca: 1206,78 | | | Massa Seca: 1097,28 | | |
| | | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido |
| 2'' | 50,8 | | | | | | |
| 1 1/2'' | 38,1 | | | | | | |
| 1'' | 12,7 | | | | | | |
| 3/4'' | 19,1 | | | | | | |
| 1/2'' | 12,7 | | | | | | |
| 3/8'' | 9,5 | | | 2,13 | 1095,15 | 0,19 | |
| 1/4'' | 6,35 | | | | | | |
| 4 | 4,76 | 17,63 | 1189,15 | 1,46 | 17,37 | 1077,78 | 1,78 |
| 8 | 2,38 | 147,13 | 1042,02 | 13,65 | 55,88 | 1021,90 | 6,87 |
| 10 | 2,00 | | | | | | |
| 16 | 1,20 | 122,20 | 919,82 | 23,78 | 123,62 | 898,28 | 18,14 |
| 30 | 0,59 | 199,30 | 720,52 | 40,29 | 189,72 | 708,56 | 35,43 |
| 40 | 0,42 | | | | | | |
| 50 | 0,297 | 391,62 | 328,90 | 72,75 | 375,84 | 332,72 | 69,68 |
| 80 | 0,18 | | | | | | |
| 100 | 0,149 | 249,30 | 79,60 | 93,40 | 254,82 | 77,90 | 92,90 |
| 200 | 0,074 | 58,05 | 21,55 | 98,21 | 55,84 | 22,06 | 97,99 |



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
Fone: 0xx 55 3332 0505



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS

Operador: DIEGO / IVAN / SALETE

Data: 14/08/2002 Material: CAL – CHII

| Peneira n° ou " | Abertura (mm) | Amostra 1 | | | Amostra 2 | | |
|--------------------|------------------|---------------------|------------|----------|--------------|------------|----------|
| | | Massa Seca: 100,00g | | | Massa Seca: | | |
| | | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido | Mat . Retido | Mat. Pass. | % retido |
| 2'' | 50,8 | | | | | | |
| 1 1/2'' | 38,1 | | | | | | |
| 1'' | 12,7 | | | | | | |
| 3/4'' | 19,1 | | | | | | |
| 1/2'' | 12,7 | | | | | | |
| 3/8'' | 9,5 | | | | | | |
| 1/4'' | 6,35 | | | | | | |
| 4 | 4,76 | | | | | | |
| 8 | 2,38 | | | | | | |
| 10 | 2,00 | | | | | | |
| 16 | 1,20 | | | | | | |
| 30 | 0,59 | 0,06 | 99,94 | 0,06 | | | |
| 40 | 0,42 | | | | | | |
| 50 | 0,297 | 5,79 | 94,15 | 5,85 | | | |
| 80 | 0,18 | | | | | | |
| 100 | 0,149 | 9,35 | 84,80 | 15,20 | | | |
| 200 | 0,074 | 64,81 | 19,99 | 80,01 | | | |



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
fone: 0xx 55 3332 0505



BRITA 1

| PENEIRA | GRANULOMETRIA | TAMANHO DAS FRAÇÕES | | COLUNA A | COLUNA B | COLUNA C | COLUNA D | COLUNA E |
|---------|---------------|---------------------|-------------------|----------------|----------------|---|---|---|
| | % que passa | Passante na Peneira | Retido na Peneira | % das Frações | Peso da Fração | Peso do material que passa de cada fração | Índice de lamelaridade de cada fração (C/B.100) | Índice de lamelaridade ponderado de cada fração (A.D) |
| 2 1/2 " | | | | | | | | |
| 2 " | | | | | | | | |
| 1 1/2 " | | | | | | | | |
| 1 1/4 " | | | | | | | | |
| 1 " | 100 | | | | | | | |
| 3/4 " | 98,0 | | | 2,0 | | | | |
| 1/2 " | 42,9 | | | 55,1 | 1327,16 | 958,69 | 72,23 | 39,8 |
| 3/8 " | 16,3 | | | 26,6 | 702,82 | 249,79 | 35,54 | 9,45 |
| 1/4 " | 4,0 | | | 12,3 | 263,99 | 89,96 | 34,07 | 4,19 |
| | | | | Σ_1 96% | | | Σ_2 | 53,44 |

ÍNDICE DE LAMELARIDADE DO AGREGADO (Σ_2 / Σ_1) :

55,66%



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
fone: 0xx 55 3332 0505



PEDRISCO

| PENEIRA | GRANULOMETRIA | TAMANHO DAS FRAÇÕES | | COLUNA A | COLUNA B | COLUNA C | COLUNA D | COLUNA E | |
|---------|---------------|---------------------|-------------------|----------------|----------------|---|---|---|--|
| | % que passa | Passante na Peneira | Retido na Peneira | % das Frações | Peso da Fração | Peso do material que passa de cada fração | Índice de lamelaridade de cada fração (C/B.100) | Índice de lamelaridade ponderado de cada fração (A.D) | |
| 2 1/2 " | | | | | | | | | |
| 2 " | | | | | | | | | |
| 1 1/2 " | | | | | | | | | |
| 1 1/4 " | | | | | | | | | |
| 1 " | | | | | | | | | |
| 3/4 " | | | | | | | | | |
| 1/2 " | | | | | | | | | |
| 3/8 " | 100 | | | | | | | | |
| 1/4 " | 60,0 | | | 40 | 131,8 | 88,9 | 67,45 | 26,98 | |
| | | | | Σ_1 40% | | | | Σ_2 26,98% | |

ÍNDICE DE LAMELARIDADE DO AGREGADO (Σ_2 / Σ_1) :

67,45%

9. ANEXO II

Caracterização dos Agregados

1 - IDENTIFICAÇÃO

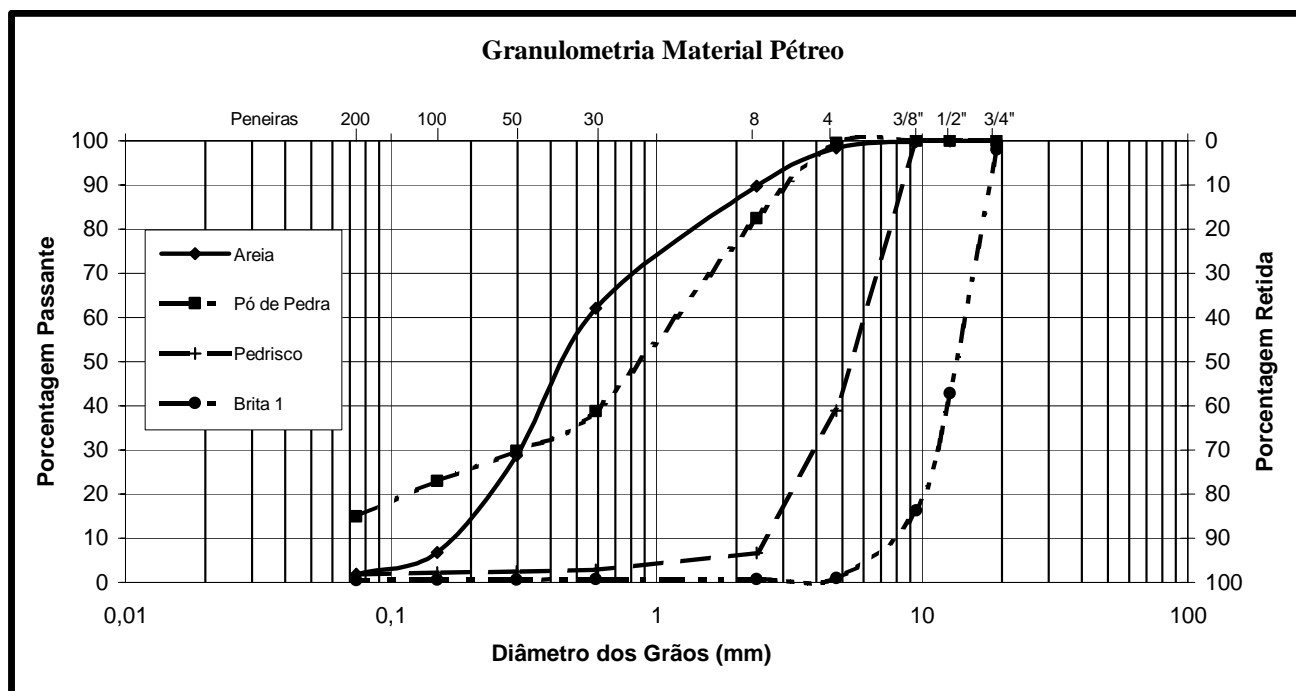
| | |
|-----------|---|
| Projeto: | TCC - Diego Henrique Wesseling |
| Operador: | Diego / Ivan / Salete |
| Data: | 18-set-02 |
| Objetivo: | Projeto de mistura em Concreto Asfáltico Usinado a Quente |
| Obs: | |

2. PROCEDÊNCIA DOS AGREGADOS MINERAIS

| Material | Procedência |
|-------------|-----------------------------|
| BRITA 1 | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| PEDRISCO | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| PÓ DE PEDRA | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| AREIA FINA | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| FILER | |

3 - ANALISE GRANULOMETRICA

| PENEIRA | mm | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FILLER |
|---------|-------|---------|----------|-------------|------------|--------|
| 3/4" | 19,1 | 98,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | |
| 1/2" | 12,7 | 42,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | |
| 3/8" | 9,5 | 16,3 | 99,9 | 100,0 | 99,9 | |
| n 4 | 4,76 | 1,0 | 38,9 | 99,5 | 98,4 | |
| n 8 | 2,38 | 0,8 | 6,7 | 82,5 | 89,7 | |
| n 30 | 0,59 | 0,7 | 2,9 | 38,8 | 62,1 | |
| n 50 | 0,297 | 0,7 | 2,5 | 29,7 | 28,8 | |
| n 100 | 0,149 | 0,6 | 2,3 | 22,9 | 6,9 | |
| n 200 | 0,074 | 0,5 | 1,9 | 15,0 | 1,9 | |



4. INDICE DE LAMELARIDADE DO AGREGADO GRAUDO (DAER108/01)

| Material | Valor obtido no ensaio (utilização da placa de lamelaridade) |
|----------|--|
| BRITA 1 | 55,66 |
| PEDRISCO | 67,45 |

Composição Granulométrica - Projeto CBUQ

SOLICITANTE: TCC - Diego Henrique Wesseling TRECHO:
DATA: set/02 OBS.: Faixa B DAER/RS (espessura mínima 4cm)

1 - GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

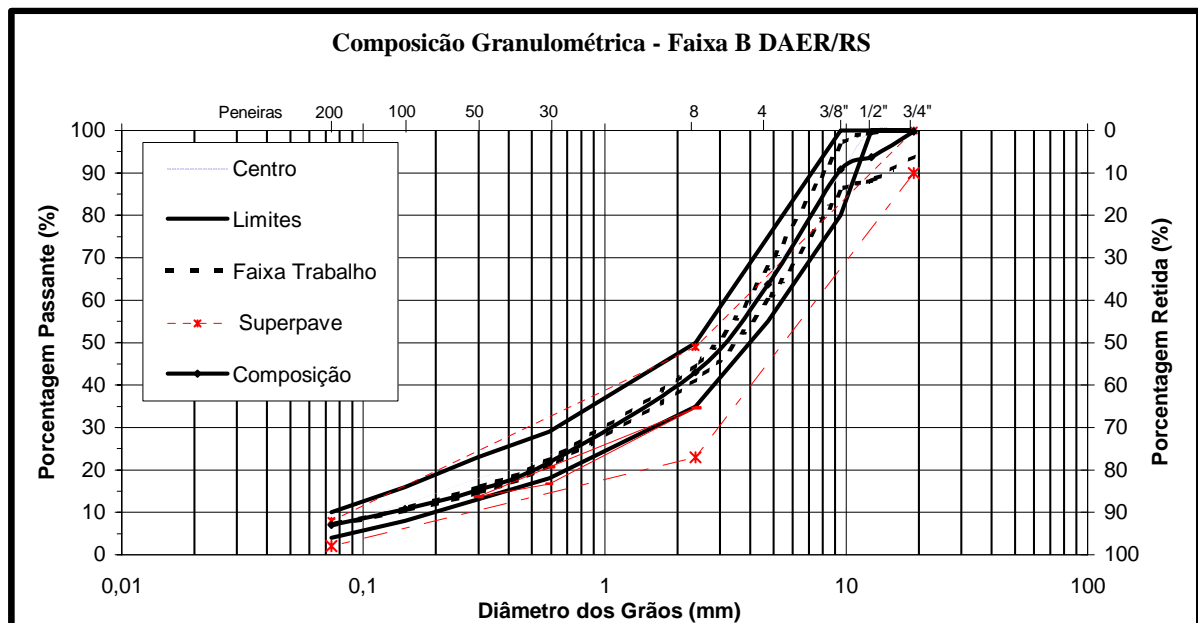
| PENEIRA | mm | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FILLER |
|---------|-------|---------|----------|-------------|------------|--------|
| 3/4" | 19,1 | 98,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 0,0 |
| 1/2" | 12,7 | 42,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 0,0 |
| 3/8" | 9,5 | 16,3 | 99,9 | 100,0 | 99,9 | 0,0 |
| n 4 | 4,76 | 1,0 | 38,9 | 99,5 | 98,4 | 0,0 |
| n 8 | 2,38 | 0,8 | 6,7 | 82,5 | 89,7 | 0,0 |
| n 30 | 0,59 | 0,7 | 2,9 | 38,8 | 62,1 | 0,0 |
| n 50 | 0,297 | 0,7 | 2,5 | 29,7 | 28,8 | 0,0 |
| n 100 | 0,149 | 0,6 | 2,3 | 22,9 | 6,9 | 0,0 |
| n 200 | 0,074 | 0,5 | 1,9 | 15,0 | 1,9 | 0,0 |

2 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA

| % mistura | | 11,0% | 41,0% | 40,0% | 8,0% | 0,0% |
|-----------|---------|----------|-------------|-------------|------------|--------|
| PENEIRA | mm | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FILLER |
| 3/4" | 19,1 | 10,8 | 41,0 | 40,0 | 8,0 | 0,0 |
| 1/2" | 12,7 | 4,7 | 41,0 | 40,0 | 8,0 | 0,0 |
| 3/8" | 9,5 | 1,8 | 41,0 | 40,0 | 8,0 | 0,0 |
| n 4 | 4,76 | 0,1 | 16,0 | 39,8 | 7,9 | 0,0 |
| n 8 | 2,38 | 0,1 | 2,7 | 33,0 | 7,2 | 0,0 |
| n 30 | 0,59 | 0,1 | 1,2 | 15,5 | 5,0 | 0,0 |
| n 50 | 0,297 | 0,1 | 1,0 | 11,9 | 2,3 | 0,0 |
| n 100 | 0,149 | 0,1 | 0,9 | 9,2 | 0,5 | 0,0 |
| n 200 | 0,074 | 0,1 | 0,8 | 6,0 | 0,2 | 0,0 |
| frações | BRITA 1 | PEDRISCO | PO DE PEDRA | AREIA FINA | FILLER | TOTAL |
| % | 11% | 41% | 40% | 8% | 0,0% | 100% |

3 - ESPECIFICAÇÃO E MISTURA

| PENEIRA | mm | Limite | centro faixa | Faixa de Trabalho | | MISTURA |
|---------|-------|----------|--------------|-------------------|------|---------|
| 3/4" | 19,1 | 100 | 100 | 100,0 | 93,8 | 99,8 |
| 1/2" | 12,7 | 100 | 100 | 99,3 | 88,1 | 93,7 |
| 3/8" | 9,5 | 80 - 100 | 90 | 96,2 | 85,3 | 90,8 |
| n 4 | 4,76 | 55 - 75 | 65 | 67,5 | 59,9 | 63,7 |
| n 8 | 2,38 | 35 - 50 | 43 | 44,7 | 41,3 | 43,0 |
| n 30 | 0,59 | 18 - 29 | 24 | 22,6 | 20,9 | 21,7 |
| n 50 | 0,297 | 13 - 23 | 18 | 15,9 | 14,7 | 15,3 |
| n 100 | 0,149 | 8 - 16 | 12 | 11,0 | 10,4 | 10,7 |
| n 200 | 0,074 | 4 - 10 | 7 | 7,1 | 6,8 | 7,0 |





Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
fone: (0xx) 55 3332 0505



Dosagem de Concreto Asfáltico - Metodologia Marshall

1 - IDENTIFICAÇÃO

| | |
|-----------|--|
| Projeto: | TCC - Diego Henrique Wesseling |
| Operador: | Diego / Ivan / Salete |
| Ligante: | CAP 20 |
| Data: | 18-set-02 |
| Mistura: | CBUQ - Faixa B DAER - RS |
| Obs: | Tamanho máximo agregado 3/4" Lamelaridade da mistura = 64,96 |

2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL

| | AGREGADOS | | | | | CAP | MISTURA MINERAL | |
|-------------|-----------|---------------------|-------------------|------------------------|----------|-----------|---------------------|-------|
| | % retida | D _{Real} : | D _{ap} : | D _{efetiva} : | Absorção | Densidade | D _{real} : | 2,989 |
| 3/4"- n° 10 | 61,52 | 3,050 | 2,931 | 2,991 | 1,326 | 1,073 | D _{ap} : | 2,918 |
| pas n° 10 | 38,48 | 2,897 | | | | | D _{efet} : | 2,954 |

3 - ESPECIFICAÇÕES

| <u>Parâmetro</u> | <u>DNER</u> | <u>DAER - RS</u> |
|-------------------|-------------|------------------|
| <u>Parâmetro</u> | <u>CAPA</u> | <u>CAPA</u> |
| Perc. Vazios (%) | 3 a 5 | 3 a 5 |
| RBV (%) | 75 a 82 | 75 a 82 |
| Estabilidade(kgf) | >500 | > 800 |
| Fluência (1/100") | 8 a 18 | 8 a 16 |
| VAM para 3/4" | -- | > 16 |

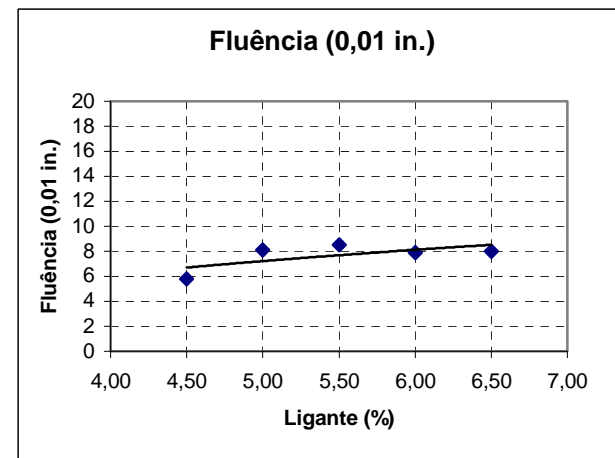
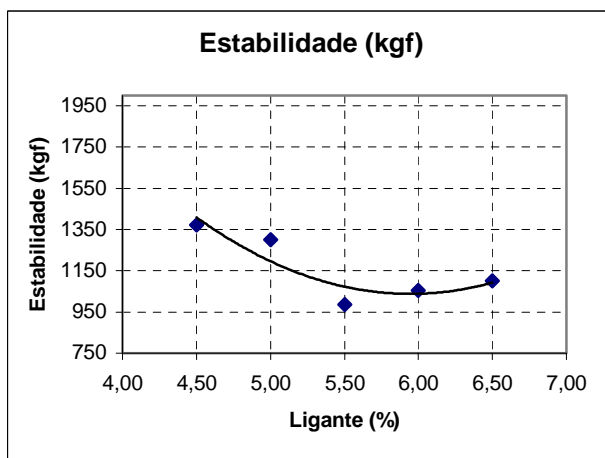
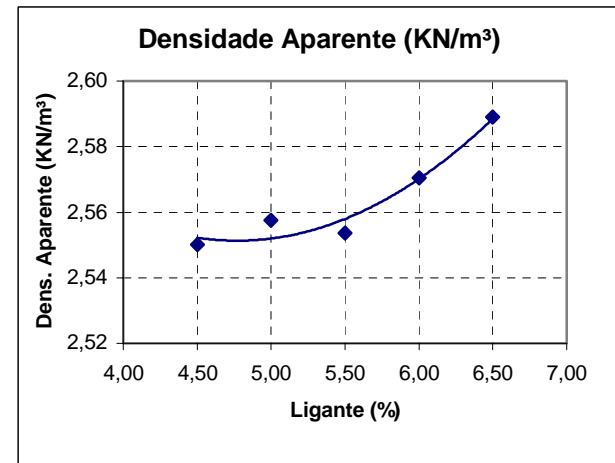
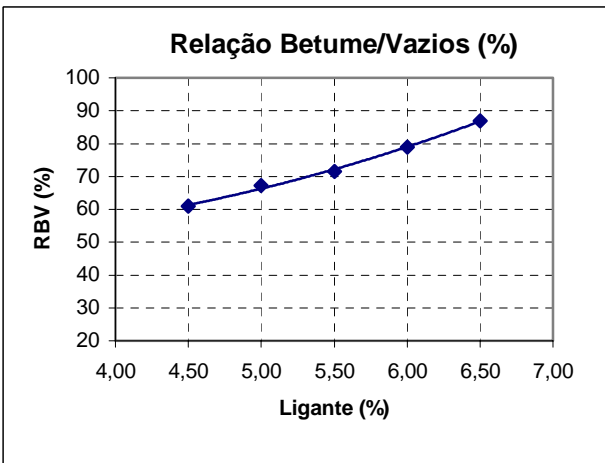
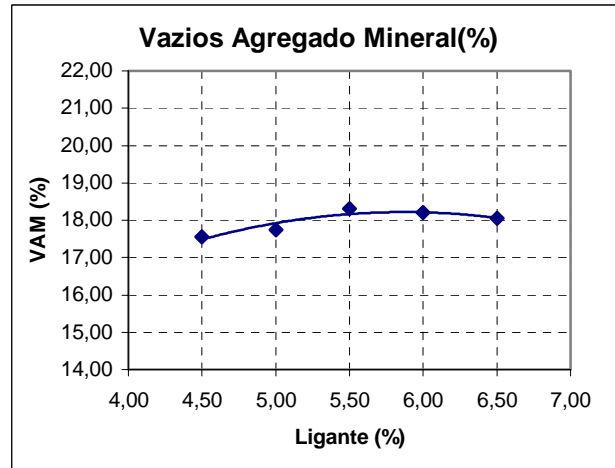
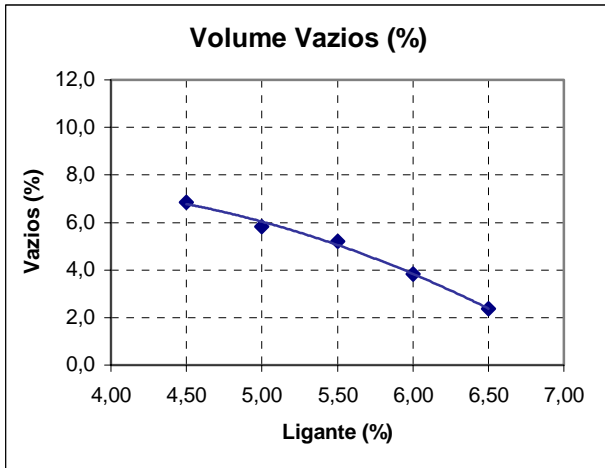
4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO

| | |
|--------------|---|
| Mistura: | manual - Temperatura - 150 -156°C |
| Compactação: | 75 golpes por face em compactador manual - Temperatura - 138 -143°C |

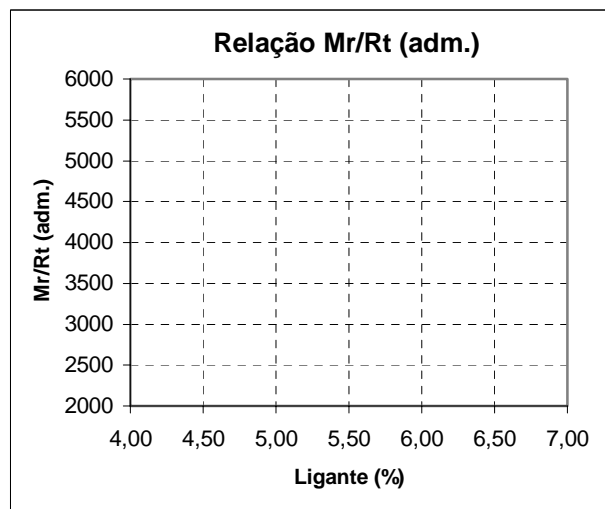
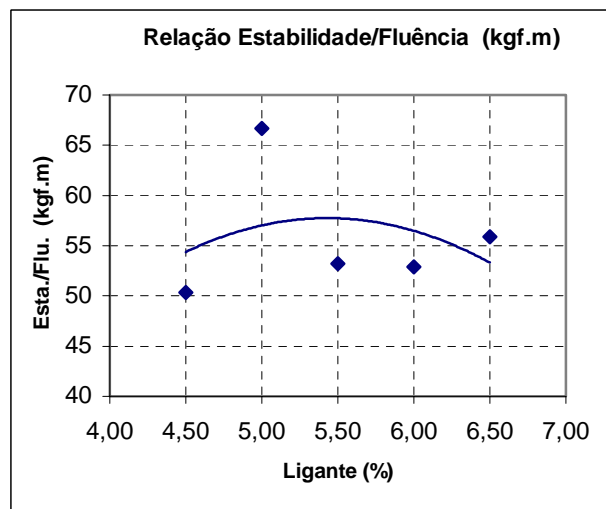
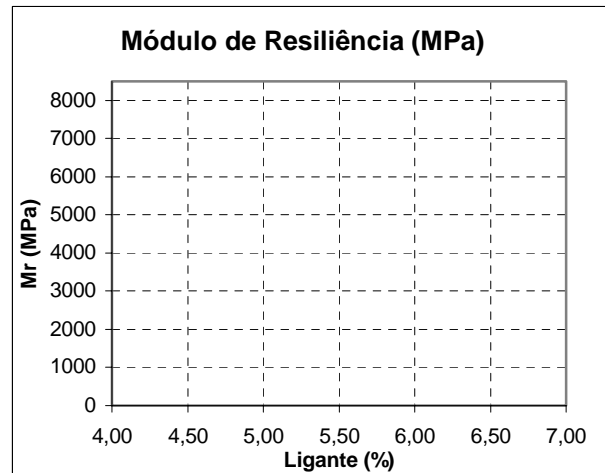
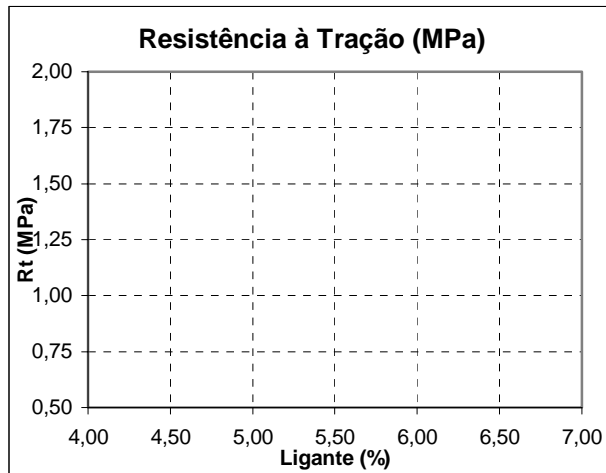
5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS

| Propriedade | Teor de Betume (%) | | | | |
|---|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 |
| Volume de Vazios (%) | 6,9 | 5,8 | 5,2 | 3,8 | 2,4 |
| Relação Betume Vazios (%) | 61 | 67 | 72 | 79 | 87 |
| Vazios do Agregado Mineral (%) | 17,55 | 17,75 | 18,30 | 18,20 | 18,04 |
| Densidade Máx. Teórica (g/cm ³) | 2,74 | 2,72 | 2,69 | 2,67 | 2,65 |
| Densidade Aparente (g/cm ³) | 2,55 | 2,56 | 2,55 | 2,57 | 2,59 |
| Estabilidade (kgf) | 1372 | 1299 | 985 | 1054 | 1100 |
| Fluência (1/100 in) | 6 | 8 | 9 | 8 | 8 |
| Resistência à Tração (MPa) | | | | | |
| Módulo de Resiliência (MPa) | | | | | |
| Relação Mr/Rt | | | | | |
| Relação Est/Fluência (kgf.m) | 50 | 67 | 53 | 53 | 56 |

6 - GRÁFICOS METODOLOGIA MARSHALL

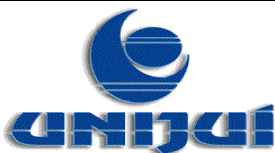


7 - GRÁFICOS DE ENSAIOS E PARÂMETROS ADICIONAIS



8 - PROPRIEDADES FINAIS DA MISTURA

| Propriedade | ESP 16/91 DAER | 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 (%) | >16 | 18,20 |
| Densidade Máxima Teórica (kN/m ³) | -- | 2,67 |
| Densidade Aparente (kN/m ³) | 97% (mínimo) | 2,57 |
| Estabilidade (kgf) | > 800 | 1050 |
| Fluência (1/100 in) | 8 a 16 | 8 |
| Resistência à Tração (MPa) | -- | 1,08 |
| Módulo de Resiliência (MPa) | -- | 2724 |
| Relação Mr/Rt (adm) | -- | 2522 |
| Relação Est/Fluência (kgf.m) | -- | 57 |
| Relação Filler/Betume (%) | 0,6 a 1,6 (Superpave) | 1,17 |



Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
fone: 0xx 55 3332 0505



Caracterização dos Agregados

1 - IDENTIFICAÇÃO

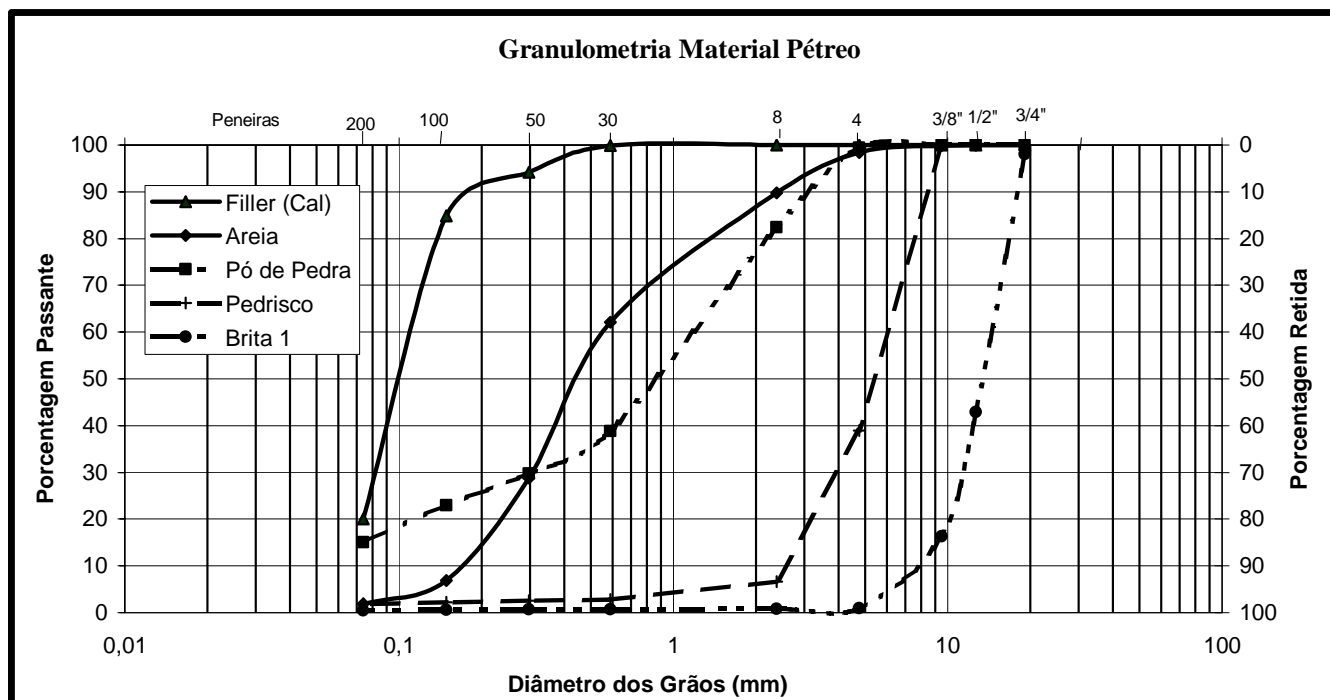
| | |
|-----------|---|
| Projeto: | TCC - Diego Henrique Wesseling |
| Operador: | Diego / Ivan / Salete |
| Data: | 18-set-02 |
| Objetivo: | Projeto de mistura em Concreto Asfáltico Usinado a Quente |
| Obs: | |

2. PROCEDÊNCIA DOS AGREGADOS MINERAIS

| Material | Procedência |
|-------------|-----------------------------|
| BRITA 1 | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| PEDRISCO | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| PÓ DE PEDRA | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| AREIA FINA | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| FÍLER (CAL) | Cal Hidratada - CH II |

3 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

| PENEIRA | mm | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FÍLER |
|---------|-------|---------|----------|-------------|------------|--------|
| 3/4" | 19,1 | 98,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 42,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,00 |
| 3/8" | 9,5 | 16,3 | 99,9 | 100,0 | 99,9 | 100,00 |
| n 4 | 4,76 | 1,0 | 38,9 | 99,5 | 98,4 | 100,00 |
| n 8 | 2,38 | 0,8 | 6,7 | 82,5 | 89,7 | 100,00 |
| n 30 | 0,59 | 0,7 | 2,9 | 38,8 | 62,1 | 99,94 |
| n 50 | 0,297 | 0,7 | 2,5 | 29,7 | 28,8 | 94,15 |
| n 100 | 0,149 | 0,6 | 2,3 | 22,9 | 6,9 | 84,80 |
| n 200 | 0,074 | 0,5 | 1,9 | 15,0 | 1,9 | 19,99 |



4. ÍNDICE DE LAMELARIDADE DO AGREGADO GRAUDO (DAER108/01)

| Material | Valor obtido no ensaio (utilização da placa de lamelaridade) |
|----------|--|
| BRITA 1 | 55,66 |
| PEDRISCO | 67,45 |

Composição Granulométrica - Projeto CBUQ

SOLICITANTE: TCC - Diego Henrique Wesseling TRECHO:
DATA: set/02 OBS.: Faixa B DAER/RS (espessura mínima 4cm)

1 - GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

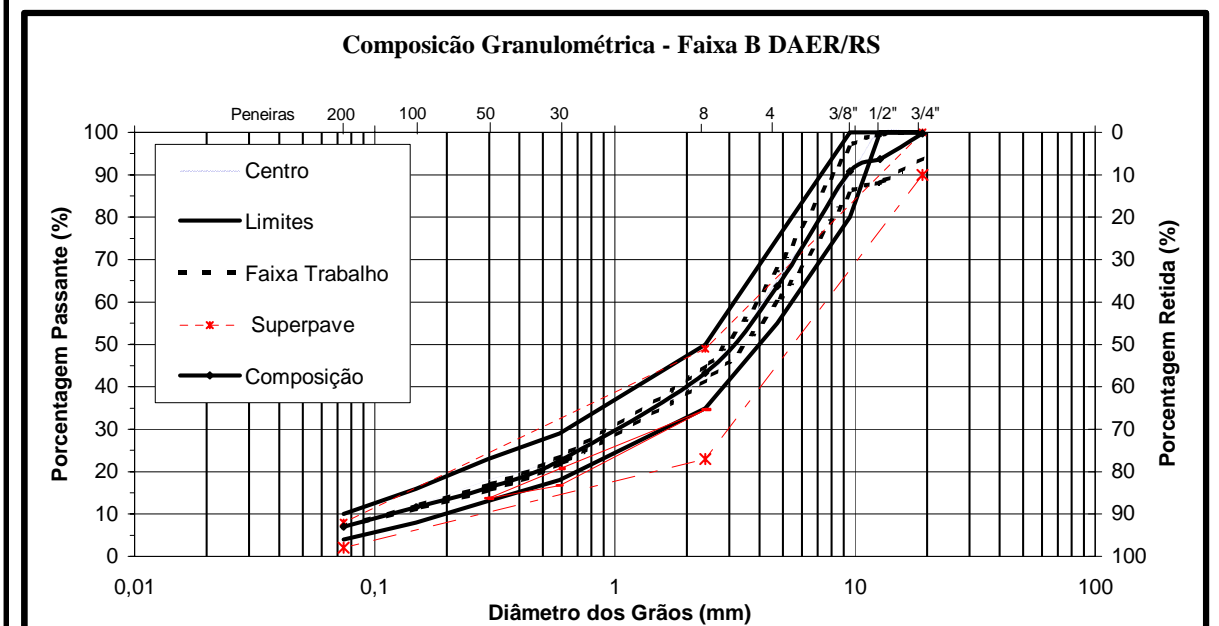
| PENEIRA | mm | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FÍLER |
|---------|-------|---------|----------|-------------|------------|-------|
| 3/4" | 19,1 | 98,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1/2" | 12,7 | 42,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3/8" | 9,5 | 16,3 | 99,9 | 100,0 | 99,9 | 100,0 |
| n 4 | 4,76 | 1,0 | 38,9 | 99,5 | 98,4 | 100,0 |
| n 8 | 2,38 | 0,8 | 6,7 | 82,5 | 89,7 | 100,0 |
| n 30 | 0,59 | 0,7 | 2,9 | 38,8 | 62,1 | 99,9 |
| n 50 | 0,297 | 0,7 | 2,5 | 29,7 | 28,8 | 94,2 |
| n 100 | 0,149 | 0,6 | 2,3 | 22,9 | 6,9 | 84,8 |
| n 200 | 0,074 | 0,5 | 1,9 | 15,0 | 1,9 | 20,0 |

2 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA

| % mistura | | 11,0% | 41,0% | 38,5% | 8,0% | 1,5% |
|-----------|---------|----------|-------------|-------------|------------|-------|
| PENEIRA | mm | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FÍLER |
| 3/4" | 19,1 | 10,8 | 41,0 | 38,5 | 8,0 | 1,5 |
| 1/2" | 12,7 | 4,7 | 41,0 | 38,5 | 8,0 | 1,5 |
| 3/8" | 9,5 | 1,8 | 41,0 | 38,5 | 8,0 | 1,5 |
| n 4 | 4,76 | 0,1 | 16,0 | 38,3 | 7,9 | 1,5 |
| n 8 | 2,38 | 0,1 | 2,7 | 31,7 | 7,2 | 1,5 |
| n 30 | 0,59 | 0,1 | 1,2 | 14,9 | 5,0 | 1,5 |
| n 50 | 0,297 | 0,1 | 1,0 | 11,4 | 2,3 | 1,4 |
| n 100 | 0,149 | 0,1 | 0,9 | 8,8 | 0,5 | 1,3 |
| n 200 | 0,074 | 0,1 | 0,8 | 5,8 | 0,2 | 0,3 |
| frações | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FÍLER | TOTAL |
| % | 11% | 41% | 38,5% | 8% | 1,5% | 100% |

3 - ESPECIFICAÇÃO E MISTURA

| PENEIRA | mm | Limite | centro faixa | Faixa de Trabalho | | MISTURA |
|---------|-------|----------|--------------|-------------------|------|---------|
| 3/4" | 19,1 | 100 | 100 | 100,0 | 93,8 | 99,8 |
| 1/2" | 12,7 | 100 | 100 | 99,3 | 88,1 | 93,7 |
| 3/8" | 9,5 | 80 - 100 | 90 | 96,2 | 85,3 | 90,8 |
| n 4 | 4,76 | 55 - 75 | 65 | 67,5 | 59,9 | 63,7 |
| n 8 | 2,38 | 35 - 50 | 43 | 45,0 | 41,5 | 43,3 |
| n 30 | 0,59 | 18 - 29 | 24 | 23,6 | 21,8 | 22,7 |
| n 50 | 0,297 | 13 - 23 | 18 | 16,9 | 15,6 | 16,3 |
| n 100 | 0,149 | 8 - 16 | 12 | 12,0 | 11,3 | 11,6 |
| n 200 | 0,074 | 4 - 10 | 7 | 7,2 | 6,9 | 7,1 |





Rua do Comércio 3000
Bairro Universitário
fone: 0xx 55 3332 0505



Dosagem de Concreto Asfáltico - Metodologia Marshall

1 - IDENTIFICAÇÃO

| | |
|-----------|--|
| Projeto: | TCC - Diego Henrique Wesseling |
| Operador: | Diego / Ivan / Salete |
| Ligante: | CAP 20 |
| Data: | 18-set-02 |
| Mistura: | CBUQ - Faixa B DAER - RS |
| Obs: | Tamanho máximo agregado 3/4" Lamelaridade da mistura = 64,96 |

2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL

| | AGREGADOS | | | | | CAP | MISTURA MINERAL | |
|-------------|-----------|---------------------|-------------------|------------------------|----------|-----------|---------------------|-------|
| | % retida | D _{Real} : | D _{ap} : | D _{efetiva} : | Absorção | Densidade | D _{real} : | |
| 3/4"- n° 10 | 61,12 | 3,050 | 2,931 | 2,991 | 1,326 | 1,073 | D _{ap} : | 2,902 |
| pas n° 10 | 38,88 | 2,857 | | | | | D _{efet} : | 2,937 |

3 - ESPECIFICAÇÕES

| <u>Parâmetro</u> | <u>DNER</u> | <u>DAER - RS</u> |
|-------------------|-------------|------------------|
| <u>Parâmetro</u> | <u>CAPA</u> | <u>CAPA</u> |
| Perc. Vazios (%) | 3 a 5 | 3 a 5 |
| RBV (%) | 75 a 82 | 75 a 82 |
| Estabilidade(kgf) | >500 | > 800 |
| Fluência (1/100") | 8 a 18 | 8 a 16 |
| VAM para 3/4" | -- | > 16 |

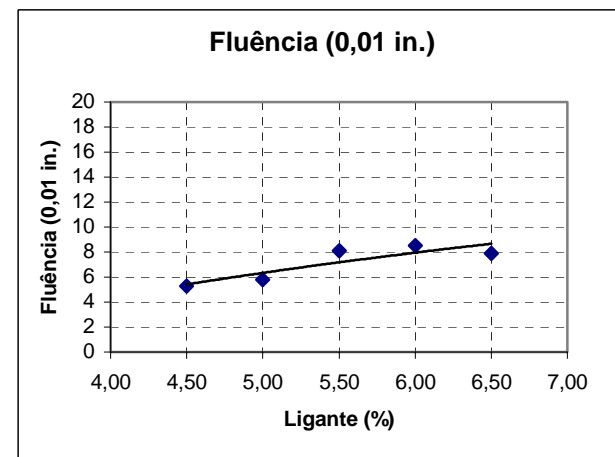
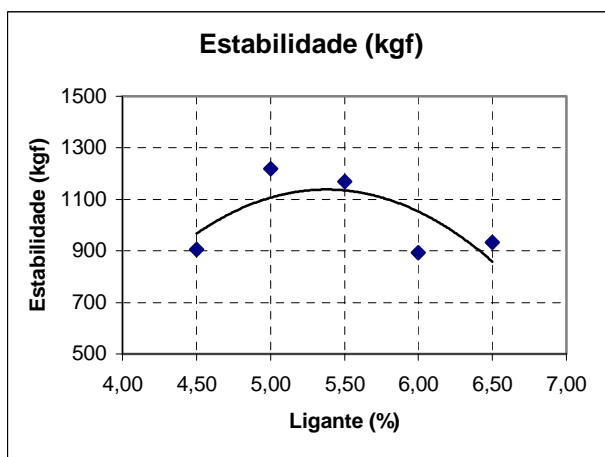
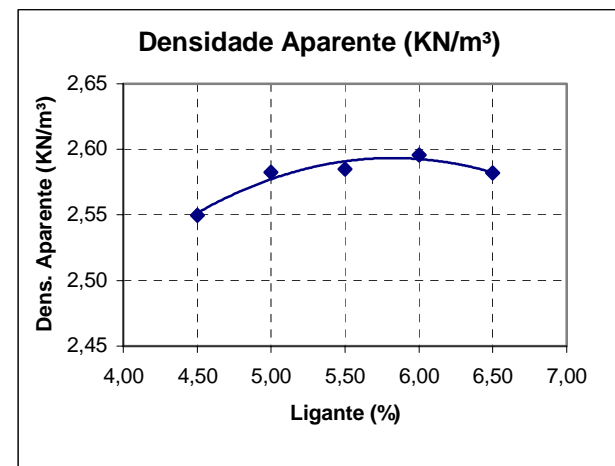
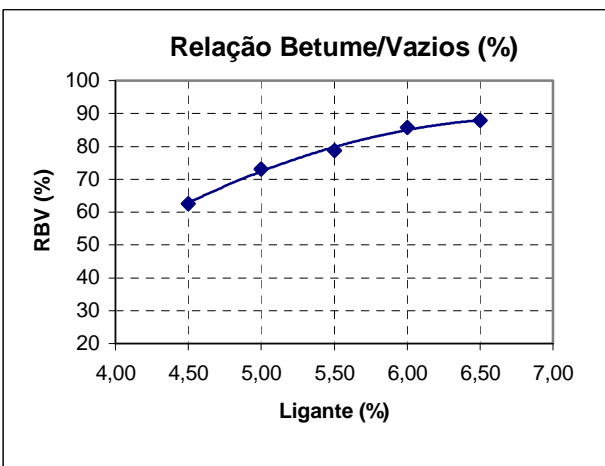
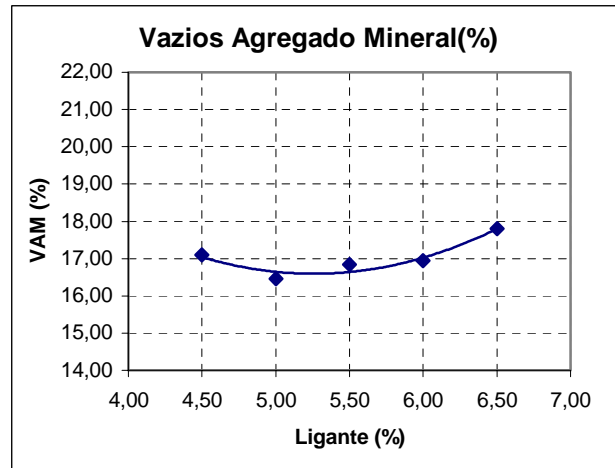
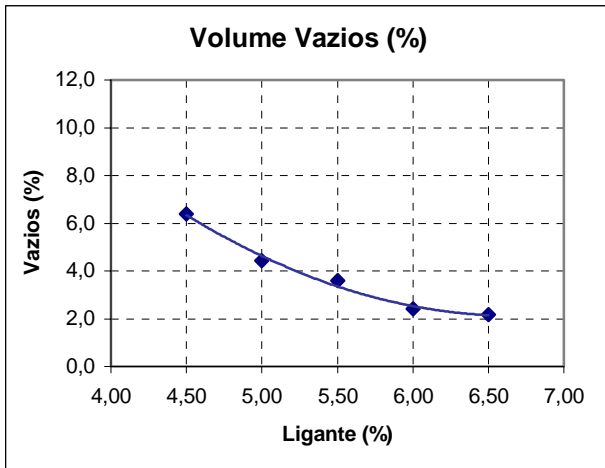
4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO

| | |
|--------------|---|
| Mistura: | manual - Temperatura - 150 -156°C |
| Compactação: | 75 golpes por face em compactador manual - Temperatura - 138 -143°C |

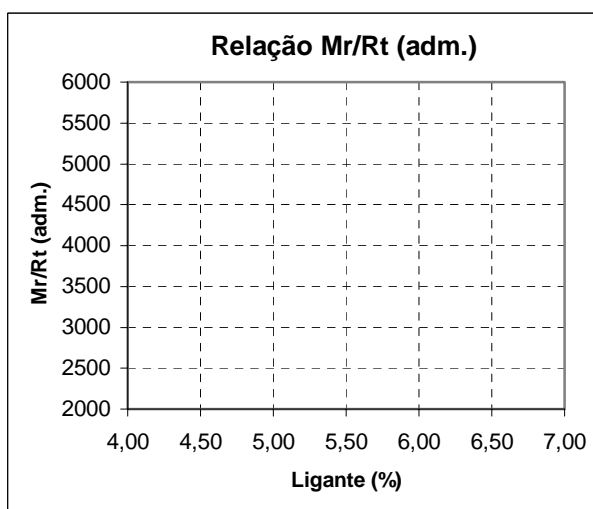
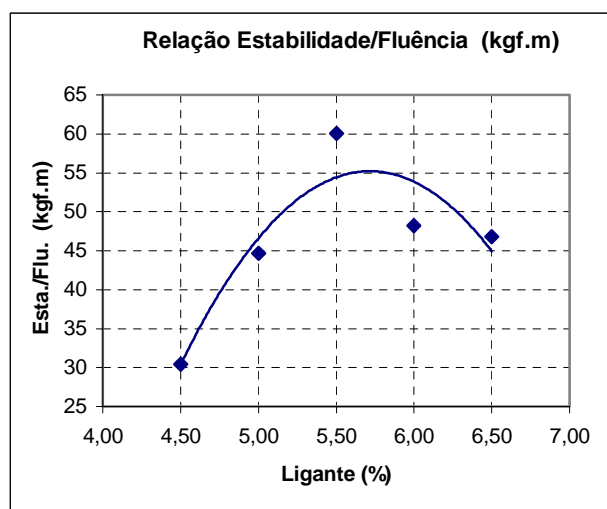
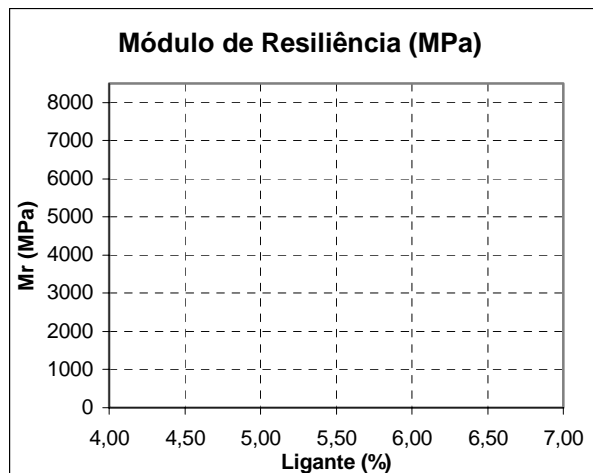
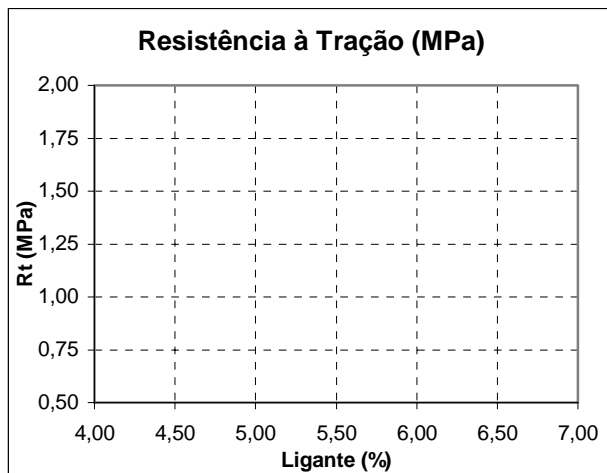
5 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS

| <u>Propriedade</u> | <u>Teor de Betume (%)</u> | | | | |
|---|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 |
| Volume de Vazios (%) | 6,4 | 4,4 | 3,6 | 2,4 | 2,2 |
| Relação Betume Vazios (%) | 63 | 73 | 79 | 86 | 88 |
| Vazios do Agregado Mineral (%) | 17,09 | 16,47 | 16,84 | 16,93 | 17,81 |
| Densidade Máx. Teórica (g/cm ³) | 2,72 | 2,70 | 2,68 | 2,66 | 2,64 |
| Densidade Aparente (g/cm ³) | 2,55 | 2,58 | 2,58 | 2,60 | 2,58 |
| Estabilidade (kgf) | 905 | 1219 | 1170 | 893 | 933 |
| Fluência (1/100 in) | 5 | 6 | 8 | 9 | 8 |
| Resistência à Tração (MPa) | | | | | |
| Módulo de Resiliência (MPa) | | | | | |
| Relação Mr/Rt | | | | | |
| Relação Est/Fluência (kgf.m) | 30 | 45 | 60 | 48 | 47 |

6 - GRÁFICOS METODOLOGIA MARSHALL



7 - GRÁFICOS DE ENSAIOS E PARÂMETROS ADICIONAIS



8 - PROPRIEDADES FINAIS DA MISTURA

| <u>Propriedade</u> | <u>ESP 16/91 DAER</u> | <u>Valor de Projeto</u> |
|---|-----------------------|-------------------------|
| Teor de Betume (%) | -- | 5,20 |
| Volume de Vazios (%) | 3 a 5 | 4,00 |
| Relação Betume Vazios (%) | 75 a 82 | 75,00 |
| Vazios do Agregado Mineral (%) | >16 | 16,60 |
| Densidade Máxima Teórica (kN/m ³) | -- | 2,69 |
| Densidade Aparente (kN/m ³) | 97% (mínimo) | 2,58 |
| Estabilidade (kgf) | > 800 | 1120 |
| Fluência (1/100 in) | 8 a 16 | 6,8 |
| Resistência à Tração (MPa) | -- | 1,19 |
| Módulo de Resiliência (MPa) | -- | 3652 |
| Relação Mr/Rt (adm) | -- | 3069 |
| Relação Est/Fluência (kgf.m) | -- | 51 |
| Relação Filler/Betume (%) | 0,6 a 1,6 (Superpave) | 1,36 |

Caracterização dos Agregados

1 - IDENTIFICAÇÃO

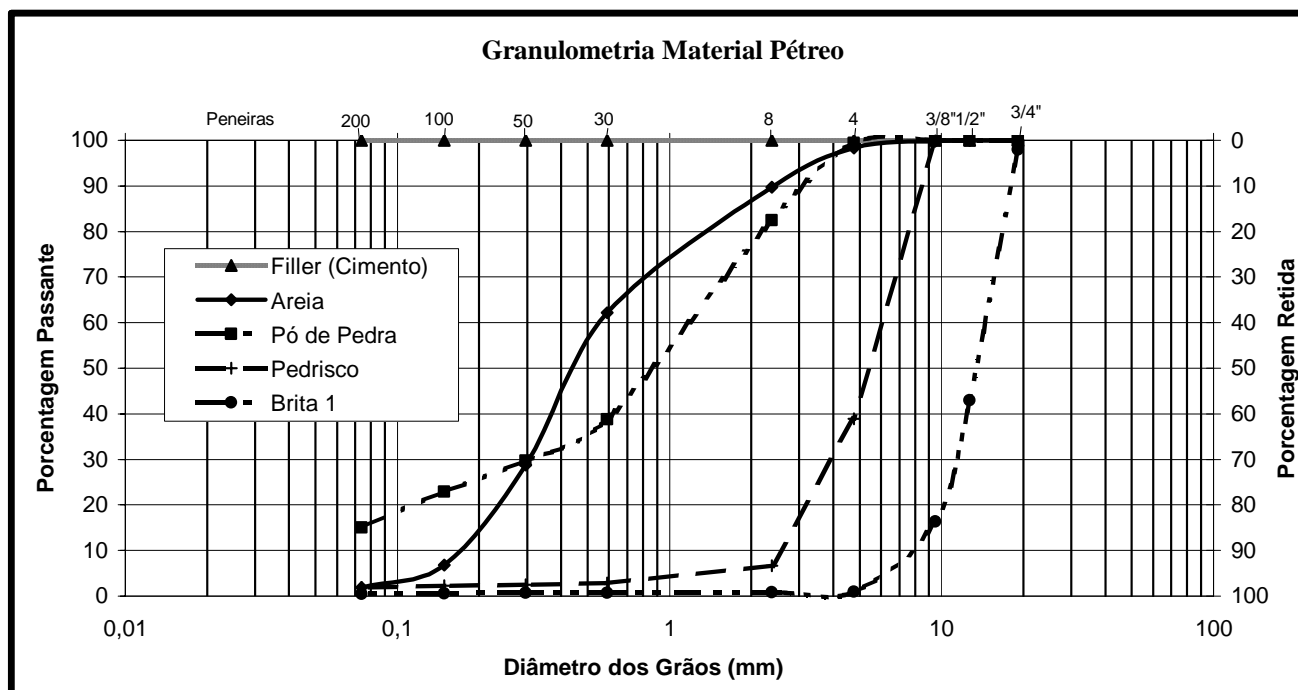
| | |
|-----------|---|
| Projeto: | TCC - Diego Henrique Wesseling |
| Operador: | Diego / Ivan / Salete |
| Data: | 18-set-02 |
| Objetivo: | Projeto de mistura em Concreto Asfáltico Usinado a Quente |
| Obs: | 1,5% Cimento |

2. PROCEDÊNCIA DOS AGREGADOS MINERAIS

| Material | Procedência |
|-----------------|-----------------------------|
| BRITA 1 | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| PEDRISCO | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| PÓ DE PEDRA | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| AREIA FINA | Concreteira Paim - Ijuí- RS |
| FÍLER (CIMENTO) | Cimento CP V - ARI |

3 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

| PENEIRA | mm | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FILLER |
|---------|-------|---------|----------|-------------|------------|--------|
| 3/4" | 19,1 | 98,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 42,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,00 |
| 3/8" | 9,5 | 16,3 | 99,9 | 100,0 | 99,9 | 100,00 |
| n 4 | 4,76 | 1,0 | 38,9 | 99,5 | 98,4 | 100,00 |
| n 8 | 2,38 | 0,8 | 6,7 | 82,5 | 89,7 | 100,00 |
| n 30 | 0,59 | 0,7 | 2,9 | 38,8 | 62,1 | 100,00 |
| n 50 | 0,297 | 0,7 | 2,5 | 29,7 | 28,8 | 100,00 |
| n 100 | 0,149 | 0,6 | 2,3 | 22,9 | 6,9 | 100,00 |
| n 200 | 0,074 | 0,5 | 1,9 | 15,0 | 1,9 | 100,00 |



4. ÍNDICE DE LAMELARIDADE DO AGREGADO GRAUDO (DAER108/01)

| Material | Valor obtido no ensaio (utilização da placa de lamelaridade) |
|----------|--|
| BRITA 1 | 55,66 |
| PEDRISCO | 67,45 |

Composição Granulométrica - Projeto CBUQ

SOLICITANTE: TCC - Diego Henrique Wesseling TRECHO:
DATA: set/02 OBS.: Faixa B DAER/RS (espessura mínima 4cm)

1 - GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

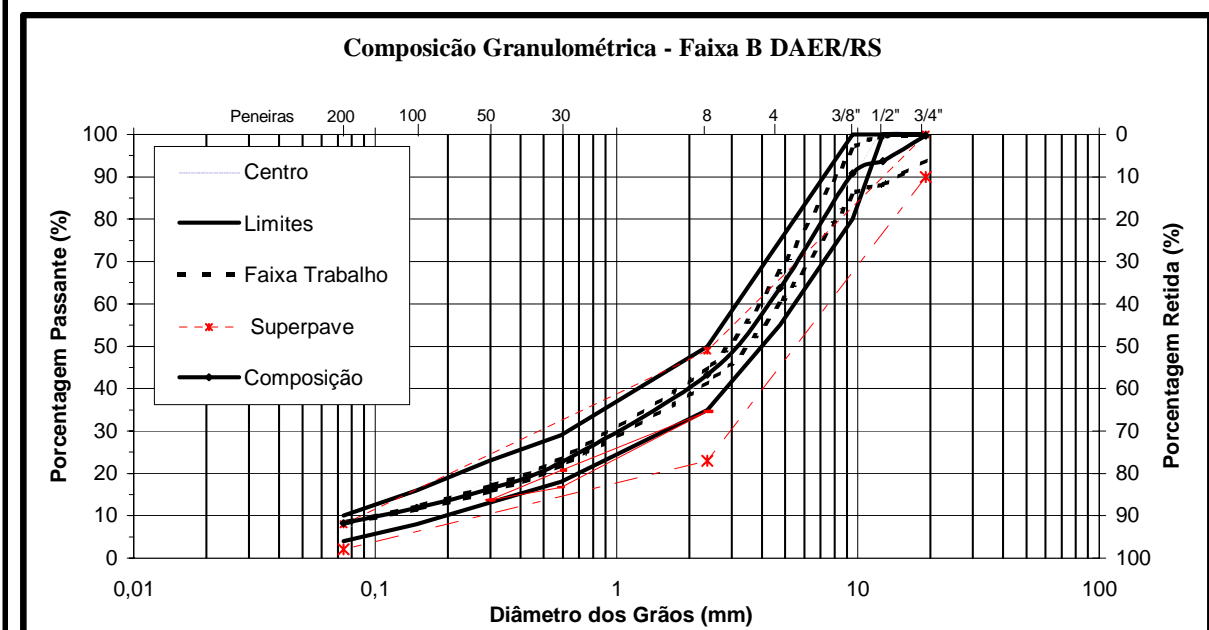
| PENEIRA | mm | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FILLER |
|---------|-------|---------|----------|-------------|------------|--------|
| 3/4" | 19,1 | 98,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1/2" | 12,7 | 42,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3/8" | 9,5 | 16,3 | 99,9 | 100,0 | 99,9 | 100,0 |
| n 4 | 4,76 | 1,0 | 38,9 | 99,5 | 98,4 | 100,0 |
| n 8 | 2,38 | 0,8 | 6,7 | 82,5 | 89,7 | 100,0 |
| n 30 | 0,59 | 0,7 | 2,9 | 38,8 | 62,1 | 100,0 |
| n 50 | 0,297 | 0,7 | 2,5 | 29,7 | 28,8 | 100,0 |
| n 100 | 0,149 | 0,6 | 2,3 | 22,9 | 6,9 | 100,0 |
| n 200 | 0,074 | 0,5 | 1,9 | 15,0 | 1,9 | 100,0 |

2 - COMPOSIÇÃO DA MISTURA

| % mistura | | 11,0% | 41,0% | 38,5% | 8,0% | 1,5% |
|-----------|---------|----------|-------------|-------------|------------|--------|
| PENEIRA | mm | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FILLER |
| 3/4" | 19,1 | 10,8 | 41,0 | 38,5 | 8,0 | 1,5 |
| 1/2" | 12,7 | 4,7 | 41,0 | 38,5 | 8,0 | 1,5 |
| 3/8" | 9,5 | 1,8 | 41,0 | 38,5 | 8,0 | 1,5 |
| n 4 | 4,76 | 0,1 | 16,0 | 38,3 | 7,9 | 1,5 |
| n 8 | 2,38 | 0,1 | 2,7 | 31,7 | 7,2 | 1,5 |
| n 30 | 0,59 | 0,1 | 1,2 | 14,9 | 5,0 | 1,5 |
| n 50 | 0,297 | 0,1 | 1,0 | 11,4 | 2,3 | 1,5 |
| n 100 | 0,149 | 0,1 | 0,9 | 8,8 | 0,5 | 1,5 |
| n 200 | 0,074 | 0,1 | 0,8 | 5,8 | 0,2 | 1,5 |
| frações | BRITA 1 | PEDRISCO | PÓ DE PEDRA | AREIA FINA | FILLER | TOTAL |
| % | 11% | 41% | 38,5% | 8% | 1,5% | 100% |

3 - ESPECIFICAÇÃO E MISTURA

| PENEIRA | mm | Limite | centro faixa | Faixa de Trabalho | | MISTURA |
|---------|-------|----------|--------------|-------------------|------|---------|
| 3/4" | 19,1 | 100 | 100 | 100,0 | 93,8 | 99,8 |
| 1/2" | 12,7 | 100 | 100 | 99,3 | 88,1 | 93,7 |
| 3/8" | 9,5 | 80 - 100 | 90 | 96,2 | 85,3 | 90,8 |
| n 4 | 4,76 | 55 - 75 | 65 | 67,5 | 59,9 | 63,7 |
| n 8 | 2,38 | 35 - 50 | 43 | 45,0 | 41,5 | 43,3 |
| n 30 | 0,59 | 18 - 29 | 24 | 23,6 | 21,8 | 22,7 |
| n 50 | 0,297 | 13 - 23 | 18 | 17,0 | 15,7 | 16,3 |
| n 100 | 0,149 | 8 - 16 | 12 | 12,2 | 11,5 | 11,9 |
| n 200 | 0,074 | 4 - 10 | 7 | 8,4 | 8,1 | 8,3 |



Dosagem de Concreto Asfáltico - Metodologia Marshall

1 - IDENTIFICAÇÃO

| | |
|-----------|--|
| Projeto: | TCC - Diego Henrique Wesseling |
| Operador: | Diego / Ivan / Salete |
| Ligante: | CAP 20 |
| Data: | 18-set-02 |
| Mistura: | CBUQ - Faixa B DAER - RS |
| Obs: | Tamanho máximo agregado 3/4" Lamelaridade da mistura = 64,96 |

2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS E MISTURA MINERAL

| | AGREGADOS | | | | | CAP | MISTURA MINERAL | |
|--------------|-----------|---------------------|-------------------|------------------------|----------|-----------|---------------------|-------|
| | % retida | D _{Real} : | D _{ap} : | D _{efetiva} : | Absorção | Densidade | D _{real} : | 2,983 |
| 3/4" - n° 10 | 61,12 | 3,050 | 2,931 | 2,991 | 1,326 | 1,073 | D _{ap} : | 2,912 |
| pas n° 10 | 38,88 | 2,883 | | | | | D _{efet} : | 2,948 |

3 - ESPECIFICAÇÕES

| <u>Parâmetro</u> | <u>DNER</u> | <u>DAER - RS</u> |
|-------------------|-------------|------------------|
| <u>Parâmetro</u> | <u>CAPA</u> | <u>CAPA</u> |
| Perc. Vazios (%) | 3 a 5 | 3 a 5 |
| RBV (%) | 75 a 82 | 75 a 82 |
| Estabilidade(kgf) | >500 | > 800 |
| Fluência (1/100") | 8 a 18 | 8 a 16 |
| VAM para 3/4" | -- | > 16 |

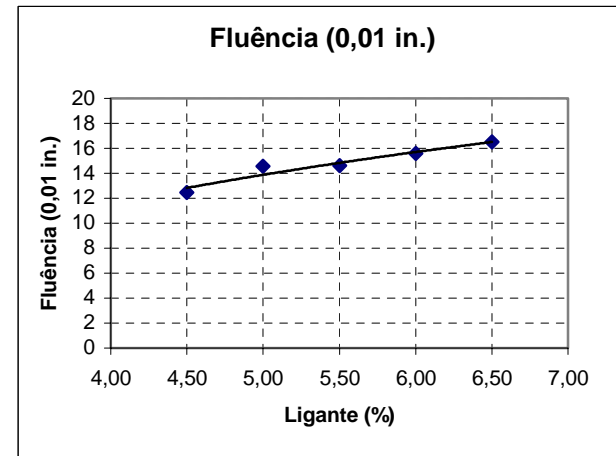
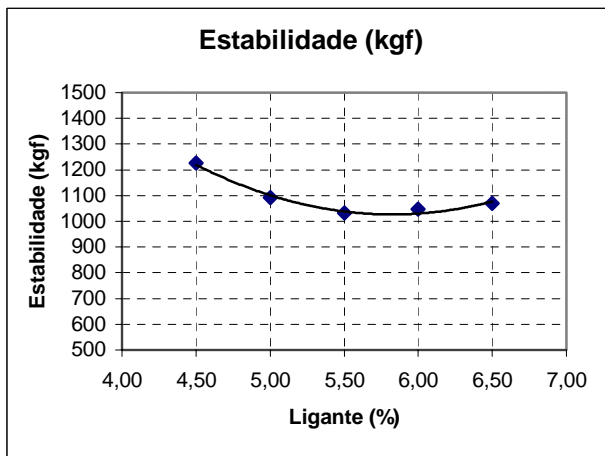
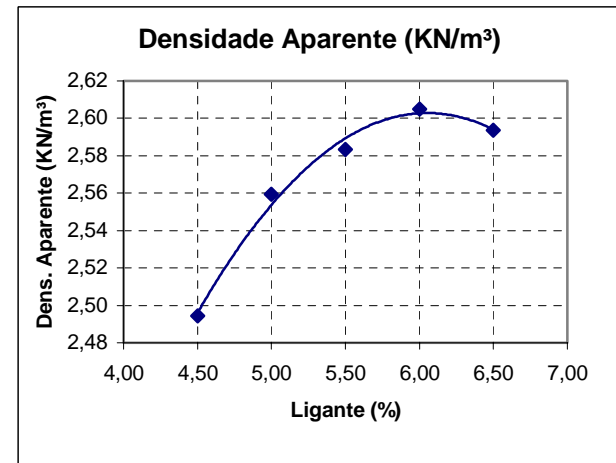
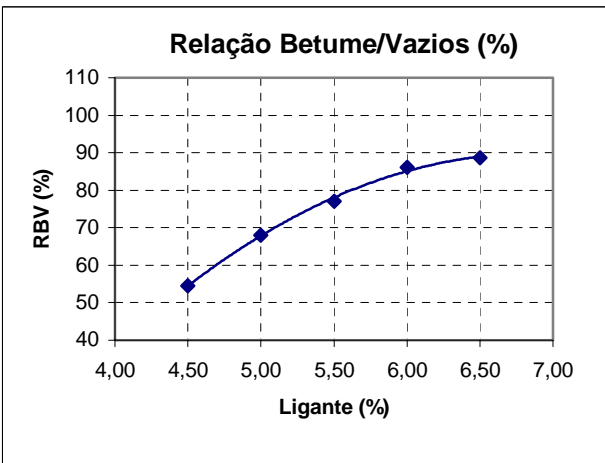
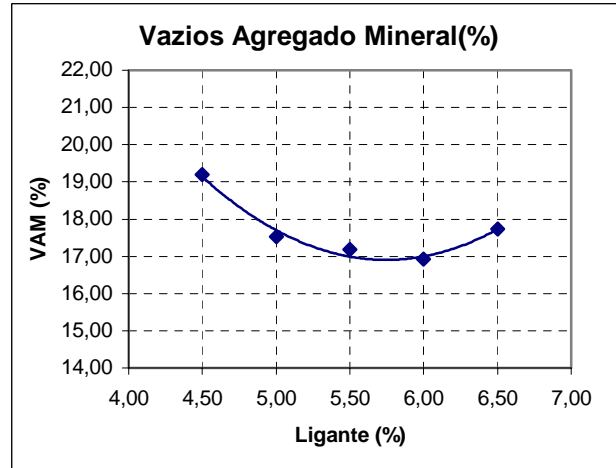
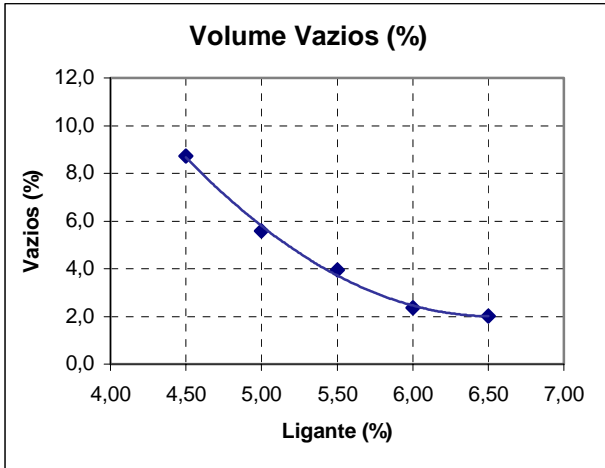
4 - MISTURA E COMPACTAÇÃO

| | |
|--------------|---|
| Mistura: | manual - Temperatura - 150 -156°C |
| Compactação: | 75 golpes por face em compactador manual - Temperatura - 138 -143°C |

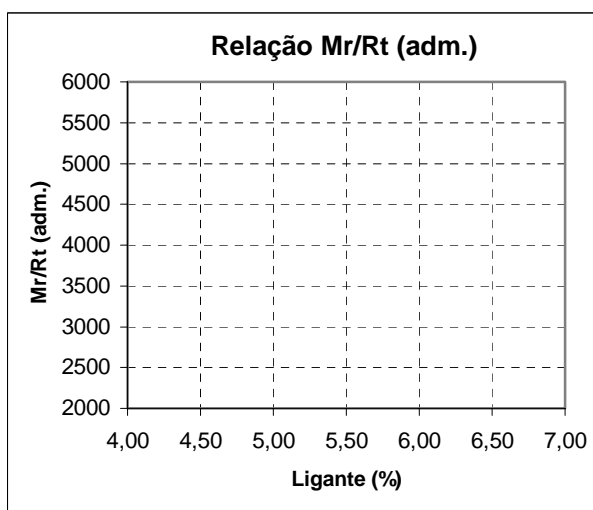
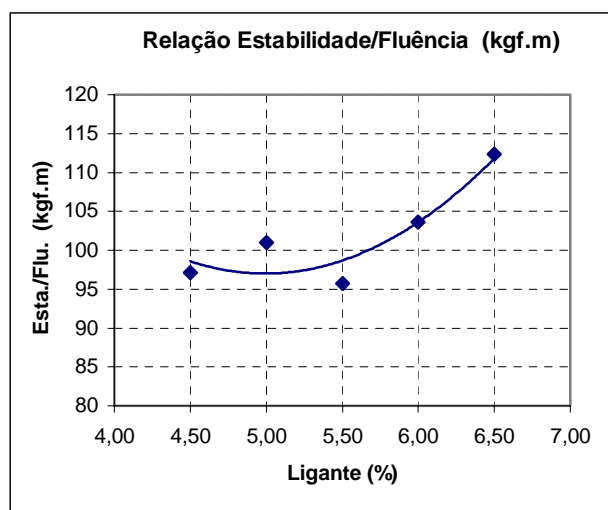
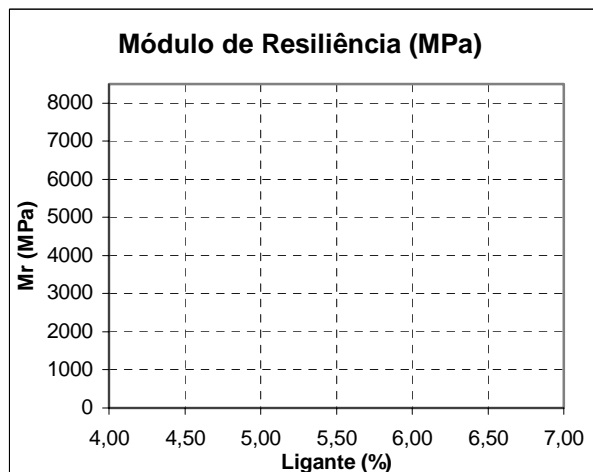
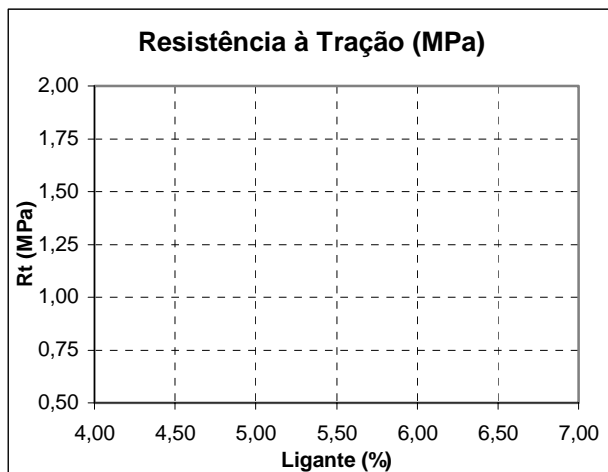
5 - RESUMO DAS CARACTERISTICAS DAS MISTURAS

| <u>Propriedade</u> | <u>Teor de Betume (%)</u> | | | | | |
|---|---------------------------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | |
| Volume de Vazios (%) | 8,7 | 5,6 | 3,9 | 2,4 | 2,0 | |
| Relação Betume Vazios (%) | 55 | 68 | 77 | 86 | 89 | |
| Vazios do Agregado Mineral (%) | 19,19 | 17,52 | 17,18 | 16,93 | 17,73 | |
| Densidade Máx. Teórica (g/cm ³) | 2,73 | 2,71 | 2,69 | 2,67 | 2,65 | |
| Densidade Aparente (g/cm ³) | 2,49 | 2,56 | 2,58 | 2,61 | 2,59 | |
| Estabilidade (kgf) | 1225 | 1092 | 1032 | 1047 | 1070 | |
| Fluência (1/100 in) | 12 | 15 | 15 | 16 | 17 | |
| Resistência à Tração (MPa) | | | | | | |
| Módulo de Resiliência (MPa) | | | | | | |
| Relação Mr/Rt | | | | | | |
| Relação Est/Fluência (kgf.m) | 97 | 101 | 96 | 104 | 112 | |

6 - GRÁFICOS METODOLOGIA MARSHALL



7 - GRÁFICOS DE ENSAIOS E PARÂMETROS ADICIONAIS



8 - PROPRIEDADES FINAIS DA MISTURA

| <u>Propriedade</u> | <u>ESP 16/91 DAER</u> | <u>Valor de Projeto</u> |
|---|-----------------------|-------------------------|
| Teor de Betume (%) | -- | 5,45 |
| Volume de Vazios (%) | 3 a 5 | 4,00 |
| Relação Betume Vazios (%) | 75 a 82 | 78,00 |
| Vazios do Agregado Mineral (%) | >16 | 17,00 |
| Densidade Máxima Teórica (kN/m ³) | -- | 2,69 |
| Densidade Aparente (kN/m ³) | 97% (mínimo) | 2,59 |
| Estabilidade (kgf) | > 800 | 1035 |
| Fluência (1/100 in) | 8 a 16 | 15,2 |
| Resistência à Tração (MPa) | -- | 1,36 |
| Módulo de Resiliência (MPa) | -- | 6789 |
| Relação Mr/Rt (adm) | -- | 4992 |
| Relação Est/Fluência (kgf.m) | -- | 98 |
| Relação Filler/Betume (%) | 0,6 a 1,6 (Superpave) | 1,51 |