

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS
EM CONCRETO BETUMINOSO USINADO À
QUENTE**

FERNANDO STEFENON

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado
Profissionalizante em Engenharia como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
**MESTRE EM ENGENHARIA –
MODALIDADE PROFISSIONALIZANTE.**
Área de concentração: **Geotecnia**

Porto Alegre

2003

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia – Modalidade Profissionalizante e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia.

Orientador: _____

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti, D.Sc.

Banca Examinadora:

Prof. Nilo Cesar Consoli, P.Hd.

Prof. Washington Peres Nuñez, D.Sc.

Prof. Fernando José Pugliero Gonçalves, D.Sc.

Helena Beatriz Bettella Cybis
Coordenadora do Mestrado Profissionalizante em Engenharia

Porto Alegre, dezembro de 2003.

AGRADECIMENTOS

Desejo externar meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas e instituições que possibilitaram a realização deste trabalho:

Ao professor Jorge Augusto Pereira Ceratti , pela orientação, críticas e sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Washington Peres Nuñez e à todos os professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da área de Geotecnia, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas do PPGEC-UFRGS, pelo convívio, amizade e compartilhamento dos conhecimentos acadêmicos e profissionais, adquiridos ao longo dos anos de atividade profissional na Engenharia.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, instituição pública que propiciou a minha graduação e pós-graduação, formadora não somente de profissionais, mas de cidadãos conscientes que lutam por uma sociedade mais justa.

Aos meus pais "in memoriam", pela vida.

À minha esposa, Cláudia, pelo apoio e companheirismo nos momentos difíceis, compreensão pela ausência, fortalecendo a confiança para a conclusão deste trabalho.

Aos meus filhos, Augusto Pedro e Afonso Carlos, dádivas de Deus.

A todos àqueles que, diretamente ou indiretamente, colaboraram na elaboração deste trabalho através de parcerias realizadas, sendo realmente muitos e portanto não serão listados, mas sintam-se todos lembrados com meus agradecimentos.

Por fim, agradeço a Deus por tudo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação.....	1
1.2 Hipóteses e Objetivos da Pesquisa.....	2
1.3 Estrutura do Trabalho.....	3

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico.....	4
2.2 Resíduos Industriais Estudados.....	5
2.3 Areias de Fundição Descartadas.....	5
2.3.1 Generalidades.....	6
2.3.2 Definições.....	6
2.3.3 Uso de Areia na Indústria da Fundição.....	7
2.3.3.1 Areias Verdes.....	8
2.3.3.2 Areias Verdes Incorporadas com Resíduos de Machos.....	8
2.3.3.3 Finos Coletados no Processo de Exaustão das Fundições.....	9
2.4 Resíduos de Laminados de Resina Poliéster Reforçados com Fibra de Vidro.....	10
2.4.1 Generalidades.....	10
2.4.2 Definições.....	10
2.4.3 Uso de Termofixos na Indústria Metal-mecânica e Automotiva.....	11
2.4.3.1 Resina Poliéster.....	11
2.4.3.2 Fibra de Vidro Virgem.....	13

2.5 Incorporação de Resíduos Industriais em Misturas Asfálticas.....	13
2.5.1 Generalidades.....	13
2.5.2 Incorporação de Areias de Fundição Descartadas em Misturas Asfálticas.....	18
2.5.3 Incorporação de Laminados de Fibras de Vidro Descartadas em Misturas Asfálticas.	22

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

3.1 Generalidades.....	29
3.2 Estudo de Incorporação de Areias de Fundição Descartadas em Misturas Asfálticas.....	30
3.2.1 Agregados.....	30
3.2.1.1 Agregados Pétreos.....	31
3.2.1.1.1 Agregado Graúdo.....	32
3.2.1.1.2 Agregado Miúdo.....	32
3.2.2 Areia para Correção do Traço da Mistura de Agregados	32
3.2.3 Areias de Fundição Descartadas.....	33
3.2.3.1 Areias Verdes.....	36
3.2.3.2 Areias Verdes Misturadas com Resíduos de Machos.....	36
3.2.3.3 Finos Coletados no Processo de Exaustão das Fundições.....	37
3.2.4 Ligante Betuminoso	37
3.3 Estudo de Incorporação de Laminados de Fibras de Vidro Descartadas em Misturas Asfálticas.....	38
3.3.1 Agregados.....	38
3.3.1.1 Agregados Pétreos.....	39
3.3.1.1.1 Agregado Graúdo.....	40
3.3.1.1.2 Agregado Miúdo.....	40
3.3.2 Areia para Correção do Traço da Mistura de Agregados	40
3.3.3 Laminados de Fibras de Vidro Descartadas.....	41
3.3.4 Ligante Betuminoso	43

4 MÉTODOS DE ENSAIO DE MISTURAS BETUMINOSAS

4.1 Generalidades.....	45
4.2 Ensaio Preliminares.....	45

4.3 Ensaio Marshall – Método de Dosagem.....	45
4.3.1 Considerações.....	46
4.3.2 Equipamentos Utilizados.....	47
4.3.3 Roteiro e Particularidades.....	49
4.4 Ensaio Complementares.....	51
4.4.1 Ensaio de Resistência à Tração.....	52
4.4.1.1 Considerações.....	52
4.4.1.2 Equipamentos Utilizados.....	52
4.4.1.3 Roteiro e Particularidades.....	52
4.4.2 Ensaio de Módulo de Resiliência.....	54
4.4.2.1 Considerações.....	54
4.4.2.2 Equipamentos Utilizados.....	54
4.4.2.3 Roteiro e Particularidades.....	56
4.4.3 Ensaio Ambientais.....	56
4.4.3.1 Considerações.....	57
4.4.3.2 Equipamentos Utilizados.....	58
4.4.3.3 Roteiro e Particularidades.....	58
5 METODOLOGIA CIENTÍFICA	
5.1 Generalidades.....	59
5.2 Propriedades Fundamentais Estudadas.....	60
5.2.1 Definições.....	60
5.3 Fundamentação Teórica.....	61
5.3.1 Cálculos e Equações.....	61
5.3.1.1 Quantidade de ligante a ser adicionado à mistura.....	62
5.3.1.2 Massa específica real dos agregados da mistura.....	62
5.3.1.3 Massa específica aparente dos agregados da mistura.....	62
5.3.1.4 Densidade efetiva do agregado da mistura.....	62
5.3.1.5 Densidade máxima teórica da mistura.....	63
5.3.1.6 Volume de vazios da mistura.....	63
5.3.1.7 Vazios do agregado mineral.....	63
5.3.1.8 Relação betume/vazios.....	64

5.3.1.9 Estabilidade.....	64
5.3.1.10 Fluência.....	64
5.3.1.11 Resistência à Tração.....	65
5.3.1.12 Módulo de Resiliência	65
5.3.1.13 Teor Ótimo de Betume.....	66

6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Generalidades.....	67
6.2 Estudo de Incorporação de Areias de Fundação Descartadas em Misturas Asfálticas.....	68
6.2.1 Misturas de Agregados.....	68
6.2.2 Parâmetros Marshall e Ensaio Mecanísticos.....	70
6.2.3 Ensaio Ambientais.....	74
6.2.4 Avaliação dos Resultados	74
6.3 Estudo de Incorporação de Laminados de Fibras de Vidro Descartadas em Misturas Asfálticas.....	76
6.3.1 Misturas de Agregados.....	76
6.3.2 Parâmetros Marshall e Ensaio Mecanísticos.....	78
6.3.3 Ensaio Ambientais.....	81
6.3.4 Avaliação dos Resultados.....	81

7 EXECUÇÃO DE TRECHO EXPERIMENTAL

7.1 Generalidades.....	83
7.2 Projeto de Pavimentação.....	84
7.3 Controle Tecnológico na Execução	86
7.4 Proposta de Monitoramento Durante a Vida Útil do Pavimento.....	91

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Conclusões.....	92
8.2 Sugestões para Ensaio Complementares.....	94
8.3 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	95

ANEXOS

ANEXO I – Relatório de Ensaio Marshall – Estudo da Incorporação de Areias de Fundição Descartadas em Misturas Asfálticas

ANEXO II – Relatório de Ensaio Marshall – Estudo da Incorporação de Fibras de Vidro Descartadas em Misturas Asfálticas

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Utilização de Asfalto-Borracha no estado do Arizona, EUA, (Way, 2000).....	16
Figura 2.2 Trincamento do pavimento com AR e sem AR ao longo do tempo, (Way, 2000)	17
Figura 2.3 Custos de manutenção de recapamentos com AR e sem AR, (Way, 2000).....	17
Figura 2.4 Graduação descontínua da mistura de SMA.....	26
Figura 3.1 Curvas granulométricas dos materiais granulares e areias de fundição.....	31
Figura 3.2 Mistura de areias de mesma classificação de diferentes empresas.....	33
Figura 3.3 Amostras homogêneas das areias de fundição descartadas.....	34
Figura 3.4 Curvas granulométricas dos materiais granulares e fibra de vidro.....	39
Figura 3.5 Fibra de vidro moída em moinho de martelos.....	41
Figura 4.1 Estratégia Experimental - Areias de fundição.....	46
Figura 4.2 Estratégia Experimental - Fibra de vidro.....	47
Figura 4.3 Cuba planetária para dosagem Marshall.....	48
Figura 4.4 Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico.....	53
Figura 4.5 Esquema do equipamento para ensaio de resiliência.....	55
Figura 4.6 Ensaio ambientais nas amostras de CBUQ após fragmentação.....	57
Figura 5.1 Determinação do teor ótimo de asfalto, Ogurtsova et. al. (1999) e Pinto (1997)	66
Figura 6.1 Curva granulométrica da mistura de referência M0.....	70
Figura 6.2 Curvas obtidas no método Marshall para as misturas estudadas.....	72
Figura 6.3 Parâmetros Marshall para os teores ótimos de asfalto para as misturas estudadas	73
Figura 6.4 Parâmetros de MR e Rt para teores ótimos de asfalto das misturas estudadas...	74
Figura 6.5 Curva granulométrica da mistura de referência.....	77
Figura 6.6 Curvas obtidas no método Marshall para as misturas estudadas.....	79
Figura 6.7 Parâmetros Marshall para os teores ótimos de asfalto para as misturas estudadas	80
Figura 6.8 Parâmetros de MR e Rt para teores ótimos de asfalto das misturas estudadas..	81
Figura 7.1 Foto do trecho experimental implantado em Caxias do Sul, RS.....	84
Figura 7.2 Adição da fibra de vidro na mistura betuminosa na usina.....	87
Figura 7.3 Médias das deflexões na camada de base granular com uso da viga benkelman.	90
Figura 7.4 Seção tipo do trecho experimental na Av. Perimetral Sul - Caxias.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Propriedades físicas e mecânicas das areias de fundições descartadas (verdes)...	20
Tabela 2.2 Composição básica dos resíduos de areia de fundição.....	21
Tabela 2.3 Composição básica das telhas de fibra de vidro.....	23
Tabela 2.4 Propriedades básicas das telhas de fibra de vidro.....	23
Tabela 3.1 Composição granulométrica dos agregados e das areias de fundição estudadas..	31
Tabela 3.2 Resultados de umidade, S.V. e pH das amostras de areias de fundição	34
Tabela 3.3 Resultados obtidos no teste de lixiviação das amostras de areias de fundição.....	35
Tabela 3.4 Resultados do teste de solubilização das amostras de areias de fundição.....	35
Tabela 3.5 Classificação por viscosidade - cimento asfáltico de petróleo.....	37
Tabela 3.6 Composição granulométrica dos agregados e da fibra de vidro.....	39
Tabela 3.7 Composição do resíduo de fibra de vidro.....	42
Tabela 3.8 Resultados do teste de lixiviação do resíduo.....	42
Tabela 3.9 Resultados do teste de solubilização do resíduo.....	43
Tabela 3.10 Classificação por viscosidade – cimento asfáltico de petróleo.....	43
Tabela 5.1 Fatores de correção em função da absorção do agregado.....	63
Tabela 6.1 Frações de materiais nas misturas de agregados estudadas	68
Tabela 6.2 Composição granulométrica das misturas de agregados estudadas.....	69
Tabela 6.3 Resultados dos parâmetros Marshall para as misturas estudadas.....	71
Tabela 6.4 Resultados dos parâmetros de resistência à tração e resiliência.....	71
Tabela 6.5 Ensaio ambientais das amostras dos corpos de prova fragmentados.....	74
Tabela 6.6 Frações de materiais nas misturas de agregados estudadas.....	76
Tabela 6.7 Composição granulométrica das misturas de agregados estudadas.....	77
Tabela 6.8 Resultados dos parâmetros Marshall para as misturas estudadas.....	78
Tabela 6.9 Resultados dos parâmetros de resistência à tração e resiliência.....	78
Tabela 6.10 Ensaio ambientais das amostras dos corpos de prova fragmentados.....	81
Tabela 7.1 Resumo dos Parâmetros de projeto das camadas do pavimento.....	85
Tabela 7.2 Controle tecnológico na execução das camadas estruturais do pavimento.....	88

RESUMO

Um dos maiores desafios da sociedade moderna é a descoberta de novas alternativas para a destinação de resíduos gerados em processos produtivos na indústria, que diminuam a degradação ambiental visando o progresso sustentável. A mudança na forma de enfrentar o problema, passando a valorizar o resíduo tratando-o com “status” de matéria-prima, através da incorporação em misturas asfálticas, minimiza a exploração de matéria-prima natural com ganho ambiental, tecnológico e econômico. Nesta pesquisa, aplicam-se métodos tradicionais de laboratório e de campo, que possibilitam avaliar o comportamento estrutural e ambiental da camada asfáltica com os resíduos industriais incorporados. Apresentam-se as propriedades avaliadas, comparando-as com propriedades usualmente verificadas em misturas do tipo cbuq, analisando as vantagens e desvantagens, a fim de estabelecer metodologia padronizada para avaliação do desempenho das misturas asfálticas estudadas, auxiliando àqueles que tem interesse na utilização de “

melhor compreensão da natureza dos materiais e quais propriedades necessitam ser avaliadas para possibilitar o seu uso em aplicações de pavimentos. A aplicação da metodologia Marshall, de ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência mostraram comportamento mecânico adequado, e as relações de M_R/R_t forneceram indicativo de leve aumento na rigidez e vida de fadiga semelhante às misturas convencionais. Para avaliação ambiental os métodos empregados basearam-se nas exigências preconizadas pela ABNT, referentes à amostragem, classificação, lixiviação e solubilização de resíduos, não sendo observadas alterações na emissão de contaminantes. Os resultados mostraram o potencial da abordagem realizada, demonstrando que podem ser aplicados os mesmos métodos, procedimentos e equipamentos usualmente empregados na pavimentação rodoviária. Por fim, apresentam-se metodologia empregada na implantação de um trecho experimental, sob ação de cargas reais de tráfego e variações climáticas, e proposta de monitoramento ao longo da vida útil do pavimento, a fim de verificar o comportamento e estabelecer padrões de desempenho de misturas asfálticas incorporadas com resíduos industriais.

Palavras chave: misturas asfálticas; comportamento mecânico; monitoramento ambiental; resíduos industriais; fibra de vidro; areia de fundição.

ABSTRACT

One of the biggest challenges of the modern society is the discovery of new alternatives for the destination of residues generated in productive processes in the industry, that diminish the environmental degradation aiming at the sustainable progress. It value the residue treating him with status of raw material, would minimize the natural raw material exploration, with environmental profit, technological and economic. As objective of the research, traditional methods of laboratory and field are applied, that they make possible to evaluate the structural and environmental behavior of the asphalt layer with the incorporated industrial residues, comparing the results with properties usually verified in mixtures of the hot-mix asphalt concrete, analyzing the advantages of the recouped use of by-products. The results demonstrated adequate mechanical behavior, with indicative of light increase in the stiffness and life of fatigue alike to the conventional mixtures, demonstrating that the same methods, procedures and usually used equipment in the road pavement can be applied. For environmental evaluation the employed methods had been based on the norms of the "ABNT", not being observed alterations in the emission of contaminantes. Finally, methodology used in the implantation of an experimental pavement section is presented, under real load action of traffic and climatic variations, and one proposal of evaluation to the long of the life service of the pavement, in order to verify the behavior and to establish standards of performance of incorporated asphalt mixtures with residues and by-products.

Keywords: asphalt mixtures; mechanical behavior; environmental evaluation; industrial residues; waste fiberglass; spent foundry sand.

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Com a crescente preocupação da sociedade e poder público com o meio ambiente, bem como a crescente deterioração da malha rodoviária brasileira, principal via utilizada para o transporte no país, ocorre o crescimento na comunidade científica de estudos que visam o tratamento e disposição adequada de resíduos, que são simplesmente abandonados a céu aberto pela fonte geradora e, também, para melhoramento das propriedades das camadas de rolamento dos pavimentos, principalmente de misturas asfálticas.

Ao mesmo tempo, são praticados altos custos para tratamento e disposição adequada de resíduos oriundos de processos de fabricação industrial, nota-se também o aumento do custo dos materiais tradicionais utilizados na pavimentação rodoviária.

Os **materiais poliméricos termofixos**, como as resinas de poliéster reforçadas com laminados de fibra de vidro, são utilizados abundantemente na indústria automobilística, metal-mecânica e de transformação. Os **materiais naturais (areia de jazida) aglomerados com aditivos ou resinas**, como areias de fundição, são utilizados largamente na indústria nos processos de fundição de peças metálicas. O estudo para reaproveitamento dos resíduos desses materiais decorrentes do processo produtivo, os quais também são denominados de materiais descartados, é uma alternativa encontrada para viabilizar a solução dos problemas apresentados.

1.2 HIPÓTESES E OBJETIVOS DA PESQUISA

Nos últimos anos, o estudo de materiais para pavimentação e a utilização em misturas betuminosas, têm aumentado de forma significativa, sendo extensivamente pesquisados em diversos países do mundo, entre eles o Brasil.

Além de estudos envolvendo misturas betuminosas através da metodologia Marshall, criada na década de 30 nos EUA e usualmente aceita e difundida no Brasil, onde são obtidos resultados de estabilidade, fluência, densidades, índice de vazios, teor ótimo de ligante, vazios do agregado mineral e a relação betume/vazios da mistura, ensaios para obtenção do módulo de resiliência e da resistência à tração são necessários, visto que simulam de forma mais apropriada as propriedades de deformabilidade e resistência da camada asfáltica.

Estudos complementares desenvolvidos para determinar as propriedades da mistura e as variáveis que têm influência na determinação de suas propriedades, como ensaios de rigidez, estabilidade e deformação permanente, durabilidade, resistência à fadiga, trincamento, permeabilidade e adesividade, foram aplicados no uso de resíduo de borracha em misturas asfálticas, conforme revisão da prática de utilização de borracha na engenharia rodoviária, Epps (1994), indicando como tendência a não utilização de receitas prontas de misturas, projetando-as de acordo com as solicitações de cada projeto. A metodologia SUPERPAVE, para projeto de dosagem de misturas, também já foi pesquisada e utilizada em misturas asfálticas com uso de resíduos de borracha, com a seleção do ligante em função da temperatura da região de projeto e da intensidade de tráfego atuante.

O objetivo principal do estudo é a incorporação desses materiais descartados em misturas asfálticas, como alternativa para solucionar os problemas apresentados, encontrando misturas asfálticas que atendam as principais características que as camadas de rolamento de pavimentos flexíveis devem atingir, como baixa deformabilidade, impermeabilidade e resistência ao carregamento, atendendo as normas técnicas de pavimentação e às condições ambientais estabelecidas, proporcionando segurança e conforto ao rolamento para o usuário, redução do custo final para a fonte geradora, sociedade e poder público.

Especificamente, busca-se avaliar o desempenho dessas misturas asfálticas, verificar o comportamento das propriedades físicas, mecânicas e ambientais, sugerir um indicativo da

resistência à fadiga, às deformações permanentes e ao trincamento, apresentar as vantagens e desvantagens no desempenho dos pavimentos asfálticos, através da incorporação de resíduos industriais em misturas asfálticas do tipo cbuq.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Apresenta uma introdução, as hipóteses e o problema de pesquisa, os objetivos e a forma como este trabalho está estruturado;
- Capítulo 2: Apresenta a revisão bibliográfica sobre a utilização de resíduos em misturas betuminosas, incluindo as particularidades dos resíduos estudados;
- Capítulo 3: Os materiais utilizados são apresentados e caracterizados, sendo listadas as propriedades fundamentais físicas, químicas e ambientais;
- Capítulo 4: São descritos os métodos de ensaio utilizados, dosagem Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e ensaios ambientais, descrevendo o procedimento experimental e os equipamentos empregados;
- Capítulo 5: A fundamentação teórica para realização da pesquisa está apresentada no decorrer deste capítulo, com as equações relacionadas à pesquisa;
- Capítulo 6: São apresentados os resultados dos testes experimentais realizados em laboratório e, posteriormente, realizada análise e discussão dos parâmetros obtidos, considerando as particularidades de cada estudo;
- Capítulo 7: Este capítulo apresenta a metodologia empregada para implantação de um trecho experimental, com a execução de um pavimento asfáltico de cbuq, adicionando-se resíduos industriais na mistura asfáltica;
- Capítulo 8: A abordagem baseia-se em considerações adicionais sobre os resultados obtidos com o programa experimental realizado, com conclusões e sugestões para ensaios adicionais e trabalhos futuros;
- Anexos I e II: Os relatórios completos da metodologia de dosagem Marshall estão apresentados em tabelas e gráficos, para cada mistura estudada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica aborda os tópicos fundamentais relacionados ao estudo de resíduos industriais, com o enfoque voltado para a utilização de resíduos laminados de resina poliéster reforçada com fibra de vidro, e resíduos de areias de fundição como subprodutos na pavimentação rodoviária, efetuando a pesquisa do estado da arte do uso alternativo de resíduos na incorporação em misturas asfálticas.

2.1 HISTÓRICO

Os registros mais antigos de utilização de resíduos em misturas asfálticas datam no início do século XX, em países como Holanda e Inglaterra, mas foram interrompidos e abandonados em função da Segunda Guerra Mundial. Charles H. McDonald, a partir do ano de 1960, iniciou a utilização em escala real de farelos de borrachas de pneus inservíveis nos EUA, em operações tapa buraco e pavimentação de ruas com baixo volume de tráfego. Desde então, inúmeras pesquisas foram realizadas pela comunidade científica internacional, com execução de pistas experimentais e rodovias, citando como exemplo o uso de farelo de borracha de pneus inservíveis em misturas asfálticas, sendo muito utilizado em diversos países, inclusive no Brasil.

Segundo o GEIPOT (2001), no Brasil aproximadamente 63% do transporte nacional é realizado através de via rodoviária, sendo o meio de transporte que produz maior impacto ambiental causador de efeitos negativos como poluição do ar, pela emissão de gases e

partículas na atmosfera, devido à combustão dos combustíveis e, a poluição dos solos por resíduos de óleos e combustíveis, pneus usados e sucatas em geral.

O aumento progressivo nos custos dos materiais tradicionais utilizados em pavimentação, e a redução da disponibilidade desses materiais naturais, aliado ao fato de serem constantemente inseridas na construção e manutenção de pavimentos rodoviários novas exigências e limitações, exigem dos profissionais ligados à área tecnológica estudos que visem o aproveitamento máximo dos recursos naturais existentes, e descoberta de novos materiais de construção com custos mais baixos.

2.2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS ESTUDADOS

O resíduo sólido industrial "areia de fundição" é gerado na etapa de desmoldagem de peças metálicas em processos de fundição metalúrgica. Um dos principais problemas atualmente das indústrias de fundição espalhadas no mundo é a geração, em quantidades significativas, dos resíduos de areias de fundição .

Da mesma forma, em vários estados do Brasil, os resíduos de resinas de poliéster e laminados de fibra de vidro são materiais que se encontram hoje sem utilização, sendo geralmente colocados em aterros. Por meio da moagem deste resíduo, podem ser encontradas soluções alternativas para o problema, com a reutilização do resíduo, para eliminar definitivamente a sua estocagem.

Por isso, estudos vêm sendo realizados com o objetivo de incorporação dos resíduos no asfalto, para verificar o comportamento das propriedades das misturas asfálticas incorporadas com resíduos, reduzir o passivo ambiental dos aterros de resíduos, propiciar recuperação de matéria e energia, e diminuir a destruição dos recursos não-renováveis.

2.3 AREIAS DE FUNDIÇÃO DESCARTADAS

Desde tempos imemoriais que o sistema para fundir metais depende dos moldes feitos com areia prensada em conjunto com um ligante e, mesmo que, em alguns casos, seja

reutilizada a areia no processo de fundição, há a necessidade de dispor os rejeitos no meio ambiente.

2.3.1 Generalidades

A capacidade de formar objetos muito complexos, tanto na parte interna como na parte externa de peças, é o fator preponderante para a utilização do processo de fundição em detrimento de outros processos de manufatura de componentes metálicos. Os produtos podem ser confeccionados com ampla faixa de tamanho, peso e complexidade.

Miller (1998) , pesquisou as indústrias de fundição nos EUA e constatou que mais de 2.300 fundições estão em operação naquele país. A indústria de fundição americana observou a necessidade de reduzir as areias de fundição descartadas, para minimizar os custos de aterramento e destino final, visto que são dispostas em aterro mais de 750.000 toneladas anuais de resíduos de areias de fundição.

Estima-se que o número de fundições em atividade no Brasil ultrapasse 1.000 empresas, conforme Mariotto (2000), sendo a grande maioria de pequeno porte com menos de 100 empregados.

Em estudos realizados pela Universidade de Caxias do Sul (2002), foram quantificados na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, a geração de aproximadamente 1.600 toneladas por mês de resíduos de areias de fundição desperdiçados, em sua maioria areias verdes misturadas com algum tipo de resina sintética.

2.3.2 Definições

Apresentam-se abaixo algumas definições necessárias ao entendimento deste capítulo:

Fundição é um processo industrial de moldagem de peças metálicas, utilizando metal líquido vazado nos moldes para conformação das peças.

Moldes são os elementos que dão forma externa das peças fundidas.

Machos são os recortes utilizados para peças complexas, principalmente para confecção de cavidades e passagens internas das peças, e necessitam de resinas poliméricas que forneçam maior qualidade no acabamento do molde.

Aglomerantes são materiais que variam conforme a peça a ser produzida, podendo ser resinas sintéticas, contendo geralmente componentes fenólicos, para ligar quimicamente as partículas de areia, ou simplesmente argila bentonita, pó de carvão e água.

Areia nova é o material natural proveniente de jazida, constituída basicamente de sílica e quartzo, sendo adicionada no início do processo de fundição para conformação do molde.

Areia verde é denominada a mistura da areia nova com aglomerante de argila, pó de carvão e água, sendo a mais utilizada no processo de fundição.

2.3.3 Uso de Areia na Indústria da Fundição

A moldagem em areia é o método mais utilizado em todo o mundo para a produção de peças fundidas. Apenas no Estado de São Paulo, estima-se que o excedente de areia de fundição seja aproximadamente 1 milhão de toneladas por ano. Isso representa, que a cada ano a mesma quantidade de areia de jazida tenha que ser extraída, para entrar no início do processo de fundição como areia nova.

A AFS - American Foundrymen's Society (1991) relata que pode ser feita, aproximadamente, a seguinte relação: nos EUA, para cada tonelada de peça fundida em ferro ou aço, é descartada 1 tonelada de resíduo de areia utilizada na fundição dessas peças.

O processo de moldagem em areia em fundição pode ser resumido da seguinte forma: o molde é montado de acordo com as características da peça a ser produzida, sendo a face externa geralmente moldada com areia verde e, caso seja necessário, para conformar a parte interna da peça são utilizados machos de areia aglomerada com resinas sintéticas. Após montado o molde, o metal líquido é vertido em seu interior e permanece até solidificar. Em seguida é realizada a desmoldagem, separando a peça metálica da areia, sendo que parte da areia retorna ao início do processo para confecção da face externa de novos moldes, após passar por peneiramento para retirada de torrões e pedaços de metal, e exaustão forçada para retirada de excedentes finos originados com o vazamento do metal líquido nos moldes.

Os machos são descartados, já que para a confecção de novos moldes de macharia, a areia deve ser nova, devido a atual tecnologia de moldagem de machos requerer areias extremamente limpas.

A areia verde é descartada sistematicamente, principalmente, devido aos seguintes fatores: frequência de defeitos que apresentem as peças fundidas, como penetração de areia, escamas, rugosidade e bolhas, entre outros; para manter as propriedades mínimas de resistência, plasticidade, permeabilidade e compactibilidade da areia de moldagem; e perdas durante as operações normais de fundição.

Ocorre, então, a necessidade de entrada de areia nova no processo, gerando um excedente de areia que é eliminada do circuito e descartada do processo produtivo, denominada de areia de fundição descartada.

2.3.3.1 Areias Verdes

Aproximadamente 80% das fundições existentes no Brasil utilizam essas areias para moldagem de peças metálicas. Nos EUA, relatório da AFS (1991), relata que através de pesquisa na indústria de fundição americana foram observadas que 90% utilizavam areia verde para confecção dos moldes.

Areia verde é uma mistura normalmente de areia natural, aglomerada com argila bentonítica, pó de carvão mineral ou vegetal e adiciona-se água, para dar plasticidade à mistura a seco do molde. Existem processos produtivos em fundições que utilizam apenas areias verdes para confecção das peças fundidas, portanto gerando como resíduo sólido apenas areia verde descartada.

2.3.3.2 Areias Verdes Incorporadas com Resíduos de Machos

Devido a diversificadas linhas de produção de peças fundidas, ocorre frequentemente em fundições a mistura de machos, que se desagregam na desmoldagem, com a areia verde do

sistema, ocorrendo um excedente de areia verde misturada com machos que contém areias aglomeradas com resinas.

Usualmente são empregados diferentes tipos de resinas para a confecção de macharia, sendo as mais utilizadas:

- resinas para moldagem em casca "shell-molding", do tipo fenólica misturada com agente polimerizador, endurecida através de aquecimento em alguns segundos;
- resinas para moldagem e macharia através de cura a frio "pep-set", do tipo fenólica-uretânica com endurecimento à temperatura ambiente;
- resinas para moldagem de machos maciços através de caixa quente "hot-box", do tipo furânica misturada com catalisador para endurecimento através de aquecimento;
- resinas para moldagem de machos maciços através de caixa fria "cold-box", do tipo furânica e misturada com acelerador para endurecimento à temperatura ambiente;
- resinas para moldagem e macharia através do sistema CO₂ - "ecolotec", do tipo fenólica alcalina endurecida com catalisador de CO₂ à temperatura ambiente.

2.3.3.3 Finos Coletados no Processo de Exaustão das Fundições

Durante o processo de vazamento do metal líquido nos moldes ocorre a queima de partículas adicionadas à areia natural, acarretando o aumento de finos na granulometria da areia de moldagem.

Portanto, devem ser exauridos do sistema através de rede de exaustores, sendo posteriormente estocados para serem descartados. Geralmente, em função dos métodos tradicionais empregados na fundição de peças metálicas, a rede de exaustão é única, não havendo separação para cada circuito ou linha de produção, ocorrendo a exaustão de areias verdes e aglomeradas com resinas sintéticas. Em algumas fundições também passam pelo processo de exaustão, as poeiras do interior das fábricas, sendo posteriormente misturadas com os finos do sistema.

2.4 RESÍDUOS DE LAMINADOS DE RESINA POLIÉSTER REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO

A utilização em larga escala de polímeros, no início do século XX, não despertava maiores preocupações quanto a problemas ecológicos relacionados ao descarte desses materiais no meio ambiente.

A partir da Segunda Guerra Mundial, entretanto, foram criados novos polímeros termoplásticos através de moagem e refusão. O uso de termofixos foi gradualmente crescendo de importância na produção de polímeros, sofrendo forte incremento com a utilização de termofixos reforçados com fibra de vidro na indústria automobilística. A partir de então, inicia a preocupação com a disposição adequada, sendo estudadas formas de reutilização ou degradação desses resíduos.

2.4.1 Generalidades

Os resíduos de laminados de resina poliéster reforçados com fibra de vidro são materiais poliméricos, que geralmente não apresentam biodegradabilidade, e o aterramento desses resíduos acarretam custos elevados em função do grande volume que ocupam, devido a sua baixa densidade.

2.4.2 Definições

Apresentam-se abaixo algumas definições necessárias ao entendimento deste capítulo:

Polímeros são entidades moleculares compostas pela união de várias outras moléculas, que não precisam necessariamente ser igual.

Polímeros Termoplásticos são aqueles que amolecem ao serem aquecidos, podendo ser moldados, e quando resfriados ficam sólidos e tomam nova forma, podendo ser repetido várias vezes o processo.

Polímeros Elastoméricos são aqueles que quando aquecidos se decompõem antes de amolecer, apresentando propriedades elásticas similares à borracha.

Polímeros Termorígidos ou Termofixos são aqueles que têm como características a estabilização química, física e térmica, não podendo ser refundidos sem que haja degradação química.

Resina Poliéster Insaturada constitui uma família de polímeros de alto peso molecular, resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis.

Gelcoat é qualquer cobertura de resina não reforçada que constitui a superfície de peças laminadas. São derivados de resinas poliésteres, aditivados com pigmentos, cargas minerais inertes, agentes tixotrópicos, absorvedores de UV, anti-floculantes e anti-sedimentares.

Aceleradores são substâncias que aceleram o processo de transformação do poliéster do estado líquido para o estado sólido.

Catalisadores são compostos que tem a função de iniciar a reação de polimerização.

2.4.3 Uso de Termofixos na Indústria Metal-mecânica e Automotiva

A utilização de termofixos reforçados com fibra de vidro ocorre em larga escala na indústria nacional, citando-se como exemplos: a fabricação de carrocerias para ônibus, micro-ônibus e frigoríficas, cabines para caminhões, camionetes e automóveis, barcos, antenas parabólicas, piscinas, móveis como mesas e cadeiras, telhas, entre outros.

Em levantamentos realizados pela Câmara de Indústria, Comércio e Serviços de Caxias do Sul, RS, cidade de porte médio com 400.000 habitantes, foram quantificados 2.000 toneladas por ano de resíduos de laminados de resina poliéster reforçados com fibra e vidro, em sua maioria de pedaços e partes de aparas e recortes oriundos da indústria nos processos de fabricação. A composição foi determinada como sendo em média 70% de resina poliéster insaturada e 30% de fibra de vidro, segundo Zattera (2001).

2.4.3.1 Resina Poliéster

A resina poliéster é obtida pela reação entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um diálcool, diluída num monômero vinílico. As resinas de poliéster têm como principais características o baixo custo e facilidade de manuseio no processamento, além de boa

resistência às intempéries e à ambientes moderadamente agressivos, possuindo características de processamento adaptáveis a várias condições.

A resina poliéster insaturada passa da fase líquida à fase sólida por meio de uma reação irreversível conhecida como "cura" ou "reticulação". A cura tem início imediatamente após a adição de catalisadores e aceleradores especiais. Os poliésteres mais reativos curam em menor tempo que os menos reativos, estando a reatividade ligada ao grau de insaturação do ácido insaturado. Os poliésteres curam à temperatura ambiente, sem requerer a aplicação de pressões externas. Este fato é de grande importância por permitir a laminação por contato em molde simples de baixo custo, o que viabiliza a produção de peças de grandes dimensões e baixa escala de produção. A cura ocorre em dois estágios. Primeiramente a resina se transforma em material gelatinoso; imediatamente após a gelatinização, a massa de poliéster endurece rapidamente liberando grande quantidade de calor (reação exotérmica).

São utilizados aceleradores para reduzir o tempo necessário para transformação do poliéster, passando do estado líquido para o estado sólido, à temperatura ambiente, e para diminuir a temperatura dos sistemas de cura a quente, podendo ser citado como acelerador o naftenato de cobalto.

Quando usado em conjunto com um catalisador, do tipo peróxido orgânico, aumentam a velocidade de quebra do peróxido em radicais livres. A função deste composto é a de iniciar a reação de polimerização, dando origem a radicais livres que agem sobre as insaturações, quebrando-as, formando as chamadas ligações cruzadas. A decomposição do peróxido pode ocorrer por meio de calor, ou mais comumente por uma reação inicial entre o peróxido e os aceleradores, após a decomposição, inicia-se a reação de cura. São compostos químicos derivados da água oxigenada, pela substituição de um ou dois hidrogênios por radicais orgânicos. Os peróxidos derivados das cetonas são os catalisadores mais comuns utilizados em resina poliéster, como por exemplo, o peróxido de metil-etil-cetona [MEK].

Para exercer a função de proteger o laminado contra a ação das intempéries e da umidade são aplicadas resinas tipo gelcoat, proporcionando acabamento colorido, liso e brilhante à superfície da peça, servindo de base para a aplicação de pintura. Os gelcoats de acabamento devem ser aplicados sobre moldes bem polidos, com rigoroso acabamento superficial, com espessura variável entre 0,3 e 0,5 mm.

2.4.3.2 Fibra de Vidro Virgem

Os vidros são materiais amorfos, rígidos e definidos fisicamente como líquidos super-resfriados. O início de uma grande revolução na utilização do vidro se deu com o desenvolvimento da fibra de vidro, provavelmente por acaso, durante a manipulação de uma massa de vidro fundida. Eram fibras grossas, quebradiças e sem nenhuma utilização prática. A primeira referência às fibras de vidro, foi feita por René de Reumir, em 1713, em uma conferência na Academia Parisiense de Ciências. Em 1893, Edward Libbey montou uma pequena unidade para a produção de fibra de vidro, às quais misturou fios de seda para produzir diversos artigos, inclusive vestidos e gravatas. Já em 1914, várias patentes da obtenção das fibras de vidro foram depositadas, principalmente na Europa, e diziam respeito a melhoria do processo de fiação da fibra.

Existem dois tipos básicos de fibras de vidro: fibras curtas, que geralmente são apresentadas na forma de lã de vidro para aplicações em isolamento térmico, acústico, filtros, etc., e as fibras longas fornecidas em diversas formas (fios picotados, mantas, fios contínuos e tecidos) cuja maior aplicação é como elemento de reforço para resinas termoplásticas e termorrígidas, sendo o poliéster insaturado uma delas.

2.5 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

O pioneirismo de Charles H. McDonald no início da década 1960, utilizando farelos de borrachas misturadas no asfalto em operações tapa buracos de ruas com baixo volume de tráfego nos EUA, desencadeou em diversos países estudos para modificação das propriedades de misturas asfálticas convencionais com o uso de resíduos de pneus inservíveis, sendo desde então, o resíduo mais utilizado em projetos de pavimentos.

2.5.1 Generalidades

Como o volume dos materiais desperdiçados, de subprodutos gerados em nossa sociedade, e do custo da disposição final continuam a aumentar, há uma pressão e um incentivo de recuperar e reciclar estes materiais para o uso em aplicações secundárias. Devido

ao fato que a construção dos pavimentos requer volumes grandes de materiais, os órgãos rodoviários e ambientais têm participado nestes esforços de reciclagem.

Do ponto de vista da engenharia de pavimentos, os materiais recuperados devem ser usados de tal maneira que o desempenho previsto do pavimento não seja comprometido. Os materiais desperdiçados e subprodutos, entretanto, diferem vastamente em seus tipos e propriedades e, em consequência, nas aplicações em pavimentação. A experiência e o conhecimento a respeito do uso desses materiais variam para cada material, assim como, para cada país, estado ou localidade. Para recuperar esses materiais e possibilitar potencialmente o seu uso, os geradores, os pesquisadores, os construtores e os organismos reguladores necessitam estarem cientes das propriedades dos materiais, como podem ser usados, e que limitações podem ser associadas ao seu uso.

O comportamento das misturas betuminosas, como orientação geral, depende das características dos agregados, quanto a deformabilidade da mistura e, das características do ligante quanto a fadiga e trincamento da mistura asfáltica.

A degradação dos pavimentos está ligada a perda das propriedades de serventia do pavimento, que podem ser ocasionadas ao tráfego atuante, como deformações permanentes excessivas e fissuras de fadiga, ou devido às características dos materiais utilizados e das condições climáticas atuantes.

Segundo Epps (1994), o estado da prática de incorporação de resíduos de pneus inservíveis e de pó de borracha em pavimentos asfálticos na engenharia rodoviária, permite traçar as seguintes considerações sobre as propriedades dessas misturas modificadas com resíduos de borracha (Rubber-Asphalt ou AR):

- *Estabilidade e fluência:* o método Marshall pode apresentar redução dos valores;
- *Módulos de resiliência e resistência à tração:* os valores são muito dependentes das condições particulares de cada mistura, como a granulometria dos agregados e o percentual de borracha incorporada, podendo ocorrer acréscimo ou diminuição nos módulos resiliente e de resistência à tração;
- *Deformação permanente:* os efeitos decorrentes do uso de borracha podem ser benéficos ou, em alguns casos, aumentam os afundamentos nas trilhas de roda;

- *Fadiga e trincamento térmico*: há uma melhora nesses parâmetros com a adição de pó de borracha;
- *Abrasão superficial*: são relatadas melhorias nessas características de resistência à abrasão;
- Susceptibilidade à água: podem ocorrer problemas de desprendimento pela ação deletéria da água;
- Atrito: é reduzido o atrito devido ao contato com os pneus dos veículos, ocasionando a redução do barulho.

Way (2000), relata que mais de 3.300 km de rodovias no Estado do Arizona, foram construídos e restaurados pelo Departamento de Transportes (DOT), utilizando resíduos de borracha (AR), apresentando desempenho excelente. Somado a isso, estima-se que mais de 5 milhões de pneus foram reciclados e utilizados nestes pavimentos. Em misturas projetadas com AR, podem ser incorporados até 20% de resíduos de borracha no ligante (*wet process* ou processo úmido), e entre 2,5 a 5% em peso do agregado (*dry process* ou processo seco), requerendo maiores teores de ligante do que misturas convencionais, entretanto, as partículas mais finas da borracha reagem com o ligante melhorando suas propriedades, enquanto que as partículas maiores preenchem a continuidade da curva granulométrica. O "dry process" utiliza até 4 vezes mais farelo de borracha do que o "wet process". O mapa da figura 2.1 mostra as rodovias federais do DOT Arizona pavimentadas com AR.

Os detalhes comparativos apresentados por Way, avaliam o percentual de trincas para aqueles projetos de recapeamento construídos desde 1988 com e sem AR, demonstrando que o percentual de trincas em misturas de AR é muitas vezes menor do que em recapeamentos convencionais. As vantagens na utilização de misturas betuminosas com este tipo de ligante modificado, no que se refere à resistência à propagação de trincas, podem ser observadas na figura 2.2.

A experiência do Arizona mostra que utilizando misturas betuminosas com Betume Modificado com Borracha nas camadas superficiais ou intermediárias, com espessuras que variam de 1/3 a 1/2 da espessura empregada em misturas betuminosas convencionais, os custos de manutenção são substancialmente inferiores quando comparados com os pavimentos constituídos por misturas convencionais.

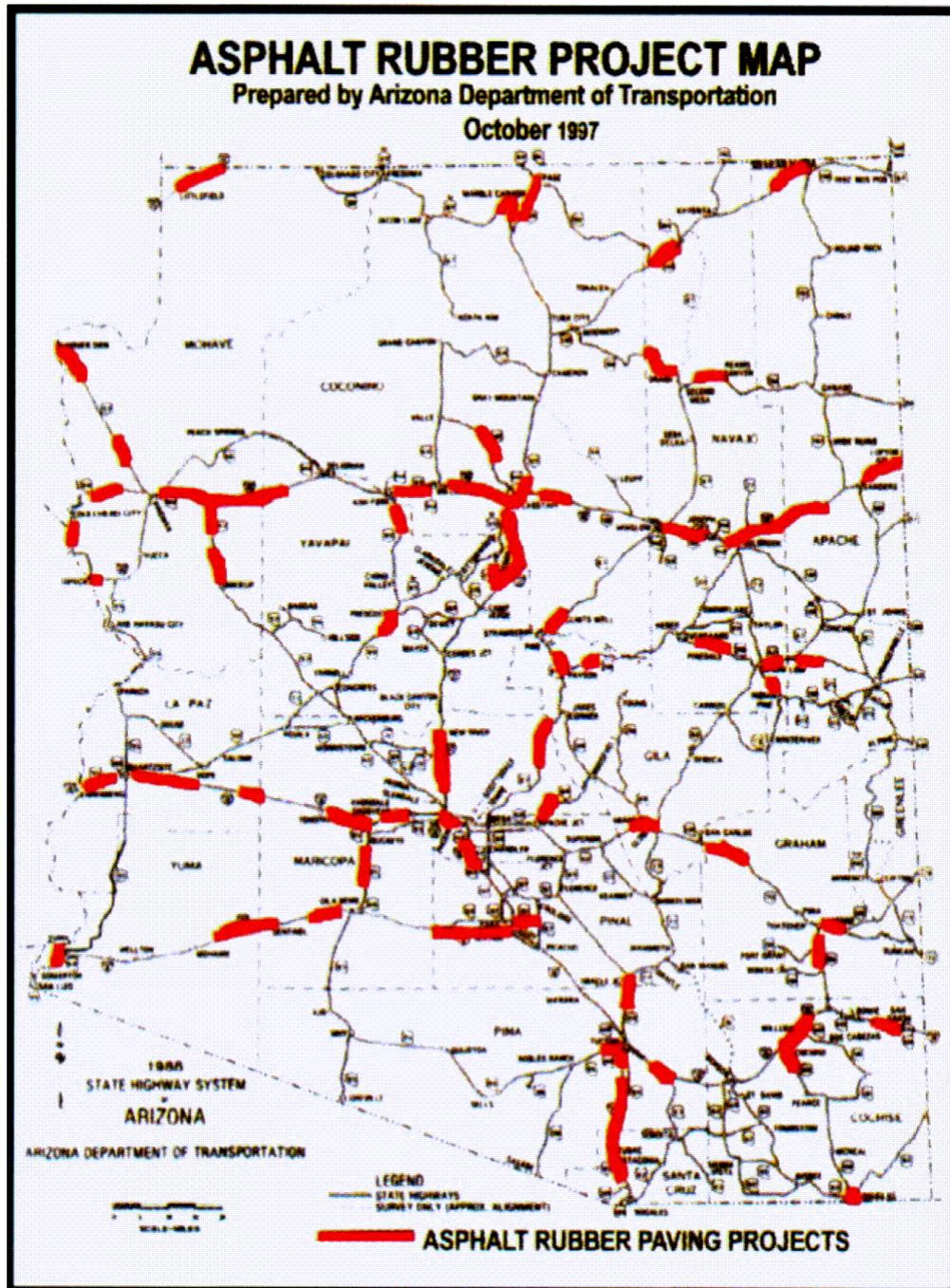


Figura 2.1 Utilização de Asfalto-Borracha no Estado do Arizona, EUA, (Way, 2000)

Somado a isso, a figura 2.3 mostra que a manutenção de rotina é menor nos projetos com AR, comparando com recapamentos convencionais. Também deve ser discutido que a espessura média dos projetos de AR é de 42,5mm e para mistura convencional é de 137,5mm, e ainda que misturas de AR custem duas vezes mais por tonelada, o valor final resulta em 25% menor que misturas convencionais.

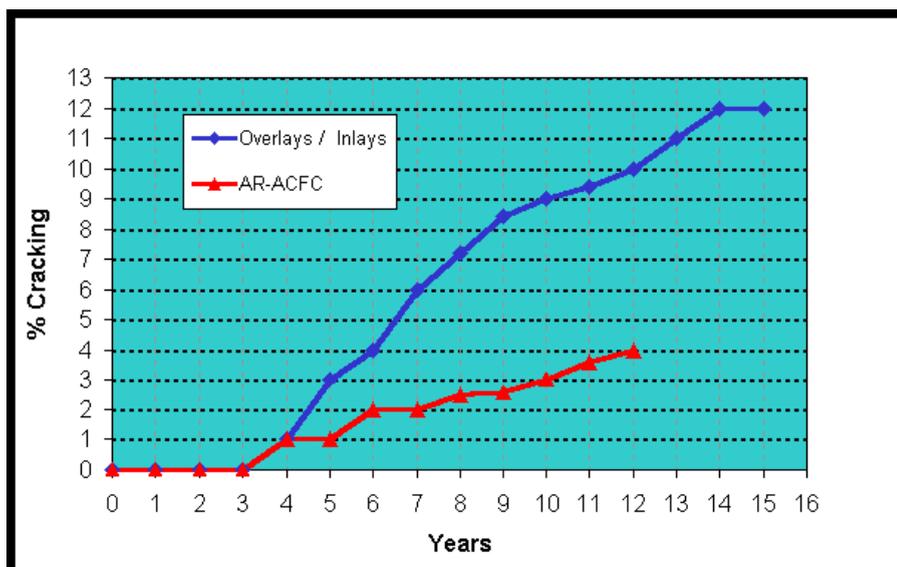


Figura 2.2 Trincamento do pavimento com AR e sem AR ao longo do tempo, (Way, 2000)

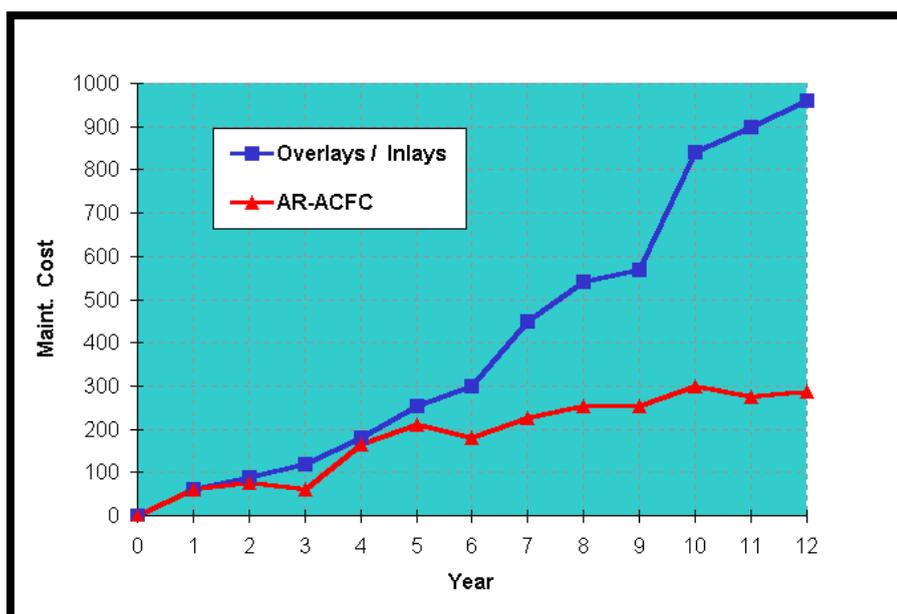


Figura 2.3 Custos de manutenção de recapeamentos com AR e sem AR, (Way, 2000)

A FHWA - Federal Highway Administration do Departamento de Transportes de Washington, (1998) publicou manual do usuário para incorporação de resíduos e subprodutos em pavimentos asfálticos. Foi realizada uma ampla revisão geral da literatura sobre a incorporação de resíduos industriais em misturas asfálticas, sendo apresentado estudo de 19 resíduos e subprodutos de indústrias americanas, classificando-os conforme a utilização em pavimentos asfálticos, nas seguintes categorias:

- *Como agregados em misturas à quente:* escórias de alto-forno, cinzas de carvão, escórias de caldeiras de carvão, areias de fundição, cinzas de incineradores municipais, escórias de ligas não-ferrosas, escórias de aço, escórias de alto-fornos siderúrgicos, sucatas de pneus inservíveis, resíduos de vidro, resíduos telhas de asfalto com fibras de vidro;
- *Como agregados em misturas a frio:* cinzas de carvão e pavimentos asfálticos reciclados;
- *Como agregados em capas selantes e tratamentos superficiais:* escórias de alto-fornos, escórias de caldeiras de carvão, escórias de aço;
- *Como enchimento mineral:* finos de exaustão de usinas asfálticas, pó de fornos de cimento, pó de fornos de cal, pó de carvão, resíduos de lodo estação de tratamento de esgoto;
- *Como asfalto modificado:* Sucatas de pneus de borracha, resíduos de telhas de asfalto e fibra de vidro.

No Brasil, também são relatados na literatura alguns estudos de incorporação de resíduos em pavimentos asfálticos. Os estudos são, na maioria, de uso de farelo de borracha e resíduos de pneus inservíveis em misturas betuminosas. Entretanto, estudos já foram realizados de incorporação de cinzas de termo-elétricas, escórias de siderúrgicas, fibras orgânicas e fibras de vidro em misturas de HMA, lama da serragem de granito e pó de filtros de usinas de asfalto como alternativas para utilização como fíleres em concreto betuminoso usinado à quente, entre outros.

2.5.2 Incorporação de Areias de Fundição Descartadas em Misturas Asfálticas

Segundo o estudo elaborado pela American Foundrymen's Society - AFS, (1991), com o objetivo de encontrar alternativas para o uso de resíduos de areias de fundição, até o início da década de 90, o uso era extremamente reduzido, não sendo encontrado nenhum histórico de utilização em misturas asfálticas. Então, foram realizadas pesquisas abordando o uso alternativo de incorporação de 10% de areia de fundição em concreto betuminoso usinado à quente, sendo avaliados os resultados e comparados com uma mistura controle, com uso de areia natural. As propriedades verificadas através do estudo Marshall foram semelhantes em

ambos os casos, como estabilidade, fluência, densidade, índice de vazios e vazios de agregado mineral.

Ciesielki e Collins (1994), através do programa americano de pesquisa em prática rodoviária, também realizaram testes utilizando areias de fundição como subprodutos em pavimentos asfálticos. O desempenho foi satisfatório em pavimentos projetados com misturas betuminosas usinadas à quente, incorporando até 15% de resíduo de areia de fundição na mistura de agregados. Com o uso de um percentual maior, as amostras foram suscetíveis à umidade, devido ao desprendimento da película de asfalto das partículas de agregados em função da natureza hidrófila do resíduo de areia de fundição, ocorrendo a perda do agregado fino da mistura e a deterioração acelerada do pavimento. Entretanto, foi verificado que o problema pode ser mitigado utilizando aditivos antistripping.

Javed et. al. (1994) realizou testes de laboratório na Universidade de Purdue, em diversas areias de fundição descartadas incorporadas à misturas asfálticas. As amostras foram oriundas de fundições do Estado de Indiana, sendo a maioria das areias aglomeradas com argilas e aditivos, chamadas areias verdes, entretanto também foram pesquisadas amostras de areias de fundição ligadas quimicamente através de resinas sintéticas. Uma parcela dos agregados finos da mistura asfáltica convencional, foi substituída pela adição de areia de fundição. Os resultados foram satisfatórios para a incorporação do resíduo em até 15% do peso da mistura de agregados, atendendo as especificações. A partir desse valor, considerado como valor máximo de resíduo possível de ser incorporado às misturas estudadas, a incorporação de areia de fundição aumentava o índice de vazios da mistura, e diminuía a densidade, a fluência e a estabilidade Marshall. Foram estudadas amostras com até 30% de resíduo de areia de fundição. A resistência a tração (após imersão em banho de água quente) também apresentava redução, indicando que as amostras poderiam ser suscetíveis à desagregação com diminuição da adesividade ao ligante, pela ação da água.

Miller (1998) realizou uma pesquisa para avaliar o potencial de uso de areias de fundição descartadas em pavimentação asfáltica, como substituto parcial de areia natural, visto que em muitos locais dos EUA, a demanda da indústria de construção rodoviária era maior que as disponibilidades de jazidas de areia natural e de produção de areia industrial manufaturada. Foram estudadas 17 areias diferentes em 13 fundições do Estado de Wisconsin, avaliando as propriedades fundamentais das areias. Foram selecionadas seis areias

para incorporação em misturas asfálticas. Oito misturas de HMA foram preparadas, sendo seis com os resíduos de areias de fundição, uma com areia nova utilizada em uma fundição, e uma mistura padrão de HMA para avaliação e comparação dos resultados. O método utilizado foi o Superpave1. Os resultados demonstraram que os resíduos de areias de fundição estudados podem substituir materiais convencionais, fornecendo no mínimo as mesmas propriedades. Os ensaios de suscetibilidade à água foram realizados, não satisfazendo os requisitos mínimos, inclusive na mistura padrão. Portanto, o estudo sugere que novos testes devam ser realizados para avaliar e compreender o papel das areias de fundição nos danos quanto à umidade das misturas asfálticas. Os relatórios finais foram encaminhados para as indústrias da construção de estradas e de empresas de fundição locais, onde o uso em misturas de HMA vêm contribuindo para o aumento da reciclagem dos resíduos gerados pelas fundições.

Segundo a FHWA - Federal Highway Administration (1998), pesquisas já realizadas com uso de areias de fundição em misturas asfálticas nos EUA, estimam que a geração anual de areias de fundição está compreendida entre 10 a 15 milhões de toneladas. As propriedades físicas e mecânicas dos resíduos estudados podem ser observadas na tabela 2.1 e a composição básica dos resíduos na tabela 2.2.

Tabela 2.1 Propriedades físicas e mecânicas das areias de fundições descartadas (verdes)

Propriedades Físicas	Resultados	Método de Teste
Densidade relativa	2.39 - 2.55	ASTM D854
Densidade real kg/m ³	2590	ASTM C48/AASHTO T84
Absorção %	0.45	ASTM C128
Umidade %	0.1 - 10.1	ASTM D2216
Torrões de argila e partículas friáveis	1 - 44	ASTM C142/AASHTO T112
Coefficiente de Permeabilidade (cm/seg)	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶	AASHTO T215/ASTM D2434
Índice de plasticidade	Não plástica	AASHTO T90/ASTM D4318
Propriedades Mecânicas	Resultados	Método de Teste
Perda de abrasão Micro-Deval %	< 2	–
Perda de sanidade Sulfato de Magnésio %	5 - 47	ASTM C88
Ângulo de atrito interno (°)	33 - 40	–
Califórnia Bearing Ratio, CBR %	4 - 20	ASTM D1883

Tabela 2.2 Composição básica dos resíduos de areia de fundição

Constituinte	Resultado (%)
SiO ₂	87.91
Al ₂ O ₃	4.70
Fe ₂ O ₃	0.94
CaO	0.14
MgO	0.30
SO ₃	0.09
Na ₂ O	0.19
K ₂ O	0.25
TiO ₂	0.15
P ₂ O ₅	0.00
Mn ₂ O ₃	0.02
SrO	0.03
LOI	2.1 - 12.1
TOTAL	100

O Departamento de Transportes de Washington avaliou os resultados, considerando determinante a inclusão de exigências nas especificações rodoviárias, tais como:

- *Controle de qualidade do rejeito*, com esmagamento de torrões das areias de fundição; seleção e retirada de metais, com homogeneidade e granulometria constante; inexistência de elementos desagradáveis como restos de madeira, e resíduos diversos que podem ser introduzidos na fundição; revestimentos grossos de carbono, pastas, resinas queimadas do molde também seriam materiais indesejáveis; armazenamento na fundição ou em uma central, em pilhas de estocagem com quantidades substanciais que possibilitem a uniformidade do material antes do transporte para a usina de asfalto;
- *Projeto da Mistura e Estrutural*: os métodos tradicionais como Marshall, Hveem, AASHTO são apropriados para a dosagem e o dimensionamento;
- *Processo de Construção*: no caso das areias de fundição serem estocadas na usina de asfalto, devem estar protegidas por estrutura coberta. Os mesmos métodos e equipamentos gerais podem ser aplicados na manipulação, armazenamento, mistura, espalhamento e compactação da mistura.
- *Controle de Qualidade da Mistura*: os mesmos métodos de teste de campo usados para misturas convencionais, acrescidas das normas AASHTO T168, ASTM

D2726 e ASTM D2950. O ensaio de imersão Marshall é indicado para avaliar apropriadamente o efeito stripping na mistura asfáltica, devido ao uso de resíduo de areia de fundição.

2.5.3 Incorporação de Laminados de Fibras de Vidro Descartadas em Misturas Asfálticas

Conforme Paulsen et. al. (1986), foram realizados estudos de laboratório na década de 1980, utilizando resíduos de telhas de asfalto reforçadas com fibra de vidro, e indicaram que as propriedades do projeto de mistura são semelhantes aos projetos de misturas convencionais.

A partir da década de 1990, foram construídos trechos experimentais em Minnesota (1993), despertando o interesse do uso dos rejeitos de telhas em pavimentos asfálticos, sendo realizados estudos e confeccionados trechos experimentais em estados americanos, como Indiana, Illinois, Missouri, New Jersey e, também em Ontário, Canadá.

Baker e Connolly (1995) realizaram estudos em pista experimental implantada em New Jersey, com adição entre 3 e 6% em peso de telhas de asfalto reforçadas com fibra de vidro, e após alguns anos de serviço, foram verificadas que as propriedades de deformações permanentes em afundamentos de trilhas de rodas, de trincamento e resistência à derrapagem não apresentaram nenhuma diferença significativa, apresentando desempenho similar aos pavimentos convencionais.

Abdulshafi et. al. (1997) iniciou estudo para os Departamentos de Transporte dos estados de Ohio e Washington, com o objetivo de avaliar os benefícios de adicionar resíduos de telhas de fibra de vidro em misturas asfálticas à quente, devido a disponibilidade reduzida de aterros, ao interesse de eliminação da crescente quantidade de resíduos de telhas, e do alto custo do cimento asfáltico de petróleo. Foram utilizadas vinte e seis misturas de concreto asfáltico incorporados com quantidades crescentes de resíduos (0, 5, 10 e até 15%), com diferentes tamanhos de partículas de resíduos moídos em moinho de martelo, utilizando diversos agregados pétreos e telhas oriundas de diferentes indústrias.

A FHWA - Federal Highway Administration (1998), apresenta os resultados dos estudos realizados por Abdulshafi et. al. (1997) com uso de rejeitos de telhas de asfalto reforçadas com fibra de vidro em misturas asfálticas. Aproximadamente, são desperdiçadas nos EUA 11 milhões de toneladas de telhas de asfalto reforçadas com fibras, sendo que 95% deste valor correspondem aos rejeitos de substituição de coberturas de edificações da indústria da construção civil, e o restante devido aos resíduos gerados no processo produtivo das telhas, sendo a maioria destes rejeitos são dispostos em aterros. A composição básica das telhas pode ser observada na tabela 2.3, e as propriedades na tabela 2.4.

Tabela 2.3 Composição básica das telhas de fibra de vidro

Composição	% em peso	Tipos
Cimento Asfáltico	25-35	Enchimento e de cobertura
Material Granular	60-70	Cerâmica granulada Recobrimento de granulados Areia lavada Estabilizantes de asfalto
Reforço	5-15	Fibras de vidro ou celulose

Tabela 2.4 Propriedades básicas das telhas de fibra de vidro

Propriedades	Telha de fibra orgânica nova	Telha de fibra de vidro nova	Telhas velhas
Asfalto			
% de asfalto	Aprox. 28%	Aprox. 28%	30-40%
Ponto de Amolecimento °C	52-102	52-102	66-82
Penetração, 0,1mm (25° C)	23-70	23-70	> 20
Ductibilidade cm (5 cm/min, 25° C)	Nd	Nd	> 25
Flash Point, °C	>260	>260	> 232
Material granular/Reforço			
Umidade %	< 3	<10	Nd
Densidade relativa	1,29	1,37	Nd
Percentual Passante			
4.75 mm (No.4)	100	100	95-100
2.36 mm (No.8)	69	89	55-75
1.0 mm (No.20)	45	65	15-35
0.3 mm (No.50)	5	11	0-15
0.15 mm (No.100)	0	1	0-10

Nd: Parâmetro não ensaiado

Os resultados das pesquisas indicaram que os rejeitos de telhas reforçadas com fibras de vidro ou celulose, podem ser utilizadas como modificador do cimento asfáltico e também como agregado, e as misturas têm a tendência de apresentar maior rigidez, melhor comportamento às variações de altas temperaturas e maior resistência às deformações permanentes, com menores afundamentos nas trilhas de roda. Os resultados mostraram também que a vida de fadiga foi melhorada com o acréscimo crescente de resíduos de telhas, e o módulo resiliente indica que as misturas apresentam bom comportamento quanto ao trincamento térmico. Danos significativos com relação a ação deletéria da água não foram observados, embora podem ser verificados no caso de utilização de somente sucatas de telhas velhas, onde ocorreu substancialmente o processo de oxidação do asfalto.

Em alguns casos, observou-se também a redução no teor de asfalto estimado em até 1,5%, visto que as telhas apresentam até 35% de sua composição de materiais asfálticos, embora esse fator possa não representar diminuição no custo final, visto que devem ser avaliados os custos decorrentes do processamento e adequação desses rejeitos para o uso em misturas asfálticas.

O relatório final da FHWA indica que há a necessidade de acompanhar o comportamento dessas misturas incorporadas com resíduos de telhas, com relação à longo prazo, principalmente quanto a fadiga, afundamento de trilhas de rodas e trincamento térmico. Também, quanto a necessidade no decorrer dos anos, de executar a reciclagem desses pavimentos, cabe elaborar estudos que visem a viabilidade econômica, através da análise do ciclo de vida útil desses pavimentos.

Como resultado do estudo, exigências para o uso desses resíduos foram incluídas nas especificações rodoviárias do Departamento de Transportes de Washington, tais como:

- *Controle de qualidade do rejeito:* as telhas devem passar obrigatoriamente por processo de moagem através de moinhos de martelos, para homogenização e fracionamento do rejeito, sendo necessária a prévia retirada de restos como madeira, pregos, elementos de vedação e impermeabilização, etc., normalmente utilizados em coberturas de telhas. A moagem deve fornecer partículas menores que 1/2 polegada, de acordo com o projeto específico da mistura, seja para funcionar como enchimento mineral ou modificador do cimento asfáltico. O efeito de adicionar água para facilitar

a moagem deve ser controlado para que não venha a inviabilizar o uso das partículas devido ao excesso de umidade;

- *Projeto da Mistura e Estrutural:* os métodos tradicionais como Marshall, Hveem, para dosagem e AASHTO para dimensionamento estrutural são apropriados, bem como os procedimentos padrões de laboratório. Cuidados devem ser tomados com incorporação de elevados teores de finos do resíduo, que aumentam a densidade e a estabilidade da massa, mas em contrapartida, podem afetar a durabilidade da mistura com a redução do índice de vazios e aumentar a superfície do agregado mineral, reduzindo a película de asfalto. O projeto de mistura deve incluir testes de resistência ao stripping, como AASHTO T283 ou MTO Ls 283;
- *Processo de Construção:* os mesmos métodos e equipamentos gerais podem ser aplicados na manipulação, armazenamento, mistura, espalhamento e compactação da mistura;
- *Controle de Qualidade da Mistura:* os mesmos métodos de teste de campo usados para misturas convencionais, acrescidas das normas AASHTO T168, ASTM D2726 e ASTM D2950. O ensaio de imersão Marshall é indicado para avaliar apropriadamente o efeito stripping na mistura asfáltica, devido ao uso de resíduo de telhas reforçadas com fibras.

No Brasil, De Reis (2002) realizou pesquisa de dissertação de mestrado, utilizando fibras de vidro em misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Matrix Asphalt - Matriz Pétrea Asfáltica), para utilização em vias de tráfego intenso. Essas misturas têm sido muito utilizadas na Europa, em países como a Alemanha, a Bélgica, entre outros, e na América do Norte, nos Estados Unidos e no Canadá, para auxiliar na aderência em pista molhada, na diminuição efetiva do borrifo de água pelos pneus, na redução da reflexão de luzes de faróis em noites chuvosas e na redução de ruídos nas áreas lindeiras à via.

O SMA é uma mistura asfáltica de maior resistência e mais durável, que envolve o emprego de graduação descontínua, em camada de alta resistência e alta durabilidade, caracterizando-se por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos (70-80% retido na peneira nº 04), aumentando a interação grão/grão. Devido a essa particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos; estes vazios, por sua vez,

são preenchidos por uma argamassa constituída pela mistura da fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras (Figura 2.4).

Devido à elevada porcentagem de agregado graúdo e, conseqüentemente, sua baixa superfície específica, emprega-se fibras para reter a argamassa finos-fíler-betume em torno do material graúdo. As fibras aumentam a viscosidade desta argamassa, rica em ligante, em até 10 vezes, evitando problemas de escorrimento durante as operações de usinagem, transporte e aplicação da massa asfáltica. As fibras são geralmente orgânicas (de celulose) ou inorgânicas (fibra de vidro), e são adicionadas durante a usinagem para evitar a segregação da mistura em seu transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico. Aplica-se as fibras como "aditivo estabilizador", uma vez que a mistura é aplicada em torno de 180°C.

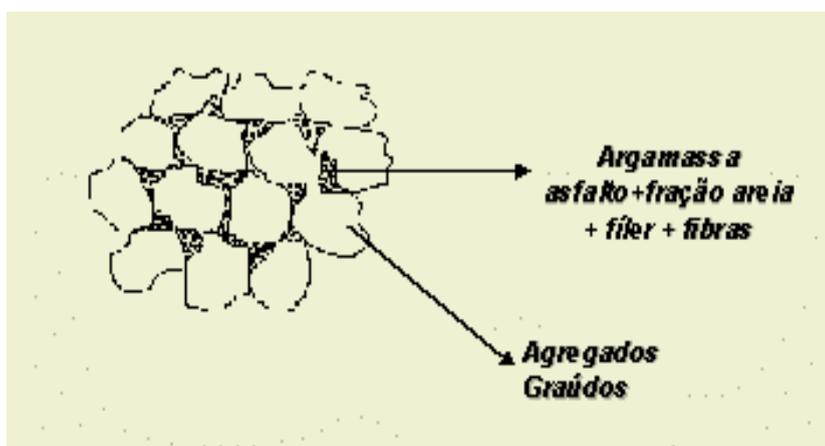


Figura 2.4 Graduação descontínua da mistura de SMA

Nas amostras ensaiadas foram utilizadas fibras inorgânicas de vidro de diâmetro nominal de 12 microns e comprimento médio, entre 4 a 5 mm, devido ao fato que há no mercado brasileiro facilidade de obtenção desta fibra, inclusive como resíduo de sua fabricação para diversas aplicações industriais. A quantidade requerida foi determinada pelo ensaio de sensibilidade ao escorrimento, resultando, em 0,3% de fibras de vidro em peso da mistura SMA.

As fibras de vidro utilizadas mostraram-se aditivos estabilizadores eficazes para evitar a segregação da massa devido à particular graduação do SMA e o escorrimento de parte da argamassa rica em ligante asfáltico, durante as operações de usinagem, transporte e aplicação. Para as misturas de SMA testadas, não foram constatadas perdas referentes a

condicionamento no ensaio AASHTO T-283, mostrando que as misturas ensaiadas são muito resistentes à ação deletéria da água.

De Reis (2002), ampliou o objeto de pesquisa com Bernucci e Zanon, elaborando um projeto de trecho experimental. Relatam que insucessos em SMA estão relacionados em geral a falhas executivas, algumas delas ligadas à segregação e à exsudação. Estes erros podem ser contornados havendo um bom controle dos agregados e da faixa de projeto, dosagem apropriada do teor de ligante e de fibras, bem como, controle e homogeneidade de temperatura de usinagem e compactação.

O trecho experimental foi construído na rodovia Anchieta, no Estado de São Paulo, construída nos anos 40 e que apresentava características de geometria inadequadas às condições atuais dos veículos de carga, principalmente nos trechos em curva, na descida da Serra do Mar. As intervenções na pista têm sido realizadas em ciclos de no máximo dois anos em função dos elevados esforços tangenciais, afundamentos nas trilhas de roda e trincamentos oriundos do movimento das placas do pavimento rígido original.

Para a execução do trecho experimental, foi selecionado o ligante asfáltico modificado por polímero SBS (AMP-2) obtendo-se o teor ótimo de 6,1% em peso da mistura SMA, de acordo com o projeto de dosagem. Os agregados britados foram os mesmos utilizados em estudo inicial. O fíler empregado foi composto por uma mistura de 70% de material calcário e 30% de cal calcítica CH-I. As fibras selecionadas foram de celulose na forma granular (*pallets*), impregnada com betume na proporção 2:1 em peso, respectivamente (Viatop 66), distribuída pela empresa Ecofibras, 0,3% em peso da mistura SMA.

Através da avaliação preliminar das características relacionadas à segurança do usuário, observa-se que o revestimento tipo SMA, apresentou condições adequadas de aderência e atrito entre a sua superfície e os pneus dos veículos, entretanto deverá ser monitorado a evolução do desempenho do trecho experimental executado, especialmente quanto à segurança ao usuário para tráfego em baixas velocidades

Os autores concluem que o bom desempenho da seção teste realizada em um trecho representativo das piores condições de solicitação de tráfego, como na via Anchieta, pista Sul, km 44 + 400 m, demonstram na prática rodoviária as expectativas de resistência,

durabilidade e de segurança que o revestimento SMA deve proporcionar, perfeitamente factível à realidade brasileira, e recomendada sua utilização em vias de tráfego intenso e pesado, desde que obedecidos os procedimentos de projeto, de execução e de controle tecnológico preconizados pela NCAT / EAPA e efetuadas as devidas adaptações nas usinas usualmente empregadas para incorporação das fibras nas misturas à quente.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

A caracterização dos materiais utilizados no estudo de incorporação de resíduos industriais em misturas asfálticas, tem como objetivo definir as propriedades básicas desses materiais, apresentando os resultados dos ensaios físicos e ambientais exigidos pelas normas e especificações dos órgãos rodoviários e de controle ambiental.

3.1 GENERALIDADES

Para melhor formatação e clareza na apresentação, optou-se em descrever os materiais pesquisados em itens específicos, separando cada estudo de incorporação de resíduo no asfalto. Os materiais tradicionais de uso corrente em pavimentação foram caracterizados conforme as normas rodoviárias brasileiras e, para os materiais alternativos (resíduos e subprodutos) também foram realizados os ensaios exigidos pela legislação ambiental vigente, classificando-os como resíduo, segundo os critérios técnicos estipulados nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A finalidade da caracterização ambiental dos resíduos é verificar se os mesmos não apresentam características de periculosidade, que poderiam ser classificados como resíduos Classe I - Perigosos, apresentando algum risco de impacto nocivo à saúde e ao meio ambiente. Dessa forma, também foram necessários a realização de ensaios de lixiviação e solubilização, em amostras da mistura asfáltica convencional e da mistura incorporada com o resíduo, efetuando análise comparativa dos resultados obtidos.

3.2 ESTUDO DE INCORPORAÇÃO DE AREIAS DE FUNDIÇÃO DESCARTADAS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Os materiais tradicionais de uso corrente em concreto asfáltico, utilizados na pesquisa, foram os agregados de rochas vulcânicas para formar a matriz pétreo, e como ligante betuminoso o cimento asfáltico de petróleo (CAP20). Os materiais alternativos empregados foram resíduos de areias de fundição, gerados por várias empresas da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, e classificadas como: areias verdes (A1), areias verdes misturadas com resíduos de macharia (A2) e finos de exaustão (A3).

3.2.1 Agregados

Os agregados para o concreto asfáltico foram constituídos de uma mistura de agregado graúdo e agregado miúdo, sendo necessária a adição de areia natural para correção da curva granulométrica. Não houve a necessidade de incorporação de fíler.

Os agregados graúdo e miúdo utilizados foram pedra britada, oriundos de exploração de rocha riodacítica em instalação de britagem localizada na pedreira municipal da Maestra, em Caxias do Sul, RS. Esses agregados pétreos não apresentavam materiais decompostos ou matéria orgânica, e foram constituídos de fragmentos sãos e duráveis, isentos de substâncias deletérias.

A granulometria foi determinada pelo método de Ensaio DAER nº 202, com separação das frações através de peneiramento. A granulometria foi determinada por lavagem, bem como a quantidade de material que passa na peneira nº 200.

A porcentagem de partículas tendo pelo menos duas faces britadas foi determinada pelo método de Ensaio DAER nº 205. A composição granulométrica dos agregados e materiais alternativos utilizados no estudo, pode ser observada na tabela 3.1. A figura 3.1 apresenta as curvas granulométricas dos materiais granulares estudados, bem como das areias de fundição, sendo que, as granulometrias das areias de fundição apresentadas são das amostras homogêneas, ou seja, obtidas após a mistura e homogeneização das diversas subamostras coletadas em empresas da região.

Tabela 3.1 Composição granulométrica dos agregados e das areias de fundição estudadas

Peneira	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA	A1	A2	A3
#	% Pass	% Pass	% Pass	% Pass	% Pass	% Pass	% Pass
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	61,20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	29,60	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
nº 4	2,00	12,90	96,30	100,00	100,00	100,00	100,00
nº 8	0,90	2,10	68,10	100,00	100,00	100,00	100,00
nº 30	0,70	1,20	32,80	99,90	97,93	98,46	100,00
nº 50	0,60	1,00	21,60	98,40	69,79	75,12	100,00
nº 100	0,50	0,90	14,90	32,70	21,69	17,55	76,58
nº 200	0,50	0,60	9,50	1,90	5,89	4,66	54,31
Convenção							

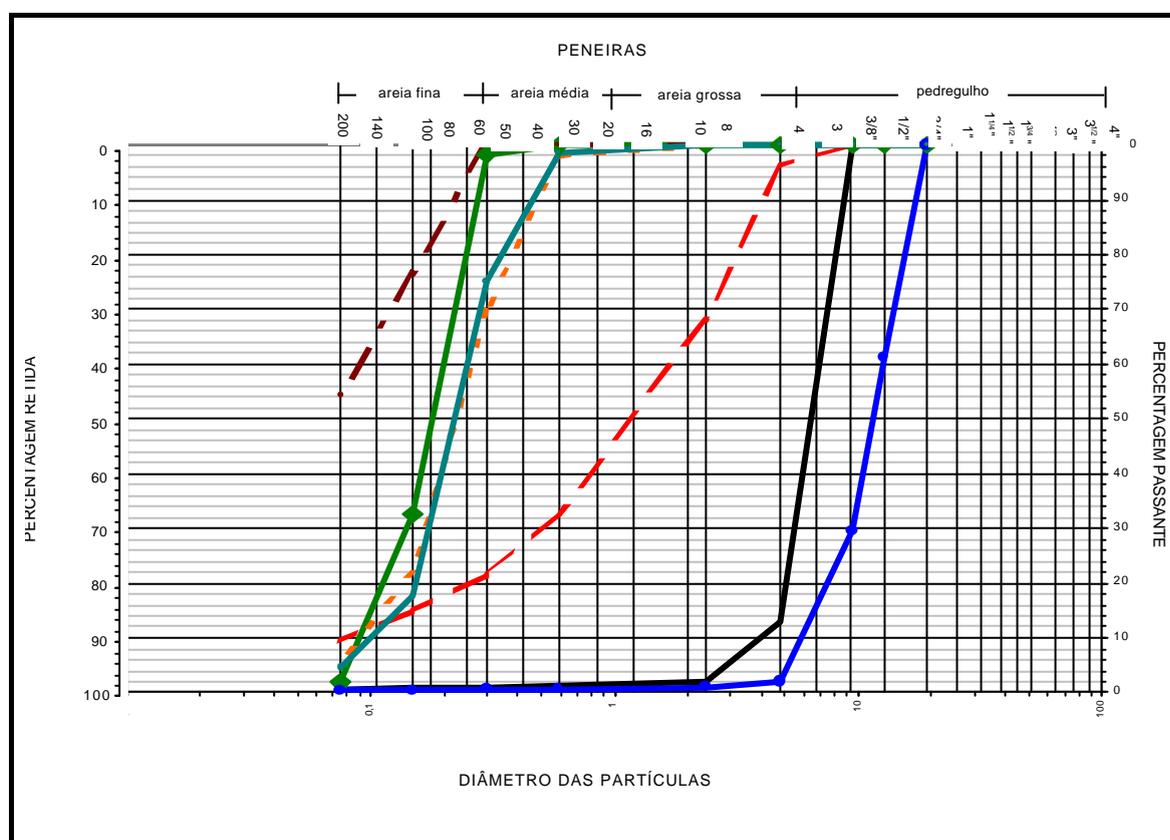


Figura 3.1 Curvas granulométricas dos materiais granulares e areias de fundição

3.2.1.1 Agregados Pétreos

Os agregados pétreos utilizados foram agregados graúdos e miúdos. O agregado graúdo é o material que fica retido na peneira nº 4 e o agregado miúdo é o material que passa na peneira nº 4.

3.2.1.1.1 Agregado Graúdo

O agregado graúdo consistiu de material britado, denominados de brita 3/4" e brita 3/8", sendo atendida a exigência de no mínimo 90% em peso das partículas, apresentarem pelo menos duas faces britadas.

O ensaio do índice de lamelaridade da mistura de agregados graúdos apresentou valor igual a 43%, atendendo limite máximo de 50% especificado pelo DAER/RS.

O ensaio de absorção apresentou resultado igual a 2,8%, caracterizando o agregado como de alta absorção.

As massas específicas da mistura de agregados foram verificadas, apresentando valores correspondentes a 2,715 g/cm³ para massa específica real e 2,530 g/cm³ para massa específica aparente.

3.2.1.1.2 Agregado Miúdo

O agregado pétreo miúdo utilizado foi pó de pedra. O mesmo consistiu de material contendo no mínimo 70% em peso de partículas com, pelo menos, duas faces britadas na fração que passa na peneira nº 4 e fica retida na nº 8.

O ensaio de equivalente areia apresentou resultado igual a 74%, caracterizando o agregado como de boa qualidade e pequena quantidade de impurezas e partículas deletérias, decorrentes de falhas em decapagens de pedreira ou contaminações no ciclo produtivo da planta de britagem.

3.2.2 Areia para Correção do Traço da Mistura de Agregados

Para correção dos vazios e da descontinuidade da curva granulométrica, ocasionados pelo uso do material britado, visando o enquadramento da mistura em faixas granulométricas da especificação para concreto asfáltico DAER/RS ES-P-16/91, foi adicionada fração de areia

fina de jazida localizada na região de Osório, RS. A composição granulométrica pode ser observada na tabela 3.1. Com o acréscimo da areia fina, os ensaios de massa específica real para a mistura de agregados miúdos, apresentaram como média de valores $2,695 \text{ g/cm}^3$.

No ensaio de equivalente areia, a mistura de agregados miúdos apresentou resultado igual a 88,6%.

3.2.3 Areias de Fundição Descartadas

As areias de fundição descartadas foram coletadas em empresas da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. O plano de amostragem e coleta foi realizado segundo a norma NBR10007 - Amostragem de Resíduos. As amostras foram coletadas durante dois ciclos de produção de 6 dias de duração, com intervalo de 15 dias. Devido às diversificadas linhas de produção de peças fundidas das várias empresas pesquisadas, as amostras foram separadas por tipos e processos de moldagem de peças fundidas, formando amostras homogêneas através da mistura das areias descartadas de mesmas características de cada empresa, conforme ilustrado na figura 3.2.



Figura 3.2 Mistura de areias de mesma classificação de diferentes empresas

Foram formadas então três amostras representativas, uma de Areia Verde (A1), outra de Areia Verde Misturada com Resíduos de Machos (A2), e a terceira de Finos Coletados no Processo de Exaustão das Fundições (A3). A figura 3.3 ilustra as amostras dos tipos de areia de fundição estudadas.

As três amostras representativas escolhidas, representam 85% da quantidade de resíduos de fundição gerados nas empresas pesquisadas. As quantidades restantes de areias representam as areias aglomeradas exclusivamente com resinas sintéticas, utilizadas na confecção de machos de peças metálicas fundidas, e não foram aplicadas para o presente estudo.



Figura 3.3 Amostras homogêneas das areias de fundição descartadas

Os resultados de teor de umidade, sólidos voláteis e pH das amostras podem ser observados na tabela 3.2.

Tabela 3.2. Resultados de umidade, S.V. e pH das amostras de areias de fundição

Amostra	A1	A2	A3
Umidade (%)	1,0	0,7	1,0
Sólidos Voláteis (%)	8,3	4,3	16,2
PH	7,7	7,4	7,8

A caracterização ambiental das amostras foi realizada seguindo os critérios das normas brasileiras NBR 10004 – Resíduos Sólidos: Classificação, NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos e NBR 10006 – Solubilização de Resíduos.

A determinação dos teores de metais das amostras dos resíduos de areias de fundição foi realizada segundo o método normalizado pela ABNT. Os testes foram realizados no Laboratório de Saneamento e as análises realizadas na Central Analítica da Universidade de Caxias do Sul, e estão apresentados na tabela 3.3 e tabela 3.4.

Tabela 3.3 Resultados obtidos no teste de lixiviação das amostras de areias de fundição

Parâmetro mg/L	A0	A1	A2	A3	Limite máximo NBR 10004
Ag	-	-	-	-	5,0
Ba	< 0,10	0,05	0,05	0,07	100,0
Cd	-	-	-	-	0,5
Cr	-	-	-	-	5,0
Cu	-	-	-	-	-
Fe	1,89	2,39	0,98	2,75	-
Mn	0,04	0,04	0,05	0,13	-
Ni	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	5,0
Zn	0,28	0,31	0,17	0,38	-

Tabela 3.4 Resultados do teste de solubilização das amostras de areias de fundição

Parâmetro mg/L	A0	A1	A2	A3	Limite máximo NBR 10004
Ag	-	-	-	-	0,05
Ba	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	1,0
Cd	-	-	-	-	0,005
Cr	-	-	0,03	-	0,05
Cu	-	-	0,17	0,02	1,0
Fe	1,70	2,18	1,43	5,46	0,3
Mn	< 0,02	0,08	0,03	0,95	0,1
Ni	-	-	0,11	-	-
Pb	-	-	-	-	0,05
Zn	0,18	0,28	0,16	0,67	5,0

3.2.3.1 Areias Verdes

A quantidade gerada desse tipo de resíduo de fundição, nas empresas pesquisadas que fazem a separação das areias verdes de outras linhas de produção que utilizam resinas sintéticas, representa 13% de toda a quantidade gerada de areias de fundição.

A caracterização granulométrica está apresentada na tabela 3.1 e a curva granulométrica na figura 3.1. O ensaio de equivalente areia apresentou valor igual a 42%, e a massa específica real apresentou valor igual a 2,183 g/cm³.

Os resultados de caracterização química das areias verdes, apresentados nas tabelas 3.3 e 3.4 indicam que o resíduo pode ser classificado como RESÍDUO CLASSE II - NÃO INERTE, devido a apresentaram valores superiores ao limite máximo permitido pela NBR 10004, nos parâmetros referentes a ferro no ensaio de solubilização, não apresentando periculosidade no teste de lixiviação.

3.2.3.2 Areias Verdes Misturadas com Resíduos de Machos

A quantidade gerada desse tipo de resíduo de fundição, nas empresas pesquisadas, representa 54% de todos os tipos de areias de fundição. A maior geração desse tipo de areia de fundição descartada é decorrente da mistura, que ocorre na maioria das fundições, das linhas de produção que utilizam areias verdes para moldagem de carcaças metálicas, e as resinas sintéticas utilizadas em areias de moldagem de machos.

A caracterização granulométrica está apresentada na tabela 3.1 e a curva granulométrica na figura 3.1. O ensaio de equivalente areia apresentou valor igual a 52%, e a massa específica real apresentou valor igual a 2,358 g/cm³.

Os resultados de caracterização química das areias verdes, apresentados nas tabelas 3.3 e 3.4 indicam que o resíduo deve ser classificado como RESÍDUO CLASSE II - NÃO INERTE, devido a apresentaram valores superiores ao limite máximo permitido pela NBR 10004, nos parâmetros referentes a ferro no ensaio de solubilização, não apresentando periculosidade no teste de lixiviação.

3.2.3.3 Finos Coletados no Processo de Exaustão das Fundições

A quantidade de finos exauridos do sistema de moldagem de peças fundidas, através de rede de exaustores estocados para serem descartados, foi quantificada nas empresas pesquisadas em 18% de todos os tipos de areias de fundição. A caracterização granulométrica está apresentada na tabela 3.1 e a curva granulométrica na figura 3.1. O ensaio de equivalente areia apresentou valor igual a 3%, e a massa específica real apresentou valor igual a 2,022 g/cm³.

Os resultados de caracterização química das areias verdes, apresentados nas tabelas 3.3 e 3.4 indicam que o resíduo deva ser classificado como RESÍDUO CLASSE II - NÃO INERTE, devido a apresentaram valores superiores ao limite máximo permitido pela NBR 10004, nos parâmetros referentes a ferro e manganês no ensaio de solubilização, não apresentando periculosidade no teste de lixiviação.

3.2.4 Ligante Betuminoso

O ligante betuminoso empregado para confecção dos corpos de prova, foi o cimento asfáltico de petróleo (CAP20). Ensaiado segundo as exigências da Especificação DAER-ES-P 22-91 referente a materiais betuminosos, as propriedades básicas estão apresentadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5 Classificação por viscosidade – especificações para cimento asfáltico de petróleo

Viscosidade a 60° C	P	2000 a 3500
Viscosidade Saybolt Furol a 135 ° C	s	177,3
Viscosidade Saybolt Furol a 177 ° C	s	33
ECA a 163 ° C por 5 h:		
Variação em massa	%	1,0 máx
Relação da viscosidade		4,0 máx
Ductilidade a 25° C	cm	20 mín
Índice de Suscetibilidade térmica		-1,5 a 1,0
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	50 mín
Ponto de fulgor	°C	235 mín
Solubilidade em tricloroetileno	%	99,5 mín

3.3 ESTUDO DE INCORPORAÇÃO DE LAMINADOS DE FIBRAS DE VIDRO DESCARTADAS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Os materiais tradicionais de uso corrente em concreto asfáltico, utilizados na pesquisa, foram agregados de rochas vulcânicas para formar a matriz pétreo, e como ligante betuminoso o cimento asfáltico de petróleo (CAP20). Os materiais alternativos empregados nesse capítulo, foram resíduos de termofixos reforçados com fibra de vidro, gerados por várias empresas da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, na fabricação de carrocerias para ônibus, micro-ônibus e frigoríficas, cabines para caminhões, camionetes e automóveis, barcos, antenas parabólicas, piscinas, móveis como mesas e cadeiras, telhas, entre outros.

3.3.1 Agregados

Os agregados para o concreto asfáltico foram constituídos de uma mistura de agregado graúdo e agregado miúdo, sendo necessária a adição de areia natural para correção da faixa granulométrica. Não houve a necessidade de incorporação de fíler.

Os agregados graúdo e miúdo utilizados foram pedra britada, oriundos de exploração de rocha riodacítica, em instalação de britagem localizada em pedreira privada localizada na cidade de Caxias do Sul, RS. Esses agregados pétreos não apresentavam materiais decompostos ou matéria orgânica, e foram constituídos de fragmentos são e duráveis, isentos de substâncias deletérias.

A granulometria foi determinada pelo método de Ensaio DAER nº 202, com separação das frações através de peneiramento. A granulometria foi determinada por lavagem, bem como a quantidade de material que passa na peneira nº 200. A composição granulométrica dos agregados e demais materiais utilizados no estudo, pode ser observada na tabela 3.6.

A figura 3.4 apresenta as curvas granulométricas dos materiais granulares estudados, bem como da amostra de fibra de vidro, sendo que, a granulometria da fibra de vidro

apresentada foi verificada através de amostra homogênea, ou seja, obtida após a trituração em moinhos de martelos das diversas subamostras coletadas em empresas diversas.

Tabela 3.6 Composição granulométrica dos agregados e da fibra de vidro

Peneira	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	AREIA	FIBRA DE VIDRO
#	% Pass	% Pass	% Pass	% Pass
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	63,50	100,00	100,00	100,00
3/8"	31,90	100,00	100,00	100,00
nº 4	3,50	88,20	100,00	74,00
nº 8	1,60	56,70	100,00	57,00
nº 30	1,30	24,30	100,00	21,00
nº 50	0,80	18,50	93,60	13,00
nº 100	0,60	12,10	11,80	10,00
nº 200	0,40	8,40	1,70	8,00
Convenção	↔	—	- - -	●—●

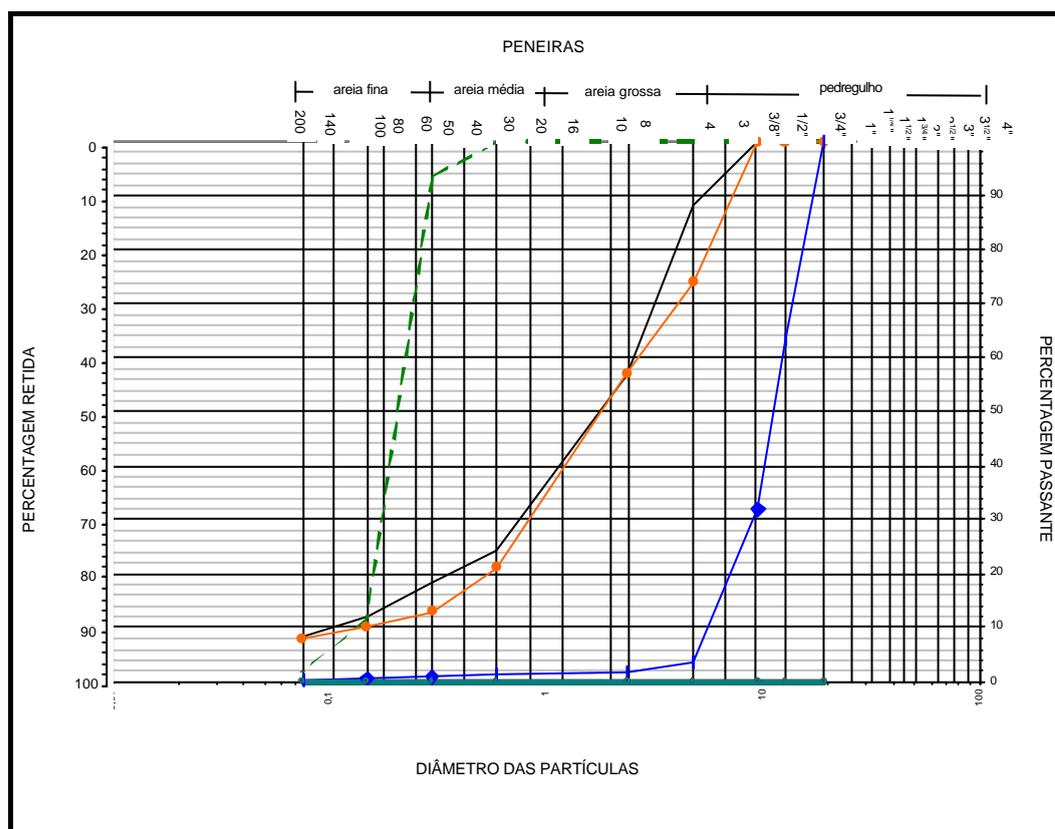


Figura 3.4 Curvas granulométricas dos materiais granulares e fibra de vidro

3.3.1.1 Agregados Pétreos

Os agregados pétreos utilizados foram agregados graúdos e miúdos, e estão descritos a seguir.

3.3.1.1.1 Agregado Graúdo

O agregado graúdo consistiu de material britado, denominados de brita 3/4" e brita 3/8", sendo atendida a exigência de no mínimo 90% em peso das partículas, apresentarem pelo menos duas faces britadas.

O ensaio de absorção apresentou resultado igual a 2,8% , caracterizando o agregado como de alta absorção. As massas específicas da mistura de agregados foram verificadas, apresentando valores correspondentes a 2,699 g/cm³ para massa específica real e 2,509 g/cm³ para massa específica aparente.

3.3.1.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi pó de pedra. O mesmo consistiu de material contendo no mínimo 70% em peso de partículas com, pelo menos, duas faces britadas na fração que passa na peneira nº 4 e fica retida na nº 8.

3.3.2 Areia para Correção do Traço da Mistura de Agregados

Para correção dos vazios e da continuidade da faixa granulométrica, ocasionados pelo uso do material britado, visando o enquadramento da mistura em faixas granulométricas da especificação para concreto asfáltico DAER/RS ES-P-16/91, foi adicionada fração de areia fina de jazida localizada na Estrada do Mar, região de Osório, RS.

A composição granulométrica pode ser observada na tabela 3.6. Com o acréscimo da areia fina, os ensaios de massa específica real, para a mistura de agregados miúdos apresentaram como média de valores 2,597 g/cm³.

3.3.3 Laminados de Fibras de Vidro Descartadas

Os resíduos foram coletados no processo de laminação de resina poliéster, reforçada com fibra de vidro, em empresas da região nordeste do Estado do RS. O acondicionamento desses materiais foi realizado em pilhas, e estocados nas empresas. O plano de amostragem e coleta foi realizado segundo a norma NBR10007 - Amostragem de Resíduos.

As amostras foram coletadas e processadas em moinho de martelos para redução do tamanho das partículas, conforme pode ser observado pela composição granulométrica apresentada na tabela 3.6. A figura 3.5 ilustra o material após o processo de moagem.



Figura 3.5 Fibra de vidro moída em moinho de martelos

A caracterização ambiental das amostras foi realizada seguindo os critérios das normas brasileiras NBR 10004 – Resíduos Sólidos Classificação, NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos e NBR 10006 – Solubilização de Resíduos.

Na tabela 3.7 verifica-se que o resíduo não apresenta ânion cianeto ou sulfeto, portanto não apresenta periculosidade.

A amostra coletada foi classificada como não inflamável, visto que não se inflamou no ensaio e também não aumentou as chamas quando exposta ao fogo. Da mesma forma, por se tratar de amostra sólida, pode ser considerada não corrosiva. Quanto a reatividade, foi considerada não reativa.

Tabela 3.7 Composição do resíduo de fibra de vidro

AMOSTRA	FIBRA DE VIDRO
Umidade (%)	1,6
Sólidos Voláteis (%)	53,8
Óleos e graxas (%)	1,2
Cianetos (%CN)	Nd
Sulfetos (%H ₂ S)	Nd
Cinzas (%)	39,0
pH	6,8

Na tabela 3.8 observa-se que o material não apresenta características de toxicidade ou patogenicidade, visto que os resultados no teste de lixiviação apresentaram valores bem abaixo do limite máximo recomendado pela NBR 10004.

Tabela 3.8 Resultados do teste de lixiviação do resíduo

PARÂMETRO mg/l	FIBRA DE VIDRO	LIMITE MÁXIMO - NBR 10004
Ag	Nd	5,0
Ba	0,21	100,0
Cd	Nd	0,5
Cr	0,06	5,0
F	Nd	150,0
As	0,005	5,0
Hg	Nd	0,1
Se	Nd	1,0
Pb	Nd	5,0

Na tabela 3.9, observa-se que parâmetros analisados no ensaio de solubilização como fenóis, surfactantes, dureza, ferro e manganês apresentaram valores superiores ao limite máximo permitido pela NBR 10004, portanto, o resíduo de laminados de resina poliéster reforçados com fibra de vidro são classificados como **RESÍDUO CLASSE II - NÃO INERTE**.

Tabela 3.9 Resultados do teste de solubilização do resíduo

PARÂMETRO mg/L	FIBRA DE VIDRO	Limite máximo NBR 10004
Parte 1		
Fenóis	1,35	0,001
Surfactantes	0,9	0,2
Cianetos	Nd	0,1
Cloretos	33,0	250,0
Fluoretos	0,53	1,5
Sulfatos	9,6	400,0
Nitratos	0,5	10,0
Parte 2		
Dureza	572,0	500
Ag	Nd	0,05
Ba	Nd	1,0
Cd	Nd	0,005
Cr	Nd	0,05
Cu	0,03	1,0
Fe	0,32	0,3
Mn	0,13	0,1
Hg	Nd	0,001
Pb	Nd	0,05
Se	Nd	0,01
Na	6,0	200,0
As	0,008	0,05
Al	0,16	0,2
Zn	1,3	5,0

3.3.4 Ligante Betuminoso CAP-20

O cimento asfáltico de petróleo CAP-20 utilizado, deve satisfazer as exigências da Especificação DAER-ES-P 22-91. Apresentam-se abaixo as propriedades básicas do ligante.

Tabela 3.10 Classificação por viscosidade – especificações para cimento asfáltico de petróleo

Viscosidade a 60° C	P	2000 a 3500
Viscosidade Saybolt Furol a 135 ° C	s	120 mín
Viscosidade Saybolt Furol a 177 ° C	s	30 a 150
ECA a 163 ° C por 5 h:		
Varição em massa	%	1,0 máx
Relação da viscosidade		4,0 máx
Ductilidade a 25° C	cm	20 mín
Índice de Suscetibilidade térmica		-1,5 a 1,0
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	50 mín
Ponto de fulgor	°C	235 mín
Solubilidade em tricloroetileno	%	99,5 mín

4 MÉTODOS DE ENSAIOS DE MISTURAS BETUMINOSAS

Este capítulo aborda os tópicos fundamentais relacionados aos ensaios e metodologia experimental empregada para o estudo de concreto asfáltico do tipo CBUQ, com uma breve descrição da metodologia utilizada para confecção dos corpos de prova, com o enfoque voltado a metodologia de dosagem Marshall para misturas betuminosas, utilizando além dos materiais tradicionais em pavimentação, resíduos de laminados de poliéster reforçados com fibra de vidro e areias de fundição descartadas como subprodutos, considerando-os materiais alternativos na pavimentação rodoviária.

Também foram realizados ensaios complementares para determinação da resistência à tração e módulo de resiliência, sendo aplicados aos corpos de prova após a verificação dos projetos de dosagem do método Marshall, a fim de verificar as propriedades de deformabilidade e resistência da camada asfáltica.

Após rompidos os corpos de prova nos ensaios complementares, foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização nos materiais fracionados dos corpos de prova, com a finalidade de simular o possível desprendimento dos materiais alternativos da matriz pétreo e do ligante asfáltico.

Para ambos os estudos de incorporação de resíduos em misturas betuminosas, das areias de fundição descartadas e dos laminados de fibra de vidro, foram realizados ensaios ambientais de laboratório e verificadas sob condições pré estabelecidas, se poderiam causar impacto nocivo à saúde e ao meio ambiente.

4.1 GENERALIDADES

Visando a padronização dos ensaios realizados, são descritas a seguir as particularidades utilizadas para realização dos ensaios, de acordo com as normas técnicas rodoviárias vigentes DAER/RS-EL 217/01 e DNER-ME 43/94, complementadas pelas recomendações gerais para dosagem de concreto asfáltico, apresentadas por Pinto (1997) e Ogurtsova et. al. (1999).

4.2 ENSAIOS PRELIMINARES

Foram realizados os ensaios preliminares exigidos pela especificação para concreto asfáltico DAER/RS ES-P-16/91, destacando-se os principais: ensaio de análise granulométrica, ensaio de massa específica real, ensaio de massa específica aparente, ensaio de absorção, ensaio de equivalente areia, ensaio de lamelaridade, ensaio de viscosidade saybolt-furol, ensaio de espuma no ligante betuminoso e adesividade.

4.3 ENSAIO MARSHALL – MÉTODO DE DOSAGEM

O método criado da década de 1930 e muito utilizado pelo exército dos EUA, é consagrado e utilizado em vários países, entre eles o Brasil, onde o uso racional e eficiente deve ser verificado para as condições brasileiras e regionais.

É sabido que o reconhecimento do ensaio Marshall como um método de dosagem e controle tecnológico de misturas betuminosas é extremamente valioso, mas de caráter empírico.

O método apresenta grande sensibilidade nos resultados diante de pequenas alterações nas condições em que se realiza. Portanto, é fundamental que uma quantidade adequada de corpos de prova seja moldada, e que o ensaio seja realizado com muito cuidado e técnica adequada às normas vigentes, levando-se em consideração uma rotina de procedimentos padronizados durante o ensaio, possibilitando dessa maneira, encontrar resultados compatíveis com as propriedades fundamentais propostas pelo método.

4.3.1 Considerações

Foram elaborados no mínimo três corpos de prova para cada teor de ligante, sendo utilizado o valor médio das três determinações como representativo para avaliação dos parâmetros estudados.

A estratégia experimental foi definida da seguinte maneira, para cada um dos projetos estudados:

- *Estudo de incorporação de areias de fundição*: elaboração de quatro projetos de dosagem, um para cada tipo de areia incorporada no CBUQ, testando corpos de prova com 5 teores de asfalto diferentes, realizando 3 repetições para cada teor, moldando-se no total 60 corpos de prova em laboratório, conforme ilustrado na figura 4.1.

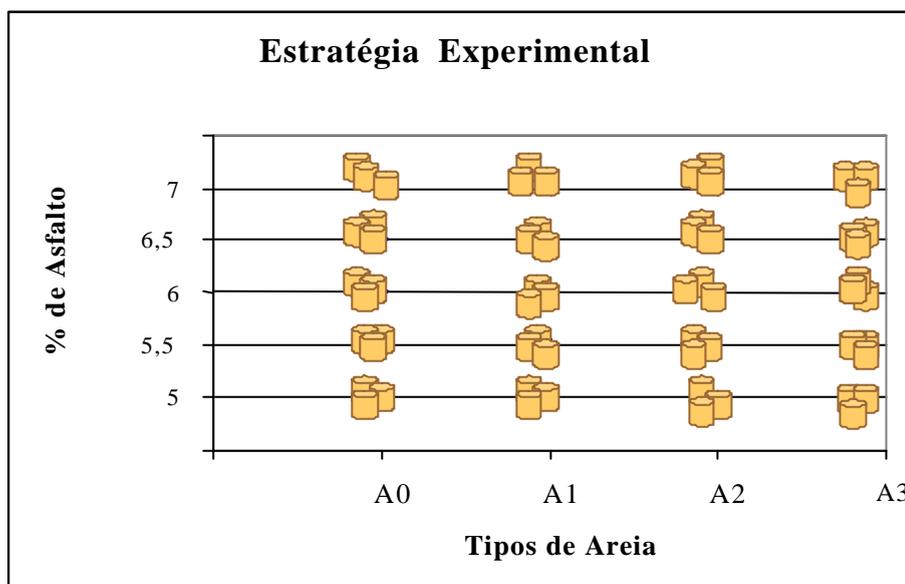


Figura 4.1 Estratégia Experimental - Areias de fundição

- *Estudo de incorporação de laminados de fibras de vidro*: elaboração de quatro projetos de dosagem, sendo o primeiro sem adição de resíduo e os demais com taxas crescentes de incorporação de resíduo de fibra, variando de 1 %, 2% e 3% em peso da mistura de agregados, moldando-se no total 96 corpos de prova em laboratório conforme ilustrado na figura 4.2.

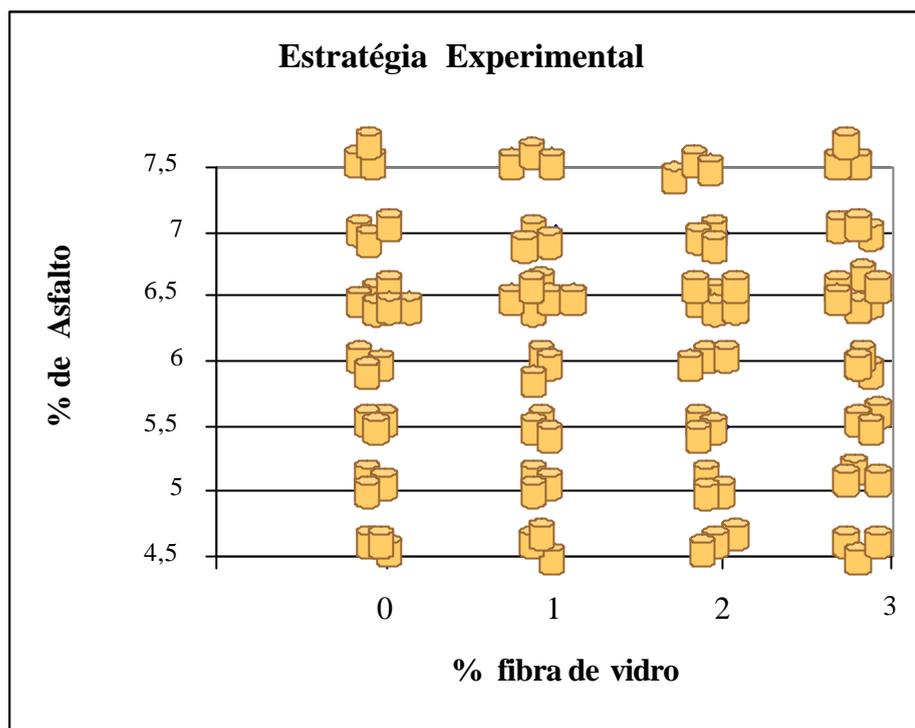


Figura 4.2 Estratégia Experimental - Fibra de vidro

4.3.2 Equipamentos Utilizados

Apresenta-se abaixo, a listagem dos equipamentos utilizados para a realização do ensaio Marshall:

- a) prensa elétrica capaz de aplicar cargas até 4000 kg, com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de 5 cm/min (aproximadamente 0,8 mm/s);
- b) medidor de fluência, com divisões de 1/100 mm;
- c) cuba planetária para dosagem dos materiais com controle de temperatura, aquecimento através de circulação de óleo térmico, e mistura realizada através de pás fixadas em eixo vertical com controle de altura e velocidade, conforme ilustração na figura 4.3;
- d) banho de água com temperatura termostaticamente controlada, capaz de manter a temperatura a 60 °C;
- e) pedestal de compactação de madeira, dimensões de 203 x 203 x 457 mm, capeado com uma chapa de aço de 305 x 305 x 25 mm, fixado com quatro cantoneiras a um sólido bloco de concreto;



Figura 4.3 Cuba planetária para dosagem Marshall

- f) molde de compactação, consistindo de uma placa base, molde e colar de extensão. O molde com diâmetro interno de 101,6 mm e altura aproximada de 76,2 mm, a placa base e o colar são alternados com qualquer das extremidades do molde;
- g) fixador do molde destinado a manter o molde na posição, sobre o pedestal de compactação;
- h) haste de aço com 12,7 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento tendo as extremidades com formato semi-esférico;

- i) soquete com sapata circular, plana de 98,4 mm de diâmetro, equipado com um peso de 4536 g, capaz de obter a altura de queda livre especificada de 457,2 mm;
- j) extrator hidráulico de corpos-de-prova;
- k) estufa elétrica capaz de manter temperaturas até 200 °C, com variação de ± 2 °C;
- l) conjunto de peneiras requeridas para a faixa granulométrica de projeto;
- m) termômetro graduado em 1 °C, de 30 °C a 200 °C;
- n) termômetro graduado em 1 °C, de 0 °C a 60 °;
- o) balança eletrônica com capacidade de 5 kg sensível a 0,1 g;
- p) espátula grande;
- q) lápis de cera para marcação dos corpos-de-prova;
- r) dispositivos para aquecimento dos moldes e soquete, tipo fogareiro ;
- s) cronômetro;
- t) papel filtro com diâmetro igual ao do molde;
- u) paquímetro com precisão de 0,1 mm;
- v) recipientes metálicos em forma de calota esférica munido de duas alças laterais;
- w) recipiente metálico com bico vertedor e alça;

4.3.3 Roteiro e Particularidades

Estabelecidos no projeto os percentuais de contribuição de cada material da mistura de forma a atender a faixa especificada, DAER/RS - B, procedeu-se a execução do ensaio Marshall conforme descrito a seguir:

- a) Identificação do projeto;
- b) Secagem dos agregados constituintes da mistura e separação nas frações definidas no projeto. Após a separação, as frações foram lavadas e secadas em estufa a 105°C;

- c) Obtido do projeto o peso a ser utilizado de cada uma das frações dos materiais da mistura de maneira a resultar uma amostra compactada com a altura de $63,5 \pm 1,3$ mm. O corpo-de-prova pioneiro foi moldado e determinado sua altura, adotando-se como **“peso do CP”**;
- d) *A mistura de agregados foi obtida com as diversas frações de cada material, determinando-se a massa específica real e aparente do agregado graúdo (DAER/RS-EL 105/01) **“MERg”** e **“MEAg”**, e massa específica real do agregado miúdo (DAER/RS-EL 106/01), **“MERm”**;

*Para efeito do cálculo das massas específicas da mistura consideramos os valores obtidos nos ensaios como representativos do percentual retido e passante na peneira n° 10 (2,00 mm).

- e) Determinado o **“peso de asfalto”** a ser utilizado na mistura;
- f) Preparada a mistura dos agregados com as diversas frações de cada material e aquecida a uma temperatura de 165 °C. A **“temperatura do ligante”**, em função do ensaio de viscosidade, foi estabelecida em 155 °C;
- g) Aquecidos o molde, em estufa, e a face do soquete em chapa quente com fogareiro, entre 93 °C e 149 °C;
- h) Aquecido o ligante em estufa a uma temperatura de 155 °C, referente a viscosidade de 85 ± 10 segundos Saybolt Furol, segundo o método DAER/RS-EL 201/01;
- i) Colocada a mistura dos agregados aquecidos na cuba planetária de modo a formar uma cavidade no centro. Colocada nesta cavidade a quantidade de ligante aquecido a 155 °C e misturado completamente o agregado com o ligante através das pás fixadas em eixo vertical com controle de altura e velocidade. A velocidade foi mantida em 30 r.p.m durante 2 minutos, até que a mistura ficasse homogênea. O recipiente foi aquecido a uma temperatura de 177 °C, nunca excedendo-a. A **“temperatura de compactação da mistura”** foi de 144 °C referente a viscosidade Saybolt Furol de 140 segundos do ligante. Adotou-se a precaução de nunca reaquecer a mistura;
- h) Fixado o conjunto do molde no fixador;
- j) Colocado um papel filtro no fundo do molde, antes de colocar a mistura;
- k) Colocada a mistura no molde em três camadas aproximadamente iguais, aplicando-se 20 golpes manuais com a haste em cada camada distribuídos uniformemente na seção do corpo-de-prova, com o objetivo de eliminar a segregação dos agregados e a possível

formação de vazios grandes pela superposição de partículas maiores do agregado graúdo. A superfície foi emparelhada por meio de uma espátula e colocada papel filtro no topo do molde;

- l) Aplicados 75 golpes com o soquete na superfície da amostra, com o eixo do soquete de compactação perpendicular à base do molde. Removeu-se a placa base e o colar, invertendo o molde com a amostra. Aplicou-se 75 golpes na face invertida da amostra;
- m) Após a compactação, removeu-se o conjunto do fixador do molde sendo a mostra deixada para resfriar durante 24 horas em temperatura ambiente;
- n) Os corpos-de-prova foram removidos do molde por meio do extrator hidráulico, identificando-os com giz de cera;
- o) Determinada a “**altura média do CP**”, tomada em quatro posições diametralmente opostas;
- p) Determinada a densidade de cada corpo-de-prova segundo o método DAER/RS-EL 212/01, sendo o peso do corpo-de-prova no ar “**P_{ar}**” e na água como “**P_{imerso}**”, respectivamente;
- q) Após a determinação da densidade os corpos-de-prova foram aquecidos no banho de água na temperatura de $60\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ durante 30 a 40 minutos. Retirado um corpo-de-prova de cada vez do banho de água, posicionando-o na prensa e rompido diametralmente, em no máximo 30 segundos;
- r) No momento da ruptura do CP é realizada a “**leitura do extensômetro**” correspondente à carga máxima de ensaio e como “**fluência**” a deformação máxima que sofre o corpo-de-prova até a ruptura.

4.4 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Também foram realizados ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

Para cada mistura asfáltica estudada, foram moldados no mínimo três corpos de prova referentes aos teores ótimos de betume encontrados no método de dosagem Marshall, adotando-se a média dos três resultados dos ensaios como parâmetro de MR e Rt.

4.4.1 Ensaio de Resistência à Tração

Para a determinar a resistência à tração, o ensaio é padronizado pela especificação DNER-ME 138/94, que especifica a aplicação de carga progressiva através de compressão diametral no corpo de prova, até que ocorra a separação em duas metades no plano vertical do corpo de prova.

4.4.1.1 Considerações

A amostra para ensaio foi constituída de um corpo-de-prova cilíndrico com altura de 6,5 cm e diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm. Para cada uma das oito misturas asfálticas avaliadas, foram moldados três corpos-de-prova referentes ao teor ótimo de betume, totalizando a moldagem em laboratório de 24 corpos-de-prova segundo o método DAER/RS-EL 217/01.

4.4.1.2 Equipamentos Utilizados

- a) Prensa mecânica, com sensibilidade inferior ou igual a 19,60 N (ou 2,0 kgf), com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s (prensa Marshall);
- b) Pórtico de ruptura dotado de frisos metálicos com curvatura compatível ao corpo-de-prova a ser ensaiado, conforme Figura 4.4;
- c) Estufa elétrica capaz de manter a temperatura entre 30 °C e 60 °C;
- d) Sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura em $25 \pm 0,5$ °C;
- e) Paquímetro.

4.4.1.3 Roteiro e Particularidades

- a) Identificação do projeto;
- b) Medição da altura do corpo-de-prova com o paquímetro, em quatro posições diametralmente opostas, determinando a “**altura do CP**”;

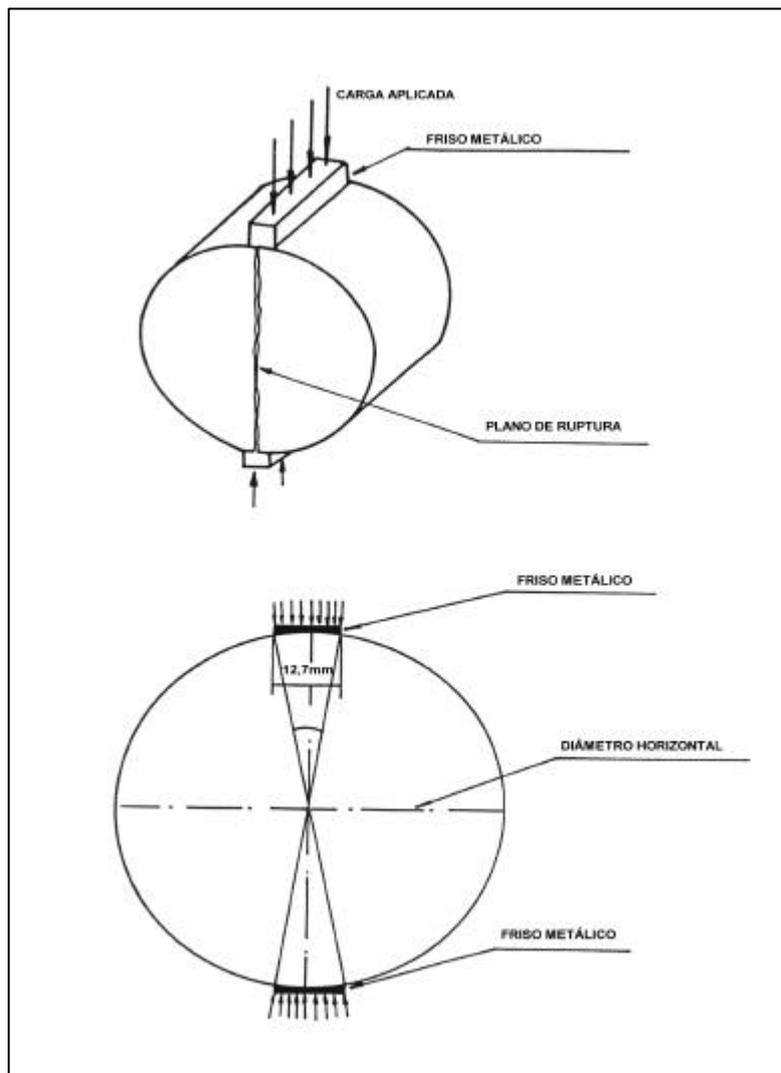


Figura 4.4 Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico

- c) Medição do diâmetro do corpo-de-prova com o paquímetro, em três posições paralelas, determinando o “**diâmetro do CP**”;
- d) Colocação do corpo-de-prova na estufa ou sistema de refrigeração, por um período de 2 (duas) horas, de modo a se obter a temperatura especificada para o ensaio: 25 °C;

* Nota: A critério do projetista, podem ser definidas temperaturas diversas, inclusive inferiores, dependendo das condições que o estudo deseja simular;
- e) Repousar o corpo-de-prova em posição horizontal, segundo uma geratriz, sobre a parte inferior do pórtico de ruptura;
- f) Verificar visualmente a retilineidade das geratrizes de contato com ambos os frisos;

- g) Ajustar o prato da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter em posição o corpo-de-prova;
- h) Aplicar a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical, efetuando a leitura do valor da “**carga de ruptura**”;

4.4.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

Para obtenção das propriedades resilientes da mistura estudada, o corpo de prova é ensaiado com aplicação diametral de cargas cíclicas e repetidas, com sistema de medição das deformações recuperáveis do corpo de prova. O ensaio é padronizado pela especificação DNER-ME 133/94, sendo que os equipamentos e métodos utilizados para a realização do ensaio estão apresentados a seguir.

4.4.2.1 Considerações

A amostra para ensaio foi constituída de um corpo-de-prova cilíndrico com altura de 6,5 cm e diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm. Para cada uma das oito misturas asfálticas avaliadas, foram moldados três corpos-de-prova referentes ao teor ótimo de betume, totalizando a moldagem em laboratório de 24 corpos-de-prova segundo o método DAER/RS-EL 217/01.

4.4.2.2 Equipamentos Utilizados

- a) Sistema pneumático ou hidráulico de carregamento, composto de: regulador de pressão para aplicação da carga vertical repetida; válvula de transmissão da carga vertical; cilindro de pressão e pistão de carga; dispositivo mecânico digital “timer” para controle do tempo de abertura de válvulas e frequência de aplicação da carga vertical. A figura 4.5 apresenta o esquema do equipamento para a realização do ensaio de resiliência.

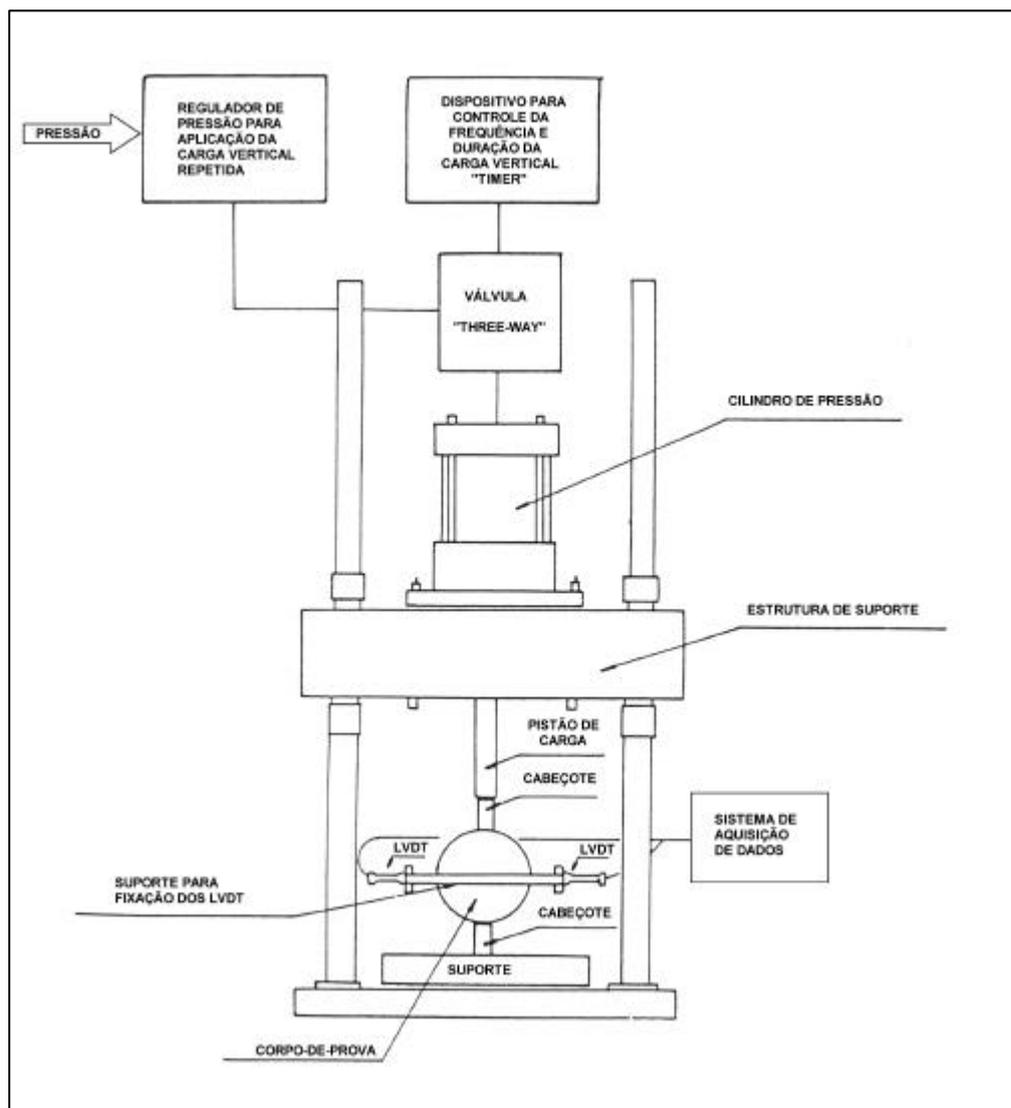


Figura 4.5 Esquema do equipamento para ensaio de resiliência

- b) Sistema de medição de deformação da amostra constituído de: dois transdutores mecânico-eletromagnético tipo LVDT (“Linear variable differential transformer”); suporte para fixação dos LVDT na amostra; equipamento de aquisição de dados com características apropriadas para uso com os transdutores;

*Nota: O princípio de funcionamento dos transdutores LVDT consiste em transformar as deformações durante o carregamento repetido em potencial elétrico, cujo valor é registrado no oscilógrafo. Uma pré-calibração é necessária, a fim de correlacionar as deformações com os valores dos registros;

- c) Estrutura de suporte com acessórios;

- d) Sistema de controle de temperatura, capaz de manter a temperatura controlada com variação máxima de 1 °C e no intervalo de 20 °C – 40 °C. O sistema inclui uma câmara de temperatura controlada com dimensões suficientes para conter os componentes descritos nos itens a, b, c.

4.4.2.3 Roteiro e Particularidades

- a) Identificação do projeto;
- b) Posicionar o corpo-de-prova no interior do suporte para fixação dos transdutores;
- c) Colocar o corpo-de-prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos, com 12,7 mm de espessura e raio de $10 \pm 0,2$ cm;
- d) Fixar e ajustar os transdutores de modo a se obter registro no equipamento de aquisição de dados;
- e) Observar o perfeito assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova;
- f) Determinar a “**carga vertical repetida**” a ser aplicada diametralmente no corpo-de-prova, de modo a se obter uma tensão de aproximadamente a 30 % da resistência à tração determinada;
- g) Para a fase de condicionamento do corpo-de-prova, aplicar 200 vezes a “**carga vertical repetida**” diametralmente no corpo-de-prova, com frequência de aplicação da carga de 60 ciclos por minuto, duração de 0,10 segundo e repouso de 0,9 segundo;
- h) Continuar a aplicação da carga e registrar a “**deformação resiliente**” para 300, 400 e 500 ciclos de aplicações;
- i) Repetir as fases descritas nos itens b) à h) com o corpo-de-prova posicionado de forma que a carga vertical repetida seja aplicada em plano ortogonal ao anterior, sendo que o módulo de resiliência será a média dos valores determinados nos dois planos ortogonais.

4.4.3 Ensaios Ambientais

Para ambos os estudos de incorporação de resíduos em misturas betuminosas, das areias de fundição descartadas e dos laminados de fibra de vidro, realizaram-se ensaios ambientais de laboratório e verificou-se sob condições pré estabelecidas, se os resultados

poderiam causar impacto nocivo à saúde e ao meio ambiente. Na figura 4.6 observa-se etapas dos ensaios ambientais realizados nas amostras após fragmentação.

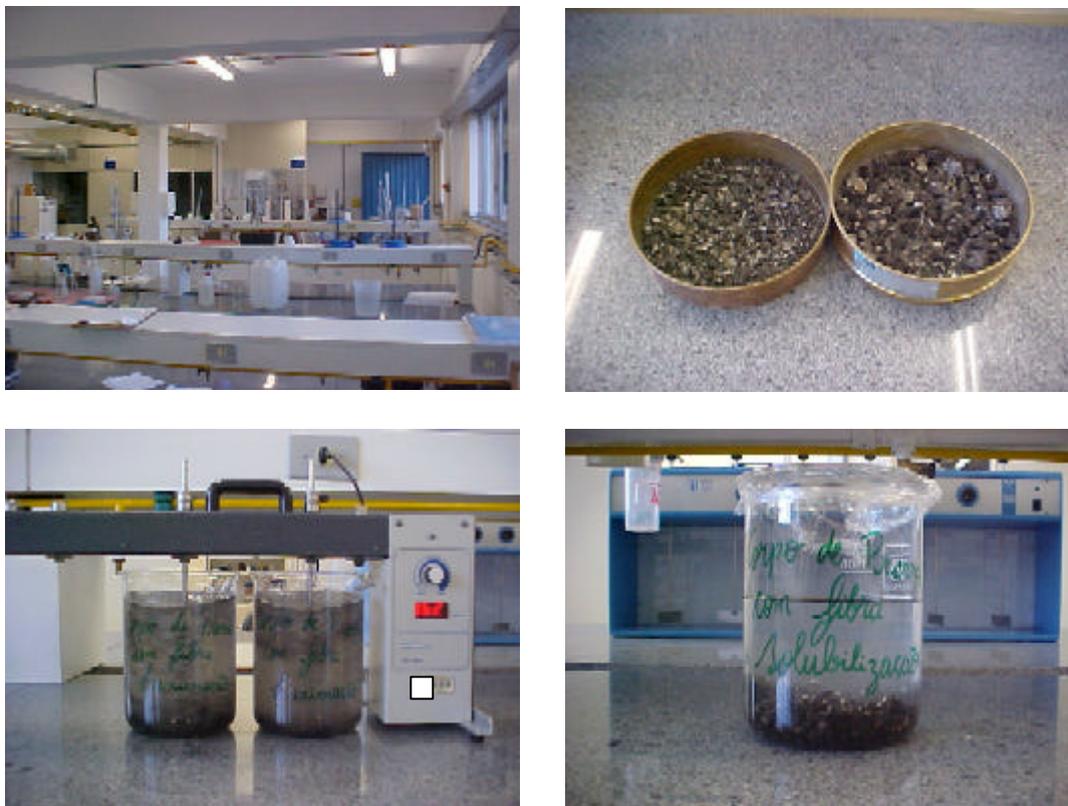


Figura 4.6 Ensaios ambientais nas amostras de CBUQ após fragmentação

4.4.3.1 Considerações

Após rompimentos dos corpos de prova nos ensaios complementares, realizam-se ensaios de solubilização nos materiais fragmentados dos corpos de provas, além de verificação microscópica da amostra, com a finalidade de simular o possível desprendimento dos materiais alternativos da matriz pétreo e do ligante asfáltico, verificando se ocorreu alteração da estrutura do esqueleto mineral, presença de resíduos de fibras livres ou de contaminantes de resíduos das areias de fundição, ou seja, partículas não envolvidas totalmente pelo ligante betuminoso.

O ensaio de solubilização é normalizado pela ABNT NBR 10.006 (1987) Solubilização de Resíduos. Após a fragmentação do corpo de prova, nos extratos solubilizados são ensaiados os mesmos parâmetros descritos no capítulo 3, caracterização dos resíduos.

4.4.3.2 Equipamentos Utilizados

- a) Aparelho de agitação do tipo "Jar-Test";
- b) Aparelho para filtração e demais acessórios (NBR 10005 e NBR 10006).

4.4.3.3 Roteiro e Particularidades

- a) Identificação do projeto e das amostras sólidas, coletadas de acordo com a NBR 10007;
- b) Para o teste de lixiviação - NBR 10005, realizam-se os seguintes procedimentos:
 - Pesar 100 gramas de massa úmida da amostra sólida, colocando-a em recipiente de vidro de 2000 ml, e acrescenta-se 1600 ml de água destilada (mantendo a relação 16:1), agitando-se no "Jar-Test" durante 24 horas;
 - Efetua-se a correção do pH para 5 +/- 0,2, respectivamente após 15, 30, 60 minutos e 24 horas após o início da agitação;
 - Concluída a agitação, adiciona-se uma quantidade m_1 de água deionizada calculada pela expressão $m_1 = 4m - m_2$, onde m é a massa da amostra (g) e m_2 é a massa de ácido utilizado para correção do pH;
 - Desliga-se o "Jar-Test", aguardando 15 minutos para decantação;
 - Realiza-se então filtração à vácuo, inicialmente com papel filtro/algodão/papel filtro, e posteriormente com membrana de 0,47 μm e 0,45 μm ;
 - Com o extrato lixiviado obtido da amostra, realiza-se análise de contaminantes, comparando-os com a o anexo G, listagem nº 7 da NBR 10004, de valores máximos permitidos;
- c) Para o teste de solubilização - NBR 10006, realizam-se os seguintes procedimentos:
 - Pesar 250 gramas de amostra seca, colocando-a em recipiente de vidro de 1500 ml;
 - Acrescenta-se 1000 ml de água destilada, agitando em baixa velocidade durante 5 minutos no "Jar-Test";
 - Tampar o recipiente e deixar em repouso durante 7 dias;
 - Filtrar com membrana de e 0,45 μm ;
 - Solubiliza-se a amostra para permitir a análise de metais, comparando os resultados com o anexo H, listagem nº 8 da NBR 10004, de valores máximos permitidos.

Obs.: Para ambos os ensaios, para a preservação da mostra, adiciona-se 2 ml de HNO_3 por litro de amostra, mantendo sob refrigeração à temperatura de 4 ° C.

5 METODOLOGIA CIENTÍFICA

A fundamentação teórica para realização da pesquisa, está apresentada no decorrer deste capítulo, abordando os tópicos fundamentais relacionados ao estudo de dosagem Marshall de concreto betuminoso usinado à quente, complementados por estudos de resistência à tração e módulo resiliente.

5.1 GENERALIDADES

Concreto betuminoso usinado à quente (cbuq) é uma mistura de concreto asfáltico constituída de agregados graúdos, miúdos, material de enchimento e ligante betuminoso misturados à quente em usina apropriada, devendo ser espalhados e compactados à quente.

O agregado constitui o esqueleto mineral que suporta e transmite as cargas aplicadas na superfície do pavimento, e sua escolha deve assegurar características de uniformidade, durabilidade, resistência, porosidade, granulometria, forma, limpeza e adesividade ao ligante.

O cimento asfáltico de petróleo é o elemento cimentante que une as partículas do agregado e as mantém na posição adequada para transmitir o carregamento aplicado pelo tráfego às camadas inferiores do pavimento. São semi-sólidos à temperatura ambiente, necessitando de aquecimento para terem consistência apropriada ao envolvimento dos agregados, e características de flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e resistência à degradação química.

5.2 PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS ESTUDADAS

Para a realização do estudo de dosagem de concreto asfáltico, incorporando materiais alternativos como areias de fundição e fibras de vidro na mistura de agregados pétreos, foram pesquisadas e verificadas as propriedades exigidas pelas especificações brasileiras dos órgãos rodoviários, e estão apresentadas a seguir.

5.2.1 Definições

Apresentam-se abaixo algumas definições necessárias ao entendimento do capítulo:

Estabilidade é a medida de um concreto betuminoso de suportar os carregamentos oriundos do tráfego sem sofrer deformações plásticas permanentes e irreversíveis, de resistir às deformações permanentes. Está associada também a resistência do material ao deslocamento, ou seja, mudança da forma geométrica sem alteração de volume.

Fluência é a deformação diametral de um corpo de prova medida no momento da ruptura, sob condições padronizadas de ensaio.

Densidade aparente (D_a) é a razão entre a massa ao ar à 25°C do corpo de prova e a massa ao ar de um volume de água destilada à 25°C igual ao volume aparente do corpo de prova. É utilizada para controlar o processo de compactação da mistura nas pistas.

Densidade máxima teórica (D_t) é a densidade da mistura sem vazios, ou seja, a massa total dividida pela soma dos volumes ocupados pelos materiais.

Volume de vazios (V_v) é a quantidade de vazios não preenchidos com ligante asfáltico, expresso percentualmente ao volume aparente do corpo de prova.

Relação betume-vazios (RBV) é o volume ocupado pelo material betuminoso na mistura expresso percentualmente em relação ao volume de vazios dos agregados minerais.

Vazios de agregado mineral (VAM) é o volume total de vazios formados pelo agregado, obtidos pela soma dos vazios da mistura e os vazios ocupados pelo betume.

Resiliência é a capacidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente, e após o descarregamento, ter a sua energia recuperada;

Resistência à tração é o valor da carga aplicada em ensaio padronizado, por compressão diametral até a ruptura do corpo de prova.

5.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como já afirmado anteriormente, o método de dosagem Marshall foi criado na longínqua década de 1930, nos EUA. O engenheiro Bruce G. Marshall do Mississippi State Highway Department idealizou o método para determinação do teor de ligante betuminoso que deveria ser utilizado para misturas asfálticas em pavimentos rodoviários. O método foi amplamente estudado pelo Corps of Engineers que, em 1948 publicou relato completo do método para o exército dos EUA, passando a ser conhecido e utilizado internacionalmente até os dias atuais, inclusive no Brasil.

A prática e estudos realizados sobre o método Marshall demonstram que vários fatores influenciam nos parâmetros medidos, tais como: tipos de materiais granulares utilizados como agregados graúdos e miúdos; das características, do tipo e quantidade do ligante betuminoso; da temperatura de mistura e compactação dos corpos de prova; das dimensões do corpo de prova; das características dos equipamentos utilizados; das condições operacionais e regionais em que estiver sendo utilizado.

Com a finalidade de verificação e validação dos resultados obtidos com o método Marshall, foram realizados ensaios de módulo de resiliência e ensaios de resistência à tração por compressão diametral, que levam em consideração propriedades resilientes e características relacionando as tensões e deformações nos materiais.

Na elaboração desse estudo, procurou-se ao máximo a padronização dos critérios utilizados nos ensaios, de modo que a utilização dos fundamentos teóricos, através de equações, apresentasse resultados com alto grau de confiabilidade.

5.3.1 Cálculos e Equações

Apresenta-se nos itens seguintes, as equações utilizadas para obtenção dos resultados das propriedades estudadas no método de dosagem Marshall, e nos ensaios de resistência à tração indireta e de módulo de resiliência, para os estudos de incorporação de resíduos de areias de fundição e de laminados de fibras de vidro em misturas asfálticas, do tipo concreto betuminoso usinado à quente.

5.3.1.1 Quantidade de ligante a ser adicionado à mistura

$$\text{"pesodo asfalto"} = \frac{\text{"\% asfalto"} \times \text{"peso do CP"}}{100 - \text{"\% asfalto"}} \quad (5.1)$$

onde:

“% asfalto” = percentagem de ligante a ser adicionada na confecção do corpo-de-prova;

“peso do CP” = peso do corpo-de-prova.

5.3.1.2 Massa específica real dos agregados da mistura

$$\text{"massa específica real dos agregados"} = \frac{100}{\frac{\text{"\% graúdo"}}{\text{"MERg"}} + \frac{\text{"\% miúdo"}}{\text{"MERm"}}} \quad (5.2)$$

onde:

“massa específica real dos agregados”, em g/cm³;

“% graúdo” = % em peso do agregado retido na peneira n° 10 (2,00 mm) na mistura;

“% miúdo” = % em peso do agregado passante na peneira n° 10 (2,00 mm) na mistura;

“MERg” = massa específica real do agregado graúdo da mistura;

“MERm” = massa específica real do agregado miúdo da mistura.

5.3.1.3 Massa específica aparente dos agregados da mistura

$$\text{"massa específica aparente dos agregados"} = \frac{100}{\frac{\text{"\% graúdo"}}{\text{"MEAg"}} + \frac{\text{"\% miúdo"}}{\text{"MERm"}}} \quad (5.3)$$

onde:

“massa específica aparente dos agregados”, em g/cm³;

“% graúdo” = % em peso do agregado retido na peneira n° 10 (2,00 mm) na mistura;

“% miúdo” = % em peso do agregado passante na peneira n° 10 (2,00 mm) na mistura;

“MEAg” = massa específica aparente do agregado graúdo da mistura;

“MERm” = massa específica real do agregado miúdo da mistura.

5.3.1.4 Densidade efetiva do agregado da mistura

$$\text{"densidade efetiva"} = R \times \text{"massa esp. real"} + A \times \text{"massa esp. aparente"} \quad (5.4)$$

onde:

“**densidade efetiva**” = massa específica efetiva do agregado da mistura (em g/cm³) dividida pela massa específica da água (considerada 1,00 g/cm³);

R e A= constantes obtidas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 Fatores de correção em função da absorção do agregado

ABSORÇÃO DO AGREGADO	R	A
< 2 %	0,5	0,5
≥ 2 % e < 3 %	0,25	0,75
≥ 3 %	0	1

5.3.1.5 Densidade máxima teórica da mistura

$$\text{"densidade máxima teórica"} = \frac{100}{\frac{100 - \text{"\% asfalto"}}{\text{"densidade efetiva"}} + \frac{\text{"\% asfalto"}}{\text{"densidade do asfalto"}}} \quad (5.5)$$

onde:

“**densidade máxima teórica**” = densidade máxima da mistura sem vazios;

“**\% asfalto**” = porcentagem de ligante a ser adicionada na confecção do corpo-de-prova;

“**densidade do asfalto**” = densidade do ligante, considerada 1,02;

“**densidade efetiva**” = massa específica efetiva do agregado da mistura (em g/cm³) dividida pela massa específica da água (considerada 1,00 g/cm³).

5.3.1.6 Volume de vazios da mistura

$$\text{"\% } V_v \text{"} = \frac{\text{"densidade máxima teórica"} - \text{"densidade aparente da mistura"}}{\text{"densidade máxima teórica"}} \times 100 \quad (5.6)$$

onde:

“**\% V_v**” = volume de vazios da mistura ocupado pelo ar, em %;

“**densidade máxima teórica**” = densidade máxima da mistura sem vazios;

“**densidade aparente da mistura**” = densidade do corpo-de-prova.

5.3.1.7 Vazios do agregado mineral

$$\text{"\% VAM"} = \text{"\% } V_v \text{"} + \frac{\text{"\% asfalto"} \times \text{"densidade aparente da mistura"}}{\text{"densidade do asfalto"}} \quad (5.7)$$

onde:

“% VAM” = volume total de vazios formado pelo agregado, em %;

“% V_v” = volume de vazios da mistura ocupado pelo ar, em %;

“% asfalto” = porcentagem de ligante a ser adicionada na confecção do corpo-de-prova;

“densidade aparente da mistura” = densidade do corpo-de-prova;

“densidade do asfalto” = densidade do ligante, considerada 1,02.

5.3.1.8 Relação betume/vazios

$$\% \text{ RBV} = \left(\frac{\% \text{ VAM} - \% \text{ V}_v}{\% \text{ VAM}} \right) \quad (5.8)$$

onde:

“% RBV” = porcentagem de vazios do agregado mineral preenchido com ligante;

“% VAM” = volume total de vazios formado pelo agregado, em %;

“% V_v” = volume de vazios da mistura ocupado pelo ar, em %.

5.3.1.9 Estabilidade

$$\text{"estabilidade"} = \text{"leitura extensômetro"} \times \text{"constante anel"} \times \text{"fator correção"} \quad (5.9)$$

onde:

“estabilidade” = carga de ruptura do corpo-de-prova, expressa em Kgf;

“constante do anel” = constante do anel dinamométrico;

“fator de correção” = correção da estabilidade em função da altura ou do volume do corpo-de-prova conforme DNER.

5.3.1.10 Fluência

$$\text{"fluência"} = \text{"leitura do extensômetro"} \times \text{"fator de conversão"} \quad (5.10)$$

onde:

“fluência” = deformação máxima que sofre o corpo-de-prova até a ruptura, em 1/100”.

“leitura do extensômetro” = deformação máxima na ruptura em milímetros;

“fator de conversão” = constante mm/centésimo de polegada = 1,00 / 0,254.

5.3.1.11 Resistência à tração

A resistência à tração por compressão diametral é calculada através da equação:

$$R_t = \frac{2 \times \text{"carga de ruptura "}}{10 \times \pi \times \text{"diâmetro médio CP"} \times \text{"altura média CP"}} \quad (5.11)$$

onde:

R_t = Resistência à tração em MPa;

“carga de ruptura” em kgf;

“diâmetro médio do CP” em cm;

“altura média do CP” em cm;

5.3.1.12 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência (MR) de misturas betuminosas é definido como relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ϵ_t) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T).

$$MR = f(\sigma_t, \epsilon_t, T) \quad e$$

$$MR = \frac{\text{"carga vertical repetida"}}{10 \times \text{"deformação resiliente"} \times \text{"altura média CP"}} \cdot (0,9976 \mu - 0,2692) \quad (5.12)$$

onde :

MR = Módulo de Resiliência em MPa;

“carga vertical repetida” em kgf;

“deformação resiliente” em cm;

“altura do CP” em cm;

μ = coeficiente de Poisson, igual a 0,30 para misturas novas de graduação densa.

Notas:

- Quando a temperatura de ensaio não for especificada, o módulo de resiliência deverá ser determinado na temperatura de $25 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ °C}$.
- O módulo de resiliência do corpo-de-prova ensaiado é a média aritmética dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de “carga vertical repetida” nos dois planos ortogonais.

A utilização dos parâmetros de resistência à tração e módulo de resiliência, em projetos de dimensionamento de pavimentos, é usualmente aceita e difundida na pavimentação rodoviária nacional. Recentemente tem-se utilizado a relação desses parâmetros através da razão MR/R_t , a fim de fornecer um indicativo da capacidade de retorno elástico e da resistência ao trincamento de misturas asfálticas. As relações encontradas para misturas asfálticas com ligantes convencionais ensaiadas a 25°C foram:

$$\blacksquare MR = 6461 R_t \quad - \quad (\text{Pinto, 1991}) \quad (5.13)$$

$$\blacksquare MR = 4385 R_t \quad - \quad (\text{Motta et. al., 1994}) \quad (5.14)$$

$$\blacksquare MR = 5000 R_t \quad - \quad (\text{DNER PRO 269, 1996}) \quad (5.15)$$

5.3.1.13 Teor Ótimo de Betume

Através dos resultados obtidos na aplicação do método de dosagem Marshall, para as misturas asfálticas densas de concreto asfáltico estudadas, são modelados gráficos correspondentes aos parâmetros característicos em função da variação do percentual de ligante. A partir dos limites fixados para índice de vazios (3 a 5%) e RBV (75 a 82%) são determinados nos respectivos gráficos o teor de ligante que atenda esses dois condicionantes, bem como os parâmetros fundamentais de vazios do agregado mineral, estabilidade e fluência Marshall, conforme Ogurtsova et. al. (1999) e Pinto (1997). Na figura 5.1 está ilustrada a determinação do teor ótimo de ligante (6,1 %) para a mistura de referência do estudo de incorporação de fibra de vidro. Os relatórios completos dos ensaios Marshall realizados estão apresentados nos anexos I e II.

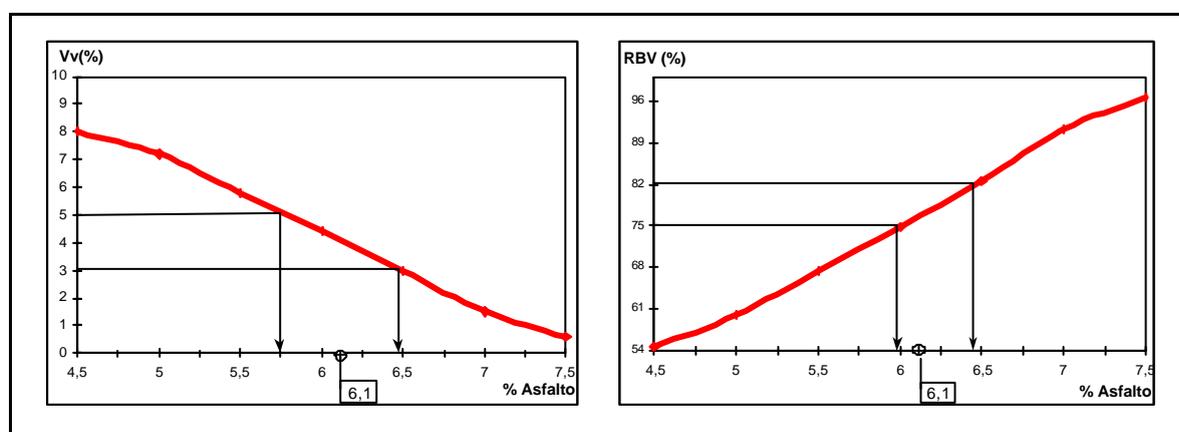


Figura 5.1 Determinação do teor ótimo de asfalto, Ogurtsova et. al. (1999) e Pinto (1997)

6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados dos ensaios realizados na pesquisa, com enfoque voltado na utilização de resíduos industriais, como laminados de resina poliéster reforçados com fibra de vidro e areias de fundição descartadas, sendo considerados como subprodutos na pavimentação rodoviária, incorporando-os em misturas asfálticas de concreto betuminoso usinado à quente.

Posteriormente à apresentação dos resultados obtidos no estudo, é realizada análise e discussão dos parâmetros obtidos, levando-se em consideração as hipóteses e particularidades da pesquisa descritas nos capítulos anteriores.

6.1 GENERALIDADES

Os resultados estão apresentados separadamente para cada estudo realizado, sendo avaliados e discutidos após a devida apresentação através de textos, tabelas e gráficos.

Cabe ressaltar que para cada propriedade a ser avaliada, foram obtidos no mínimo três valores de resultados, adotando-se como valor final a média aritmética dos três valores. Isso foi possível, devido à moldagem e confecção de no mínimo três corpos de prova para cada determinação a ser realizada, em seqüência aleatória através de sorteio prévio ao início dos testes, conforme descrição no capítulo de métodos de ensaios de misturas betuminosas.

6.2 ESTUDO DE INCORPORAÇÃO DE AREIAS DE FUNDIÇÃO DESCARTADAS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

De acordo com a estratégia experimental proposta e descrita em capítulos anteriores, para a incorporação do resíduo sólido industrial "areia de fundição", gerado na etapa de desmoldagem de peças metálicas em processos de fundição metalúrgica, em misturas asfálticas de concreto asfáltico do tipo cbuq, foram obtidos resultados para quatro misturas estudadas, ou seja:

- *M0* - Mistura padrão com uso de materiais tradicionais de pavimentação;
- *M1* - Mistura incorporada com resíduo do tipo areia verde;
- *M2* - Mistura incorporada com resíduo de areia verde misturada com machos;
- *M3* - Mistura incorporada com resíduo do tipo finos de exaustão de fundições.

6.2.1 Misturas de Agregados

Na tabela 6.1 estão apresentadas as quantidades de materiais utilizados na confecção das misturas de agregados para cada resíduo de areia de fundição estudado. Os valores estão expressos em percentagem do peso total da mistura de agregados.

Tabela 6.1 Frações de materiais nas misturas de agregados estudadas

FRAÇÕES DE MATERIAIS	MISTURAS	M0	M1	M2	M3
	BRITA 3/4"	27%	27%	27%	27%
	BRITA 3/8"	13%	13%	13%	13%
	PÓ DE PEDRA	53%	53%	53%	53%
	AREIA	7%	-	-	5%
	RESÍDUO	-	7%	7%	2%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	

As quantidades de cada material utilizado são decorrentes do enquadramento na faixa granulométrica desejada, em função da composição granulométrica de cada material, resultando dessa forma, a curva granulométrica da mistura de agregados.

Conforme apresentado no capítulo de caracterização dos materiais, observa-se que as granulometrias da areia tradicional, da areia verde (A1) e da areia verde misturada com machos (A2) são semelhantes. Portanto, optou-se pela simples substituição das areias de fundição A1 e A2 na mistura de agregados, com o mesmo percentual da areia tradicional.

Para a incorporação dos finos de exaustão das fundições (A3), cuja granulometria atende a especificação de fíler para ser utilizado como material de enchimento dos vazios da mistura, adotando-se, dessa forma, a mistura de agregados M3 com menor índice de vazios.

Na tabela 6.2 estão apresentadas as distribuições granulométricas das quatro misturas estudadas. Utilizou-se o enquadramento na faixa B do DAER/RS, devido ao uso freqüente dessa faixa granulométrica em pavimentos asfálticos no Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 6.2 Composição granulométrica das misturas de agregados estudadas

COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS	PENEIRA	M0	M1	M2	M3	FAIXA TRABALHO	FAIXA B DAER/RS
	#	% pass	% pass				
	3/4"	100,0	100,0	100,0	100,0	-	100,0 100,0
	1/2"	89,5	89,5	89,5	89,5	± 6	80,0 100,0
	3/8"	81,0	81,0	81,0	81,0	± 6	70,0 90,0
	nº 4	60,3	60,3	60,3	60,3	± 6	50,0 70,0
	nº 8	43,6	43,6	43,6	43,6	± 4	35,0 50,0
	nº 30	24,7	24,6	24,6	24,7	± 4	18,0 29,0
	nº 50	18,6	16,6	17,0	18,7	± 4	13,0 23,0
nº 100	10,4	9,7	9,4	11,3	± 3	8,0 16,0	
nº 200	5,4	5,7	5,6	6,4	± 2	4,0 10,0	

Os resultados obtidos nos ensaios preliminares, referentes às propriedades dos materiais empregados para obtenção das misturas estudadas, foram apresentados no capítulo de caracterização dos materiais. Os resultados obtidos em laboratório dos ensaios realizados para dosagem Marshall das misturas asfálticas estudadas estão apresentados de forma completa no anexo I.

Na figura 6.1 está representada graficamente a curva granulométrica da mistura padrão M0, com os limites inferiores e superiores aceitáveis referentes a faixa de trabalho adotada, e a faixa B do DAER/RS, utilizando agregado de tamanho máximo 19,1 mm.

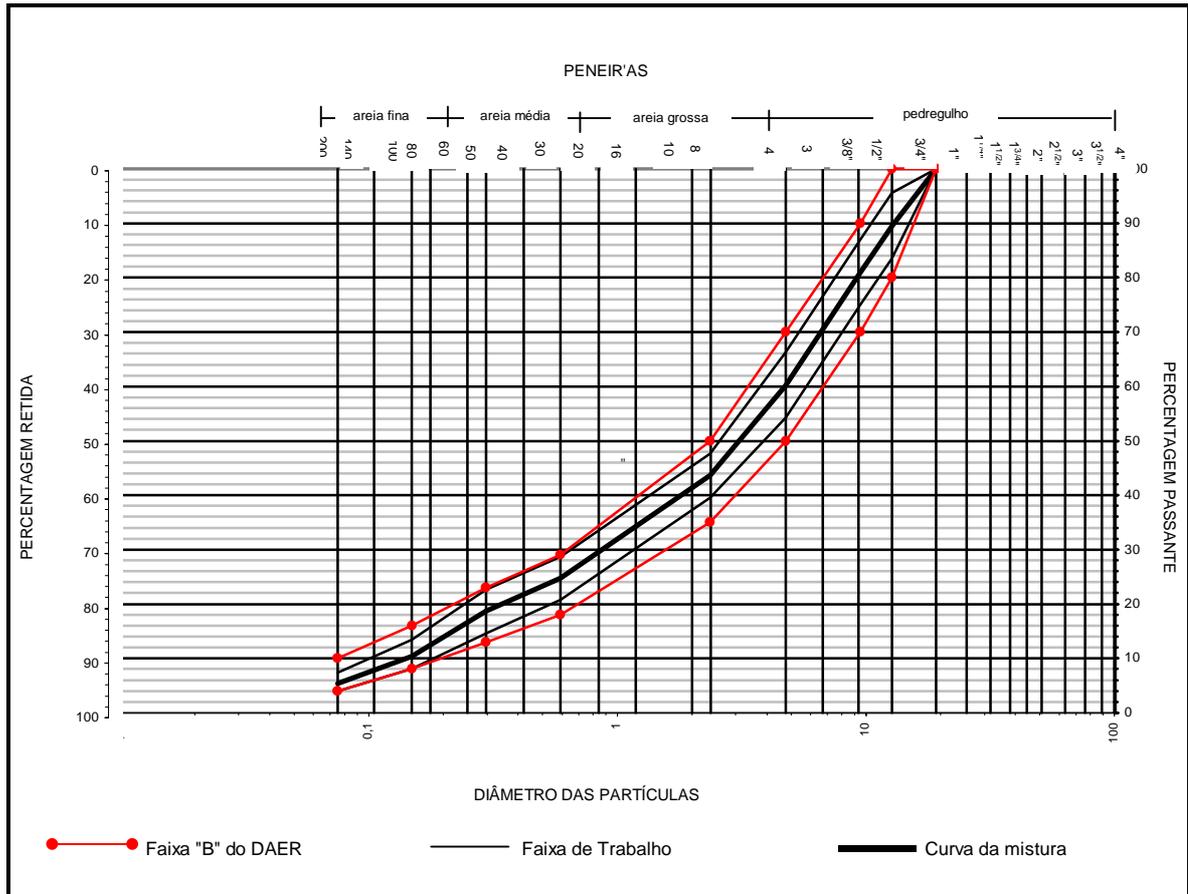


Figura 6.1 Curva granulométrica da mistura de referência M0

6.2.2 Parâmetros Marshall e Ensaio Complementares

A metodologia completa dos ensaios realizados pelo método Marshall está descrita nos capítulos anteriores e o relatório completo está apresentado no Anexo I.

Os padrões de tolerância, para os parâmetros utilizados pelo método Marshall, devem ser sempre avaliados de acordo com as condições técnicas e de laboratório disponíveis, a fim de que sejam estabelecidas bases consistentes para as comparações dos resultados que são obtidos.

Recomendações de Ogurtsova et. al. (1999) sobre a determinação da massa específica dos agregados, indicam a necessidade de que seja feita de forma rigorosa, devido à grande influência deste parâmetro na determinação da densidade aparente da mistura, e por conseguinte, nos demais valores que medem as propriedades físicas da mistura.

A tabela 6.3 apresenta os principais resultados obtidos com a utilização do projeto de dosagem Marshall. Na tabela 6.4 estão apresentados os resultados (média aritmética) dos ensaios de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, realizados em três corpos de prova confeccionados com os teores ótimos de asfalto, para cada mistura estudada.

Os valores limites aceitáveis e exigidos para a especificação adotada referente às propriedades fundamentais das misturas, estão apresentadas na tabela 6.3, sendo considerados como parâmetro de comparação para as misturas estudadas. Para as propriedades que não são exigidas limitações pelas especificações rodoviárias brasileiras, os resultados obtidos devem ser comparados com valores típicos apresentados na literatura e usualmente empregados na prática rodoviária nacional.

Tabela 6.3 Resultados dos parâmetros Marshall para as misturas estudadas

ENSAIOS		MISTURAS				ESPECIFICAÇÃO	
PARÂMETROS MARSHALL	Unid.	M0	M1	M2	M3	DAER/RS - B	
						Mínimo	Máximo
Teor Ótimo Betume	%	6,5	6,7	6,8	6,6	-	-
Densidade Efetiva	g/cm ³	2,606	2,595	2,600	2,601	-	-
Densidade Aparente	g/cm ³	2,276	2,261	2,263	2,277	-	-
Índice Vazios	%	3,9	4,0	3,9	3,6	3	5
Estabilidade	kgf	1220,2	1184,0	1226,5	1153,2	800	-
RBV	%	79,0	79,1	79,2	80,5	75	82
Fluência	0,01"	7,9	11,9	8,2	7,9	8	16
VAM	%	18,6	19,0	19,2	18,5	14	-

Tabela 6.4 Resultados dos parâmetros de resistência à tração e resiliência

ENSAIOS		MISTURAS			
PARÂMETROS	Unid.	M0	M1	M2	M3
MÓDULO DE RESILIÊNCIA M_R	MPa	5823	7303	6703	7403
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO R_t	MPa	1,093	1,333	1,190	1,288
RELAÇÃO M_R/R_t	-	5328	5479	5639	6029

Na figura 6.2 estão representados através de gráficos, curvas obtidas com a aplicação do método Marshall, apresentando os resultados dos parâmetros em função da variação do teor de betume, para a mistura betuminosa convencional e as misturas estudadas com adição de areias descartadas geradas nos processos de fundição de peças metálicas.

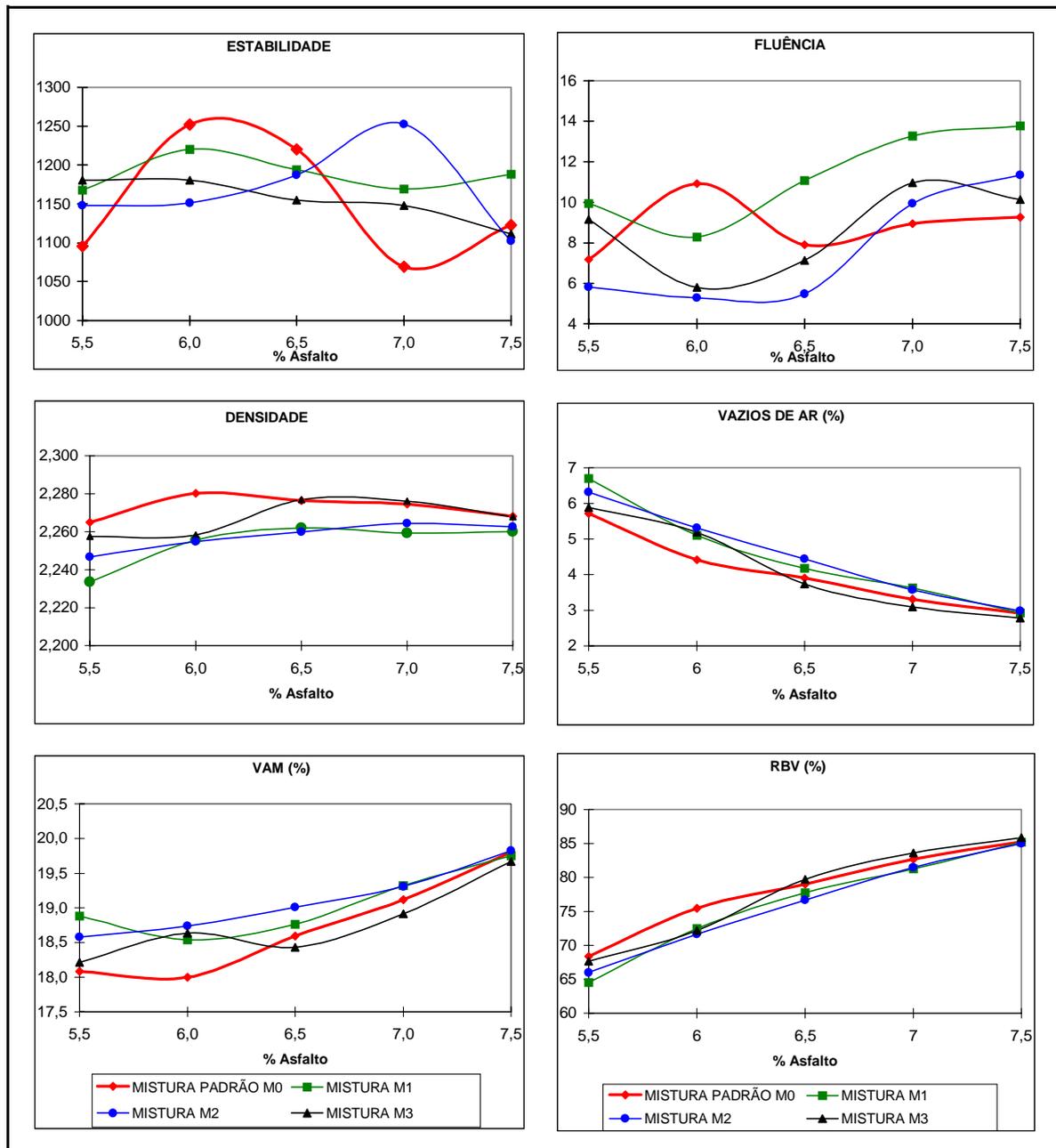


Figura 6.2 Curvas obtidas no método Marshall para as misturas estudadas

Na figura 6.3 estão representados graficamente os parâmetros do método Marshall para cada mistura estudada, apresentando os resultados referentes aos teores ótimos de betume calculados através da aplicação da metodologia Marshall descrita no capítulo 5.

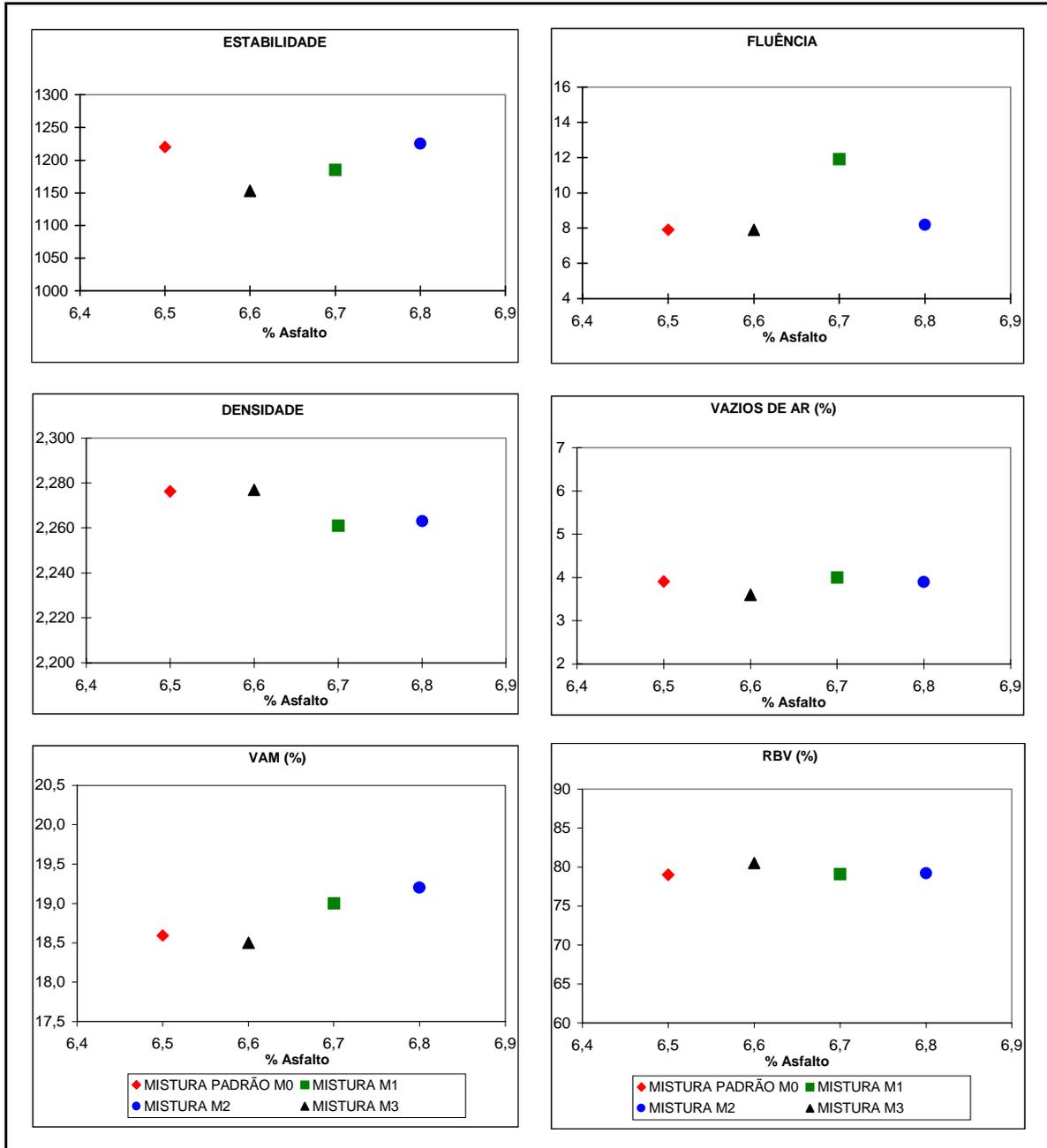


Figura 6.3 Parâmetros Marshall para os teores ótimos de asfalto para as misturas estudadas

A capacidade de um concreto asfáltico de suportar as cargas de tráfego sem se deformar, é avaliada de forma mais satisfatória através das propriedades resilientes e de resistência à tração, obtidas em ensaios complementares que simulam as condições de campo.

Na figura 6.4 estão representados graficamente os parâmetros dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, apresentando os resultados dos parâmetros referentes aos teores ótimos de betume para cada mistura estudada.

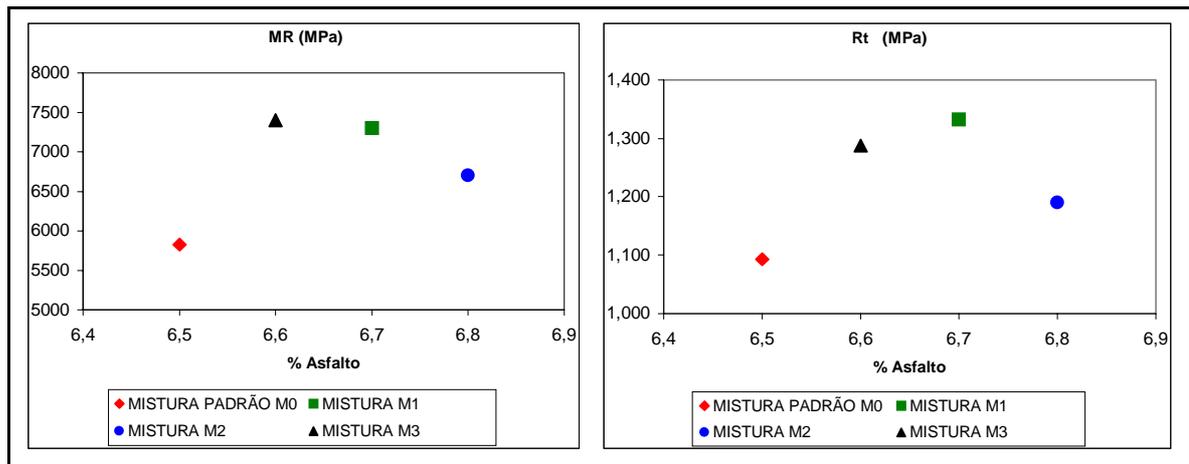


Figura 6.4 Parâmetros de MR e Rt para os teores ótimos de asfalto das misturas estudadas

6.2.3 Ensaios Ambientais

Após rompidos os corpos de prova nos ensaios complementares de MR e Rt, foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização nos materiais fragmentados dos corpos de provas, através dos ensaios normalizados pela ABNT - NBR 10.005 e NBR 10.006. Os resultados estão apresentados na tabela 6.5.

Tabela 6.5 Ensaios ambientais das amostras dos corpos de prova fragmentados

Parâmetros mg/L	Mistura M0		Mistura M1		Mistura M2		Mistura M3		Limite Max NBR1004	
	L*	S*	L*	S*	L*	S*	L*	S*	L*	S*
Ag	-	-	-	-	-	-	-	-	5,0	0,05
Ba	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	100,0	1,00
Cd	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,005
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	5,0	0,05
Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0
Fe	< 0,04	1,75	0,06	0,19	0,28	0,31	0,11	1,04	-	0,30
Mn	0,02	< 0,02	0,01	< 0,02	0,02	< 0,02	0,02	< 0,02	-	0,10
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	5,0	0,05
Zn	0,05	0,21	0,03	0,04	0,07	0,03	0,03	0,10	-	5,0

L*: Lixiviação, S*: Solubilização.

6.2.4 Avaliação dos Resultados

Com incorporação das areias de fundição na mistura asfáltica tradicional, o comportamento dos parâmetros obtidos com o estudo, sugere as seguintes considerações:

- *Estabilidade:* Ocorre uma pequena redução na estabilidade; exceção ocorreu com a mistura M2, que apresentou valores maiores que a mistura padrão;
- *Fluência:* Para os teores ótimos calculados, a fluência manteve-se dentro dos limites estipulados pela especificação adotada; a mistura M1 apresentou as maiores deformações na ruptura;
- *Densidade aparente:* Para índice de vazios iguais, as densidades diminuem devido às massas específicas das areias de fundição apresentarem valores menores que a areia tradicional;
- *Volume de vazios:* Apenas a mistura M3 apresentou valores próximos ao limite inferior de 3%, devido a adição dos finos de exaustão como enchimento do esqueleto mineral; no campo, variações de temperaturas e $V_v < 3\%$ podem ser associados a ruptura por cisalhamento devido a expansão térmica dos agregados;
- *Vazios de agregado mineral:* Os resultados indicaram valores acima do mínimo especificado, sendo que à medida que se reduz o tamanho das partículas, exige-se um volume maior de asfalto, devido ao aumento da área superficial, obtendo misturas com %VAM maiores;
- *Relação betume-vazios:* Os valores mantiveram-se dentro da faixa especificada, evitando RBV muito altos (90%) que propiciam misturas asfálticas instáveis;
- *Resiliência:* Ocorreu o aumento do módulo de resiliência em média 20%; o acréscimo pode ser atribuído à textura superficial das areias de fundição estudadas, proporcionando maior coesão e intertravamento do esqueleto mineral, aliado a um pequeno acréscimo no teor de betume; a mistura M1 apresentou acréscimo da ordem de 28%;
- *Resistência à tração:* Da mesma forma que as propriedades resilientes das misturas de areias de fundição, ocorreu aumento dos valores da ordem de 15%; a mistura M1 apresentou maior acréscimo, da ordem de 22%;
- *Teor ótimo de betume:* Pelo método Marshall, obteve-se maior teor ótimo de asfalto para as misturas de areias de fundição, utilizando-se a metodologia apresentada no capítulo 5; se fixarmos o índice de vazios em 4%, apenas a mistura M3 apresentaria valores menores no teor ótimo de asfalto que a mistura convencional, mas isso sugere que uma parcela de finos estaria incorporando-se ao ligante, mascarando os resultados;
- *Ensaio ambientais:* Não foram verificados acréscimos significativos na emissão dos parâmetros poluentes ao meio ambiente.

6.3 ESTUDO DE INCORPORAÇÃO DE LAMINADOS DE FIBRAS DE VIDRO DESCARTADAS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

De acordo com a estratégia experimental proposta e descrita em capítulos anteriores, para a incorporação do resíduo sólido industrial "laminados de fibras de vidro", em misturas asfálticas de concreto asfáltico do tipo cbuq, foram obtidos resultados para quatro misturas estudadas, ou seja:

- *Referência.* - Mistura padrão com uso de materiais tradicionais de pavimentação;
- 1 - Mistura incorporada com 1% de resíduo de fibra de vidro;
- 2 - Mistura incorporada com 2% de resíduo de fibra de vidro;
- 3 - Mistura incorporada com 3% de resíduo de fibra de vidro.

6.3.1 Misturas de Agregados

Na tabela 6.6 estão apresentadas as quantidades de materiais utilizados na confecção das misturas de agregados, para cada teor de resíduo de fibra de vidro estudado. Os valores estão expressos em porcentagem do peso total da mistura de agregados.

Tabela 6.6 Frações de materiais nas misturas de agregados estudadas

FRAÇÕES DE MATERIAIS	MISTURAS	REF.	1	2	3
	BRITA 3/4"	28%	28%	28%	28%
	BRITA 3/8" + PÓ DE PEDRA	65%	64%	63%	62%
	AREIA	7%	7%	7%	7%
	RESÍDUO	-	1%	2%	3%
	TOTAL	100%	100%	100%	100%

Na tabela 6.7 estão apresentadas as distribuições granulométricas das quatro misturas estudadas, enquadrando-se na faixa B do DAER/RS. Devido à adição da fibra de vidro em pequenos percentuais, no máximo 3%, a curva granulométrica das misturas praticamente manteve-se constante.

Tabela 6.7 Composição granulométrica das misturas de agregados estudadas

COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS	Peneira	REF.	1	2	3	FAIXA TRABALHO	FAIXA B DAER/RS
	#	% pass	% pass				
	3/4"	100,0	100,0	100,0	100,0	-	100,0 100,0
	1/2"	89,8	89,8	89,8	89,8	± 6	80,0 100,0
	3/8"	80,9	80,9	80,9	80,9	± 6	70,0 90,0
	n° 4	65,3	65,2	65,0	64,9	± 6	50,0 70,0
	n° 8	44,3	44,3	44,3	44,3	± 4	35,0 50,0
	n° 30	23,2	23,1	23,1	23,1	± 4	18,0 29,0
	n° 50	18,8	18,7	18,7	18,6	± 4	13,0 23,0
n° 100	8,9	8,8	8,8	8,8	± 3	8,0 16,0	
n° 200	5,7	5,7	5,7	5,7	± 2	4,0 10,0	

Na figura 6.5 está representada graficamente a curva granulométrica da mistura padrão, com os limites inferiores e superiores aceitáveis referentes à faixa de trabalho adotada, bem como a faixa B do DAER/RS, com tamanho máximo do agregado de 18 mm.

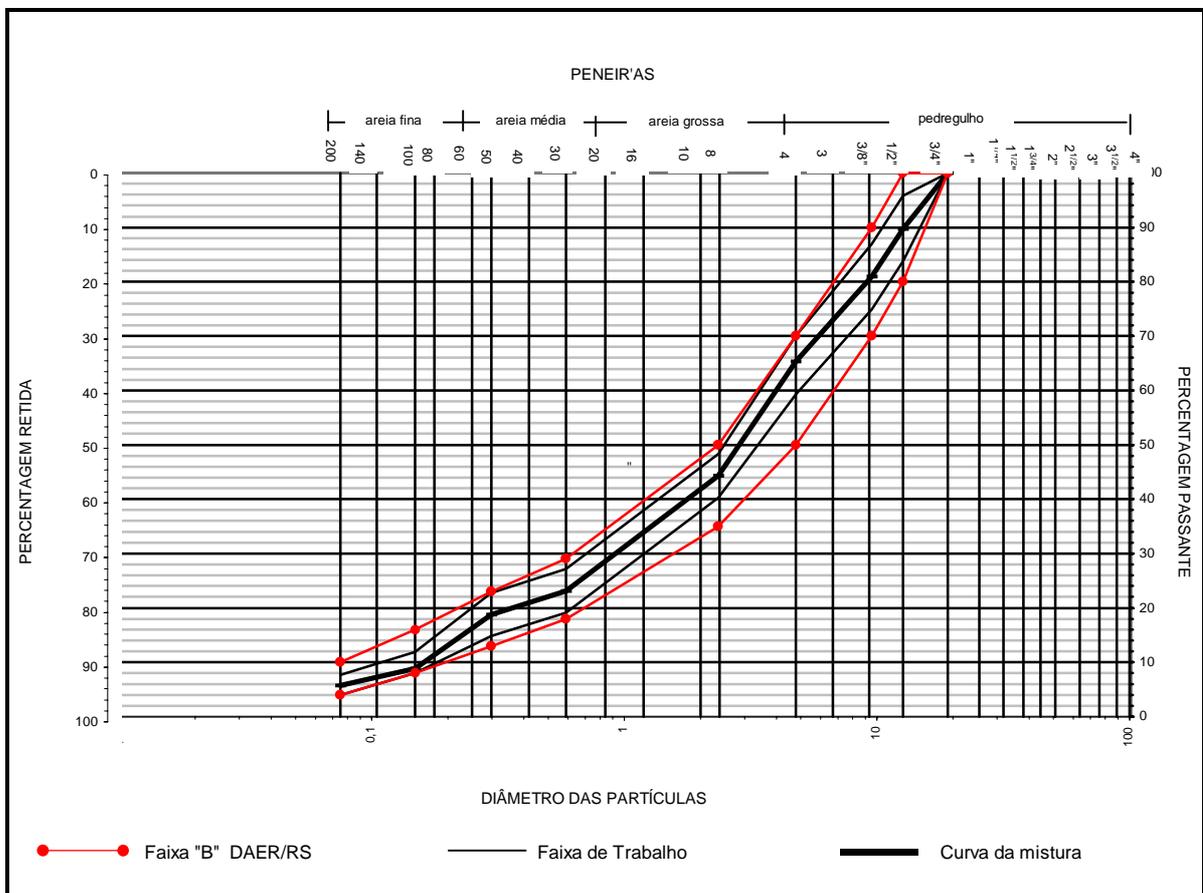


Figura 6.5 Curva granulométrica da mistura de referência

6.3.2 Parâmetros Marshall e Ensaio Complementares

O relatório completo dos ensaios realizados pelo método Marshall está apresentado no Anexo II. A tabela 6.8 apresenta os principais resultados obtidos com a utilização do projeto de dosagem Marshall. Na tabela 6.9 estão apresentados os resultados dos ensaios de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, realizados em corpos de prova confeccionados com os teores ótimos de asfalto, para cada mistura estudada.

Os valores limites referentes às propriedades fundamentais das misturas, exigidos pela especificação adotada, estão apresentados na tabela 6.8, sendo considerados como parâmetro de comparação para as misturas estudadas.

Tabela 6.8 Resultados dos parâmetros Marshall para as misturas estudadas

ENSAIOS		MISTURAS				ESPECIFICAÇÃO	
PARÂMETROS MARSHALL	Unid.	REF.	1	2	3	DAER/RS - B	
						Mínimo	Máximo
Teor Ótimo Betume	%	6,1	6,8	7,2	7,7	-	-
Densidade Efetiva	g/cm ³	2,556	2,551	2,540	5,532	-	-
Densidade Aparente	g/cm ³	2,247	2,229	2,206	2,176	-	-
Índice Vazios	%	4,1	3,8	3,9	4,4	3	5
Estabilidade	kgf	1411,0	1455,2	1311,9	1212,9	800	-
RBV	%	76,3	79,3	79,9	78,3	75	82
Fluência	0,01"	7,9	8,8	14,0	17,7	8	16
VAM	%	17,4	18,5	19,3	20,3	14	-

Tabela 6.9 Resultados dos parâmetros de resistência à tração e resiliência

ENSAIOS		MISTURAS			
PARÂMETROS	Unid.	REF.	1	2	3
MÓDULO DE RESILIÊNCIA M_R	MPa	3250	3490	3083	-
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO R_t	MPa	0,980	0,990	0,860	-
RELAÇÃO M_R/R_t	-	3316	3525	3589	-

Na figura 6.6 estão representadas graficamente as curvas obtidas com a aplicação do método Marshall, apresentando os resultados dos parâmetros em função da variação do teor de betume, para as misturas estudadas.

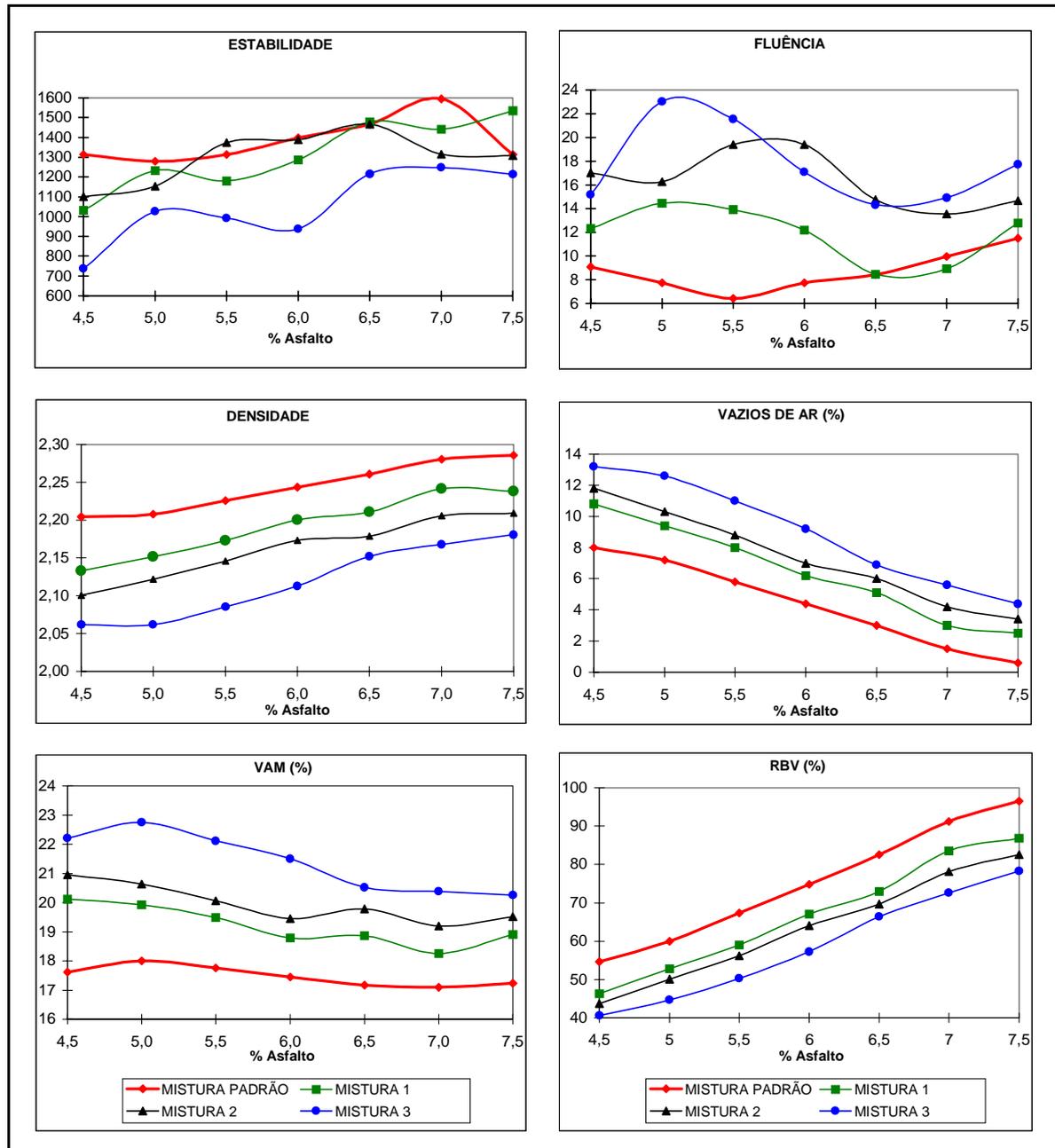


Figura 6.6 Curvas obtidas no método Marshall para as misturas estudadas

Na figura 6.7 estão representados graficamente os parâmetros do método Marshall, apresentando os resultados dos parâmetros referentes aos teores ótimos de betume para cada mistura estudada, calculados através da aplicação da metodologia Marshall descrita no capítulo 5.

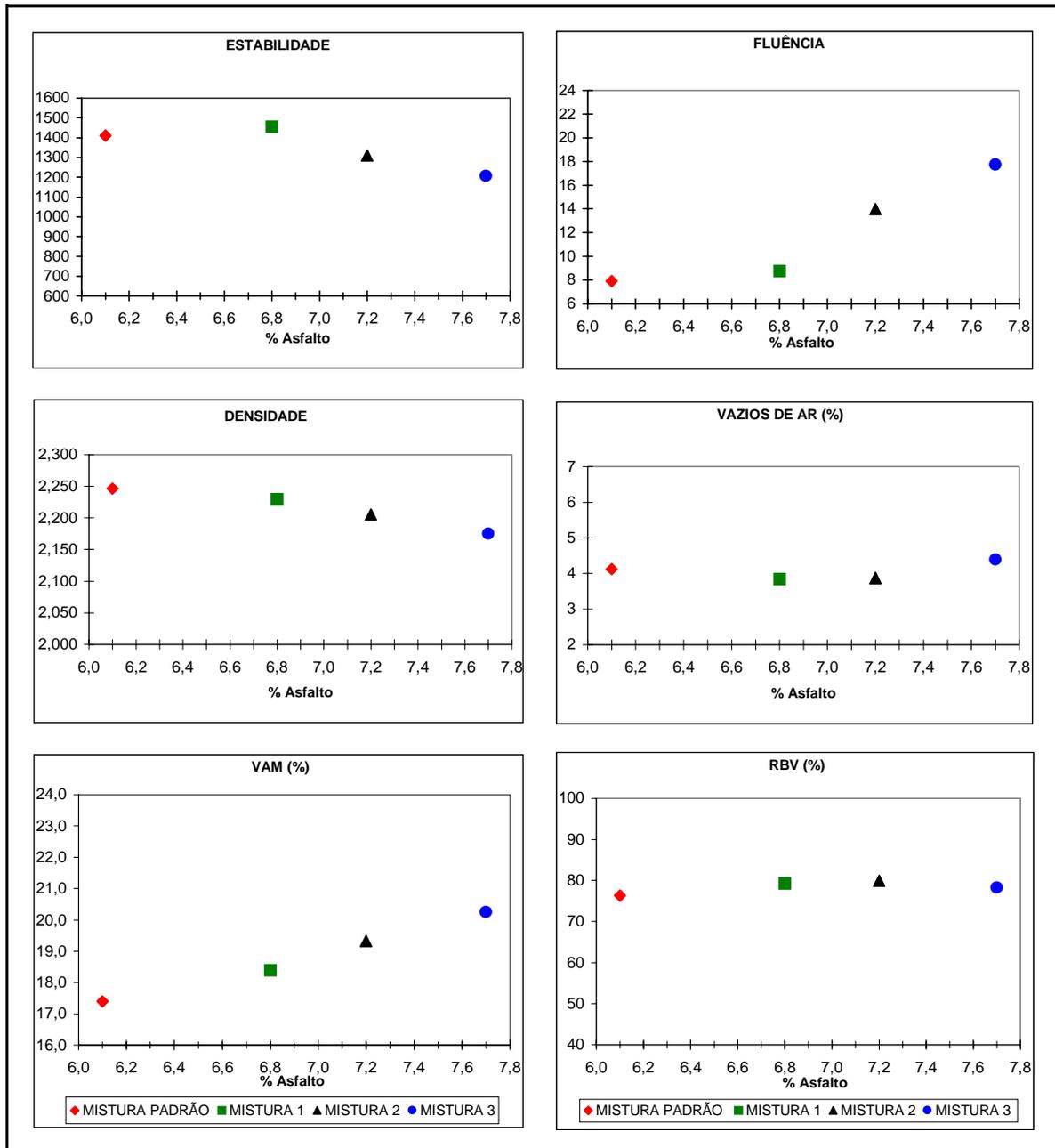


Figura 6.7 Parâmetros Marshall para os teores ótimos de asfalto para as misturas estudadas

Com a utilização preliminar do método Marshall, verificou-se que a adição de fibra de vidro em percentuais maiores que 2%, apresenta resultados insatisfatórios, principalmente com relação a valores muito elevados de fluência e teor ótimo de betume. Portanto a mistura 3 foi substituída por mistura com adição de 1,5% de fibra de vidro na mistura convencional. Na figura 6.8 estão representados graficamente parâmetros dos ensaios referentes ao módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, apresentando os resultados dos parâmetros referentes aos teores ótimos de betume da mistura padrão e com adição de 1%, 1,5% e 2% de fibra de vidro.

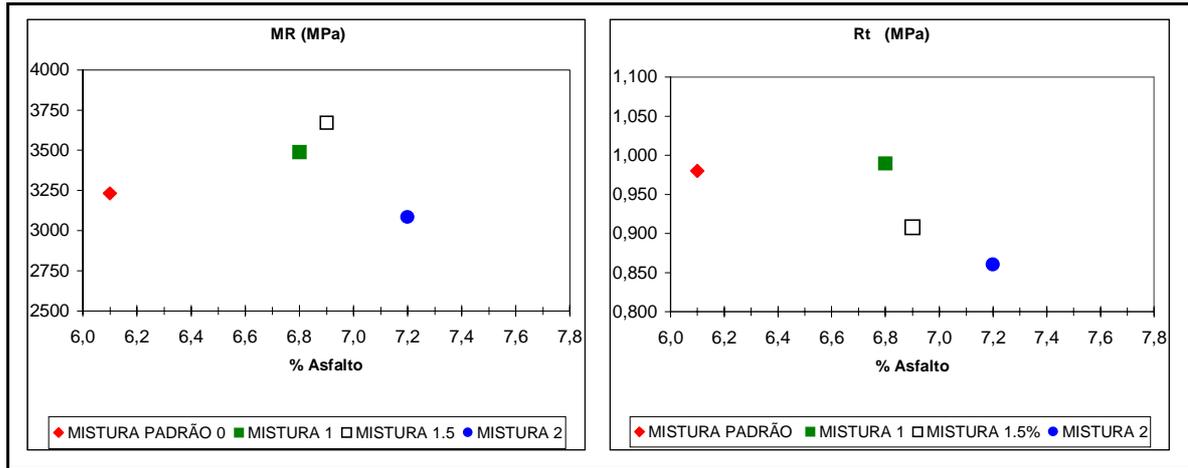


Figura 6.8 Parâmetros de MR e Rt para os teores ótimos de asfalto das misturas estudadas

6.3.3 Ensaios Ambientais

Após rompidos os corpos de prova nos ensaios complementares de MR e Rt, foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização nos materiais fragmentados dos corpos de provas, através dos ensaios normalizados pela ABNT - NBR 10.005 e NBR 10.006. Os resultados estão apresentados na tabela 6.10.

Tabela 6.10 Ensaios ambientais das amostras dos corpos de prova fragmentados

Parâmetros mg/L	Mistura Padrão		Mistura 1 (c/ fibras)		Limite Máximo-NBR1004	
	Lixiviação	Solubilização	Lixiviação	Solubilização	Lixiviação	Solubilização
Ag	-	-	-	-	5,0	0,05
Ba	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	100,0	1,00
Cd	-	-	-	-	0,5	0,005
Cr	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	5,0	0,05
Cu	-	-	-	-	-	1,0
Fé	3,15	0,14	4,32	0,13	-	0,30
Mn	0,04	0,01	0,05	0,01	-	0,10
Pb	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	5,0	0,05
Zn	0,33	0,12	0,47	< 0,01	-	5,0

6.3.4 Avaliação dos Resultados

Com a incorporação dos resíduos de laminados de resina poliéster, reforçados com fibra de vidro na mistura asfáltica tradicional, o comportamento dos parâmetros obtidos, com a realização do estudo, sugere as seguintes considerações:

- *Estabilidade:* Não ocorrem alterações significativas até a adição de 1% de fibras, sendo que acima desse percentual ocorre uma pequena redução na estabilidade;
- *Fluência:* Para os teores ótimos calculados, a fluência aumenta com a adição de fibras de vidro; a mistura com 3% de fibras apresentou deformações na ruptura elevadas, fora dos limites adotados pela especificação;
- *Densidade aparente:* Para índice de vazios iguais, as densidades diminuem devido a densidade da fibra ser significativamente menor do que o agregado pétreo;
- *Volume de vazios:* Há uma tendência de elevação do volume de vazios à medida que se incorporam as fibras, para um mesmo teor de asfalto;
- *Vazios de agregado mineral:* Os resultados indicaram valores acima do mínimo especificado, sendo que à medida que se reduz o tamanho das partículas, exige-se um volume maior de asfalto, devido ao aumento da área superficial, obtendo misturas com %VAM maiores;
- *Relação betume-vazios:* Há um ligeiro decréscimo devido ao aumento do volume de vazios, embora os valores tenham se mantido dentro da faixa especificada, evitando RBV muito altos (90%) que propiciam misturas asfálticas instáveis;
- *Resiliência:* Ocorreu um pequeno aumento do módulo de resiliência até a adição de 1% de fibras, para os teores ótimos de asfalto; com adição em percentuais maiores ocorre o decréscimo dos valores, atribuído ao intertravamento do esqueleto mineral, aliado a um pequeno acréscimo no teor de betume;
- *Resistência à tração:* Da mesma forma que as propriedades resilientes das misturas estudadas, ocorreu aumento dos valores até a adição de 1% de fibras, para os teores ótimos de asfalto; com adição em percentuais maiores ocorre o decréscimo dos valores;
- *Teor ótimo de betume:* Pelo método Marshall, obteve-se teores maiores de asfalto para as misturas com fibra de vidro estudadas, utilizando-se a metodologia apresentada no capítulo 5; se fixarmos o índice de vazios em 4%, também ocorre o aumento no teor ótimo de ligante à medida que são adicionadas fibras, devido ao aumento da superfície específica da mistura de agregados, necessitando maior quantidade de asfalto para realizar o completo envolvimento dos agregados e das fibras;
- *Ensaio ambientais:* Não foram verificados acréscimos significativos na emissão de parâmetros poluentes ao meio ambiente.

7 EXECUÇÃO DE TRECHO EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para implantação de um trecho experimental, com a execução de um pavimento asfáltico de cbuq, adicionando-se resíduos industriais como material alternativo na mistura asfáltica.

7.1 GENERALIDADES

O extensivo programa de avaliação de laboratório realizado até então, utilizando as metodologias tradicionais de projeto e dosagem de concreto betuminoso usinado à quente, indicaram resultados de viabilidade de utilização nas misturas asfálticas com os resíduos pesquisados. Com a implantação de testes de campo, pode-se verificar e comparar os resultados obtidos em condições de laboratório com a resposta do pavimento "às-built" sob condições de campo, sujeito à aplicação de cargas reais de tráfego e de variações climáticas.

Para alcançar o objetivo de comparação com o comportamento de uma mistura asfáltica padrão, um trecho experimental foi implantado levando em consideração a execução de dois segmentos, sendo o primeiro com a mistura padrão e o segundo adicionando-se o resíduo estudado na camada asfáltica. Dessa forma, e garantindo a premissa de equivalência das características estruturais das camadas inferiores do pavimento e, das mesmas condições e exigências das cargas de tráfego e de fatores climáticos em ambos os segmentos, o objetivo de comparação do comportamento do pavimento ao longo de sua vida de serviço será válido.

A figura 7.1 apresenta o registro fotográfico do trecho experimental implantado na Avenida Perimetral Sul, acesso a BR116, na cidade de Caxias do Sul, estado do Rio Grande do Sul. Os trabalhos foram concluídos no mês de maio de 2003 e a abertura ao tráfego de veículos pesados foi realizada no mês subsequente.



Figura 7.1 Foto do trecho experimental implantado em Caxias do Sul, RS

7.2 PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO

O projeto de pavimentação foi desenvolvido considerando-se basicamente:

- Dimensionamento pelo método do DNER;
- Número $N = 10^7$ e Período de projeto = 10 anos;
- ISC mínimo do sub-leito = 10%;
- Coeficientes de equivalência estrutural: CBUQ = 2,0 e Brita graduada = 1,0
- Espessuras das camadas:

Brita graduada* = 30 cm e CBUQ = 7 cm

*Sobre o Sub-leito, aplicada camada de bloqueio de 3cm de brita.

As características técnicas dos projetos de pavimentação padrão e com adição de 1,5% de fibra, dos materiais e das camadas do pavimento estão apresentadas na tabela 7.1.

Tabela 7.1 Resumo Parâmetros de projeto das camadas do pavimento - trecho experimental

PAVIMENTO	SUB-LEITO		BASE GRANULAR		CAPA ASFÁLTICA		CUBUQ Padrão c/fibra	
	Peneira #	%Pass.	Peneira #	%Pass.	Peneira #	% Pass.	% Pass.	
COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS	¾ "	Nd	1 ½ "	100	¾ "	100	100	
	½ "	Nd	¾ "	67,5	½ "	90,4	90,4	
	3/8 "	Nd	4	37,4	3/8 "	81,8	81,8	
	4	Nd	30	15	4	53,0	53,0	
	8	Nd	200	4,8	8	39,9	39,9	
	30	Nd			30	24,8	24,8	
	50	Nd			50	19,8	19,8	
	100	Nd			100	11,6	11,6	
	200	Nd			200	6,4	6,4	
PROPRIEDADES FÍSICAS	Densidade kg/m³	1482	Densidade kg/m³	2156	Densidade kg/m³	2277	2235	
	C.B.R. %	14,8	C.B.R. %	100	Betume %	6,8	7,2	
	Umidade %	19,2	Umidade %	8,4	Vazios %	4	4	
	Expansão %	0,1	Equiv. Areia %	65	Estabilidade kgf	1115	1115	
	Classificação Silte Argiloso		Grau compact. %	>100	Fluência 1/100"	13,3	13,3	
ESPESSURAS	> 0,40 m		0,30 m		0,07 m			

As características técnicas geométricas do trecho estão apresentadas a seguir:

- Uma pista de tráfego;
- Duas faixas de rolamento com 3,50 metros de largura cada faixa;
- Uma faixa de estacionamento de 2,50 metros;
- Proteção do meio-fio de 0,50 metro de largura;
- Declividade transversal única da pista de 2%;
- Caimento dos passeios para fora da pista;
- Declividade longitudinal de -4,1% (contra-rampa);
- Trecho em tangente;
- ÍNICIO: Est. 3+120,5 metros;
- FIM: Est. 3+244,9 metros;

7.3 CONTROLE TECNOLÓGICO NA EXECUÇÃO

Da mesma forma que a dosagem das misturas asfálticas dos dois segmentos do trecho experimental, que foram projetadas através do método Marshall, através de procedimento padrão de laboratório, para execução do ensaio de campo os mesmos métodos e equipamentos utilizados na pavimentação rodoviária tradicional mostraram-se adequados às exigências para incorporação dos resíduos industriais estudados em misturas asfálticas.

Alguns cuidados fundamentais que foram adotados, para garantir que a granulometria atenda ao projeto de mistura asfáltica, estão elencados abaixo:

- Limpeza prévia e cuidadosa da área a ser detonada na pedreira, evitando a contaminação de material de decapagem;
- Redução da lamelaridade do agregado no processo produtivo, com ajustes na britagem com a finalidade de reduzir a relação entre os diâmetros inicial e final da pedra, possibilitando maior cubicidade da pedra;
- Evitar a segregação das frações reduzindo a altura dos montes, e proteger o monte de agregados finos da ação dos ventos;
- Armazenamento dos agregados em local coberto e protegido da ação de intempéries;
- Abastecimento dos silos frios da usina de modo a manter o volume de material constante em cada silo, evitando a mistura dos materiais no carregamento.

Quanto à adição dos resíduos na mistura na planta da usina, os cuidados fundamentais que foram adotados para atender ao projeto de mistura asfáltica são:

- As fibras de vidro ou então, as areias de fundição já processadas, devem ser armazenadas em local seco e estarem isentas de impurezas e grumos, sendo incorporadas à massa asfáltica através de dispositivos mecânicos dotados de medidores mássicos e volumétricos;
- Nas usinas gravimétricas, as fibras devem ser adicionadas, previamente à adição do ligante asfáltico, mas sem o contato com a chama do maçarico, diretamente no misturador; em usinas do tipo Drum-Mixer devem ser adicionadas no

segundo compartimento do tambor, também antes da injeção do ligante; ou alternativamente, a fim de evitar a perda das fibras pelo sistema de exaustão, imediatamente após a injeção do ligante, desde que haja um mecanismo misturador para a perfeita homogeneização da massa asfáltica;

- No caso das areias de fundição, devem ser adicionadas em compartimento dos silos frios da usina, mantendo o volume de material constante no silo, procedendo-se os métodos normais de secagem e mistura dos agregados, para posterior injeção do ligante betuminoso.

No processo de confecção da capa asfáltica do trecho experimental em fibra de vidro, houve a necessidade de somente um dia de trabalho, atendendo aos critérios técnicos exigidos. Não houve necessidade de estocagem do resíduo no local, sendo transportando diretamente da fonte geradora do resíduo, já moído e processado para o uso. A incorporação da fibra na mistura asfáltica em usina está apresentada na figura 7.2.

A usina volumétrica utilizada do tipo "drum mixer", recebeu um sistema de alimentação do resíduo e mistura na massa asfáltica consistindo de um pequeno silo auxiliar, com mecanismo de rosca sem-fim e elevador, propiciando misturar, de maneira uniforme, contínua e constante, a quantidade indicada pelo projeto.



Figura 7.2 Adição da fibra de vidro na mistura betuminosa na usina

Para o transporte do material, todas as cargas da mistura asfáltica foram cobertas por lona de tamanho suficiente para abrigar toda a carroceria do caminhão. A descarga do material foi realizada diretamente na vibroacabadora, realizando o espalhamento de forma homogênea na pista. A rolagem inicial de compactação foi realizada quando a temperatura da mistura somada à temperatura do ar esteve entre 150°C e 190°C. A compactação intermediária e final foi executada conforme as normas rodoviárias vigentes e equipamentos tradicionais de compactação. Na ocasião da descarga e espalhamento da massa asfáltica, verificou-se a liberação de odor característico de aquecimento de resina poliéster, visto que representa cerca de 70% em peso na composição da massa total do resíduo.

O acabamento final e abertura do tráfego foi realizado somente após concluído o trecho experimental na sua totalidade, com a realização do controle tecnológico tradicional de campo e laboratório. O resumo das propriedades das camadas executadas do pavimento pode ser visualizado na tabela 7.2.

Tabela 7.2 Controle tecnológico na execução das camadas estruturais do pavimento*

ENSAIOS	SUB-LEITO			BASE GRANULAR			CAPA ASFÁLTICA		
	TRECHOS:	Padrão	c/fibra	TRECHOS:	Padrão	c/fibra	TRECHOS:	Padrão	c/fibra
COMPOSIÇÃO	Peneira #	%Pas	%Pas	Peneira #	%Pas	%Pas	Peneira #	%Pas	%Pas
	¾ "	Nd	Nd	1 ½ "	100	100	¾ "	100	100
	½ "	Nd	Nd	¾ "	67,5	67,5	½ "	90,4	90,4
	3/8 "	Nd	Nd	4	37,4	37,4	3/8 "	81,8	81,8
	4	Nd	Nd	30	15	15	4	53,0	53,0
	8	Nd	Nd	200	4,8	4,8	8	39,9	39,9
	30	Nd	Nd				30	24,8	24,8
	50	Nd	Nd				50	19,8	19,8
	100	Nd	Nd				100	11,6	11,6
200	Nd	Nd				200	6,4	6,4	
PROPRIEDADE	Densidade kg/m ³	1507	1503	Densidade kg/m ³	2176	2195	Densidade kg/m ³	2,302	2,271
	C.B.R. %	14,8	14,8	C.B.R. %	-	-	Betume %	6,8	7,1
	Umidade %	19,2	19,2	Umidade %	8,4	8,4	Vazios %	3,2	3,4
	Expansão %	0,1	0,1	Equiv. Areia %	60	60	Estabilidade kgf	897	921
	Grau compact, %	101,7	101,4	Grau compact, %	100,9	101,8	Fluência 1/100 "	8,7	8,3
ESPESSURAS	0,40 m			0,30 m			0,08 m		

* Média das determinações a cada 20 metros.

Para a verificação das propriedades especificadas em projeto e, principalmente para confecção do banco de dados do pavimento do trecho experimental, referente ao início da sua vida de serviço, devem ser realizadas extrações de corpos de prova na pista.

Nesse estudo, para monitoramento do trecho experimental, prevê-se a retirada de testemunhos conforme a seqüência do estaqueamento, a cada 20 metros de extensão de pista, de maneira alternada na trilha de rodas interna da faixa à direita, no eixo e na trilha de rodas externa da faixa à esquerda, em pontos pré-estabelecidos apresentados na figura 7.4.

Com o objetivo de avaliar a homogeneidade do processo construtivo, o emprego de ferramentas auxiliares visando o levantamento contínuo e sistemático das deflexões máximas reversíveis e, também da linha de influência em pontos afastados do local de aplicação da carga, devem ser realizados levantamentos deflectométricos.

Nesse estudo, para monitoramento do trecho experimental, prevê-se a realização de levantamento deflectométrico rotineiro ao longo do período de testes com utilização de viga Benkelman, com a atenção de que os valores lidos devem ser corrigidos a uma temperatura de referência, tendo em vista que as propriedades do concreto asfáltico relacionadas à rigidez e às deformações são altamente dependentes da temperatura.

As deformações elásticas ou reversíveis medidas com a viga Benkelman, são definidas como os deslocamentos verticais que surgem na estrutura do pavimento quando submetido aos esforços intermitentes ou transitórios, de maneira que cessando os esforços, a estrutura do pavimento retorna a sua posição de origem.

A figura 7.3 apresenta as médias das determinações de medidas de deflexão na pista, realizadas a cada 10 metros de extensão, nas trilhas de roda da pista da esquerda, da pista da direita e do eixo das pistas, com no mínimo de 5 leituras em cada ponto medido na camada de base granular, antes da aplicação da camada asfáltica.

Os assentamentos resultantes do efeito de uma carga aplicada no pavimento, que se dissipa à medida que a carga se afasta do seu ponto de aplicação, denomina-se de bacia de deformação, sendo representada graficamente pelo deflectograma.

Nesse estudo, para monitoramento do trecho experimental prevê-se o levantamento das bacias de deformação medidas na base do pavimento, imediatamente antes da execução da capa asfáltica, e na superfície do pavimento de cbuq, imediatamente após a execução da camada asfáltica, em cada segmento do trecho experimental, realizadas a cada 10 metros de extensão, nas trilhas de roda da pista da esquerda, da pista da direita e do eixo das pistas, com no mínimo de 5 leituras em cada ponto medido.

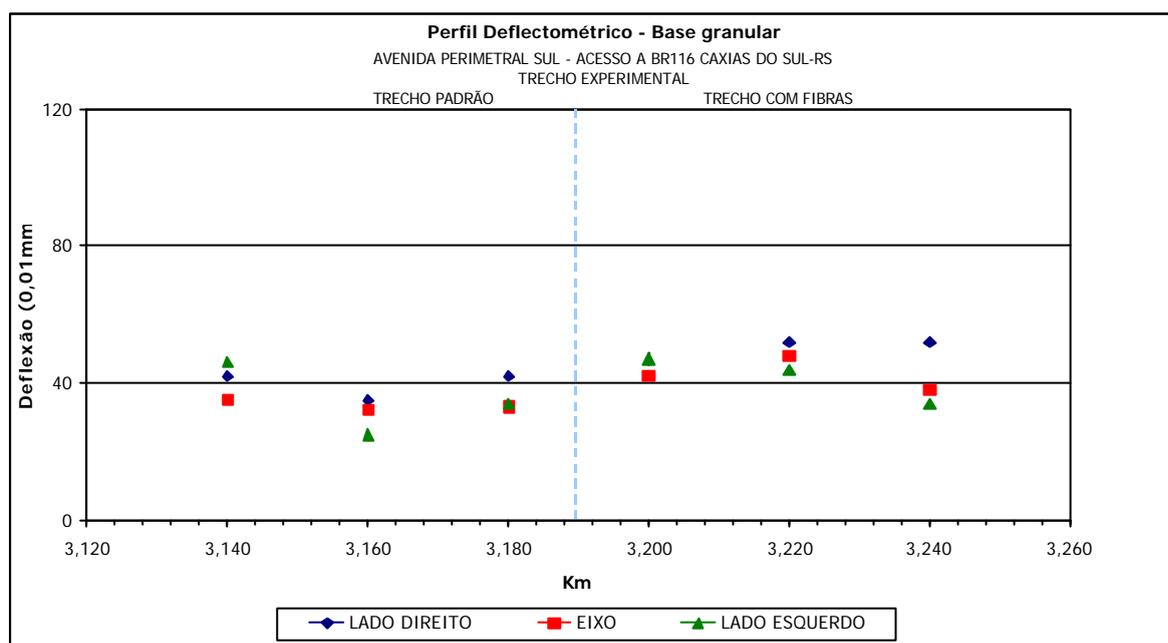


Figura 7.3 Médias das deflexões na camada de base granular, com uso da Viga Benkelman

Visando o monitoramento ambiental e atendendo as exigências da licença ambiental emitida pelo órgão de controle ambiental do Estado do Rio Grande do Sul (FEPAM), para implantação do trecho experimental, foram instaladas caixas coletoras antes e depois de cada um dos segmentos do trecho experimental, para coleta de amostras líquidas das águas pluviais oriundas do escoamento superficial sobre a camada asfáltica de cada área de contribuição dos segmentos do trecho experimental.

Para a coleta das amostras sólidas, visando o monitoramento ambiental, após serem realizados os ensaios de MR e R_t fragmentam-se os corpos de prova extraídos na pista, sendo realizados ensaios da mesma forma que as análises ambientais realizadas na fase de testes de laboratório, como ensaios ambientais de lixiviação e solubilização, em pontos pré-estabelecidos conforme ilustração da figura 7.4.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas considerações adicionais sobre os resultados obtidos com o presente trabalho. A abordagem baseia-se nas conclusões relacionadas com os pontos fundamentais do programa experimental realizado.

Também, a partir da abordagem realizada, abre-se a possibilidade de uma gama de investigações que podem ser realizadas, de modo a contribuir para um melhor entendimento, estabelecendo padrões de desempenho para pavimentos asfálticos com a utilização dos resíduos industriais pesquisados.

8.1 CONCLUSÕES

Através do extensivo programa de laboratório realizado, que propiciou a obtenção dos resultados apresentados, nota-se o enorme potencial da abordagem desenvolvida de uso de resíduos industriais como subprodutos na pavimentação rodoviária, incorporando-os em misturas asfálticas, demonstrando que o encapsulamento de resíduos com cimento asfáltico de petróleo é um processo eficiente para a estabilização dos metais presentes em excesso. Somado a isso, são praticados altos custos de tratamento e disposição adequada de resíduos oriundos de processos de fabricação industrial, e nota-se também o aumento do custo dos materiais tradicionais utilizados na pavimentação rodoviária.

Quanto às considerações finais particulares de cada estudo, temos:

- Estudo de Incorporação de Areias de Fundição em Misturas Asfálticas:
 - Os valores de módulo resiliente e resistência à tração das misturas com areias de fundição, apresentaram resultados bastante satisfatórios, com acréscimo de aproximadamente 20% aos valores da mistura padrão;
 - Embora de forma sutil, os resultados apresentaram pequena redução na estabilidade e leve aumento na fluência das misturas com areias de fundição, para os teores ótimos de asfalto calculados;
 - Se fixarmos o teor de ligante em 6,5% para as misturas pesquisadas, os parâmetros limites exigidos seriam atendidos, com exceção dos baixos valores de fluência obtidos para as misturas M2 e M3.

- Estudo de Incorporação de Fibra de Vidro em Misturas Asfálticas:
 - Os ensaios de módulo resiliente das misturas com adição de até 1,5% de fibra de vidro apresentaram resultados satisfatórios, com acréscimo de aproximadamente 10% aos valores da mistura padrão;
 - A resistência à tração apresentou pequeno incremento nos resultados com adição em até 1% de fibra de vidro, sendo que para adição em percentuais maiores ocorre redução na resistência à tração;
 - A estabilidade e fluência das misturas com fibra de vidro mantêm-se em patamares próximos comparados com a mistura padrão;
 - Aumento dos vazios das misturas com adição de fibra de vidro.

De uma forma geral para ambos os estudos, verificou-se um aumento no teor ótimo de asfalto para as misturas em que foram incorporados resíduos, segundo a metodologia de dosagem Marshall descrita no capítulo 5. Foram observadas também, diminuições nas densidades aparente e efetiva da mistura, devido às menores massas específicas dos materiais alternativos pesquisados. Os resultados se mostraram mais consistentes para as misturas com adição de até 1,5% de fibra de vidro e, para o estudo de areias de fundição, as misturas com incorporação de areias verdes foram mais satisfatórias, sendo que a relação de M_R/R_t forneceu um indicativo de leve aumento na rigidez e comportamento semelhante quanto à vida de fadiga dessas misturas quando comparadas com misturas convencionais. Dessa forma,

a estabilidade dos pavimentos estaria assegurada pelo atrito interno obtido no entrosamento dos resíduos, das partículas e do ligante presentes na mistura asfáltica.

Os resultados obtidos indicam, ainda, que as recomendações do DOT Washington descritas no capítulo 2, são válidas para o presente estudo e foram aplicadas na implantação do trecho experimental, principalmente as propriedades relacionadas com: *controle de qualidade do rejeito* através do esmagamento de torrões das areias de fundição e processo de moagem dos laminados de fibras utilizando moinho de martelos; *projeto da mistura e estrutural* utilizando métodos tradicionais como Marshall; *no processo de construção* os resíduos devem ser protegidos por estrutura coberta na planta da usina, sendo que os mesmos métodos e equipamentos gerais podem ser aplicados na manipulação, armazenamento, mistura, espalhamento e compactação da mistura; *no controle de qualidade da mistura* são utilizados os mesmos métodos de teste de campo que misturas convencionais, acrescidos do ensaio de imersão Marshall para avaliar apropriadamente o efeito stripping nas misturas asfálticas, devido aos resíduos de areia de fundição e fibra de vidro.

Então, torna-se possível observar que os mesmos métodos, procedimentos e equipamentos usualmente empregados na pavimentação rodoviária são aplicados para o emprego da metodologia estudada.

É importante ressaltar que para o possível aproveitamento dos materiais estudados como subprodutos, as empresas geradoras desses resíduos devem gerenciá-los com “*status*” de matéria-prima e, não simplesmente serem jogados em um canto da fábrica, gerando problemas de ordem técnica, econômica e de segurança. Por fim, faz-se necessário a implementação de uma central de armazenamento que receba os materiais de pequenas empresas, de maneira a propiciar o gerenciamento e a homogeneização dos resíduos antes da transferência para a planta da usina de asfalto.

8.2 SUGESTÕES PARA ENSAIOS COMPLEMENTARES

Para efeito de dimensionamento dos pavimentos, os métodos empíricos possibilitam uma previsão da composição das misturas betuminosas, mas devem-se determinar as propriedades mecânicas dessas misturas, através de vários ensaios, de acordo com as

propriedades de maior relevância para o comportamento global da mistura de interesse, tais como; deformação permanente, fadiga, trincamento térmico, durabilidade, susceptibilidade à temperatura, entre outros.

De uma forma geral para ambos os estudos, sugere-se a realização dos seguintes estudos complementares:

- Danos de umidade que possam acarretar o desprendimento e deterioração acelerada do pavimento;
- Descascamento e stripping atribuídos à fina película de carbono que envolve os grãos da areia de fundição, e ao pó da fibra de vidro devido a moagem;
- Ensaios de deformação permanente relativo ao tráfego pesado canalizado;
- Ensaios de fadiga e trincamento térmico.

8.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da abordagem realizada, abre-se a possibilidade de uma gama de investigações que podem ser realizadas de modo a contribuir para o complemento dos estudos.

Dentre as possibilidades de pesquisas futuras, são elencadas algumas sugestões de novas investigações e pesquisas:

- Verificação a longo prazo do desempenho das misturas nos trechos experimentais implantados, através da avaliação funcional sistemática e implantação da proposta de monitoramento durante a vida de serviço do pavimento, a fim de estabelecer padrões de desempenho com o uso de resíduos em misturas de cbuq;
- Verificação da quantidade máxima de adição de areias de fundição em cbuq;
- Verificação do comportamento de areias de fundição em areia-asfalto à quente;
- Problemas ambientais associados a descargas e liberações de fenol das pilhas de estocagem de areias de fundição na central de processamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULSHAFI, O; KEDZIERSKI, B.; FITCH, M.; MUKHTAR, H., (1997). **Evaluation of the Benefits of Adding Waste Fiberglass Roofing Shingles to Hot-Mix Asphalt.** Report n° FHWA-OH-97-006. Prepared for the Ohio Department of Transportation and U.S. Department of Transportation.
- AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, (1991). **Alternative Utilization of Foundry Waste Sand.** AFS - Final Report (Phase 1). DES Plaines, Illinois.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, (1997). **Standard Specifications for Asphalt-Rubber Binder.** ASTM .D 6114-97. In.: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v4.03, pp.659-661.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO, (1985). **Anuário Estatístico da Indústria Brasileira de Fundição.** ABIFA - MIC-CONSIDER/ABIFA/BNDES. São Paulo.
- BAKER, R. F.; CONNOLLY, E., (1995). **Ground Bituminous Shingle Mix.** Presented at the January 1995. Transportation Research Board, Annual Meeting, Washington.
- BATH, S. T.; LOWELL, C. W., (1996). **Design of Flowable Fill: Waste Foundry Sand as a Fine Aggregate.** Paper n° 961066 - Transportation Research Board. 75th Annual Meeting, Washington.
- BROWN, S. F., (1977). **Achievements and Challenges in Asphalt Pavement Engineering.** ISAP - 8th International Conference on Asphalt Pavements. Seattle.
- BROWN, E. R.; FOO, KEY Y., (1989). **Evaluation of Variability in Resilient Modulus Test Results.** NCTA Report ° 91-6. Washington.
- BROWN, E. R.; HADDOCK, J. E.; CRAWFORD, C. (1991). **Investigation of Stone Matrix Asphalt Mortars.** Publication in Transportation Research Record 1530, pp. 95-102. Washington.

- CERATTI, J.A.P.; SPECHT, L.P., (2003). **Asfalto-Borracha e Borracha-Agregado**. Revista Estradas - SUDAER, Nº 4 - 2003, pp. 18-26. Porto alegre.
- CIESIELSKI, S.K.; COLLINS, R. J., (1994). **Recycling and Use of Waste Materials and Byproducts in Highway Construction**. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199. Transportation Research Board. Washington.
- DE REIS, R.M.M., (2002). **Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado**. Tese de Mestrado / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.
- DE REIS, R. M. M.; BERNUCCI, L. B.; ZANON, A. L., (2002). **Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado**. ABPV - 11ª Reunião de Pavimentação Urbana, Porto Alegre.
- DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM, (2001). **Especificações Gerais**. DAER-RS. Unidade de Normas e Pesquisas. Porto Alegre.
- DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM, (2001). **Manual de Ensaios**. DAER-RS. Unidade de Normas e Pesquisas. v.1 e 2. Porto Alegre.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, (1994). **Ensaio Marshall para Misturas Betuminosas**. DNER ME 43/94, Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, (1996). **Manual de Pavimentação**. DNER, 2ª Ed.,320 p. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, (1996). **Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis - TECNAPAV**. DNER PRO 269/96, 17 p. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, (2001). **Especificações de Serviço**. DNER, Cd-Rom. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, (1975). **Método de Ensaio - Determinação das Deflexões no Pavimento pela Viga Benkelman**. DNER ME 24/75, Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, (1994). **Misturas Betuminosas - Determinação do Módulo de Resiliência**. DNER ME 133/94, Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, (1994). **Misturas Betuminosas - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**. DNER ME 138/94, Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, (1998). **Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros**. DNER. Rio de Janeiro, tomos I, II e III.

- EPPS, J.A, (1994). **Uses of Recycled Rubber Tires in Highways**. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 198, Transportation Research Board, Washington.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, (1995). **Crumb Rubber Modifiers (CRM) in Asphalt Pavements**. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. FHWA - AS-95-056. Washington.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, (1997). **Evaluation of the Benefits of Adding Waste Fiberglass Roofing Shingles to Hot-Mix Asphalt**. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. FHWA - OH-97-006. Washington.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, (1998). **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction**. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. FHWA - RD-97-148. Washington
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL, (1997). **Resíduos Sólidos Industriais: Geração e Destinação no RS**. Porto alegre.
- GAWEL, I.; SLUSARSKI, L., (1998). **Use of Recycled Tyre Rubber for Modification of Asphalt**. Polimery, Tworzywa Wielkocząsteczkowe, n° 5, pp. T/97-T103.
- GEIPOP – EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES, (2001). **Anuário Estatístico de Transportes**. Ministério dos Transportes, Brasília, 2001.
- GONÇALVES, F. P.; CERATTI, J. A. P.; SOMACAL NETO, L., (2002). **Desempenho de Pavimentos Flexíveis em Concreto Asfáltico**. Revista Estradas - SUDAER, N° 2 - 2002, PP. 39-45. Porto Alegre.
- HARVEY, J. T., (1992). **Mix Design and Compaction Procedures for Hot-Mix Asphalt Concrete and Rubber-Modified Concrete Mixtures**. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of California at Berkeley. 450p.
- HISLOP, W. P., (2000). **Influence of Aggregate Type and Gradation on Critical Voids in the Asphalt Paving Mixtures**. PhD Thesis, Satate University, Iowa.
- HUANG, B.; MOHAMMAD, L. N.; GRAVES, PHILLIP S.; ABADIE, C., (2002). **Louisiana Experience with Crumb-Rubber Modified Hot Mix Asphalt Pavement**. Transportation Research Board, 81st Annual Meeting. Washington.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO PETRÓLEO, (1994). **Materiais Alfálticos**. IBP, Rio de Janeiro.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO PETRÓLEO, (1998). **Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas**. IBP, Rio de Janeiro.
- ISACSSON, U.; LU, XIAOHU, (1999). **Characterization of Bitumens Modified with SEBS, EVA and EBA Polymers**. Journal of Materials Science 34, pp. 3737-3745. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.

- JAVED, S.; LOVELL C. W.; WOOD L. E., (1994). **Waste Foundry Sand in Asphalt Concrete**. Transportation Research Record 1437. Transportation Research Board. Washington.
- JAVED, S.; LOVELL C. W., (1994). **Use of Waste Foundry Sand in Highway Construction**. Final Report, Project nº C-36-50N, Purdue University, West Lafayette. Indiana.
- LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B., (2000). **Mechanical Behavior of Asphalt Rubber Mixes Prepared in Laboratory**. In: Asphalt Rubber 2000, Vilamoura-Portugal. Proceedings. p.309-318.
- MARIOTTO, L. C., (2001). **Regeneração de Areias de Fundição**. IPT .São Paulo.
- MEDINA, J., (1997). **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro. Editora UFRJ.
- MILLER, E., (1998). **Use of Waste Foundry Sand in Hot-Mix Asphalt**. M.sc. Thesis, University of Wisconsin-Madison. Wisconsin.
- MINISTRY ONTARIO Of THE ENVIRONMENT AND ENERGY; CANADIAN FOUNDRY ASSOCIATION, (1993). **Spent Foundry Sand - Alternative Uses Study**. MOEE-CFA, Queen's Printer for Ontario, Canada.
- MOTTA, L. M. G.; PINTO, S. (1994). **O Uso de Ensaios Estáticos na Definição de Parâmetros de Comportamento das Misturas Asfálticas**. 12º encontro de asfalto, pp.152-178.
- MOTTA, L. M. G., (1998). **Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas**. 14º encontro de asfalto, pp.30-39.
- MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M., (2000). **Efeito do Fíler nas Carcaterísticas Mecânicas das Misturas Asfálticas**. Engenharia de Tráfego e Transporte 2000, pp. 1007-1017. Gramado, RS.
- MOTTA, L. M. G.; MACÊDO, J. A. G.; MARINHO, A. D.; RIBEIRO FILHO, A. A., (2001). **Utilização de Fileres Alternativos para Fabricação de Concreto Betuminosos Usinado a Quente**. ABPV - 33ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis.
- MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M., (2002). **Desempenho de Trechos de Pavimentos Acompanhados nos Últimos 10 Anos**. IBP - 16º Encontro do Asfalto, Rio de Janeiro.
- NBR 10.004, (1987). **Resíduos Sólidos - Classificação**. NBR. Associação Brasileira de Normas Técnicas, a. Rio de Janeiro.
- NBR 10.005, (1987). **Lixiviação de Resíduos**. NBR. Associação Brasileira de Normas Técnicas, b. Rio de Janeiro.
- NBR 10.006, (1987). **Solubilização de Resíduos**. NBR. Associação Brasileira de Normas Técnicas, c. Rio de Janeiro.

- NBR 10.007, (1987). **Amostragem de Resíduos**. NBR. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, d.
- NTEKIM, A. N. E., (2001). **Effects of Moisture on Asphalt-Rubber Mixtures Using Superpave**. PhD Thesis, Polytechnic University. UMI Proquest Digital Dissertations, P. n° AAT 9984002.
- ODA, S.; LEOMAR, J. F. JUNIOR, (2001). **Viabilidade técnica do Uso de Ligante Asfalto-Borracha como Material para Pavimentação Asfáltica**. ABPV - 33ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis.
- OGURTSOVA, J.; BIRMAN, S.; COELHO, V., (1999). **Concreto Asfáltico**. Boletim Técnico n° 08, 2ª Ed. Departamento de Estradas de Rodagem, DER, Paraná.
- OLIVER, J. W. H.; JAMESON, G. W.; SHARP, K. G.; VERTESSY, N. J.; JOHNSON-CLARKE, J. R.; ANDERSON, A. J., (1994). **Evaluation of Rut-Resistant Properties of Asphalt Mixes Under Field and Laboratory Conditions**. AUSTRROADS - Austrália. Publication in Transportation Research Record 1590, pp. 53-60. Washington.
- PABLOS, J. M., (2001). **Utilização de Resíduos de Areias de Fundição Aglomeradas com Argila no Setor da Construção Civil**. USP - São Carlos. São Paulo.
- PAULSEN, G.; GARDINER, M. S.; EPPS, J., (1986). **Roofing Waste in Asphalt Paving Mixtures**. Report n709-1, Center for Construction Materials Research, University of Nevada. Reno, Nevada.
- PINTO, S., (1991). **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Dissertação de Doutorado – UFRJ, Rio de Janeiro.
- PINTO, S., (1997). **Materiais Pétreos e Concreto Asfáltico: Conceituação e Dosagem**. IME, 1997, Rio de Janeiro.
- PROENÇA, G., (2001). **Impacto Ambiental Obriga Fabricantes de Peças Fundidas a Encontrar saídas para Resíduos de Moldes**. Revista Metalurgia e Materiais, maio/2001, pp.207-208.
- QIN, M. S. H., (2002). **Comparative performance of Rubberized Hot Mix Asphalt Under ALF Loading**. Dissertation Doctor of Engineering. College of Engineering and Science, Louisiana Tech University. Louisiana.
- ROQUE, R.; EPPS, A.; HARVEY, J.T.; KIM, Y. R., (2000). **Structural Requirements of Bituminous Paving Mixtures**. TRB-A2D04. Transportation Research Board, Washington.
- ROWLETT, R.D.; UFFNER, W.E., (1985). **The Use of an Asphalt Polymer/Glass Fiber Reinforcement System for Minimizing Reflection Cracks in Overlays and Reducing Excavitation Before Overlaying**. Bernard F. Kallas, Ed., ASTM Publication Code Number, pp. 65-73.

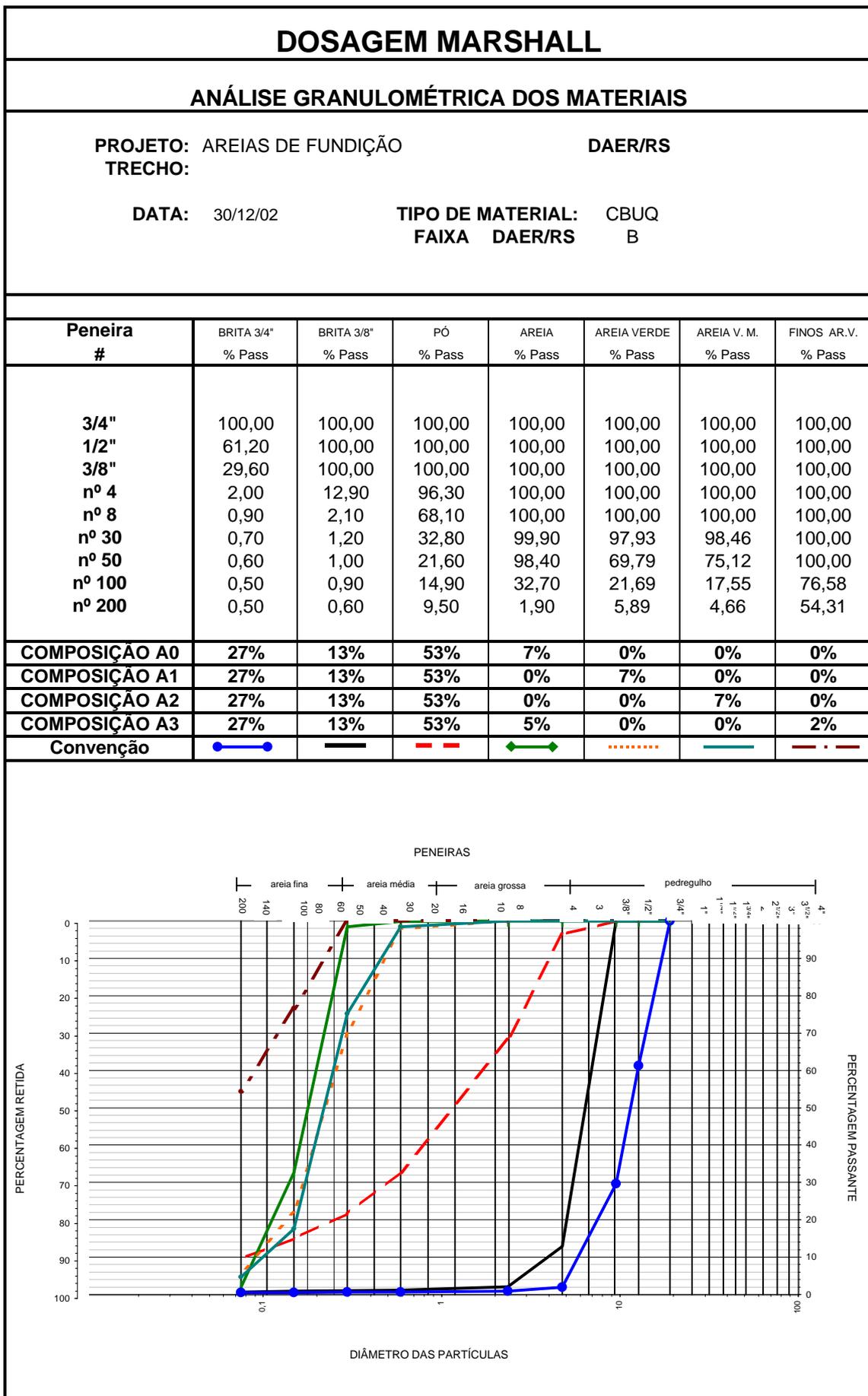
- SANTANA, H., (1995). **Considerações Sobre os Nebulosos Conceitos e definição de Filer em Misturas Asfálticas.** ABPV - 29ª Reunião Anual de Pavimentação, 1995. Cuiabá.
- SOMACAL NETO, L.; PASSOS, M. C. FERREIRA, (2002) . **Produção e Manuseio dos Agregados para Misturas Asfálticas.** Revista Estradas - SUDAER, Nº 3 - 2002, pp. 34-35. Porto alegre.
- SOUZA, J. N.; NETO, P. N. S.; RODRIGUES, J. K. G.; BRASILEIRO, F. E., (2000). **Utilização da Lama de Serragem do Granito como Filer no Concreto Betuminoso Usinado a Quente.** ABPV - 32ª Reunião Anual de Pavimentação, 2000. Brasília.
- SPECHT, L. P.; CONSOLI, N. C.; CERATTI, JORGE A. P., (2000). **Comportamento de Misturas Solo-Cimento-Fibra Submetidas a Carregamentos Dinâmicos Visando o seu Emprego em Pavimentação.** Engenharia de Tráfego e Transporte 2000, pp. 993-1005. Gramado, RS.
- TAKALLOU, H. B.; HICKS, R. G., (1987). **Development of Improved Mix and Construction Guidelines for Rubber-Modified asphalt Pavements.** Oregon State University. Public. in Transportation Reserarch Record 1171, pp. 113-120. Washington.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, (1975). **Test Procedures for Characterizing Dinamic Stress-Strain Properties of Pavement Materials.** TRB, Special Report 162, Whashington.
- ZATTERA, A. J., (2001). **Reuso de Laminados de Fibra de Vidro na Construção Civil.** UCS - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS.
- WAY, G. B., (2000). **Flagstaff I-40 Asphalt Rubber Overlay Project, Nine Years of Sucess.** Transportation Research Record, 78th Annual Meeting. Washington.

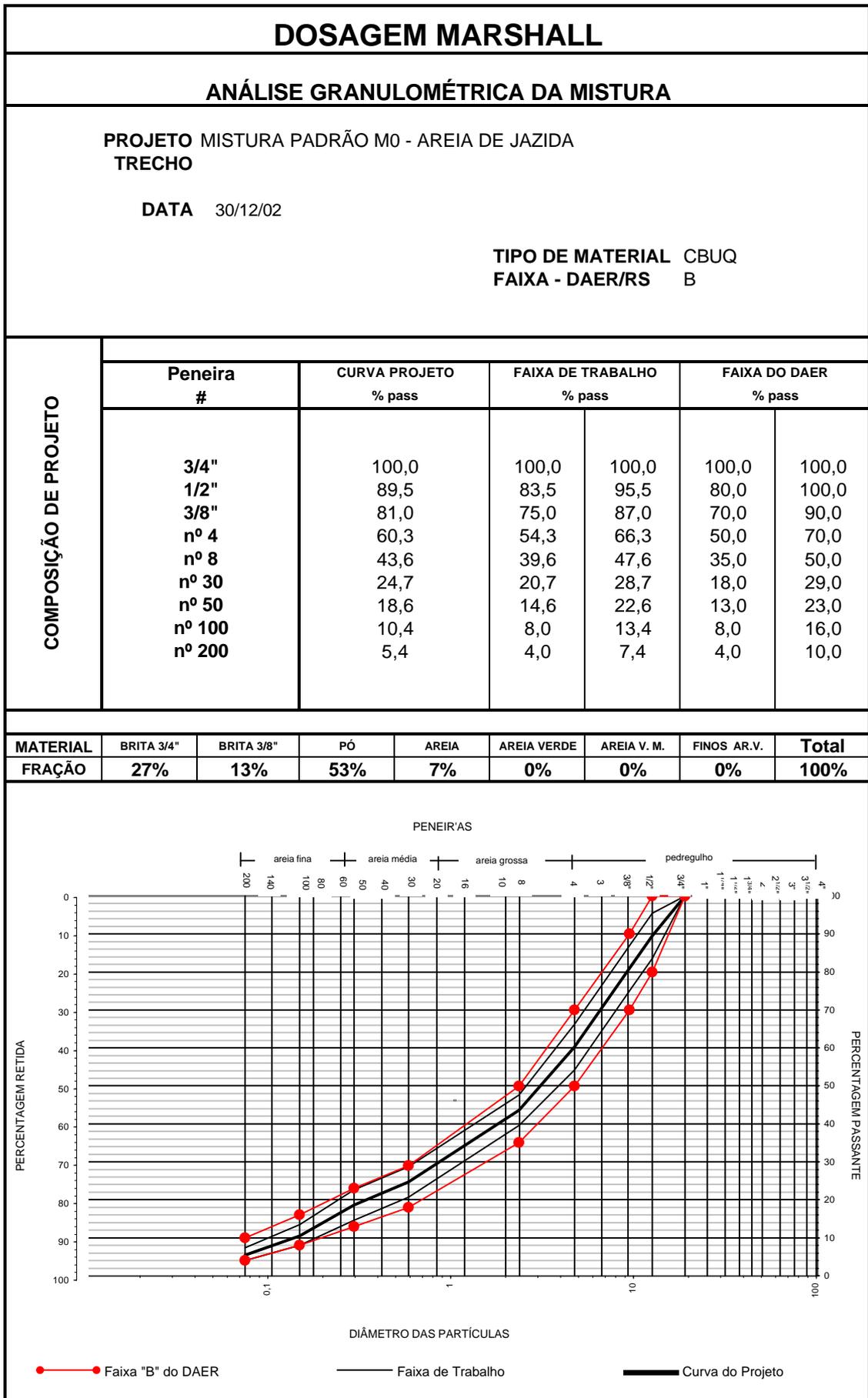
ANEXO I

RELATÓRIO DE ENSAIO MARSHALL

Estudo da Incorporação de Areias de Fundação Descartadas

em Misturas Asfálticas





RODOVIA
TRECHO

MISTURA PADRÃO M0 - AREIA DE JAZIDA

TIPO DE MATERIAL
FAIXA - DAER/RS

CBUQ
B

GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA	FINOS AR.V.
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	61,20	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	29,60	100,00	100,00	100,00	100,00
4	2,00	12,90	96,30	100,00	100,00
8	0,90	2,10	68,10	100,00	100,00
30	0,70	1,20	32,80	99,90	100,00
50	0,60	1,00	21,60	98,40	100,00
100	0,50	0,90	14,90	32,70	76,58
200	0,50	0,60	9,50	1,90	54,31

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA DA MISTURA

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA	FINOS AR.V.
	27%	13%	53%	7%	0%
3/4"	27,00	13,00	53,00	7,00	0,00
1/2"	16,52	13,00	53,00	7,00	0,00
3/8"	7,99	13,00	53,00	7,00	0,00
4	0,54	1,68	51,04	7,00	0,00
8	0,24	0,27	36,09	7,00	0,00
30	0,19	0,16	17,38	6,99	0,00
50	0,16	0,13	11,45	6,89	0,00
100	0,14	0,12	7,90	2,29	0,00
200	0,14	0,08	5,04	0,13	0,00
BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA	FINOS AR.V.	TOTAL
27,0%	13,0%	53,0%	7,0%	0,0%	100,0%

#	MISTURA	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA - DAER/RS - B
3/4"	100,00	100,0	100,0
1/2"	89,52	83,5	95,5
3/8"	80,99	75,0	87,0
4	60,26	54,3	66,3
8	43,61	39,6	47,6
30	24,72	20,7	28,7
50	18,63	14,6	22,6
100	10,44	8,0	13,4
200	5,38	4,0	7,4

QUANTIDADE DOS MATERIAIS PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA - CP

PESO MATL. GRANULAR CP (g) : 1150

QUANT. DE CP: 15

#	MATERIAL GRANULAR			LIGANTE ASFÁLTICO	
	%RET	PESO (g)	TOTAL (g)	CAP20 %	PESO (g)
3/4"	0,00	0,00	0,00	5,5	66,93
1/2"	10,48	120,47	1807,11	6,0	73,40
3/8"	8,53	98,12	1471,77	6,5	79,95
4	20,74	238,46	3576,96	7,0	86,56
8	16,65	191,44	2871,61	7,5	93,24
30	18,88	217,12	3256,80	TOTAL (g)	1200,25
50	5,99	68,87	1033,10	Quantidade de Teores:	5
100	3,59	41,30	619,45	Nº de CP para cada Teor	3
200	2,90	33,36	500,42	Teor para Pioneiro:	6,5%
Pass 200	5,25	60,35	905,28		
AREIA	7,00	80,50	1207,50		
FINOS AR.V.	0,00	0,00	0,00		
TOTAL	100,00	1150,00	17250,00	Peso CP Pio. (g)	1229,95

Equivalente de Areia >= 50%

Índice de Lamelalidade <= 40%

DOSAGEM MARSHALL																
CÁLCULO DOS PARÂMETROS MARSHALL PARA CONCRETO BETUMINOSO																
LIGANTE ASFÁLTICO		PENEIRA #		AGREGADOS			MISTURA PADRÃO M0 - AREIA DE JAZIDA									
CLASS.	CAP-20	FRACÇÃO %	D real	D apar.	absorção											
DENS.	1,027	RET. N° 10	59,00	2,715	2,53	2,8										
		PAS. N° 10	41,00	2,693	R=0,1 e A=0,9											
D _{real} mistura: 2,706			D _{ap} mistura: 2,594			D _{efet} mistura: 2,606			D _{efet} mistura: D _{real} mistura * R + D _{ap} mistura * A							
% cap	LEITURA		PESO		Volume (cm³)	DENSIDADES			VAZIOS			RBV	Valores Corrigidos			
	estabilidade	fluência	no ar	na água		D _{aparente}	D _{máx teórica}	D _{corrigida}	ar	agregado	#f _{corrigido}		fc	carga	estabilidade	fluência
5,5	0,54	1,36	1213,20	686,80	526,4											
5,5	0,50	2,09	1209,70	685,05	524,7											
5,5	0,63	2,01	1207,55	686,16	521,4											
% cap	0,56	1,82	1210,15	686,00	524,1	2,309	2,402	2,265	3,9	18,1	5,7	68,4	0,96	1141,2	1095,5	7,2
6,0	0,65	3,54	1213,70	692,30	521,4											
6,0	0,61	2,57	1214,35	690,15	524,2											
6,0	0,61	2,22	1218,20	695,40	522,8											
% cap	0,62	2,78	1215,42	692,62	522,8	2,325	2,386	2,280	2,5	18,0	4,4	75,5	0,98	1277,8	1252,3	10,9
6,5	0,69	1,13	1223,85	696,85	527,0											
6,5	0,67	1,55	1226,65	699,05	527,6											
6,5	0,50	1,02	1223,50	695,00	528,5											
% cap	0,62	1,23	1224,67	696,97	527,7	2,321	2,369	2,276	2,0	18,6	3,9	79,0	0,96	1271,0	1220,2	7,9
7,0	0,46	1,45	1229,55	700,15	529,4											
7,0	0,56	2,38	1228,25	697,15	531,1											
7,0	0,61	2,99	1224,85	697,25	527,6											
% cap	0,54	2,27	1227,55	698,18	529,4	2,319	2,352	2,275	1,4	19,1	3,3	82,7	0,96	1113,8	1069,3	9,0
7,5	0,51	3,23	1228,10	698,80	529,3											
7,5	0,67	1,73	1236,70	700,25	536,5											
7,5	0,57	2,10	1233,60	699,70	533,9											
% cap	0,58	2,35	1232,80	699,58	533,2	2,312	2,336	2,268	1,0	19,8	2,9	85,3	0,94	1194,5	1122,8	9,3
ESTABILIDADE																
ESTABILIDADE		FLUÊNCIA		DENSIDADE		VAZIOS		VAM		RBV						
5,50	1095,5	5,5	7,2	5,50	2,265	5,5	5,7	5,50	18,1	5,5	68,4					
6,00	1252,3	6,0	10,9	6,00	2,280	6,0	4,4	6,00	18,0	6,0	75,5					
6,50	1220,2	6,5	7,9	6,50	2,276	6,5	3,9	6,50	18,6	6,5	79,0					
7,00	1069,3	7,0	9,0	7,00	2,275	7,0	3,3	7,00	19,1	7,0	82,7					
7,50	1122,8	7,5	9,3	7,50	2,268	7,5	2,9	7,50	19,8	7,5	85,3					

DOSAGEM MARSHALL

CURVAS PARA ESTUDO DE CONCRETO ASFÁLTICO

PROJETO MISTURA PADRÃO M0 - AREIA DE JAZIDA

Trecho:

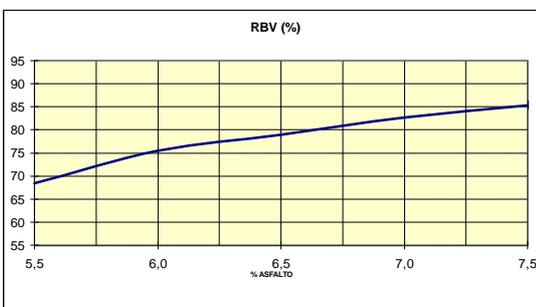
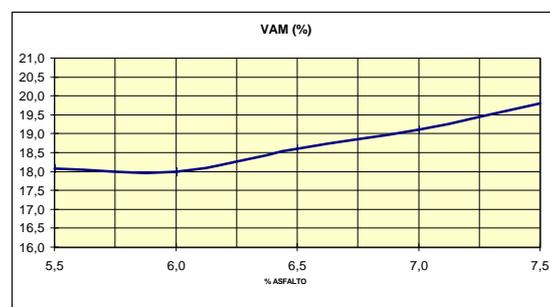
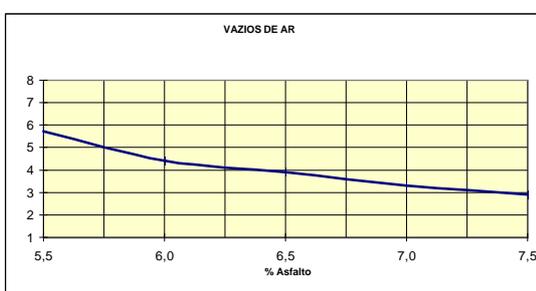
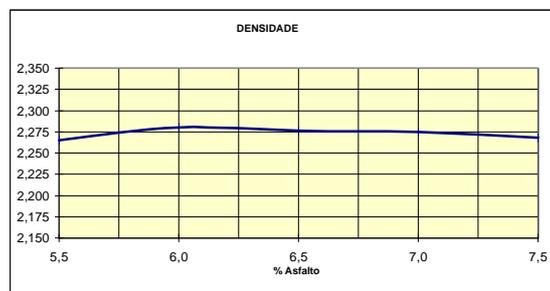
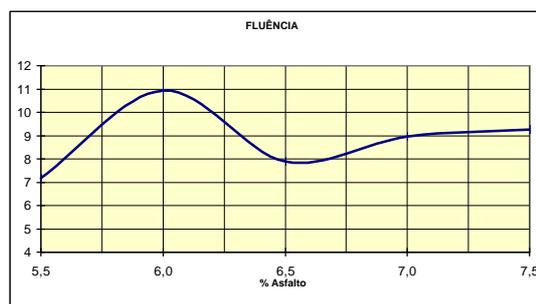
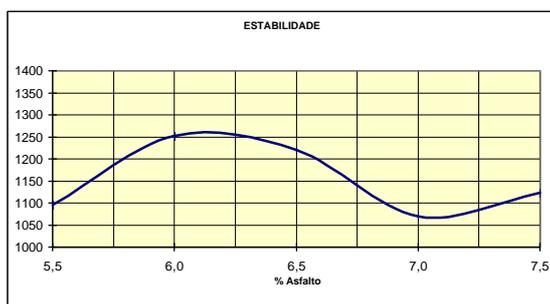
Subtrecho:

Serviço:

Data: 30/12/02

Especificação: FAIXA - DAER/RS

B



DOSAGEM MARSHALL

Cálculo do Teor Ótimo - Cálculo dos Parâmetros Relativos

PROJETO MISTURA PADRÃO M0 - AREIA DE JAZIDA

Trecho:

Subtrecho:

Serviço:

Data: 30/12/02

Especificação: FAIXA - DAER/RS

Valores Médios do Estudo Marshall

Teor (%)	Dens. Apar. (Kg/m3)	Índice Vazios (%)	Estabilidade	RBV	Fluência	VAM (%)
5,500	2,265	5,721	1.095,520	68,366	7,165	18,086
6,000	2,280	4,417	1.252,277	75,462	10,932	17,999
6,500	2,276	3,906	1.220,160	78,992	7,900	18,595
7,000	2,275	3,310	1.069,280	82,684	8,950	19,116
7,500	2,268	2,919	1.122,799	85,260	9,265	19,803

Cálculo do Teor Ótimo de Betume

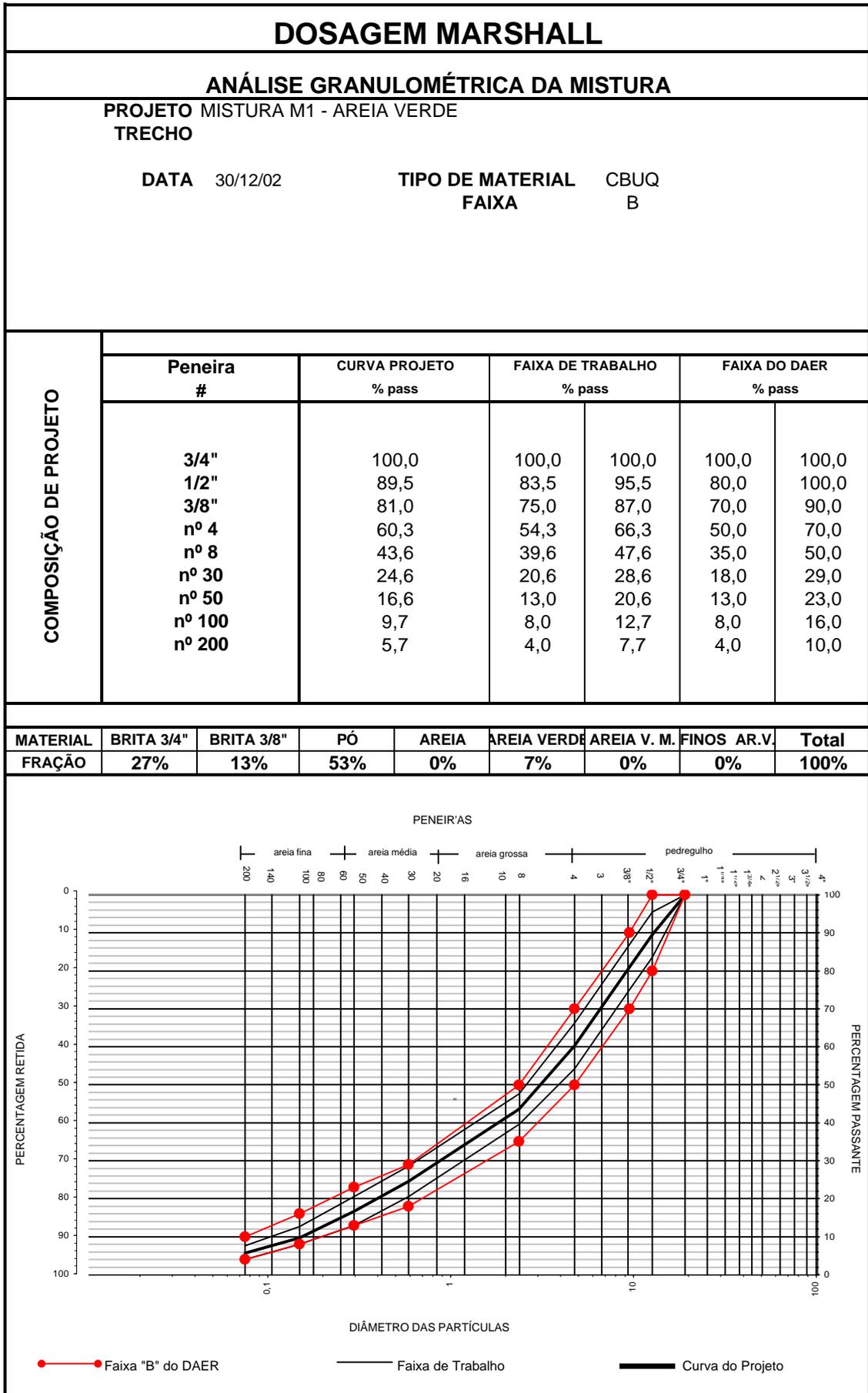
Valores limites				
Vazios	Teor		RBV	Teor
3,0	7,256		75,0	6,098
5,0	5,823		82,0	6,933
Média	6,54		Média	6,516
Teor Médio Calculado				6,528
Teor Adotado				6,500

Cálculo dos Parâmetros relativos ao Teor Ótimo de Betume

Teor	Ótimo: 6,50	Limites: 6,50	a	7,00
	Multiplicador: 0,00			
Densidade Aparente	Mínimo: 2,276	Máximo: 2,275	Calculado: 2,276	
	Diferença: 0,002			
Índice Vazios	Mínimo: 3,906	Máximo: 3,310	Calculado: 3,9	
	Diferença: 0,596			
Estabilidade	Mínimo: 1.220,160	Máximo: 1.069,280	Calculado: 1.220,2	
	Diferença: 150,880			
RBV	Mínimo: 78,992	Máximo: 82,684	Calculado: 79,0	
	Diferença: 3,693			
Fluência	Mínimo: 7,900	Máximo: 8,950	Calculado: 7,9	
	Diferença: 1,050			
VAM	Mínimo: 18,595	Máximo: 19,116	Calculado: 18,6	
	Diferença: 0,521			

Data: _____

Responsável Técnico _____



RODOVIA
TRECHO

MISTURA M1 - AREIA VERDE

TIPO DE MATERIAL
FAIXA - DAER/RS

CBUQ
B

GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA VERDE	FINOS AR.V.
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	61,20	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	29,60	100,00	100,00	100,00	100,00
4	2,00	12,90	96,30	100,00	100,00
8	0,90	2,10	68,10	100,00	100,00
30	0,70	1,20	32,80	97,93	100,00
50	0,60	1,00	21,60	69,79	100,00
100	0,50	0,90	14,90	21,69	76,58
200	0,50	0,60	9,50	5,89	54,31

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA DA MISTURA

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA VERDE	FINOS AR.V.
	27%	13%	53%	7%	0%
3/4"	27,00	13,00	53,00	7,00	0,00
1/2"	16,52	13,00	53,00	7,00	0,00
3/8"	7,99	13,00	53,00	7,00	0,00
4	0,54	1,68	51,04	7,00	0,00
8	0,24	0,27	36,09	7,00	0,00
30	0,19	0,16	17,38	6,85	0,00
50	0,16	0,13	11,45	4,89	0,00
100	0,14	0,12	7,90	1,52	0,00
200	0,14	0,08	5,04	0,41	0,00
BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA VERDE	FINOS AR.V.	TOTAL
27,0%	13,0%	53,0%	7,0%	0,0%	100,0%

#	MISTURA	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA - DAER/RS - B
3/4"	100,00	100,0	100,0
1/2"	89,52	83,5	95,5
3/8"	80,99	75,0	87,0
4	60,26	54,3	66,3
8	43,61	39,6	47,6
30	24,58	20,6	28,6
50	16,63	13,0	20,6
100	9,67	8,0	12,7
200	5,66	4,0	7,7

QUANTIDADE DOS MATERIAIS PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA - CP

PESO MATL. GRANULAR CP (g) : 1150

QUANT. DE CP: 15

#	MATERIAL GRANULAR			LIGANTE ASFÁLTICO	
	%RET	PESO (g)	TOTAL (g)	CAP20 %	PESO (g)
3/4"	0,00	0,00	0,00	5,5	66,93
1/2"	10,48	120,47	1807,11	6,0	73,40
3/8"	8,53	98,12	1471,77	6,5	79,95
4	20,74	238,46	3576,96	7,0	86,56
8	16,65	191,44	2871,61	7,5	93,24
30	18,88	217,12	3256,80		
50	5,99	68,87	1033,10		
100	3,59	41,30	619,45		
200	2,90	33,36	500,42		
Pass 200	5,25	60,35	905,28		
AREIA VERDE	7,00	80,50	1207,50		
FINOS AR.V.	0,00	0,00	0,00		
TOTAL	100,00	1150,00	17250,00	TOTAL (g)	1200,25
				Quantidade de Teores:	5
				Nº de CP para cada Teor	3
				Teor para Pioneiro:	6,5%
				Peso CP Pio. (g)	1229,95

Equivalente de Areia >= 50%

Índice de Lamelalidade <= 40%

DOSAGEM MARSHALL																
CÁLCULO DOS PARÂMETROS MARSHALL PARA CONCRETO BETUMINOSO																
LIGANTE ASFÁLTICO		PENEIRA #		FRAÇÃO %		AGREGADOS										
CLASS.	CAP-20					D real	D apar.	absorção	MISTURA M1 - AREIA VERDE							
DENS.	1,027	RET. N° 10	59,00	2,715	2,53	2,8	R=0,1 e A=0,9									
		PAS. N° 10	41,00	2,665												
D _{real} mistura: 2,694			D _{ap} mistura: 2,584			D _{efet} mistura: 2,595			D _{efet} mistura: D _{real} mistura * R + D _{ap} mistura * A							
% cap	LEITURA		PESO		Volume (cm³)	DENSIDADES			VAZIOS			RBV	Valores Corrigidos			
	estabilidade	fluência	no ar	na água		D _{aparente}	D _{máx teórica}	D _{corrigida}	ar	agregado	ar corrigido		fc	carga	estabilidade	fluência
5,5	0,56	2,74	1212,50	677,65	534,9											
5,5	0,61	2,29	1207,25	675,70	531,6											
5,5	0,61	2,54	1208,70	680,55	528,2											
% cap	0,59	2,52	1209,48	677,97	531,5	2,276	2,394	2,233	4,9	18,9	6,7	64,5	0,96	1216,3	1167,68	9,9
6,0	0,54	1,91	1210,80	685,00	525,8											
6,0	0,63	3,17	1207,80	682,55	525,3											
6,0	0,69	1,24	1221,65	689,25	532,4											
% cap	0,62	2,11	1213,42	685,60	527,8	2,299	2,377	2,256	3,3	18,5	5,1	72,5	0,96	1271,0	1220,16	8,3
6,5	0,63	2,99	1223,90	692,35	531,6											
6,5	0,60	3,90	1223,00	693,45	529,6											
6,5	0,59	1,54	1216,40	688,65	527,8											
% cap	0,61	2,81	1221,10	691,48	529,6	2,306	2,361	2,262	2,3	18,8	4,2	77,8	0,96	1243,7	1193,92	11,1
7,0	0,67	3,29	1229,35	694,45	534,9											
7,0	0,55	3,44	1229,30	695,85	533,5											
7,0	0,60	3,38	1226,05	694,25	531,8											
% cap	0,61	3,37	1228,23	694,85	533,4	2,303	2,344	2,259	1,8	19,3	3,6	81,2	0,94	1243,7	1169,05	13,3
7,5	0,62	3,54	1233,85	698,60	535,3											
7,5	0,62	3,73	1229,35	695,85	533,5											
7,5	0,61	3,22	1230,25	695,65	534,6											
% cap	0,62	3,50	1231,15	696,70	534,5	2,304	2,328	2,260	1,1	19,7	2,9	85,2	0,94	1264,2	1188,32	13,8
ESTABILIDADE		FLUÊNCIA		DENSIDADE		VAZIOS		VAM		RBV						
5,50	1167,7	5,5	9,9	5,50	2,233	5,5	6,7	5,5	18,9	5,5	64,5					
6,00	1220,2	6,0	8,3	6,00	2,256	6,0	5,1	6,0	18,5	6,0	72,5					
6,50	1193,9	6,5	11,1	6,50	2,262	6,5	4,2	6,5	18,8	6,5	77,8					
7,00	1169,0	7,0	13,3	7,00	2,259	7,0	3,6	7,0	19,3	7,0	81,2					
7,50	1188,3	7,5	13,8	7,50	2,260	7,5	2,9	7,5	19,7	7,5	85,2					

DOSAGEM MARSHALL

CURVAS PARA ESTUDO DE CONCRETO ASFÁLTICO

PROJETO MISTURA M1 - AREIA VERDE

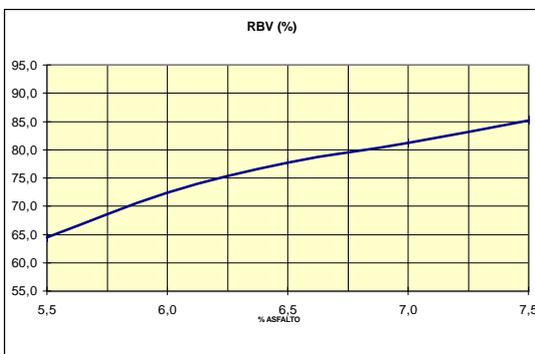
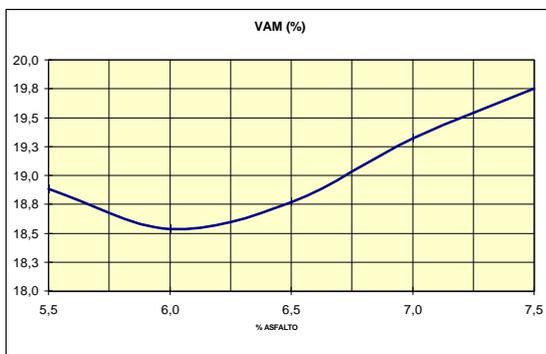
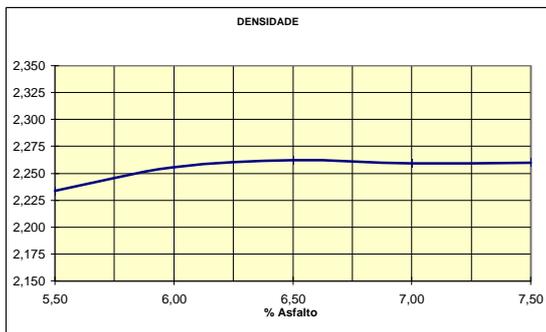
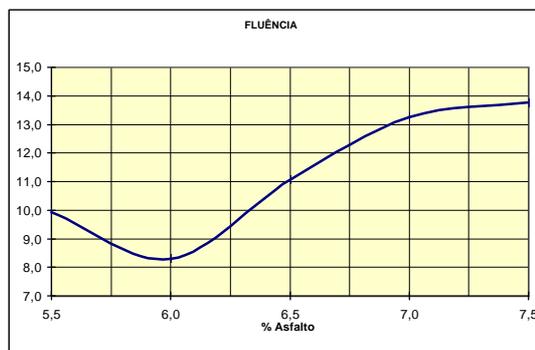
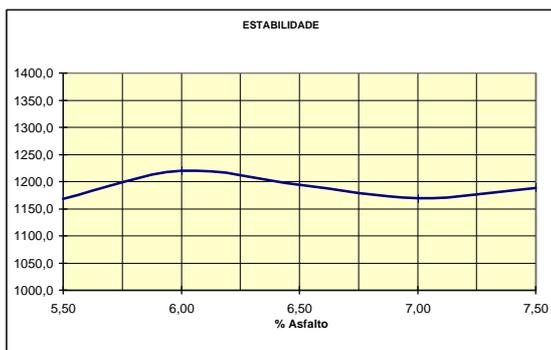
Trecho:

Subtrecho:

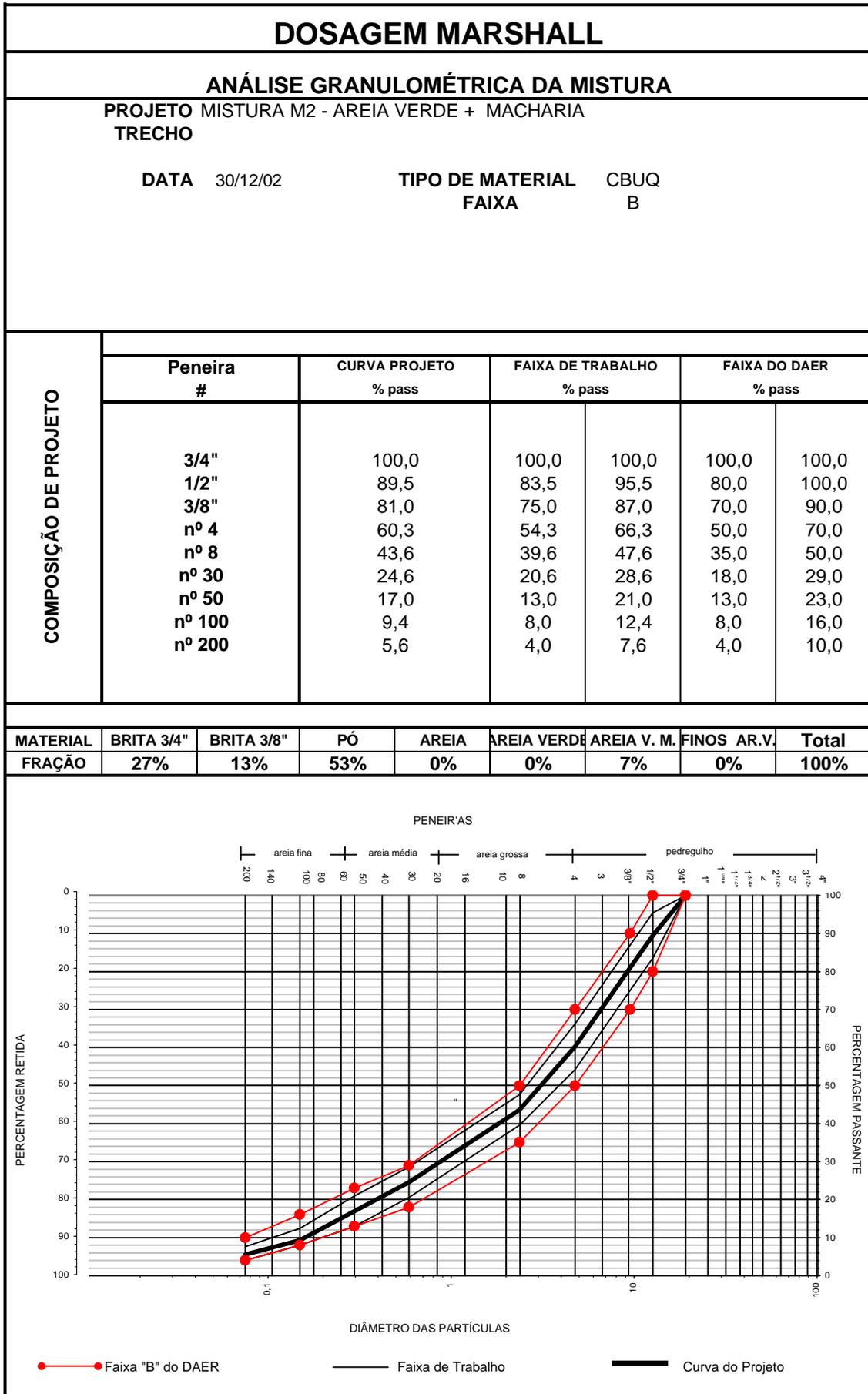
Serviço:

Data: 30/12/02

Especificação: FAIXA - DAER/RS **B**



DOSAGEM MARSHALL						
Cálculo do Teor Ótimo - Cálculo dos Parâmetros Relativos						
PROJETO	MISTURA M1 - AREIA VERDE					
Trecho:						
Subtrecho:		Data:	30/12/02			
Serviço:		Especificação:	FAIXA - DAER/RS			
Valores Médios do Estudo Marshall						
Teor (%)	Dens. Apar. (Kg/m3)	Índice Vazios (%)	Estabilidade	RBV	Fluência	VAM (%)
5,500	2,233	6,697	1.167,680	64,534	9,934	18,884
6,000	2,256	5,106	1.220,160	72,454	8,294	18,537
6,500	2,262	4,174	1.193,920	77,759	11,063	18,766
7,000	2,259	3,626	1.169,047	81,233	13,268	19,321
7,500	2,260	2,926	1.188,317	85,182	13,766	19,749
Cálculo do Teor Ótimo de Betume						
Valores limites						
Vazios	Teor		RBV	Teor		
3,0	7,317		75,0	6,342		
5,0	6,203		82,0	7,050		
Média	6,76		Média	6,696		
Teor Médio Calculado					6,728	
Teor Adotado					6,700	
Cálculo dos Parâmetros relativos ao Teor Ótimo de Betume						
Teor	Ótimo:	6,70	Limites:	6,50	a	7,00
	Multiplicador: 2,00					
Densidade Aparente	Mínimo:	2,262	Máximo:	2,259	Calculado:	2,261
	Diferença:	0,003				
Índice Vazios	Mínimo:	4,174	Máximo:	3,626	Calculado:	4,0
	Diferença:	0,548				
Estabilidade	Mínimo:	1.193,920	Máximo:	1.169,047	Calculado:	1.184,0
	Diferença:	24,873				
RBV	Mínimo:	77,759	Máximo:	81,233	Calculado:	79,1
	Diferença:	3,474				
Fluência	Mínimo:	11,063	Máximo:	13,268	Calculado:	11,9
	Diferença:	2,205				
VAM	Mínimo:	18,766	Máximo:	19,321	Calculado:	19,0
	Diferença:	0,555				
Data: _____ Responsável Técnico _____						



RODOVIA
TRECHO

MISTURA M2 - AREIA VERDE + MACHARIA

TIPO DE MATERIAL
FAIXA - DAER/RS

CBUQ
B

GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA V. M.	FINOS AR.V.
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	61,20	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	29,60	100,00	100,00	100,00	100,00
4	2,00	12,90	96,30	100,00	100,00
8	0,90	2,10	68,10	100,00	100,00
30	0,70	1,20	32,80	98,46	100,00
50	0,60	1,00	21,60	75,12	100,00
100	0,50	0,90	14,90	17,55	76,58
200	0,50	0,60	9,50	4,66	54,31

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA DA MISTURA

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA V. M.	FINOS AR.V.
	27%	13%	53%	7%	0%
3/4"	27,00	13,00	53,00	7,00	0,00
1/2"	16,52	13,00	53,00	7,00	0,00
3/8"	7,99	13,00	53,00	7,00	0,00
4	0,54	1,68	51,04	7,00	0,00
8	0,24	0,27	36,09	7,00	0,00
30	0,19	0,16	17,38	6,89	0,00
50	0,16	0,13	11,45	5,26	0,00
100	0,14	0,12	7,90	1,23	0,00
200	0,14	0,08	5,04	0,33	0,00
BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA V. M.	FINOS AR.V.	TOTAL
27,0%	13,0%	53,0%	7,0%	0,0%	100,0%

#	MISTURA	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA - DAER/RS - B
3/4"	100,00	100,0	100,0
1/2"	89,52	83,5	95,5
3/8"	80,99	75,0	87,0
4	60,26	54,3	66,3
8	43,61	39,6	47,6
30	24,62	20,6	28,6
50	17,00	13,0	21,0
100	9,38	8,0	12,4
200	5,57	4,0	7,6

QUANTIDADE DOS MATERIAIS PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA - CP

PESO MATL. GRANULAR CP (g) : 1150

QUANT. DE CP: 15

#	MATERIAL GRANULAR			LIGANTE ASFÁLTICO	
	%RET	PESO (g)	TOTAL (g)	CAP20 %	PESO (g)
3/4"	0,00	0,00	0,00	5,5	66,93
1/2"	10,48	120,47	1807,11	6,0	73,40
3/8"	8,53	98,12	1471,77	6,5	79,95
4	20,74	238,46	3576,96	7,0	86,56
8	16,65	191,44	2871,61	7,5	93,24
30	18,88	217,12	3256,80		
50	5,99	68,87	1033,10		
100	3,59	41,30	619,45		
200	2,90	33,36	500,42		
Pass 200	5,25	60,35	905,28		
AREIA V. M.	7,00	80,50	1207,50		
FINOS AR.V.	0,00	0,00	0,00		
TOTAL	100,00	1150,00	17250,00	TOTAL (g)	1200,25
				Quantidade de Teores:	5
				Nº de CP para cada Teor	3
				Teor para Pioneiro:	6,5%
				Peso CP Pio. (g)	1229,95

Equivalente de Areia >= 50%

Índice de Lamelalidade <= 40%

DOSAGEM MARSHALL																
CÁLCULO DOS PARÂMETROS MARSHALL PARA CONCRETO BETUMINOSO																
LIGANTE ASFÁLTICO		PENEIRA		FRAÇÃO		AGREGADOS			MISTURA M2 - AREIA VERDE + MACHARIA							
CLASS.	CAP-20	#	%	D real	D apar.	absorção										
DENS.	1,027	RET. N° 10	59,00	2,715	2,53	2,8										
		PAS. N° 10	41,00	2,679	R=0,1 e A=0,9											
D _{real} mistura: 2,700			D _{ap} mistura: 2,589			D _{defet} mistura: 2,600			D _{defet} mistura: D _{real} mistura * R + D _{ap} mistura * A							
% cap	LEITURA		PESO		Volume (cm³)	DENSIDADES			VAZIOS			RBV	Valores Corrigidos			
	estabilidade	fluência	no ar	na água		D _{aparente}	D _{max teórica}	D _{corrigida}	ar	agregado	ar _{corrigido}		fc	carga	estabilidade	fluência
5,5	0,51	1,69	1212,20	683,30	528,9											
5,5	0,69	0,83	1215,15	684,15	531,0											
5,5	0,55	1,91	1212,25	682,45	529,8											
% cap	0,58	1,48	1213,20	683,30	529,9	2,289	2,398	2,247	4,5	18,6	6,3	66,0	0,96	1195,8	1148,0	5,8
6,0	0,60	2,09	1214,20	686,95	527,3											
6,0	0,60	1,13	1214,35	683,85	530,5											
6,0	0,56	0,81	1216,05	687,80	528,3											
% cap	0,59	1,34	1214,87	686,20	528,7	2,298	2,381	2,255	3,5	18,7	5,3	71,6	0,96	1199,3	1151,3	5,3
6,5	0,68	1,44	1226,60	696,65	530,0											
6,5	0,69	1,25	1223,60	688,15	535,5											
6,5	0,44	1,49	1224,45	694,50	530,0											
% cap	0,60	1,39	1224,88	693,10	531,8	2,303	2,365	2,260	2,6	19,0	4,4	76,7	0,96	1236,8	1187,4	5,5
7,0	0,68	3,54	1228,95	697,75	531,2											
7,0	0,69	1,47	1232,70	698,50	534,2											
7,0	0,58	2,56	1231,20	696,65	534,6											
% cap	0,65	2,52	1230,95	697,63	533,3	2,308	2,348	2,264	1,7	19,3	3,6	81,5	0,94	1332,5	1252,6	9,9
7,5	0,53	3,11	1232,45	696,25	536,2											
7,5	0,58	3,43	1230,40	695,75	534,7											
7,5	0,57	2,10	1213,30	690,20	523,1											
% cap	0,56	2,88	1225,38	694,07	531,3	2,306	2,332	2,263	1,1	19,8	3,0	85,0	0,96	1148,0	1102,1	11,3
ESTABILIDADE		FLUÊNCIA		DENSIDADE		VAZIOS		VAM		RBV						
5,50	1148,0	5,5	5,8	5,50	2,247	5,5	6,3	5,5	18,6	5,5	66,0					
6,00	1151,3	6,0	5,3	6,00	2,255	6,0	5,3	6,0	18,7	6,0	71,6					
6,50	1187,4	6,5	5,5	6,50	2,260	6,5	4,4	6,5	19,0	6,5	76,7					
7,00	1252,6	7,0	9,9	7,00	2,264	7,0	3,6	7,0	19,3	7,0	81,5					
7,50	1102,1	7,5	11,3	7,50	2,263	7,5	3,0	7,5	19,8	7,5	85,0					

DOSAGEM MARSHALL

CURVAS PARA ESTUDO DE CONCRETO ASFÁLTICO

PROJETO MISTURA M2 - AREIA VERDE + MACHARIA

Trecho:

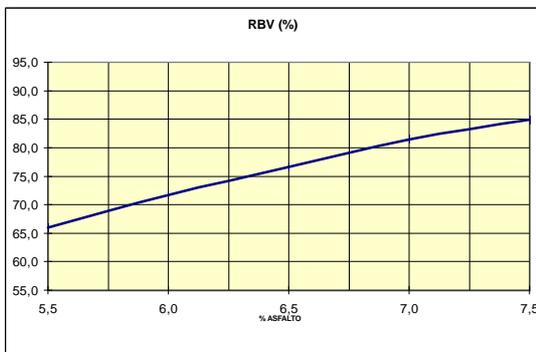
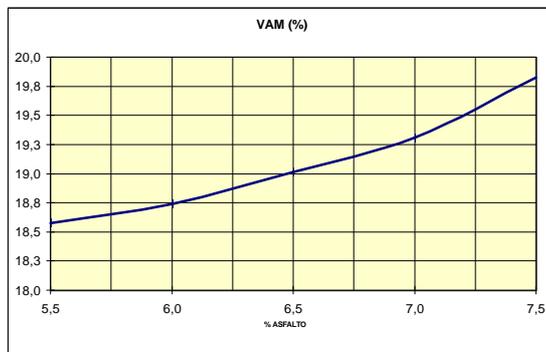
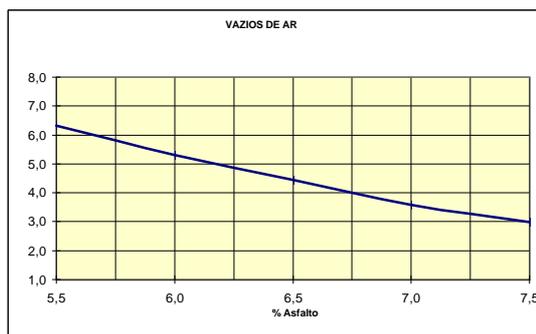
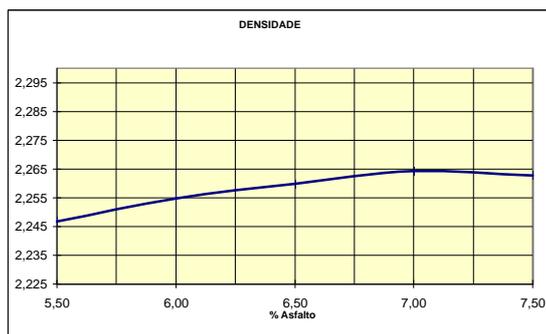
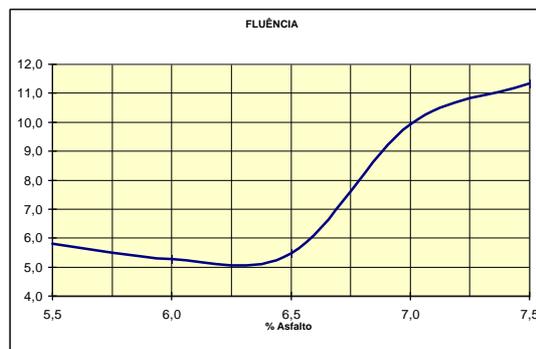
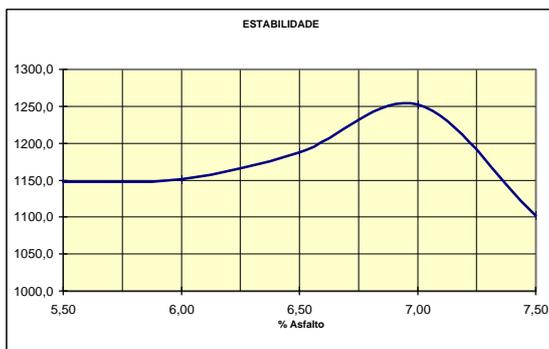
Subtrecho:

Serviço:

Data: 30/12/02

Especificação: FAIXA - DAER/RS

B



DOSAGEM MARSHALL

Cálculo do Teor Ótimo - Cálculo dos Parâmetros Relativos

PROJETO MISTURA M2 - AREIA VERDE + MACHARIA

Trecho:

Subtrecho:

Data: 30/12/02

Serviço:

Especificação: FAIXA - DAER/RS

Valores Médios do Estudo Marshall

Teor (%)	Dens. Apar. (Kg/m ³)	Índice Vazios (%)	Estabilidade	RBV	Fluência	VAM (%)
5,50	2,247	6,315	1.148,000	66,006	5,814	18,576
6,00	2,255	5,315	1.151,280	71,640	5,289	18,740
6,50	2,260	4,435	1.187,360	76,673	5,486	19,013
7,00	2,264	3,578	1.252,550	81,472	9,934	19,310
7,50	2,263	2,983	1.102,080	84,952	11,339	19,826

Cálculo do Teor Ótimo de Betume

Valores limites

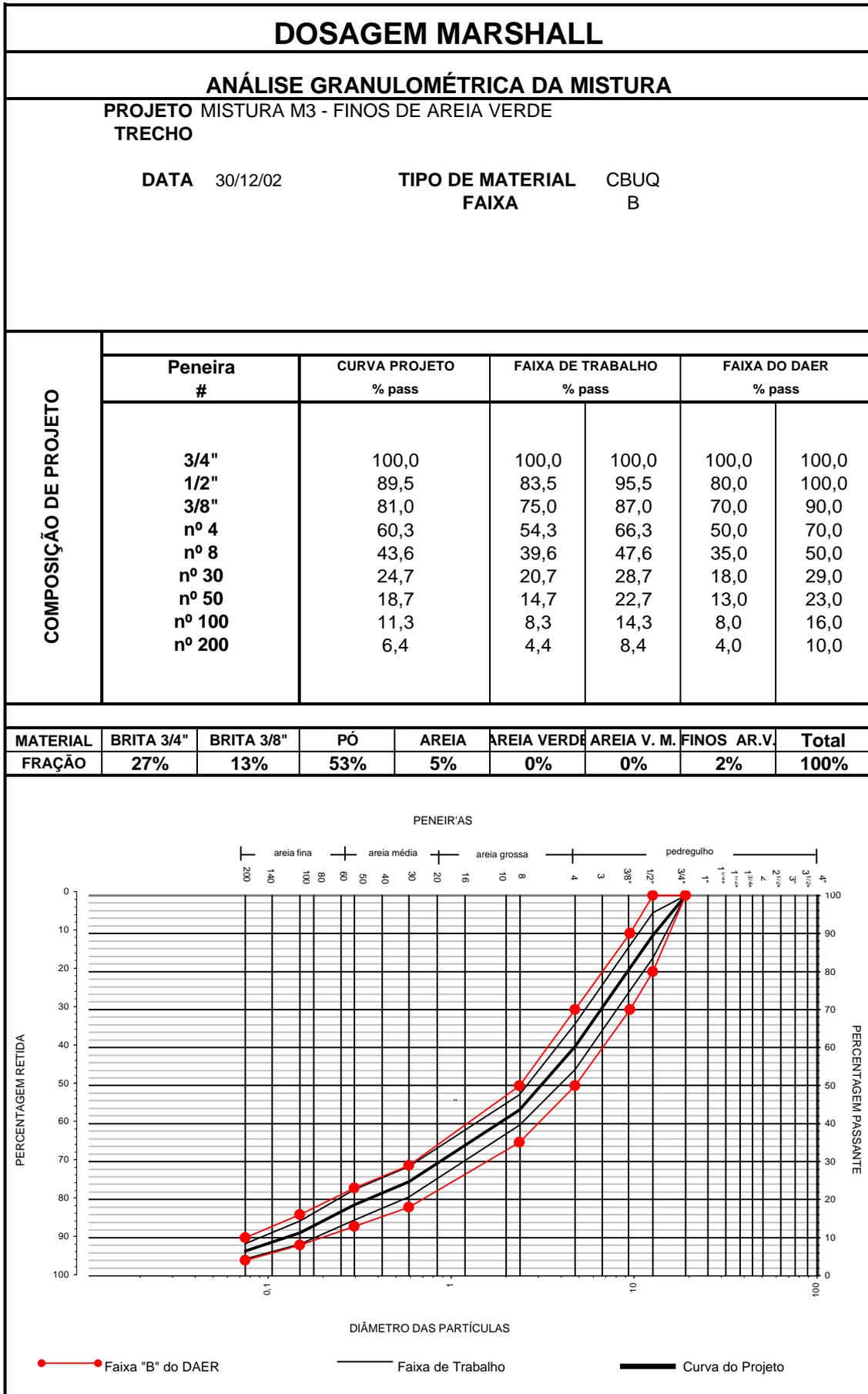
Vazios	Teor	RBV	Teor
3,0	7,433	75,0	6,342
5,0	6,185	82,0	7,103
Média	6,809	Média	6,723
Teor Médio Calculado			6,766
Teor Adotado			6,800

Cálculo dos Parâmetros relativos ao Teor Ótimo de Betume

Teor	Ótimo: 6,80	Limites: 6,50	a	7,00
	Multiplicador: 3,00			
Densidade Aparente	Mínimo: 2,260 Máximo: <u>2,264</u> Diferença: 0,005		Calculado:	2,263
Índice Vazios	Mínimo: 4,435 Máximo: <u>3,578</u> Diferença: 0,858		Calculado:	3,9
Estabilidade	Mínimo: 1.187,360 Máximo: <u>1.252,550</u> Diferença: 65,190		Calculado:	1.226,5
RBV	Mínimo: 76,673 Máximo: <u>81,472</u> Diferença: 4,799		Calculado:	79,6
Fluência	Mínimo: 5,486 Máximo: <u>9,934</u> Diferença: 4,449		Calculado:	8,2
VAM	Mínimo: 19,013 Máximo: <u>19,310</u> Diferença: 0,296		Calculado:	19,2

Data: _____

Responsável Técnico



RODOVIA
TRECHO

MISTURA M3 - FINOS DE AREIA VERDE

TIPO DE MATERIAL
FAIXA - DAER/RS

CBUQ
B

GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA	FINOS AR.V.
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	61,20	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	29,60	100,00	100,00	100,00	100,00
4	2,00	12,90	96,30	100,00	100,00
8	0,90	2,10	68,10	100,00	100,00
30	0,70	1,20	32,80	99,90	100,00
50	0,60	1,00	21,60	98,40	100,00
100	0,50	0,90	14,90	32,70	76,58
200	0,50	0,60	9,50	1,90	54,31

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA DA MISTURA

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA	FINOS AR.V.
	27%	13%	53%	5%	2%
3/4"	27,00	13,00	53,00	5,00	2,00
1/2"	16,52	13,00	53,00	5,00	2,00
3/8"	7,99	13,00	53,00	5,00	2,00
4	0,54	1,68	51,04	5,00	2,00
8	0,24	0,27	36,09	5,00	2,00
30	0,19	0,16	17,38	5,00	2,00
50	0,16	0,13	11,45	4,92	2,00
100	0,14	0,12	7,90	1,64	1,53
200	0,14	0,08	5,04	0,10	1,09
BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ	AREIA	FINOS AR.V.	TOTAL
27,0%	13,0%	53,0%	5,0%	2,0%	100,0%

#	MISTURA	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA - DAER/RS - B
3/4"	100,00	100,0	100,0
1/2"	89,52	83,5	95,5
3/8"	80,99	75,0	87,0
4	60,26	54,3	66,3
8	43,61	39,6	47,6
30	24,72	20,7	28,7
50	18,66	14,7	22,7
100	11,32	8,3	14,3
200	6,43	4,4	8,4

QUANTIDADE DOS MATERIAIS PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA - CP

PESO MATL. GRANULAR CP (g) : 1150

QUANT. DE CP: 15

#	MATERIAL GRANULAR			LIGANTE ASFÁLTICO	
	%RET	PESO (g)	TOTAL (g)	CAP20 %	PESO (g)
3/4"	0,00	0,00	0,00	5,5	66,93
1/2"	10,48	120,47	1807,11	6,0	73,40
3/8"	8,53	98,12	1471,77	6,5	79,95
4	20,74	238,46	3576,96	7,0	86,56
8	16,65	191,44	2871,61	7,5	93,24
30	18,88	217,12	3256,80	TOTAL (g)	1200,25
50	5,99	68,87	1033,10	Quantidade de Teores:	5
100	3,59	41,30	619,45	Nº de CP para cada Teor	3
200	2,90	33,36	500,42	Teor para Pioneiro:	6,5%
Pass 200	5,25	60,35	905,28		
AREIA	5,00	57,50	862,50		
FINOS AR.V.	2,00	23,00	345,00		
TOTAL	100,00	1150,00	17250,00	Peso CP Pio. (g)	1229,95

Equivalente de Areia >= 50%

Índice de Lamelaridade <= 40%

DOSAGEM MARSHALL																
CÁLCULO DOS PARÂMETROS MARSHALL PARA CONCRETO BETUMINOSO																
LIGANTE ASFÁLTICO		PENEIRA		FRAÇÃO	AGREGADOS			MISTURA M3 - FINOS DE AREIA VERDE								
CLASS.	CAP-20	#	%		D real	D apar.	absorção									
DENS.	1,027	RET. N° 10	59,00		2,715	2,53	2,8									
		PAS. N° 10	41,00		2,681		R=0,1 e A=0,9									
D _{real} mistura: 2,701			D _{ap} mistura: 2,590			D _{defet} mistura: 2,601			D _{defet} mistura: D _{real} mistura * R + D _{ap} mistura * A							
% cap	LEITURA		PESO		Volume (cm³)	DENSIDADES			VAZIOS			RBV	Valores Corrigidos			
	estabilidade	fluência	no ar	na água		D _{aparente}	D _{máx teórica}	D _{corrigida}	ar	agregado	ar corrigido		fc	carga	estabilidade	fluência
5,5	0,59	1,97	1210,00	683,15	526,9											
5,5	0,60	2,20	1210,95	685,00	526,0											
5,5	0,61	2,80	1209,95	684,70	525,3											
% cap	0,60	2,32	1210,30	684,28	526,0	2,301	2,399	2,257	4,1	18,2	5,9	67,7	0,96	1230,00	1180,80	9,1
6,0	0,56	1,88	1218,90	687,80	531,1											
6,0	0,65	1,26	1218,45	687,95	530,5											
6,0	0,59	1,27	1221,10	693,30	527,8											
% cap	0,60	1,47	1219,48	689,68	529,8	2,302	2,382	2,258	3,4	18,6	5,2	72,2	0,96	1230,00	1180,80	5,8
6,5	0,50	2,16	1222,65	697,55	525,1											
6,5	0,59	1,27	1225,60	695,55	530,1											
6,5	0,67	2,00	1223,10	696,70	526,4											
% cap	0,59	1,81	1223,78	696,60	527,2	2,321	2,365	2,277	1,9	18,4	3,7	79,7	0,96	1202,67	1154,56	7,1
7,0	0,57	2,42	1231,20	699,40	531,8											
7,0	0,59	2,89	1229,15	700,35	528,8											
7,0	0,59	3,04	1230,40	700,55	529,9											
% cap	0,58	2,78	1230,25	700,10	530,2	2,321	2,349	2,276	1,2	18,9	3,1	83,6	0,96	1195,83	1148,00	11,0
7,5	0,65	2,06	1234,10	699,15	535,0											
7,5	0,46	2,70	1237,65	701,40	536,3											
7,5	0,62	2,96	1224,80	697,00	527,8											
% cap	0,58	2,57	1232,18	699,18	533,0	2,312	2,333	2,268	0,9	19,7	2,8	85,8	0,94	1182,17	1111,24	10,1
ESTABILIDADE		FLUÊNCIA		DENSIDADE		VAZIOS		VAM		RBV						
5,50	1180,8	5,5	9,1	5,50	2,257	5,5	5,9	5,5	18,2	5,5	67,7					
6,00	1180,8	6,0	5,8	6,00	2,258	6,0	5,2	6,0	18,6	6,0	72,2					
6,50	1154,6	6,5	7,1	6,50	2,277	6,5	3,7	6,5	18,4	6,5	79,7					
7,00	1148,0	7,0	11,0	7,00	2,276	7,0	3,1	7,0	18,9	7,0	83,6					
7,50	1111,2	7,5	10,1	7,50	2,268	7,5	2,8	7,5	19,7	7,5	85,8					

DOSAGEM MARSHALL

CURVAS PARA ESTUDO DE CONCRETO ASFÁLTICO

PROJETO MISTURA M3 - FINOS DE AREIA VERDE

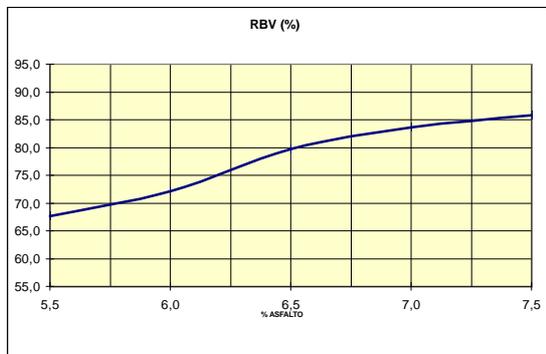
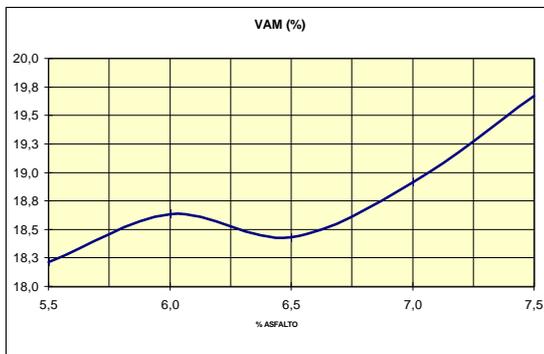
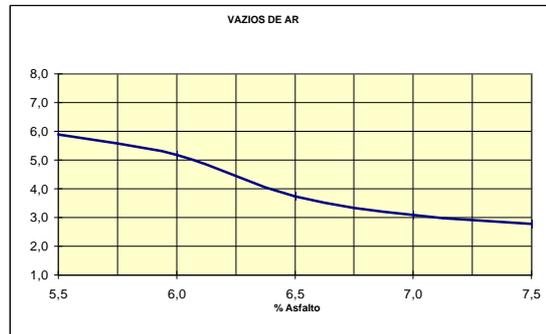
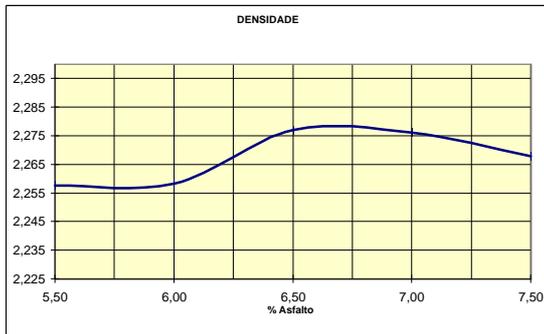
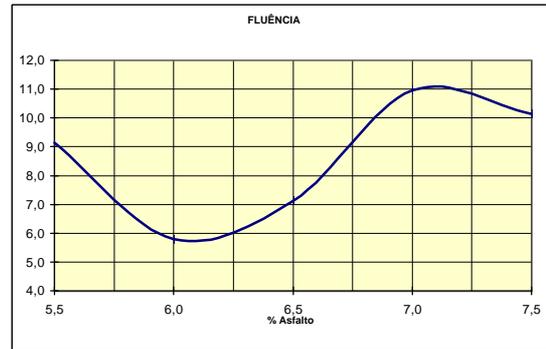
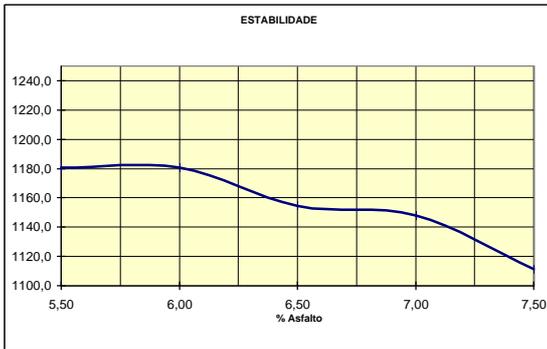
Trecho:

Subtrecho:

Serviço:

Data: 30/12/02

Especificação: FAIXA - DAER/RS **B**

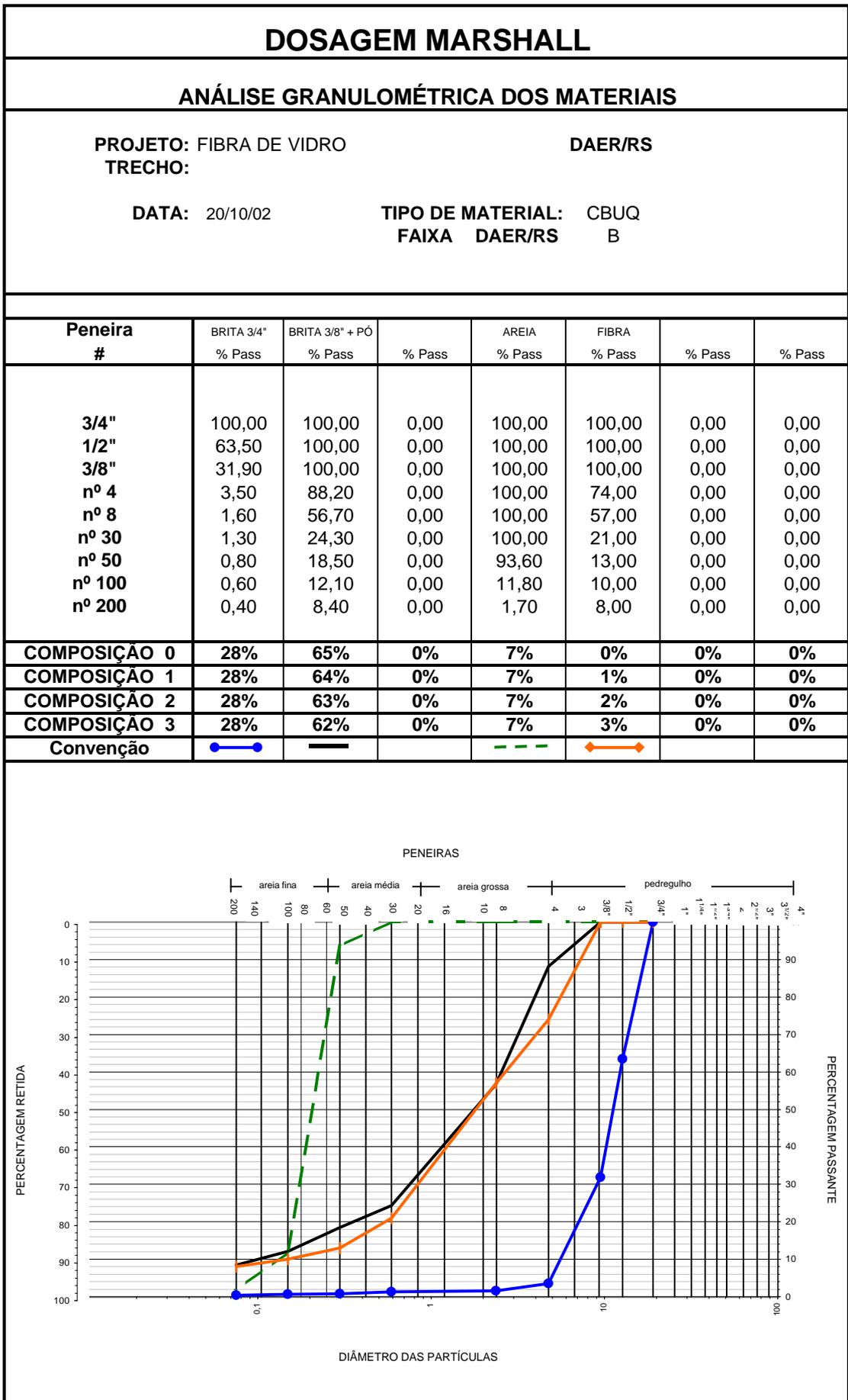


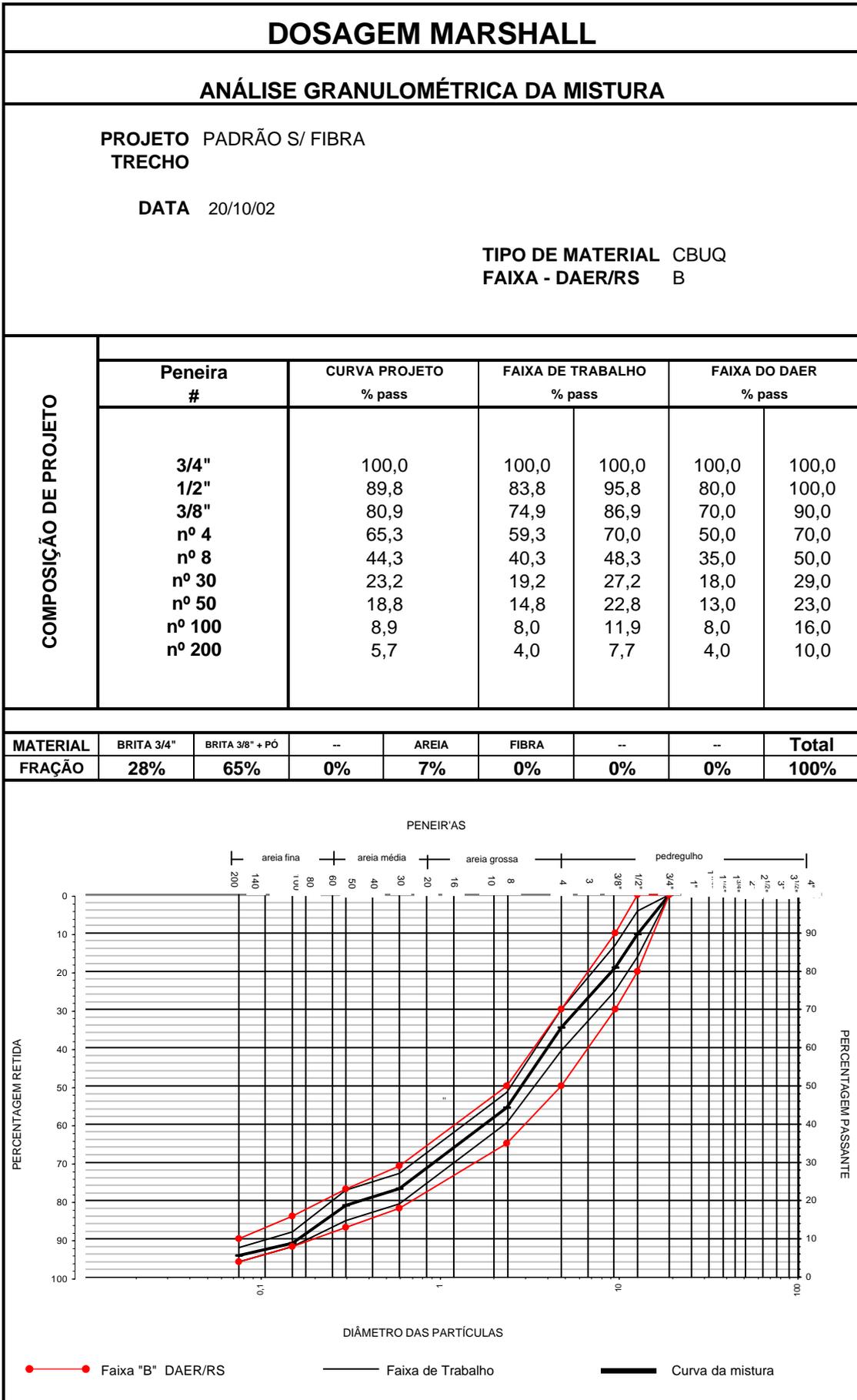
DOSAGEM MARSHALL						
Cálculo do Teor Ótimo - Cálculo dos Parâmetros Relativos						
PROJETO		MISTURA M3 - FINOS DE AREIA VERDE				
Trecho:						
Subtrecho:		Data:		30/12/02		
Serviço:		Especificação:		FAIXA - DAER/RS		
Valores Médios do Estudo Marshall						
Teor (%)	Dens. Apar. (Kg/m ³)	Índice Vazios (%)	Estabilidade	RBV	Fluência	VAM (%)
5,500	2,257	5,889	1.180,800	67,664	9,147	18,211
6,000	2,258	5,188	1.180,800	72,162	5,787	18,635
6,500	2,277	3,737	1.154,560	79,721	7,126	18,430
7,000	2,276	3,099	1.148,000	83,619	10,958	18,915
7,500	2,268	2,785	1.111,237	85,841	10,131	19,667
Cálculo do Teor Ótimo de Betume						
Valores limites						
Vazios	Teor		RBV	Teor		
3,0	7,154		75,0	6,183		
5,0	5,983		82,0	6,903		
Média	6,569		Média	6,543		
Teor Médio Calculado					6,556	
Teor Adotado					6,600	
Cálculo dos Parâmetros relativos ao Teor Ótimo de Betume						
Teor	Ótimo: 6,60	Limites: 6,50	a	7,00		
	Multiplicador: 1,00					
Densidade Aparente	Mínimo: 2,277	Máximo: 2,276	Diferença: 0,001	Calculado:	2,277	
Índice Vazios	Mínimo: 3,737	Máximo: 3,099	Diferença: 0,639	Calculado:	3,6	
Estabilidade	Mínimo: 1.154,560	Máximo: 1.148,000	Diferença: 6,560	Calculado:	1.153,2	
RBV	Mínimo: 79,721	Máximo: 83,619	Diferença: 3,898	Calculado:	80,5	
Fluência	Mínimo: 7,126	Máximo: 10,958	Diferença: 3,832	Calculado:	7,9	
VAM	Mínimo: 18,430	Máximo: 18,915	Diferença: 0,486	Calculado:	18,5	
Data: _____ Responsável Técnico _____						

ANEXO II

RELATÓRIO DE ENSAIO MARSHALL

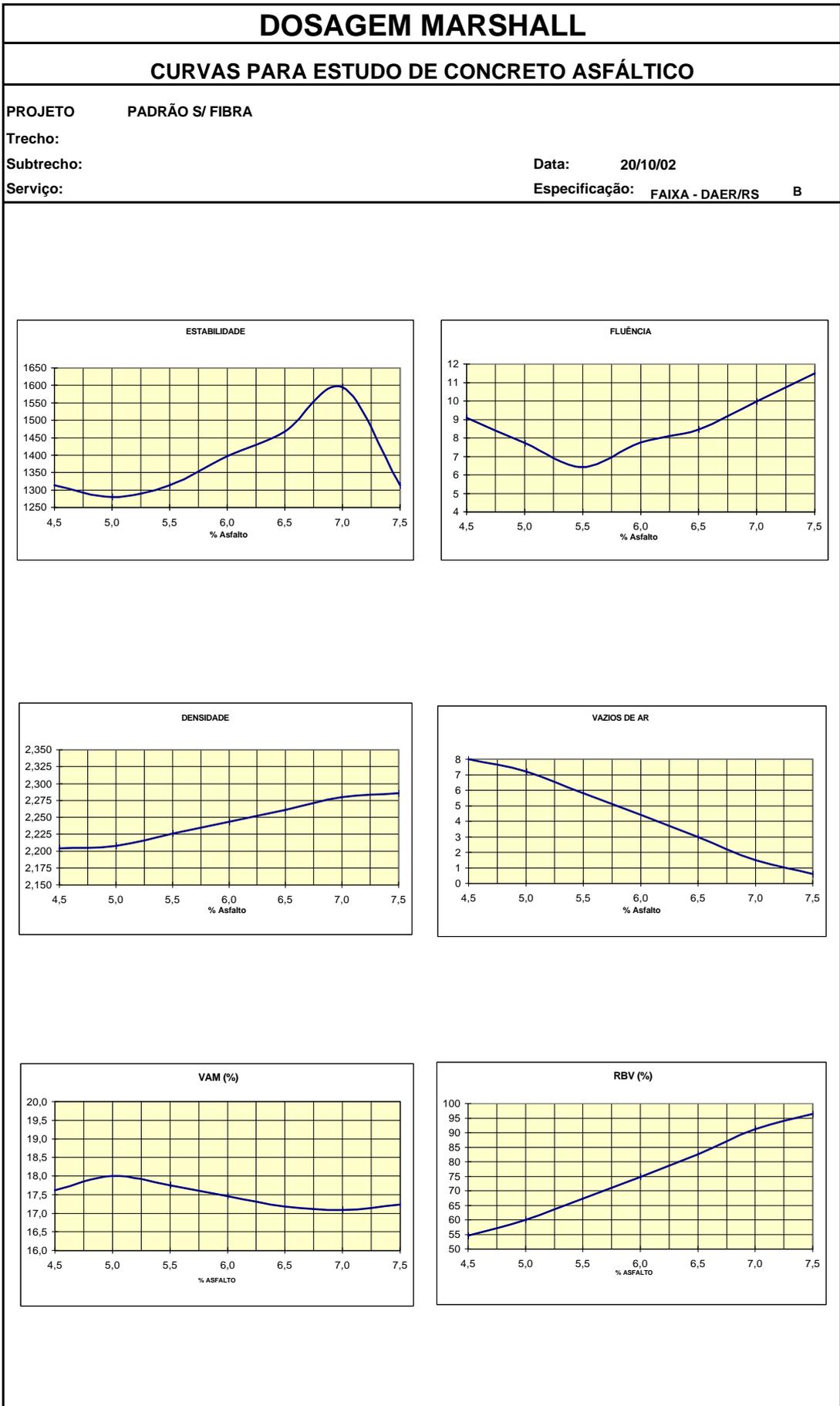
**Estudo da Incorporação de Laminados de Fibras de Vidro Descartadas
em Misturas Asfálticas**





RODOVIA TRECHO	PADRÃO S/ FIBRA	TIPO DE MATERIAL FAIXA - DAER/RS			CBUQ B
GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS					
#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA
3/4"	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00
1/2"	63,50	100,00	0,00	100,00	100,00
3/8"	31,90	100,00	0,00	100,00	100,00
4	3,50	88,20	0,00	100,00	74,00
8	1,60	56,70	0,00	100,00	57,00
30	1,30	24,30	0,00	100,00	21,00
50	0,80	18,50	0,00	93,60	13,00
100	0,60	12,10	0,00	11,80	10,00
200	0,40	8,40	0,00	1,70	8,00
COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA DA MISTURA					
#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA
	28%	65%	0%	7%	0%
3/4"	28,00	65,00	0,00	7,00	0,00
1/2"	17,78	65,00	0,00	7,00	0,00
3/8"	8,93	65,00	0,00	7,00	0,00
4	0,98	57,33	0,00	7,00	0,00
8	0,45	36,86	0,00	7,00	0,00
30	0,36	15,80	0,00	7,00	0,00
50	0,22	12,03	0,00	6,55	0,00
100	0,17	7,87	0,00	0,83	0,00
200	0,11	5,46	0,00	0,12	0,00
BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA	TOTAL
28,0%	65,0%	0,0%	7,0%	0,0%	100,0%
#	MISTURA	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA - DAER/RS - B		
3/4"	100,00	100,0	100,0	100,00	100,00
1/2"	89,78	83,8	95,8	80,00	100,00
3/8"	80,93	74,9	86,9	70,00	90,00
4	65,31	59,3	70,0	50,00	70,00
8	44,30	40,3	48,3	35,00	50,00
30	23,16	19,2	27,2	18,00	29,00
50	18,80	14,8	22,8	13,00	23,00
100	8,86	8,0	11,9	8,00	16,00
200	5,69	4,0	7,7	4,00	10,00
QUANTIDADE DOS MATERIAIS PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA - CP					
PESO MATL. GRANULAR CP (g) 1050			QUANT. DE CP: 21		
MATERIAL GRANULAR				LIGANTE ASFÁLTICO	
#	%RET	PESO (g)	TOTAL (g)	CAP20 %	PESO (g)
3/4"	0,00	0,00	0,00	4,5	49,48
1/2"	10,22	107,31	2253,51	5,0	55,26
3/8"	8,85	92,90	1950,98	5,5	61,11
4	15,62	164,03	3444,65	6,0	67,02
8	21,01	220,57	4632,04	6,5	72,99
30	21,14	222,01	4662,25	7,0	79,03
50	3,91	41,06	862,16	7,5	85,14
100	4,22	44,27	929,63	TOTAL (g)	917,60
200	2,46	25,84	542,65	Teores:	7
Pass 200	5,57	58,51	1228,63	Nº de CP	3
AREIA	7,00	73,50	1543,50	Teor para Pioneiro:	6,0%
FIBRA	0,00	0,00	0,00		
TOTAL	100,00	1050,00	22050,00	Peso CP Pio. (g)	1117,02
Equivalente de Areia >= 50%			Índice de Lamelaridade <= 40%		

DOSAGEM MARSHALL																
CÁLCULO DOS PARÂMETROS MARSHALL PARA CONCRETO BETUMINOSO																
GANTE ASFÁLTICO		PENEIRA		FRAÇÃO		AGREGADOS										
CLASS.	CAP-20	#	O %	D real	D apar.	absorção										
DENS.	1,027	RET. N° 10	58,00	2,699	2,509	2,8										
		PAS. N° 10	42,00	2,597	R=0,1 e A=0,9											
D_{real} mistura: 2,655				D_{ap} mistura: 2,545				D_{defet} mistura: 2,556				D_{defet} mistura: D_{real} mistura * R + D_{ap} mistura * A				
% cap	LEITURA		PESO		Volume (cm³)	DENSIDADES			VAZIOS			RBV	Valores Corrigidos			
	estabilidade	fluência	no ar	na água		D _{aparente}	D _{máx teórica}	D _{corrigida}	ar	agregado	ar corrigido		fc	carga	estabilidade	fluência
4,5	0,70	3,06	1100,60	601,40	499,2											
4,5	0,61	2,00	1066,90	578,50	488,4											
4,5	0,65	1,87	1099,20	599,10	500,1											
% cap	0,65	2,31	1088,90	593,00	495,9	2,196	2,396	2,204	8,3	17,6	8,0	54,6	1,00	1313,2	1313,2	9,1
5,0	0,63	2,47	1112,90	609,90	503,0											
5,0	0,67	1,62	1110,90	608,60	502,3											
5,0	0,61	1,81	1103,70	609,10	494,6											
% cap	0,64	1,97	1109,17	609,20	500,0	2,218	2,379	2,208	6,8	18,0	7,2	60,0	1,00	1279,7	1279,7	7,7
5,5	0,63	1,92	1110,00	612,40	497,6											
5,5	0,62	1,88	1108,80	610,10	498,7											
5,5	0,71	1,10	1111,50	615,90	495,6											
% cap	0,65	1,63	1110,10	612,80	497,3	2,232	2,363	2,226	5,5	17,8	5,8	67,3	1,00	1313,2	1313,2	6,4
6,0		1,72	1115,00	614,50	500,5											
6,0	0,71	2,64	1108,80	611,80	497,0											
6,0	0,68	1,55	1114,70	617,80	496,9											
% cap	0,70	1,97	1112,83	614,70	498,1	2,234	2,347	2,243	4,8	17,5	4,4	74,8	1,00	1397,0	1397,0	7,8
6,5		2,26	1112,80	615,20	497,6											
6,5	0,69	1,91	1123,80	623,30	500,5											
6,5	0,77	2,27	1121,70	620,30	501,4											
% cap	0,73	2,15	1119,43	619,60	499,8	2,240	2,331	2,261	3,9	17,2	3,0	82,5	1,00	1467,3	1467,3	8,5
7,0	0,81	2,54	1134,40	638,70	495,7											
7,0	0,81	2,91	1135,00	638,80	496,2											
7,0	0,76	2,14	1133,70	637,80	495,9											
% cap	0,79	2,53	1134,37	638,43	495,9	2,287	2,315	2,280	1,2	17,1	1,5	91,2	1,00	1594,6	1594,6	10,0
7,5	0,63	2,97	1141,10	639,30	501,8											
7,5	0,67	3,04	1141,20	639,60	501,6											
7,5	0,66	2,75	1137,00	639,40	497,6											
% cap	0,65	2,92	1139,77	639,43	500,3	2,278	2,299	2,286	0,9	17,2	0,6	96,5	1,00	1313,2	1313,2	11,5
ESTABILIDADE		FLUÊNCIA		DENSIDADE		VAZIOS		VAM		RBV						
4,50	1313,2	4,5	9,1	4,50	2,204	4,5	8,0	4,5	17,6	4,5	54,6					
5,00	1279,7	5,0	7,7	5,00	2,208	5,0	7,2	5,0	18,0	5,0	60,0					
5,50	1313,2	5,5	6,4	5,50	2,226	5,5	5,8	5,5	17,8	5,5	67,3					
6,00	1397,0	6,0	7,8	6,00	2,243	6,0	4,4	6,0	17,5	6,0	74,8					
6,50	1467,3	6,5	8,5	6,50	2,261	6,5	3,0	6,5	17,2	6,5	82,5					
7,00	1594,6	7,0	10,0	7,00	2,280	7,0	1,5	7,0	17,1	7,0	91,2					
7,50	1313,2	7,5	11,5	7,50	2,286	7,5	0,6	7,5	17,2	7,5	96,5					



DOSAGEM MARSHALL						
Cálculo do Teor Ótimo - Cálculo dos Parâmetros Relativos						
PROJETO	PADRÃO S/ FIBRA					
Trecho:						
Subtrecho:				Data:	20/10/02	
Serviço:				Especificação:	FAIXA - DAER/RS B	
Valores Médios do Estudo Marshall						
Teor	Dens. Apar.	Índice Vazios	Estabilidade	RBV	Fluência	VAM
(%)	(Kg/m ³)	(%)				(%)
4,500	2,204	8,000	1.313,200	54,601	9,094	17,621
5,000	2,208	7,200	1.279,700	60,002	7,743	18,001
5,500	2,226	5,800	1.313,200	67,332	6,430	17,755
6,000	2,243	4,400	1.396,950	74,787	7,756	17,452
6,500	2,261	3,000	1.467,300	82,533	8,451	17,175
7,000	2,280	1,500	1.594,600	91,223	9,961	17,090
7,500	2,286	0,600	1.313,200	96,519	11,496	17,236
Cálculo do Teor Ótimo de Betume						
Valores limites						
Vazios	Teor		RBV	Teor		
3,0	6,458		75,0	5,896		
5,0	5,674		82,0	6,395		
Média	6,066		Média	6,146		
Teor Médio Calculado					6,106	
Teor Adotado					6,100	
Cálculo dos Parâmetros relativos ao Teor Ótimo de Betume						
Teor	Ótimo:	6,10	Limites:	6,00	a	6,50
	Multiplicador: 1,00					
Densidade	Mínimo: 2,243			Calculado: 2,247		
Aparente	Máximo: 2,261					
	Diferença: 0,017					
Índice Vazios	Mínimo: 4,400			Calculado: 4,1		
	Máximo: 3,000					
	Diferença: 1,400					
Estabilidade	Mínimo: 1.396,950			Calculado: 1.411,0		
	Máximo: 1.467,300					
	Diferença: 70,350					
RBV	Mínimo: 74,787			Calculado: 76,3		
	Máximo: 82,533					
	Diferença: 7,745					
Fluência	Mínimo: 7,756			Calculado: 7,9		
	Máximo: 8,451					
	Diferença: 0,696					
VAM	Mínimo: 17,452			Calculado: 17,4		
	Máximo: 17,175					
	Diferença: 0,277					
Data: _____ Responsável Técnico _____						

DOSAGEM MARSHALL

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA MISTURA

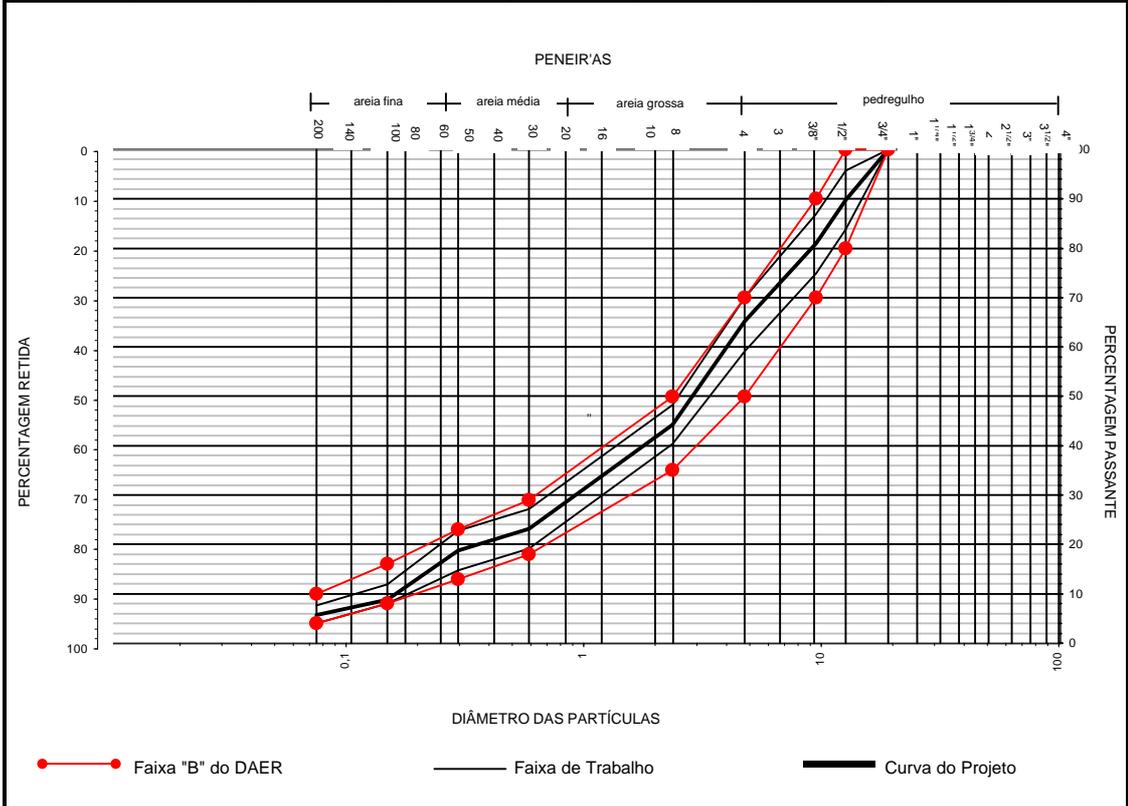
**PROJETO MISTURA 1 (1% FIBRA)
TRECHO**

DATA 20/10/02

TIPO DE MATERIAL CBUQ
FAIXA - DAER/RS B

COMPOSIÇÃO DE PROJETO	Peneira #	CURVA PROJETO % pass	FAIXA DE TRABALHO % pass		FAIXA DO DAER % pass	
	3/4"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	1/2"	89,8	83,8	95,8	80,0	100,0
	3/8"	80,9	74,9	86,9	70,0	90,0
	nº 4	65,2	59,2	70,0	50,0	70,0
	nº 8	44,3	40,3	48,3	35,0	50,0
	nº 30	23,1	19,1	27,1	18,0	29,0
	nº 50	18,7	14,7	22,7	13,0	23,0
	nº 100	8,8	8,0	11,8	8,0	16,0
	nº 200	5,7	4,0	7,7	4,0	10,0

MATERIAL	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	--	AREIA	FIBRA	--	--	Total
FRAÇÃO	28%	64%	0%	7%	1%	0%	0%	100%



RODOVIA
TRECHO

MISTURA 1 (1% FIBRA)

TIPO DE MATERIAL
FAIXA - DAER/RS

CBUQ
B

GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA
3/4"	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00
1/2"	63,50	100,00	0,00	100,00	100,00
3/8"	31,90	100,00	0,00	100,00	100,00
4	3,50	88,20	0,00	100,00	74,00
8	1,60	56,70	0,00	100,00	57,00
30	1,30	24,30	0,00	100,00	21,00
50	0,80	18,50	0,00	93,60	13,00
100	0,60	12,10	0,00	11,80	10,00
200	0,40	8,40	0,00	1,70	8,00

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA DA MISTURA

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA
	28%	64%	0%	7%	1%
3/4"	28,00	64,00	0,00	7,00	1,00
1/2"	17,78	64,00	0,00	7,00	1,00
3/8"	8,93	64,00	0,00	7,00	1,00
4	0,98	56,45	0,00	7,00	0,74
8	0,45	36,29	0,00	7,00	0,57
30	0,36	15,55	0,00	7,00	0,21
50	0,22	11,84	0,00	6,55	0,13
100	0,17	7,74	0,00	0,83	0,10
200	0,11	5,38	0,00	0,12	0,08
BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA	TOTAL
28,0%	64,0%	0,0%	7,0%	1,0%	100,0%

#	MISTURA	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA - DAER/RS - B
3/4"	100,00	100,0	100,0
1/2"	89,78	83,8	95,8
3/8"	80,93	74,9	86,9
4	65,17	59,2	70,0
8	44,31	40,3	48,3
30	23,13	19,1	27,1
50	18,75	14,7	22,7
100	8,84	8,0	11,8
200	5,69	4,0	7,7

QUANTIDADE DOS MATERIAIS PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA - CP

PESO MATL. GRANULAR CP (g) : 1050

QUANT. DE CP: 21

#	MATERIAL GRANULAR			LIGANTE ASFÁLTICO	
	%RET	PESO (g)	TOTAL (g)	CAP20 %	PESO (g)
3/4"	0,00	0,00	0,00	4,5	49,48
1/2"	10,22	107,31	2253,51	5,0	55,26
3/8"	8,85	92,90	1950,98	5,5	61,11
4	15,50	162,79	3418,63	6,0	67,02
8	20,69	217,27	4562,59	6,5	72,99
30	20,82	218,61	4590,81	7,0	79,03
50	3,85	40,45	849,37	7,5	85,14
100	4,15	43,60	915,52	TOTAL (g)	917,60
200	2,42	25,45	534,49	Teores:	7
Pass 200	5,49	57,62	1210,10	Nº de CP	3
AREIA	7,00	73,50	1543,50	Teor para	6,0%
FIBRA	1,00	10,50	220,50	Pioneiro:	
TOTAL	100,00	1050,00	22050,00	Peso CP Pio. (g)	1117,02

Equivalente de Areia >= 50%

Índice de Lamelalidade <= 40%

DOSAGEM MARSHALL																
CÁLCULO DOS PARÂMETROS MARSHALL PARA CONCRETO BETUMINOSO																
LIGANTE ASFÁLTICO			PENEIRA #		FRAÇÃO %		AGREGADOS			MISTURA 1 (1% FIBRA)						
CLASS.	CAP-20		RET. N° 10	58,00	2,699	2,509	2,8									
DENS.	1,027		PAS. N° 10	42,00	2,584	R=0,1 e A=0,9										
D _{real} mistura: 2,649			D _{ap} mistura: 2,540			D _{efet} mistura: 2,551			D _{efet} mistura: D _{real} mistura * R + D _{ap} mistura * A							
% cap	LEITURA		PESO		Volume (cm³)	DENSIDADES			VAZIOS			RBV	Valores Corrigidos			
	estabilidade	fluência	no ar	na água		D _{aparente}	D _{máx teórica}	D _{corrigida}	ar	agregado	ar _{corrigido}		fc	carga	estabilidade	fluência
4,5	0,48	3,28	1071,90	567,90	504,0											
4,5	0,58	2,84	1074,70	570,30	504,4											
4,5	0,48	3,26	1078,60	570,60	508,0											
% cap	0,51	3,13	1075,07	569,60	505,5	2,127	2,391	2,133	11,1	20,1	10,8	46,3	1,00	1031,8	1031,8	12,3
5,0	0,57	4,16	1085,60	584,10	501,5											
5,0	0,59	3,00	1087,70	584,90	502,8											
5,0	0,68	3,85	1082,60	580,10	502,5											
% cap	0,61	3,67	1085,30	583,03	502,3	2,161	2,375	2,152	9,0	19,9	9,4	52,8	1,00	1232,8	1232,8	14,4
5,4	0,58	3,47	1093,30	593,70	499,6											
5,4	0,63	3,16	1088,10	592,70	495,4											
5,4	0,55	3,98	1088,90	587,60	501,3											
% cap	0,59	3,54	1090,10	591,33	498,8	2,186	2,362	2,173	7,5	19,5	8,0	59,0	1,00	1179,2	1179,2	13,9
5,9	0,56	2,88	1102,30	599,10	503,2											
5,9	0,73	3,95	1089,40	592,20	497,2											
5,9	0,63	2,47	1102,00	599,30	502,7											
% cap	0,64	3,10	1097,90	596,87	501,0	2,191	2,346	2,200	6,6	18,8	6,2	67,0	1,00	1286,4	1286,4	12,2
6,4	0,69	2,16	1097,10	599,60	497,5											
6,4	0,70	2,30	1105,80	600,00	505,8											
6,4	0,67	1,99	1117,10	606,90	510,2											
6,4	0,84	2,17	1110,70	605,90	504,8											
6,4	0,88	2,52	1100,60	610,10	490,5											
6,4	0,63	1,77	1096,90	604,20	492,7											
% cap	0,74	2,15	1104,70	604,45	500,3	2,208	2,330	2,211	5,2	18,9	5,1	73,0	1,00	1477,4	1477,4	8,5
7,0	0,66	2,43	1107,90	611,90	496,0											
7,0	0,77	2,08	1102,90	609,80	493,1											
7,0	0,72	2,31	1102,90	610,90	492,0											
% cap	0,72	2,27	1104,57	610,87	493,7	2,237	2,311	2,242	3,2	18,2	3,0	83,6	1,00	1440,5	1440,5	9,0
7,5	0,78	3,15	1112,90	620,30	492,6											
7,5	0,70	2,65	1109,00	614,20	494,8											
7,5	0,81	3,95	1111,30	614,70	496,6											
% cap	0,76	3,25	1111,07	616,40	494,7	2,246	2,295	2,238	2,2	18,9	2,5	86,8	1,00	1534,3	1534,3	12,8
ESTABILIDADE																
FLUÊNCIA																
DENSIDADE																
VAZIOS																
VAM																
RBV																
4,50	1031,8	4,5	12,3	4,50	2,133	4,5	10,8	4,5	20,1	4,5	46,3					
5,00	1232,8	5,0	14,4	5,00	2,152	5,0	9,4	5,0	19,9	5,0	52,8					
5,40	1179,2	5,4	13,9	5,40	2,173	5,4	8,0	5,4	19,5	5,4	59,0					
5,90	1286,4	5,9	12,2	5,90	2,200	5,9	6,2	5,9	18,8	5,9	67,0					
6,40	1477,4	6,4	8,5	6,40	2,211	6,4	5,1	6,4	18,9	6,4	73,0					
7,00	1440,5	7,0	9,0	7,00	2,242	7,0	3,0	7,0	18,2	7,0	83,6					
7,50	1534,3	7,5	12,8	7,50	2,238	7,5	2,5	7,5	18,9	7,5	86,8					

DOSAGEM MARSHALL

CURVAS PARA ESTUDO DE CONCRETO ASFÁLTICO

PROJETO MISTURA 1 (1% FIBRA)

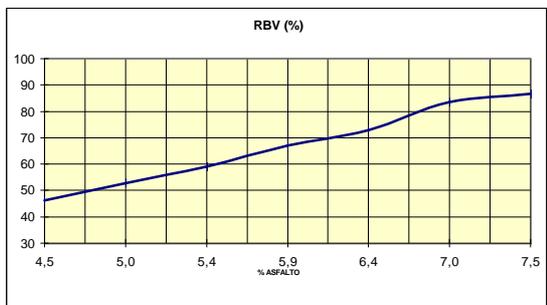
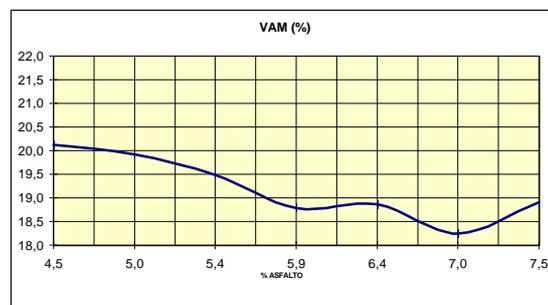
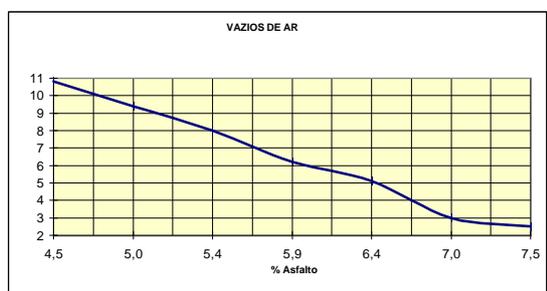
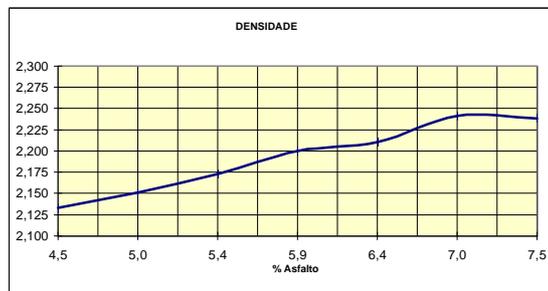
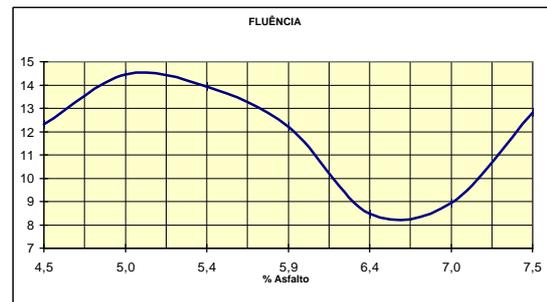
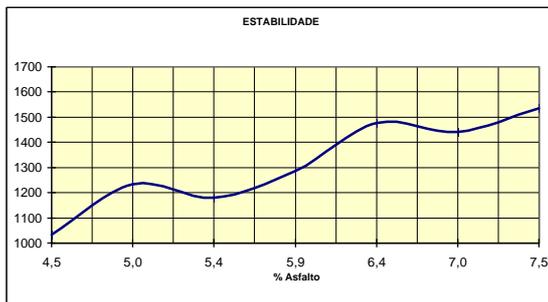
Trecho:

Subtrecho:

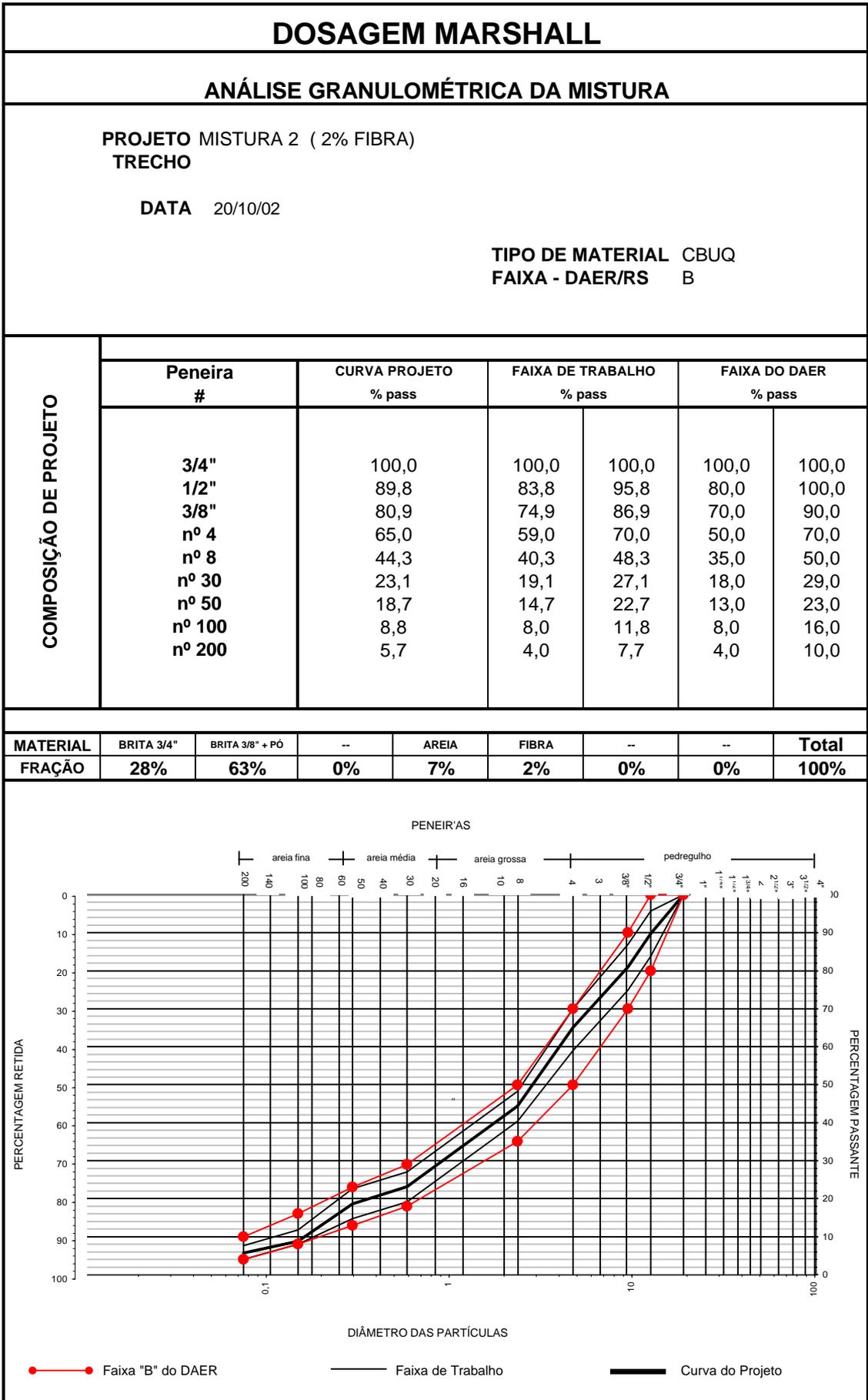
Serviço:

Data: 20/10/02

Especificação: FAIXA - DAER/RS B



DOSAGEM MARSHALL						
Cálculo do Teor Ótimo - Cálculo dos Parâmetros Relativos						
PROJETO	MISTURA 1 (1% FIBRA)					
Trecho:						
Subtrecho:				Data:	20/10/02	
Serviço:				Especificação:	FAIXA - DAER/RS	B
Valores Médios do Estudo Marshall						
Teor	Dens. Apar.	Índice Vazios	Estabilidade	RBV	Fluência	VAM
(%)	(Kg/m ³)	(%)				(%)
4,500	2,133	10,800	1.031,800	46,320	12,310	20,119
5,000	2,152	9,400	1.232,800	52,811	14,449	19,920
5,400	2,173	8,000	1.179,200	58,957	13,924	19,492
5,900	2,200	6,200	1.286,400	67,001	12,205	18,789
6,400	2,211	5,100	1.477,350	72,961	8,471	18,862
7,000	2,242	3,000	1.440,500	83,561	8,950	18,250
7,500	2,238	2,500	1.534,300	86,774	12,795	18,903
Cálculo do Teor Ótimo de Betume						
Valores limites						
Vazios	Teor		RBV	Teor		
3,0	7,167		75,0	6,471		
5,0	6,381		82,0	7,037		
Média	6,774		Média	6,754		
Teor Médio Calculado					6,764	
Teor Adotado					6,800	
Cálculo dos Parâmetros relativos ao Teor Ótimo de Betume						
Teor	Ótimo:	6,80	Limites:	6,40	a	7,00
Multiplicador: 3,00						
Densidade Aparente	Mínimo:	2,211			Calculado:	2,229
	Máximo:	2,242				
	Diferença:	0,031				
Índice Vazios	Mínimo:	5,100			Calculado:	3,8
	Máximo:	3,000				
	Diferença:	2,100				
Estabilidade	Mínimo:	1.477,350			Calculado:	1.455,2
	Máximo:	1.440,500				
	Diferença:	36,850				
RBV	Mínimo:	72,961			Calculado:	79,3
	Máximo:	83,561				
	Diferença:	10,600				
Fluência	Mínimo:	8,471			Calculado:	8,8
	Máximo:	8,950				
	Diferença:	0,479				
VAM	Mínimo:	18,862			Calculado:	18,5
	Máximo:	18,250				
	Diferença:	0,612				
<p>Data: _____</p> <p style="text-align: right;">Responsável Técnico _____</p>						



RODOVIA
TRECHO

MISTURA 2 (2% FIBRA)

TIPO DE MATERIAL
FAIXA - DAER/RS

CBUQ
B

GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA
3/4"	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00
1/2"	63,50	100,00	0,00	100,00	100,00
3/8"	31,90	100,00	0,00	100,00	100,00
4	3,50	88,20	0,00	100,00	74,00
8	1,60	56,70	0,00	100,00	57,00
30	1,30	24,30	0,00	100,00	21,00
50	0,80	18,50	0,00	93,60	13,00
100	0,60	12,10	0,00	11,80	10,00
200	0,40	8,40	0,00	1,70	8,00

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA DA MISTURA

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA
	28%	63%	0%	7%	2%
3/4"	28,00	63,00	0,00	7,00	2,00
1/2"	17,78	63,00	0,00	7,00	2,00
3/8"	8,93	63,00	0,00	7,00	2,00
4	0,98	55,57	0,00	7,00	1,48
8	0,45	35,72	0,00	7,00	1,14
30	0,36	15,31	0,00	7,00	0,42
50	0,22	11,66	0,00	6,55	0,26
100	0,17	7,62	0,00	0,83	0,20
200	0,11	5,29	0,00	0,12	0,16
BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA	TOTAL
28,0%	63,0%	0,0%	7,0%	2,0%	100,0%

#	MISTURA	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA - DAER/RS - B
3/4"	100,00	100,0	100,0
1/2"	89,78	83,8	95,8
3/8"	80,93	74,9	86,9
4	65,03	59,0	70,0
8	44,31	40,3	48,3
30	23,09	19,1	27,1
50	18,69	14,7	22,7
100	8,82	8,0	11,8
200	5,68	4,0	7,7

QUANTIDADE DOS MATERIAIS PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA - CP

PESO MATL. GRANULAR CP (g) : 1050

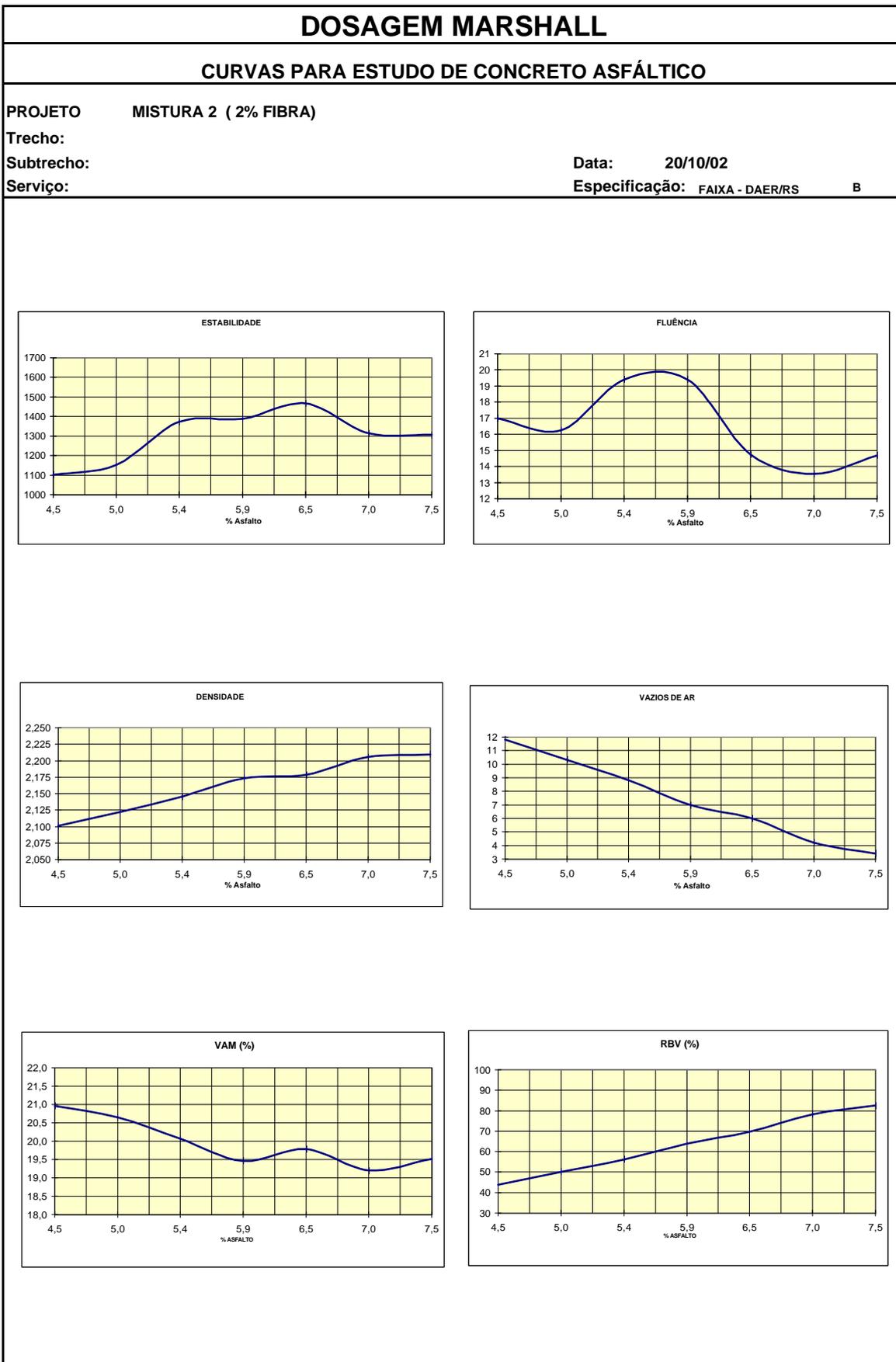
QUANT. DE CP: 21

#	MATERIAL GRANULAR			LIGANTE ASFÁLTICO	
	%RET	PESO (g)	TOTAL (g)	CAP20 %	PESO (g)
3/4"	0,00	0,00	0,00	4,5	49,48
1/2"	10,22	107,31	2253,51	5,0	55,26
3/8"	8,85	92,90	1950,98	5,5	61,11
4	15,39	161,55	3392,61	6,0	67,02
8	20,38	213,96	4493,13	6,5	72,99
30	20,50	215,21	4519,37	7,0	79,03
50	3,79	39,84	836,58	7,5	85,14
100	4,09	42,92	901,40	TOTAL (g)	917,60
200	2,39	25,06	526,33	Teores:	7
Pass 200	5,40	56,74	1191,58	Nº de CP	3
AREIA	7,00	73,50	1543,50	Teor para	6,0%
FIBRA	2,00	21,00	441,00	Pioneiro:	
TOTAL	100,00	1050,00	22050,00	Peso CP Pio. (g)	1117,02

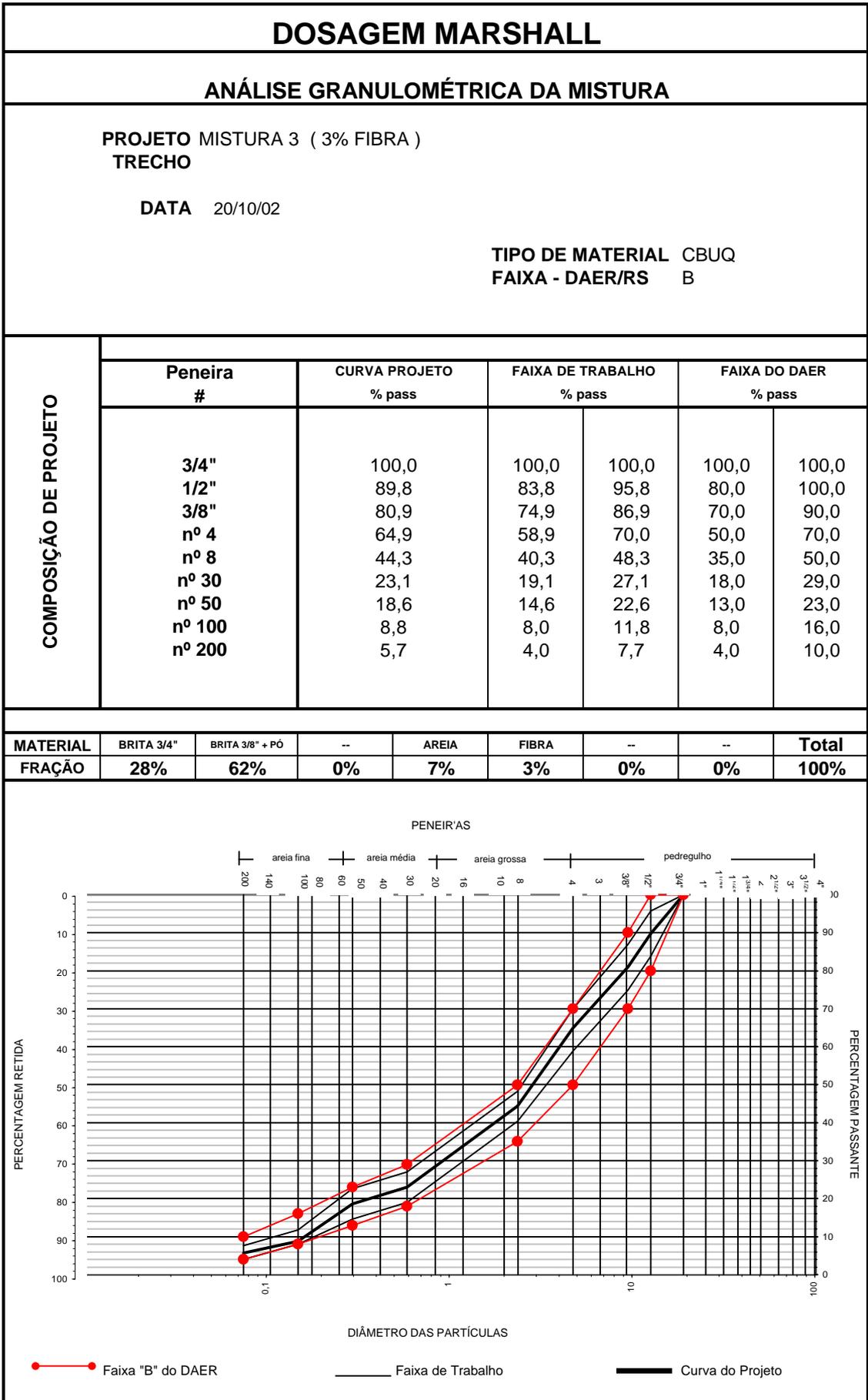
Equivalente de Areia >= 50%

Índice de Lamelalidade <= 40%

DOSAGEM MARSHALL																
CÁLCULO DOS PARÂMETROS MARSHALL PARA CONCRETO BETUMINOSO																
LIGANTE ASFÁLTICO		PENEIRA #		FRAÇÃO %		AGREGADOS			MISTURA 2 (2% FIBRA)							
CLASS.	CAP-20	RET. N° 10	58,00	D real	2,699	D apar.	2,509	absorção	2,8							
DENS.	1,027	PAS. N° 10	42,00	2,557		R=0,1 e A=0,9										
D _{real} mistura: 2,637			D _{ap} mistura: 2,529			D _{efet} mistura: 2,540			D _{efet} mistura: D _{real} mistura * R + D _{ap} mistura * A							
% cap	LEITURA		PESO		Volume (cm³)	DENSIDADES			VAZIOS			RBV	Valores Corrigidos			
	estabilidade	fluência	no ar	na água		D _{aparente}	D _{máx teórica}	D _{corrigida}	ar	agregado	ar _{corrigido}		fc	carga	estabilidade	fluência
4,5	0,58	4,60	1083,70	565,30	518,4											
4,5		3,97	1076,90	562,40	514,5											
4,5	0,56	4,39	1079,00	562,10	516,9											
% cap	0,57	4,32	1079,87	563,27	516,6	2,090	2,382	2,101	12,2	21,0	11,8	43,7	1,00	1101,8	1101,8	17,0
5,0	0,62	3,67	1087,80	576,40	511,4											
5,0	0,57		1087,20	575,30	511,9											
5,0	0,60	4,59	1089,50	576,10	513,4											
% cap	0,60	4,13	1088,17	575,93	512,2	2,124	2,366	2,122	10,2	20,6	10,3	50,1	1,00	1153,4	1153,4	16,3
5,4			1088,60	585,00	503,6											
5,4	0,75	4,88	1099,60	578,30	521,3											
5,4	0,67	4,98	1083,10	581,50	501,6											
% cap	0,71	4,93	1090,43	581,60	508,8	2,143	2,353	2,146	8,9	20,1	8,8	56,1	1,00	1372,4	1372,4	19,4
5,9	0,71	5,18	1097,70	593,30	504,4											
5,9	0,67	6,13	1090,00	585,00	505,0											
5,9		3,46	1117,00	602,10	514,9											
% cap	0,69	4,92	1101,57	593,47	508,1	2,168	2,337	2,173	7,2	19,5	7,0	64,0	1,04	1333,8	1387,1	19,4
6,4	0,66	6,27	1101,10	589,80	511,3											
6,4	0,68	4,86	1097,80	590,80	507,0											
6,4		2,23	1100,30	590,50	509,8											
6,5	0,79	2,72	1117,50	610,70	506,8											
6,5	0,78	3,26	1120,90	611,50	509,4											
6,5	0,74	3,14	1111,00	603,50	507,5											
% cap	0,73	3,75	1108,10	599,47	508,6	2,179	2,318	2,179	6,0	19,8	6,0	69,7	1,04	1411,1	1467,5	14,8
7,0	0,78	3,31	1124,80	617,20	507,6											
7,0	0,69	3,43	1122,80	613,00	509,8											
7,0	0,57	3,58	1127,20	611,30	515,9											
% cap	0,68	3,44	1124,93	613,83	511,1	2,201	2,302	2,206	4,4	19,2	4,2	78,1	1,00	1314,4	1314,4	13,5
7,5	0,66	4,51	1127,50	614,10	513,4											
7,5	0,73	4,07	1127,90	617,20	510,7											
7,5	0,64	2,60	1121,90	615,40	506,5											
% cap	0,68	3,73	1125,77	615,57	510,2	2,207	2,287	2,209	3,5	19,5	3,4	82,6	1,00	1308,0	1308,0	14,7
ESTABILIDADE		FLUÊNCIA		DENSIDADE		VAZIOS		VAM		RBV						
4,50	1101,8	4,5	17,0	4,50	2,101	4,5	11,8	4,5	21,0	4,5	43,7					
5,00	1153,4	5,0	16,3	5,00	2,122	5,0	10,3	5,0	20,6	5,0	50,1					
5,40	1372,4	5,4	19,4	5,40	2,146	5,4	8,8	5,4	20,1	5,4	56,1					
5,90	1387,1	5,9	19,4	5,90	2,173	5,9	7,0	5,9	19,5	5,9	64,0					
6,50	1467,5	6,5	14,8	6,50	2,179	6,5	6,0	6,5	19,8	6,5	69,7					
7,00	1314,4	7,0	13,5	7,00	2,206	7,0	4,2	7,0	19,2	7,0	78,1					
7,50	1308,0	7,5	14,7	7,50	2,209	7,5	3,4	7,5	19,5	7,5	82,6					



DOSAGEM MARSHALL						
Cálculo do Teor Ótimo - Cálculo dos Parâmetros Relativos						
PROJETO	MISTURA 2 (2% FIBRA)					
Trecho:						
Subtrecho:				Data:	20/10/02	
Serviço:				Especificação:	FAIXA - DAER/RS B	
Valores Médios do Estudo Marshall						
Teor	Dens. Apar.	Índice Vazios	Estabilidade	RBV	Fluência	VAM
(%)	(Kg/m3)	(%)				(%)
4,500	2,101	11,800	1.101,810	43,700	17,008	20,959
5,000	2,122	10,300	1.153,357	50,103	16,260	20,643
5,400	2,146	8,800	1.372,430	56,149	19,409	20,068
5,900	2,173	7,000	1.387,121	64,020	19,383	19,455
6,500	2,179	6,000	1.467,534	69,679	14,751	19,789
7,000	2,206	4,200	1.314,440	78,127	13,543	19,202
7,500	2,209	3,400	1.307,997	82,576	14,672	19,514
Cálculo do Teor Ótimo de Betume						
Valores limites						
Vazios	Teor		RBV	Teor		
3,0	7,618		75,0	6,821		
5,0	6,767		82,0	7,461		
Média	7,193		Média	7,141		
Teor Médio Calculado				7,167		
Teor Adotado				7,200		
Cálculo dos Parâmetros relativos ao Teor Ótimo de Betume						
Teor	Ótimo:	7,20	Limites:	7,00	a	7,50
	Multiplicador: 2,00					
Densidade	Mínimo: 2,206			Calculado: 2,206		
Aparente	Máximo: 2,206					
	Diferença: 0,000					
Índice Vazios	Mínimo: 4,200			Calculado: 3,9		
	Máximo: 3,400					
	Diferença: 0,800					
Estabilidade	Mínimo: 1.314,440			Calculado: 1.311,9		
	Máximo: 1.307,997					
	Diferença: 6,443					
RBV	Mínimo: 78,127			Calculado: 79,9		
	Máximo: 82,576					
	Diferença: 4,449					
Fluência	Mínimo: 13,543			Calculado: 14,0		
	Máximo: 14,672					
	Diferença: 1,129					
VAM	Mínimo: 19,202			Calculado: 19,3		
	Máximo: 19,514					
	Diferença: 0,312					
Data: _____ Responsável Técnico _____						



RODOVIA
TRECHO

MISTURA 3 (3% FIBRA)

TIPO DE MATERIAL
FAIXA - DAER/RS

CBUQ
B

GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA
3/4"	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00
1/2"	63,50	100,00	0,00	100,00	100,00
3/8"	31,90	100,00	0,00	100,00	100,00
4	3,50	88,20	0,00	100,00	74,00
8	1,60	56,70	0,00	100,00	57,00
30	1,30	24,30	0,00	100,00	21,00
50	0,80	18,50	0,00	93,60	13,00
100	0,60	12,10	0,00	11,80	10,00
200	0,40	8,40	0,00	1,70	8,00

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA DA MISTURA

#	BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA
	28%	62%	0%	7%	3%
3/4"	28,00	62,00	0,00	7,00	3,00
1/2"	17,78	62,00	0,00	7,00	3,00
3/8"	8,93	62,00	0,00	7,00	3,00
4	0,98	54,68	0,00	7,00	2,22
8	0,45	35,15	0,00	7,00	1,71
30	0,36	15,07	0,00	7,00	0,63
50	0,22	11,47	0,00	6,55	0,39
100	0,17	7,50	0,00	0,83	0,30
200	0,11	5,21	0,00	0,12	0,24
BRITA 3/4"	BRITA 3/8" + PÓ	0	AREIA	FIBRA	TOTAL
28,0%	62,0%	0,0%	7,0%	3,0%	100,0%

#	MISTURA	FAIXA DE TRABALHO	FAIXA - DAER/RS - B
3/4"	100,00	100,0	100,0
1/2"	89,78	83,8	95,8
3/8"	80,93	74,9	86,9
4	64,88	58,9	70,0
8	44,31	40,3	48,3
30	23,06	19,1	27,1
50	18,64	14,6	22,6
100	8,80	8,0	11,8
200	5,68	4,0	7,7

QUANTIDADE DOS MATERIAIS PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA - CP

PESO MATL. GRANULAR CP (g) : 1050

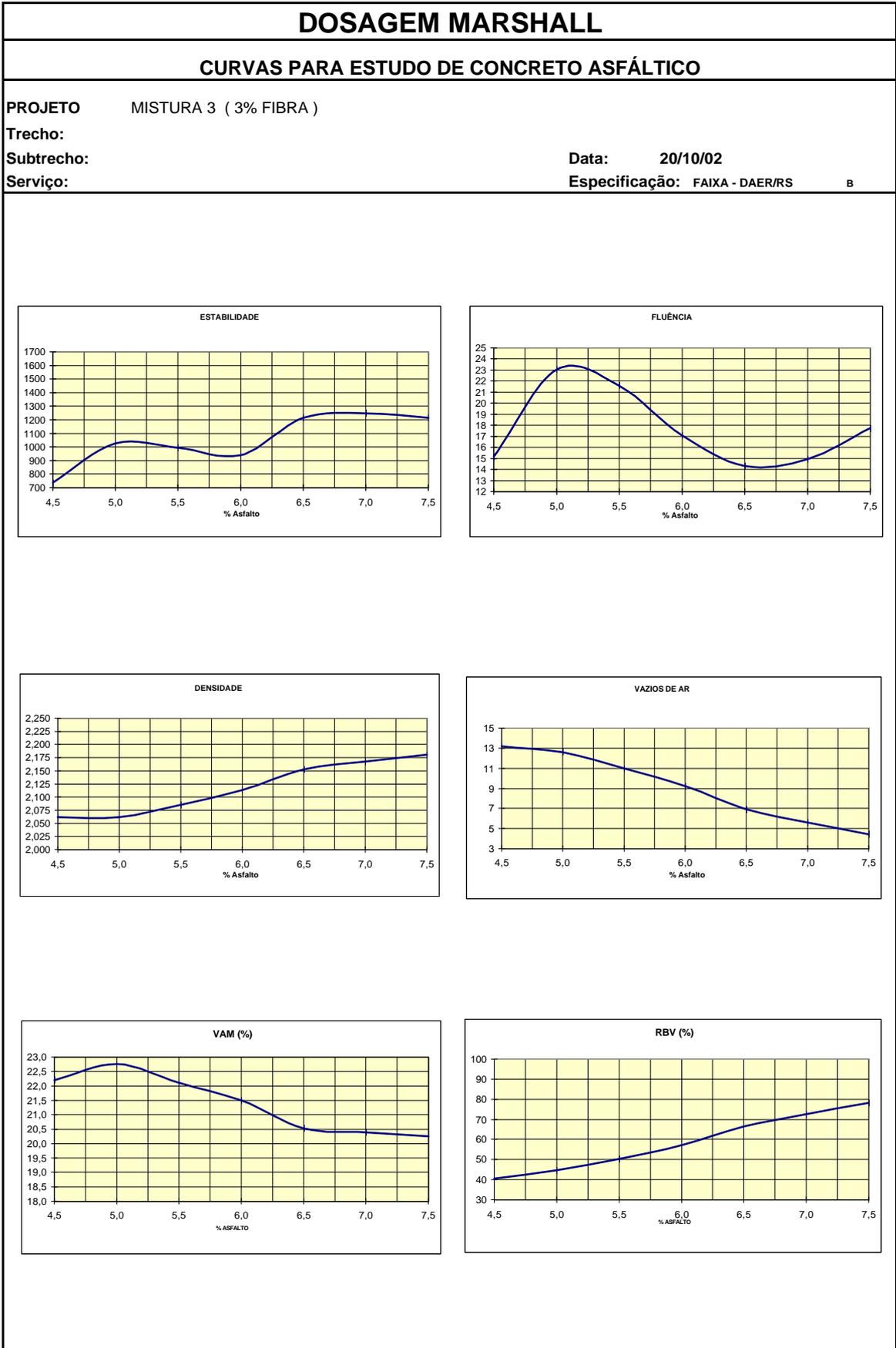
QUANT. DE CP: 21

#	MATERIAL GRANULAR			LIGANTE ASFÁLTICO	
	%RET	PESO (g)	TOTAL (g)	CAP20 %	PESO (g)
3/4"	0,00	0,00	0,00	4,5	49,48
1/2"	10,22	107,31	2253,51	5,0	55,26
3/8"	8,85	92,90	1950,98	5,5	61,11
4	15,27	160,31	3366,59	6,0	67,02
8	20,06	210,65	4423,67	6,5	72,99
30	20,17	211,81	4447,93	7,0	79,03
50	3,74	39,23	823,79	7,5	85,14
100	4,02	42,25	887,29	TOTAL (g)	917,60
200	2,35	24,68	518,18	Teores:	7
Pass 200	5,32	55,86	1173,06	Nº de CP	3
AREIA	7,00	73,50	1543,50	Teor para	6,0%
FIBRA	3,00	31,50	661,50	Pioneiro:	
TOTAL	100,00	1050,00	22050,00	Peso CP Pio. (g)	1117,02

Equivalente de Areia >= 50%

Índice de Lamelaridade <= 40%

DOSAGEM MARSHALL																
CÁLCULO DOS PARÂMETROS MARSHALL PARA CONCRETO BETUMINOSO																
LIGANTE ASFÁLTICO		PENEIRA #		FRAÇÃO %		AGREGADOS										
CLASS.	CAP-20	RET. N° 10	58,00	D real	2,699	D apar.	2,509	absorção	2,8							
DENS.	1,027	PAS. N° 10	42,00	2,538	R=0,1 e A=0,9											
D_{real} mistura: 2,629			D_{ap} mistura: 2,521			D_{efet} mistura: 2,532			D_{efet} mistura: D_{real} mistura * R + D_{ap} mistura * A							
% cap	LEITURA		PESO		Volume (cm³)	DENSIDADES			VAZIOS			RBV	Valores Corrigidos			
	estabilidade	fluência	no ar	na água		D _{aparente}	D _{máx teórica}	D _{corrigida}	ar	agregado	ar _{corrigido}		fc	carga	estabilidade	fluência
4,5	0,42	4,30	1037,70	530,80												
4,5	0,34	3,44	1036,60	535,70												
4,5	0,34	3,81	1034,10	528,80												
% cap	0,37	3,85	1036,13	531,77	504,4	2,054	2,375	2,062	13,5	22,2	13,2	40,5	1,04	708,8	737,1	15,2
5,0	0,38	3,81	1048,50	542,00												
5,0	0,58	7,19	1044,90	545,20												
5,0	0,57	6,55	1034,50	541,10												
% cap	0,51	5,85	1042,63	542,77	499,9	2,086	2,359	2,062	11,6	22,8	12,6	44,6	1,04	985,8	1025,3	23,0
5,5	0,51	6,32	1051,50	545,40												
5,5	0,51	4,98	1049,40	548,90												
5,5	0,46	5,13	1044,40	536,00												
% cap	0,49	5,48	1048,43	543,43	505,0	2,076	2,343	2,085	11,4	22,1	11,0	50,3	1,04	953,6	991,8	21,6
6,0	0,60	3,50	1050,80	565,20												
6,0	0,46	4,19	1053,60	550,30												
6,0	0,34	5,32	1057,40	544,70												
% cap	0,47	4,34	1053,93	553,40	500,5	2,106	2,327	2,113	9,5	21,5	9,2	57,2	1,04	902,1	938,1	17,1
6,5	0,75	3,06	1058,10	564,00												
6,5	0,64	3,89	1057,80	569,80												
6,5	0,64	3,51	1056,50	571,70												
6,5	0,49	3,86	1086,30	579,80												
6,5	0,56	3,74	1088,10	579,80												
6,5	0,55	3,78	1084,70	578,50												
% cap	0,61	3,64	1071,92	573,93	498,0	2,153	2,312	2,152	6,9	20,5	6,9	66,4	1,04	1169,5	1216,2	14,3
7,0	0,63	3,86	1094,40	592,30												
7,0	0,70	3,74	1087,90	587,90												
7,0	0,53	3,78	1092,00	584,30												
% cap	0,62	3,79	1091,43	588,17	503,3	2,169	2,296	2,168	5,6	20,4	5,6	72,5	1,04	1198,5	1246,4	14,9
7,5	0,64	4,49	1098,10	591,80												
7,5	0,63	4,46	1099,20	594,00												
7,5	0,54	4,56	1100,10	593,20												
% cap	0,60	4,50	1099,13	593,00	506,1	2,172	2,281	2,181	4,8	20,3	4,4	78,3	1,04	1166,2	1212,9	17,7
ESTABILIDADE		FLUÊNCIA		DENSIDADE		VAZIOS		VAM		RBV						
4,50	737,1	4,5	15,2	4,50	2,062	4,5	13,2	4,5	22,2	4,5	40,5					
5,00	1025,3	5,0	23,0	5,00	2,062	5,0	12,6	5,0	22,8	5,0	44,6					
5,50	991,8	5,5	21,6	5,50	2,085	5,5	11,0	5,5	22,1	5,5	50,3					
6,00	938,1	6,0	17,1	6,00	2,113	6,0	9,2	6,0	21,5	6,0	57,2					
6,50	1216,2	6,5	14,3	6,50	2,152	6,5	6,9	6,5	20,5	6,5	66,4					
7,00	1246,4	7,0	14,9	7,00	2,168	7,0	5,6	7,0	20,4	7,0	72,5					
7,50	1212,9	7,5	17,7	7,50	2,181	7,5	4,4	7,5	20,3	7,5	78,3					



DOSAGEM MARSHALL						
Cálculo do Teor Ótimo - Cálculo dos Parâmetros Relativos						
PROJETO	MISTURA 3 (3% FIBRA)					
Trecho:						
Subtrecho:		Data:	20/10/02			
Serviço:		Especificação:	FAIXA - DAER/RS			
Valores Médios do Estudo Marshall						
Teor	Dens. Apar.	Índice Vazios	Estabilidade	RBV	Fluência	VAM
(%)	(Kg/m3)	(%)				(%)
4,500	2,062	13,200	737,117	40,544	15,157	22,201
5,000	2,062	12,600	1.025,263	44,627	23,031	22,755
5,500	2,085	11,000	991,758	50,268	21,562	22,118
6,000	2,113	9,200	938,149	57,212	17,073	21,502
6,500	2,152	6,900	1.216,244	66,380	14,331	20,524
7,000	2,168	5,600	1.246,398	72,524	14,934	20,382
7,500	2,181	4,400	1.212,893	78,281	17,730	20,259
Cálculo do Teor Ótimo de Betume						
Valores limites						
Vazios	Teor		RBV	Teor		
3,0	8,093		75,0	7,284		
5,0	7,288		82,0	7,959		
Média	7,691		Média	7,622		
Teor Médio Calculado				7,657		
Teor Adotado				7,700		
Cálculo dos Parâmetros relativos ao Teor Ótimo de Betume						
Teor	Ótimo:	7,70	Limites:	7,50	a	8,00
Multiplicador: 2,00						
Densidade Aparente	Mínimo: 2,181		Máximo: 2,168		Calculado: 2,176	
	Diferença: 0,013					
Índice Vazios	Mínimo: 4,400		Máximo: 4,400		Calculado: 4,4	
	Diferença: 0,000					
Estabilidade	Mínimo: 1.212,893		Máximo: 1.212,893		Calculado: 1.212,9	
	Diferença: 0,000					
RBV	Mínimo: 78,281		Máximo: 78,281		Calculado: 78,3	
	Diferença: 0,000					
Fluência	Mínimo: 17,730		Máximo: 17,730		Calculado: 17,7	
	Diferença: 0,000					
VAM	Mínimo: 20,259		Máximo: 20,259		Calculado: 20,3	
	Diferença: 0,000					
Data: _____ Responsável Técnico _____						