RAFAEL MARÇAL MARTINS DE REIS

REVESTIMENTO ASFÁLTICO TIPO SMA PARA ALTO DESEMPENHO EM VIAS DE TRÁFEGO PESADO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

CONSULTA
FD-3088

SÃO PAULO
2002

RAFAEL MARÇAL MARTINS DE REIS

REVESTIMENTO ASFÁLTICO TIPO SMA PARA ALTO DESEMPENHO EM VIAS DE TRÁFEGO PESADO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora:
Prof.ª Livre-Docente, Mestre e Doutora
Liedi Bariani Bernucci

SÃO PAULO
2002

OK

FICHA CATALOGRÁFICA

Reis, Rafael Marçal Martins de
Revestimento asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado / Rafael Marçal Martins de Reis. -- São Paulo, 2002.
111 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Pavimentação asfáltica 2.Revestimento de superfícies 3.Polímeros (Aplicações) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

"Quando tudo estava dito e feito, o principal fator de unificação se poderia resumir no ditado: 'Todos os caminhos levam a Roma'. Os mais de 85 mil km de vias principais, formando a linha de avanço para o exército e o comércio, servindo como força de ligação entre raças e culturas e base essencial para o desenvolvimento das terras conquistadas, unificaram o Império Romano e, a longo prazo, criaram a Europa Moderna."

Roman Roads
Raymond Chevallier
University of California Press, 1976

AGRADECIMENTOS

À ORIENTADORA:

Prof.ª Dra. Liedi B. Bernucci, pelo incentivo e orientação ao longo do desenvolvimento da pós-graduação.

À IPIRANGA ASFALTOS:

Em especial ao Dr. Wellington S. Leal Sandim, Eng.º Nelson Roberto do Espírito Santo e Eng.º Paulo Sastre, pelo apoio e valioso tempo concedido para o meu aprimoramento técnico.

À ECOVIAS DOS IMIGRANTES E A EBEC ENGENHARIA:

Em especial ao Eng.º Paulo Rosa Machado Filho, Eng.º José Carlos Cassaniga e Dr. Dultevir Guerreiro V. de Melo pelo entusiasmo, empenho e suporte técnico na realização do trecho experimental.

AOS COLEGAS:

Eng.º Humberto Nascimento, por sua cooperação na execução do trecho experimental.

Eng.ª Márcia Aps pelo auxílio na revisão bibliográfica do tema.

À EQUIPE DO CDT DA IPIRANGA ASFALTOS:

Anelise Zanon, Emerson Maciel, Gláucia Bucheroni, Humberto Capellesso e Marcos Moreira pela execução dos ensaios de materiais, de misturas e pelo auxílio na confecção do trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de pesquisa laboratorial compreendendo projeto de dosagem, comportamento mecânico da mistura SMA (Stone Matrix Asphalt – Matriz Pétrea Asfáltica), bem como, aspectos executivos relacionados ao desenvolvimento de um trecho experimental em SMA para revestimento de pavimentos. Os resultados de laboratório obtidos mostram que o SMA é um revestimento asfáltico que pode apresentar bom desempenho sob cargas pesadas em climas quentes, pois estas misturas são muito resistentes à deformação permanente, mas preservam a flexibilidade como os concretos asfálticos densos. O SMA é uma solução bem conhecida para tráfego pesado na Europa e mais recentemente na América do Norte. O SMA também tem sido empregado para aumento de aderência em pista molhada e para redução de ruído.

Palavras chaves: SMA, matriz pétrea asfáltica, ligante asfáltico modificado por polímero SBS, deformação permanente, misturas asfálticas

ABSTRACT

This research presents laboratory test results of mixture design, mechanical behavior of SMA (Stone Matrix Asphalt), as well as some construction aspects regarding to development of Brazilian road trial section as a new bituminous surface course to pavement construction or maintenance.The laboratory results show that SMA can perform very well in hot climate under heavy load conditions due to the mixture to be very resistant against permanent deformation but still flexible like dense asphalt concrete. The SMA is a well Known solution for heavy traffic in Europe and, more recently, in North America. The SMA is also employed to increase the adherence in wet conditions and for noise reduction.

Keywords: SMA, stone matrix asphalt, SBS polymer modified asphalt binder, permanent deformation, asphalt mixtures.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO 01

1.1 Considerações Iniciais 01

1.2 Justificativa e Objetivo da Dissertação 03

1.3 Estrutura da Dissertação 05

2 REVISÃO DA LITERATURA 06

2.1 Aspectos Relacionados ao Desempenho dos Pavimentos 06

2.1.1 Desempenho Funcional 06

2.1.2 Desempenho Quanto à Segurança 07

2.1.3 Desempenho Estrutural 08

2.2 Principais Mecanismos de Degradação dos Pavimentos Flexíveis 08

2.2.1 Trincamento 08

2.2.2 Deformações Permanentes 09

2.2.3 Desagregações 10

2.3 Breve Histórico do SMA 11

2.4 Conceito e Princípio de Funcionamento do SMA 14

2.5 Características de Desempenho do SMA 18

2.5.1 Deformação Permanente e Qualidade de Rolamento 18

2.5.2 Trincamentos e Desagregações 19

2.5.3 Desempenho Quanto à Segurança 19

2.5.4 Redução de Ruído 20

3 PROJETO DE MISTURA SMA 22

3.1 Concepção do Projeto de Mistura 22

3.2 Seleção dos Componentes da Mistura 23

3.2.1 Seleção dos Agregados Minerais 23

3.2.2 Seleção do Material de Enchimento – Fíler 24

3.2.3 Seleção do Ligante Asfáltico 25

3.2.3.1 Cimentos Asfálticos de Petróleo – CAPs 25

3.2.3.2 Asfaltos Modificados por Polímeros – AMPs 26

3.2.4 Fibras 31

3.2.5 Aditivo Melhorador de Adesividade 31

3.3 Seleção da Graduação Ótima 31

3.4 Seleção do Teor Ótimo de Ligante Asfáltico 34

3.5 Avaliação da Resistência à Ação Deletéria da Água 36

3.6 Avaliação da Sensibilidade ao Escorrimento 37

3.7 Avaliação Mecânica Complementar 38

3.7.1 Avaliação da Resistência à Deformação Permanente 38

3.7.2 Avaliação da Resistência à Tração por Compressão Diametral 40

3.7.3 Avaliação do Módulo de Resiliência 41

3.8 Avaliação de Aderência 43

3.8.1 Pêndulo Britânico-SRT 43

3.8.2 Ensaio de Mancha de Areia 44

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL 47

4.1 Considerações Iniciais 47

4.2 Seleção do Ligante Asfáltico para a Mistura SMA 47

4.2.1 Procedência e Natureza Mineralógica dos Materiais 48

4.2.2 Caracterização, Massa Específica e Granulometria dos Agregados 48

4.2.3 Composição da Mistura Seca e Graduação do Traço 49

4.2.4 Ligante Asfáltico 51

4.2.5 Fibras 51

4.2.6 Estudo Marshall para os Ligantes Asfálticos 51

4.2.7 Composição Final da Mistura e Resultados do Projeto de Dosagem 56

4.2.8 Estudo de Comportamento da Mistura 57

4.2.8.1 Deformação Permanente em Trilhas de Roda 57

4.2.8.2 Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral 59

4.2.8.3 Resistência à Ação Deletéria da Água 61

4.2.8.4 Conclusão do Estudo de Comportamento da Mistura 62

4.3 Projeto de Dosagem da Mistura SMA para Execução de Trecho Experimental 62

4.3.1 Procedência e Natureza Mineralógica dos Materiais 62

4.3.2 Caracterização, Massa Específica e Granulometria dos agregados 63

4.3.3 Composição da Mistura Seca e Graduação do Traço 64

4.3.4 Ligante Asfáltico 66

4.3.5 Aditivo Melhorador de Adesividade 67

4.3.6 Fibras 67

4.3.7 Estudo Marshall para o Ligante Asfáltico 67

4.3.8 Composição Final da Mistura e Resultados do Projeto de Dosagem 69

4.3.9 Verificação do Teor Ótimo de Ligante e do Comportamento Mecânico da Mistura SMA 69

4.3.9.1 Verificação do Teor Ótimo de Ligante através do Simulador de Tráfego tipo LPC 70

4.3.9.2 Verificação do Comportamento Mecânico – Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral 72

4.4 Execução do SMA em Pista Experimental 74

4.4.1 Seleção do Trecho Experimental 75

4.4.2 Materiais Utilizados na Mistura SMA 76

4.4.2.1 Agregados 76

4.4.2.2 Ligantes Asfálticos e Aditivo Melhorador de Adesividade 77

4.4.2.3 Fibras 78

4.4.2.4 Fabricação da Massa Asfáltica 79

4.4.2.5 Armazenamento e Transporte da Massa Asfáltica 80

4.4.2.6 Aplicação da Massa Asfáltica 80

4.4.2.7 Controles Tecnológicos 84

4.4.3 Avaliação Preliminar das Características Relacionadas à Segurança do Usuário 86

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 88

5.1 Conclusões 88

5.2 Recomendações para Pesquisas Futuras 89

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 91

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1 Composição esquemática do SMA 15

Figura 2.2 Curvas granulométricas comparativas das misturas asfálticas 16

Figura 2.3 Perfis comparativos das misturas asfálticas 16

Figura 2.4 Diagrama dos componentes – SMA 17

Figura 3.1 Arranjo laboratorial para a "saturação" com água dos corpos de prova Marshall para futura avaliação da resistência à ação da água 37

Figura 3.2 Mesa compactadora tipo LPC do LTP/EPUSP, usada na moldagem de placas de misturas asfálticas de SMA 39

Figura 3.3 Equipamento simulador de tráfego tipo LPC, para estudo do Comportamento à deformação permanente, do LTP/EPUSP 39

Figura 3.4 Equipamento utilizado para ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral 40

Figura 3.5 Equipamento utilizado para ensaio de determinação do módulo de resiliência por compressão diametral do LTP/EPUSP 42

Figura 3.6 Pêndulo Britânico SRT 44

Figura 3.7 Equipamento necessário para o ensaio de mancha de areia 45

Figura 4.1 Curva granulométrica dos agregados 49

Figura 4.2 Componentes da mistura seca de SMA 49

Figura 4.3 Graduação de SMA estudado, enquadrado na faixa D-8 da comunidade européia 50

Figura 4.4 Gráfico de viscosidade x temperatura p/ os ligantes asfálticos 52

Figura 4.5 Estudo Marshall para o ligante asfáltico AMP-2 53

Figura 4.6 Estudo Marshall para o ligante asfáltico AMP-1 54

Figura 4.7 Estudo Marshall para o ligante asfáltico CAP-20 55

Figura 4.8 Misturadora de massa asfáltica instalada no LTP-EPUSP 57

Figura 4.9 Afundamentos em trilhas de roda no simulador de tráfego tipo LPC para misturas de SMA testadas com três diferentes ligantes asfálticos 58

Figura 4.10 Amostras cerradas da parte central das placas ensaiadas no simulador de tráfego tipo LPC para comparação visual entre afundamentos nas trilhas de roda 59

Figura 4.11 Valores de módulo de resiliência das misturas tipo SMA ensaiadas 61

Figura 4.12 Valores de resistência à tração por compressão diametral das misturas tipo SMA ensaiadas 61

Figura 4.13 Curva granulométrica dos agregados 64

Figura 4.14 Componentes da mistura seca de SMA 65

Figura 4.15 Graduação de SMA estudada, enquadrada na faixa D 11/S da Alemanha 66

Figura 4.16 Estudo Marshall para o ligante asfáltico AMP-2 68

Figura 4.17 Afundamentos em trilhas de roda para misturas de SMA testadas com quatro teores de ligante asfáltico 70

Figura 4.18 Amostras cerradas da parte central das placas ensaiadas no simulador de tráfego tipo LPC para comparação visual entre afundamentos nas trilhas de roda 71

Figura 4.19 Característica da textura superficial obtida com misturas asfálticas tipo SMA 72

Figura 4.20 Valores de módulo de resiliência das misturas tipo SMA ensaiadas 73

Figura 4.21 Valores de resistência à tração por compressão diametral das misturas tipo SMA ensaiadas 74

Figura 4.22 Detalhe do trecho experimental antes da execução do SMA 75

Figura 4.23 Usina gravimétrica utilizada na fabricação da mistura SMA 77

Figura 4.24 Execução da pintura de ligação 81

Figura 4.25 Detalhe do espalhamento e compactação da mistura SMA 82

Figura 4.26 Aspecto da espessura, macrotextura e matriz pétrea do revestimento SMA 83

Figura 4.27 Seção teste em SMA na Via Anchieta 83

Figura 4.28 Aspecto da macrotextura do trecho experimental, imediatamente após sua liberação ao tráfego 84

Figura 4.29 Afundamentos em trilhas de roda para as misturas SMA produzidas na usina e no laboratório 86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Composição média dos materiais nas misturas asfálticas 17

Tabela 3.1 Definição da fração de agregado graúdo 22

Tabela 3.2 Especificações para o CAP-classificação por viscosidade 25

Tabela 3.3 Especificações para o CAP – classificação por penetração 25

Tabela 3.4 Especificação do asfalto modificado por polímero SBS - Betuflex 29

Tabela 3.5 Especificação técnica para o cimento asfáltico modificado por polímero SBS (DNER-EM 396/99) 30

Tabela 3.6 Principais características para as fibras orgânicas (celulose) ou minerais para misturas SMA 31

Tabela 3.7 Faixas granulométricas – Alemanha 32

Tabela 3.8 Faixas granulométricas – Suécia 32

Tabela 3.9 Faixas granulométricas – Comunidade Européia 32

Tabela 3.10 Faixas granulométricas – Estados Unidos 33

Tabela 3.11 Tolerância para graduação da mistura SMA 34

Tabela 3.12 Especificação para mistura SMA (NAPA, 1999) 35

Tabela 3.13 Valor limite para o VRD proposto pelo "*Marshall Commitee*" 44

Tabela 3.14 Intervalos de valores e respectivos conceitos para as medidas de macrotextura (mancha de areia) 45

Tabela 4.1 Procedência e natureza mineralógica dos materiais 48

Tabela 4.2 Caracterização dos agregados 48

Tabela 4.3 Massa específica e granulometria dos agregados 48

Tabela 4.4 Composição da mistura seca 50

Tabela 4.5 Porcentagens de material passante nas peneiras para composição do traço de SMA 51

Tabela 4.6 Características dos ligantes asfálticos utilizados na pesquisa 51

Tabela 4.7 Temperatura de usinagem e compactação para o SMA 52

Tabela 4.8 Composição da mistura para quatro teores de ligante 52

Tabela 4.9 Composição final da mistura 56

Tabela 4.10 Resultados do projeto de dosagem 56

Tabela 4.11 Resultados da resistência à ação deletéria da água 63

Tabela 4.12 Procedência e natureza mineralógica dos materiais 64

Tabela 4.13 Caracterização dos agregados 63

Tabela 4.14 Massa específica e granulometria dos agregados 63

Tabela 4.15 Composição da mistura seca 65

Tabela 4.16 Porcentagens de material passante nas peneiras para composição do traço de SMA 65

Tabela 4.17 Característica do ligante asfáltico AMP-2 66

Tabela 4.18 Características do aditivo melhorador de adesividade 67

Tabela 4.19 Composição da mistura para quatro teores de ligante Asfáltico 68

Tabela 4.20 Composição final da mistura 69

Tabela 4.21 Resultados do projeto de dosagem 69

Tabela 4.22 Controle de qualidade da mistura SMA para o trecho experimental 85

Tabela 4.23 Ensaios para avaliação de aderência 87

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Ao longo das últimas cinco décadas, o modelo rodoviário brasileiro evoluiu tornando-se a principal forma de transporte do país. A lógica deste crescimento é simples de ser entendida: a indústria automotiva e de construção viária dependem uma da outra para gerar um ciclo virtuoso de desenvolvimento dos vários setores da economia.

O Brasil é o quarto país do mundo em termos de superfície territorial (8,5 milhões de quilômetros quadrados) e em número de veículos automotores (32 milhões de unidades), porém é um dos países que menos rodovias pavimentadas tem por área territorial dentre os que estão em desenvolvimento, o que faz ter custos de transportes expressivos e baixa competitividade no mercado mundial.

A análise das informações contidas no Anuário Estatístico (GEIPOT, 1999), revela que indústria nacional lançou, no período de 1995/1999, em média, 1,5 milhões unidades por ano, sendo 300 mil novos veículos comerciais que somados aos existentes dependem de forma exclusiva das boas condições mecânicas e de rolamento de nossa infra-estrutura rodoviária para a movimentação de 62% do volume de toda a carga transportada e 96% dos passageiros, representando operações que envolvem 70% do PIB brasileiro.

Desde a segunda metade da década de 50, quando as obras rodoviárias tiveram um grande incremento, recursos financeiros provenientes dos órgãos públicos e organismos internacionais vem sendo destinados a pavimentação e a manutenção da rede.

Estes investimentos resultaram em um patrimônio nacional avaliado em US$ 300 bilhões, e foram empregados na tentativa de reduzir as distâncias continentais do país e garantir condições adequadas de transporte frente ao crescimento da circulação de bens, serviços e de seus usuários, tornando incontestável a importância da preservação da qualidade da rodovia não só pelo valor patrimonial da infra-estrutura como, também, para sustentar o desenvolvimento sócio e econômico da nação.

Ainda segundo o GEIPOT, apesar deste esforço constituir-se no maior investimento público do país, a análise revela também, a precariedade quantitativa e qualitativa da rede rodoviária nacional, destacando principalmente, a condição em que se encontra a malha rodoviária municipal com a extensão de 1,45 milhões de quilômetros, equivalentes a 84% de todas as estradas brasileiras pavimentadas e não pavimentadas, dotada de pavimento em apenas 17 mil quilômetros, ou 1,2% de sua extensão total.

Estes dados, igualmente atestam a insuficiência de uma das maiores malhas rodoviárias do planeta, (considerando os três níveis: federal, estadual e municipal) com a extensão de 1,725 milhões de quilômetros, quando relacionada à extensão territorial brasileira e comparada a de outros países mais evoluídos e resolvidos quanto aos demais sistemas de transportes.

Apenas 9,5% da extensão total malha rodoviária brasileira são pavimentados (164 mil quilômetros), sendo que, em 1996, 85% destes pavimentos já apresentavam idade média construtiva bastante avançada, superior a 10 anos, estando em muitos casos no fim de sua vida útil.

Os investimentos públicos para o setor que em 1975 chegaram a representar 3,5% do PIB, diminuíram dramaticamente para cerca de 1% desde 1981. (BNDES, 1996).

Segundo a pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2001) é notória a crescente degradação das rodovias brasileiras. Foram avaliados 45,3 mil quilômetros e constataram que 68,8% das rodovias estão em mau estado.

Ainda, segundo o presidente da CNT – Clésio Andrade, os baixos resultados alcançados na avaliação demonstram que o governo tem investido três vezes menos do que deveria na conservação da malha. Os recursos destinados às estradas nos últimos cinco anos foram de R$ 1,5 bilhão, quando seriam necessários investimentos anuais na ordem R$ 1 a 4,5 bilhões para recuperar as estradas em condições de uso.

Com a demanda de tráfego e a idade dos pavimentos avançando, fica cada vez mais difícil reverter este quadro de deterioração, considerando o nível crescente das restrições orçamentárias destinadas à conservação / restauração, os problemas institucionais do setor e as constantes mudanças nas políticas rodoviárias. Além disso, sabe-se que as irregularidades aumentam mais rapidamente quando a manutenção é negligenciada, tornando as restaurações cada vez mais onerosas.

De acordo com a pesquisa do DNER (1998), uma rodovia em mau estado de conservação representa no custo total do transporte, além do aumento dos custos de manutenção da própria infra-estrutura, 58% a mais no consumo de combustível, 38% no custo operacional dos veículos, 38% no custo do frete, dobra o tempo de viagem e eleva o número de acidentes em 50%.

O mau estado de conservação das rodovias brasileiras tem forte influência no chamado "custo Brasil", que contribui para diminuir a competitividade de nossos produtos tanto no mercado interno como no exterior. A magnitude do problema pode ser exemplificada pelo fato de que só ano de 1993, a perda da safra de grãos atingiu 20% do total, ou seja 12 milhões de toneladas, que pela sua natureza, transcende uma análise puramente econômica de repasse de custos para os produtos.

Ainda segundo a mesma pesquisa do DNER, a má conservação de nossa malha rodoviária federal representa um gasto anual de R$ 1,7 bilhão, devido ao acréscimo nos custos operacionais; destaca-se ainda a perda de vidas humanas, que, em média, representam 78 mil pessoas/ano.

Soluções inovadoras de engenharia, baseadas em critérios técnico-econômicos racionais, contemplando pavimentos com maior ciclo de vida, que não requeiram intervenções freqüentes de elevado custo e que sejam seguros e confortáveis aos usuários da rodovia são imprescindíveis para que os escassos recursos dos órgãos públicos, hoje destinados prioritariamente a restauração pesada ou reconstrução, possam ser melhor empregados de forma planejada e sistêmica na conservação preventiva, ampliação da malha existente e, principalmente, na pavimentação da nossa rede municipal.

A pavimentação das estradas municipais / vicinais, além de ser econômica (permitindo executar mais com menos recursos financeiros), confere um papel extremamente relevante para o escoamento da produção das regiões onde se situam, interligando as fontes de produção com as áreas de consumo, promovendo a integração demográfica e territorial, elevando o nível de renda do setor primário, da saúde pública e, consequentemente, a qualidade de vida de seus beneficiários.

Além disso, a pavimentação facilita o acesso da população rural aos recursos instalados nas cidades, estimulando-a permanecer na sua origem, sem agravar as condições de infra-estrutura dos núcleos urbanos. A pavimentação das vias vicinais colaboraria a reverter os dados alarmantes revelados no Censo 2000, sobre a contínua evasão da população rural que, em 1991, representava 24,5% e em 2000 totaliza 18,8% da população brasileira, com uma redução relativa de 23,2%. (IBGE, 2000)

Portanto, devido à importância sócioeconômica para o desenvolvimento sustentável de várias regiões e o grande patrimônio público representado pelas estradas, cabe a engenharia rodoviária o grande desafio de inovar com tecnologias e formas de gerência que reduzam o custo total do transporte do país, garantindo a manutenção e o fornecimento de uma maior extensão de rodovias em boas condições para a sociedade.

1.2. Justificativa e Objetivo da Dissertação

O desenvolvimento da indústria automobilística tem implicações diretas no aumento do volume de tráfego, velocidade média dos veículos e da carga dos caminhões nas rodovias e vias urbanas brasileiras, muitas delas, obedecendo a conceitos funcionais e estruturais incompatíveis com as características operacionais e de desempenho apresentados pelos veículos modernos.

Devido ao clima tropical, diversas regiões brasileiras estão expostas a ocorrências constantes de chuvas, muitas vezes torrenciais, que, em conjunto com o incremento da frota nacional, também contribui para que haja no país um número bastante alto de acidentes rodoviários.

Na medida em que as intervenções no pavimento ou em novas construções, atendam aos requisitos de conforto ao usuário e alta segurança em pista molhada, minimizam-se os efeitos das condições climáticas, contribuindo para a redução das ocorrências de trânsito e a gravidade daquelas que não se pode evitar.

Além disso, a relação custo-benefício é um fator que exerce forte influência na escolha do revestimento asfáltico; a opção por uma alternativa de alta durabilidade e resistência, reduz os custos de manutenção e os custos de operação das vias durante os serviços de reparos e reabilitação.

A tecnologia de materiais asfálticos e de misturas evoluiu muito nestas últimas três décadas na Europa e na América do Norte. Para a camada de rolamento, vem crescendo a utilização em países desenvolvidos de misturas asfálticas mais resistentes e mais duráveis, sendo que algumas destas soluções envolvem o emprego de graduação descontínua, tal como o SMA (*Stone Matrix Asphalt* – Matriz Pétrea Asfáltica).

O SMA tem sido muito utilizado na Europa, em países como a Alemanha, a Bélgica, entre outros, e na América do Norte, nos Estados Unidos e no Canadá. Sua aplicação tem sido realizada principalmente em vias de tráfego intenso e/ou pesado e aeroportos, seja como camada de alta resistência e alta durabilidade, como para auxiliar na aderência em pista molhada, na diminuição efetiva do *spray* ou 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 principal objetivo desta pesquisa é disponibilizar à engenharia rodoviária uma nova tecnologia construtiva ou de manutenção asfáltica, durável e econômica, adaptada à realidade nacional, para melhorar as condições estruturais e de segurança aos usuários, principalmente para tráfego pesado e intenso em condições de pista úmida.

A partir da análise dos resultados da pesquisa laboratorial do projeto de dosagem e de comportamento mecânico, bem como dos dados experimentais de campo, espera-se comprovar o bom desempenho do revestimento asfáltico tipo SMA para correção das condições de superfície e reabilitação de pavimentos, sob cargas pesadas em climas quentes. Os resultados podem ser estendidos para revestimentos de pavimentos novos, atendendo as especificidades e recomendações para o projeto estrutural.

Em outras palavras, objetiva-se mostrar a particular resistência à deformação permanente, sem detrimento das propriedades de flexibilidade e de resistência à ação da água, características encontradas nos concretos asfálticos densos de boa qualidade, somadas a melhoria de suas características funcionais de conforto e de aderência pneu / pavimento.

1.3. Estrutura da Dissertação

O trabalho foi organizado em cinco capítulos que, a seguir, são descritos sucintamente.

O presente capítulo 1- *Introdução*, contém a importância nacional do tema da dissertação, a justificativa da necessidade de revestimentos asfálticos de maior durabilidade e de alta resistência, os objetivos a serem atingidos em função da potencialidade da técnica SMA, finalizando com a organização da estrutura da pesquisa.

O capítulo 2 – *Revisão da Literatura* contém aspectos relacionados ao desempenho e reabilitação dos pavimentos flexíveis, os principais mecanismos de deterioração dos mesmos, um breve histórico sobre o estado da arte do tema proposto, concepção e seu princípio de funcionamento, assim como as vantagens da técnica.

O capítulo 3 – *Projeto de Mistura SMA* contém a metodologia preconizada para o projeto, as características e especificações dos materiais, a descrição dos ensaios mandatórios e complementares, bem como, as especificações para o projeto de mistura SMA.

O capitulo 4 – *Análise Experimental* contém o programa de laboratório desenvolvido para a seleção do ligante asfáltico para a mistura SMA; o projeto de dosagem para a execução do trecho experimental; os principais aspectos executivos relacionados aos materiais, fabricação, armazenamento, transporte, aplicação e controles tecnológicos dos componentes e da mistura asfáltica, bem como, a avaliação preliminar das principais características relacionadas à segurança do usuário.

O capítulo 5 – *Conclusões e Recomendações* contém as conclusões da dissertação, recomendações para estudos futuros e sugestões para utilização desta nova solução de revestimento asfáltico no Brasil.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Aspectos Relacionados ao Desempenho dos Pavimentos

Os pavimentos não são perpétuos, mas concebidos para durarem um determinado período ou "ciclo de vida". O decréscimo da condição da superfície ou da serventia do pavimento ao longo do tempo é conhecida como desempenho.

Já o fenômeno que rege a mudança da condição funcional ou estrutural do pavimento é conhecido como deterioração, que se manifesta em geral na superfície do revestimento por meio dos defeitos.

Muitos fatores atuando isoladamente ou em conjunto podem afetar a taxa de deterioração de um pavimento, destacando-se: tráfego, clima, características dos materiais, espessura das camadas, características do sub-leito, fatores construtivos e de manutenção, drenagem, entre outros.

Segundo LU (1997), os asfaltos têm sido usados como revestimentos nos pavimentos flexíveis há mais de 100 anos; entretanto, há duas décadas, as estruturas destas rodovias feitas com ligante convencional têm deteriorado mais rapidamente do que era esperado devido ao aumento do tráfego, das cargas por eixo, da pressão dos pneus e ainda devido a uma manutenção ineficiente. As degradações sofridas se manifestam, principalmente sob a forma de severas deformações permanentes nas trilhas de roda, trincamentos precoces e a perda de materiais do revestimento asfáltico.

Segundo o DNER (1998), o entendimento dos mecanismos de deterioração e a observação dos defeitos, que afetam o desempenho funcional e estrutural de um pavimento é condição essencial para a identificação das causas, bem como para a escolha e programação da técnica mais adequada para sua reabilitação.

2.1.1. Desempenho Funcional

A avaliação de desempenho funcional determina qualitativamente as condições de rolamento. A irregularidade longitudinal é a grandeza física mensurável, direta ou indiretamente, na superfície do pavimento que melhor se correlaciona com o conceito de funcionalidade do pavimento ou de seu grau de serventia, estando diretamente relacionada ao conforto, segurança, custo operacional dos veículos, a velocidade de percurso e a economia das viagens.

A irregularidade depende de fatores endógenos e exógenos, ou seja, decorre de imperfeições de projeto, ou no processo executivo, ou ainda devido à atuação do tráfego, do clima, entre outros fatores.

Além do aumento dos custos operacionais dos veículos, a irregularidade acelera a deterioração do pavimento e exerce efeitos adversos sobre a drenagem de água na superfície, consequentemente, afetando as condições de desempenho e de segurança da rodovia.

2.1.2. Desempenho quanto à Segurança

A principal propriedade do pavimento no que diz respeito à segurança é a sua capacidade de proporcionar condições adequadas de aderência e atrito entre a sua superfície e os pneus dos veículos.

Praticamente todos os pavimentos apresentam níveis satisfatórios de aderência em condições de pista seca. A resistência à derrapagem se torna crítica sob efeito do aumento da velocidade dos veículos em condições de pista molhada e o uso de pneus inadequados para auxílio na expulsão d'água para facilitar o contato do pneu com a superfície da pista.

Quando os veículos se deslocam em baixas velocidades (até 50 km/h) a elevada textura superficial do agregado (microtextura) é a responsável pela aderência ou resistência à derrapagem. Para assegurar condições adequadas de microtextura, os agregados devem possuir elevada resistência ao polimento pela ação do tráfego.

Em velocidades mais altas, a ruptura do filme de água sobre a superfície se torna mais difícil em função do menor tempo de contato do pneu. Do ponto de vista da segurança, a rugosidade média da superfície (macrotextura) em conjunto com a declividade transversal do pavimento são os fatores preponderantes pela drenagem superficial, evitando que a espessura da lâmina de água reduza ou isole o contato do pneu com o pavimento (efeito de hidroplanagem).

Além disso, à noite, o borrifo e a reflexão da luz gerados pelo tráfego sobre o espelho de água na camada de rolamento reduzem consideravelmente, a visibilidade da sinalização horizontal e vertical. Para assegurar condições adequadas de drenabilidade, a macrotextura da superfície deve ser avaliada através do ensaio de mancha de areia.

Devido a sua macrotextura rugosa, os tratamentos superficiais são normalmente os revestimentos que apresentam excelentes condições de aderência em pista molhada, sob alta velocidade. São usualmente mais críticos os pavimentos de concreto de cimento Portland e as misturas betuminosas do tipo areia-asfalto, estando os concretos asfálticos em uma posição intermediária. Valem em cada caso, as condições particulares de

cada revestimento e a busca do projetista da melhor condição possível (DNER, 1998).

Uma vez que a microtextura dependente da natureza do agregado, suas vantagens, em termos de melhoria das condições de segurança, não são tão evidentes nos pavimentos flexíveis, devido a existência do ligante asfáltico envolvendo os agregados. Ao longo do tempo, o tráfego vai removendo esta película, melhorando as características de aderência em pista molhada, sob baixas velocidades.

A experiência com dados de aderência no Brasil ainda é bastante limitada, porém esta preocupação vem sendo cada vez maior em função do crescimento no número de acidentes rodoviários e dos custos de operação envolvidos nestas situações.

2.1.3. Desempenho Estrutural

A avaliação de desempenho estrutural determina o grau de integridade da estrutura do pavimento frente as suas solicitações, e a possível vida restante para o pavimento. Diagnosticam-se as causas das degradações através do amplo conhecimento do estado da superfície (tipos, severidade e intensidade dos defeitos), das características dos materiais e estruturais frente a ação do tráfego e às condições ambientais.

2.2. Principais Mecanismos de Degradação dos Pavimentos Flexíveis

Do ponto de vista estrutural, o trincamento, as deformações permanentes e as desagregações mecânicas são os principais defeitos que contribuem para a perda da qualidade do pavimento.

2.2.1. Trincamento

Os revestimentos asfálticos tendem a trincar ao longo de sua vida útil por ações combinadas do tráfego e das condições ambientais. A evolução do trincamento tem um impacto importante na progressão da irregularidade longitudinal, além de permitir a entrada de água no interior do pavimento, acelerando o processo de deterioração da infra-estrutura.

Para MOTTA & PINTO (1994), o trincamento dos materiais devido à fadiga, é proveniente dos efeitos cumulativos causados pela repetição das cargas e das conseqüentes deformações elásticas, sendo o principal mecanismo de ruptura dos pavimentos asfálticos no Brasil.

Este tipo de trincamento é caracterizado em sua fase final pelas trincas "couro de jacaré", geralmente presentes nas trilhas de roda.

Segundo o DNER (1998), principalmente, o acréscimo do teor e da viscosidade do ligante asfáltico resultam no aumento da vida de fadiga

(exceto para níveis acima do teor ótimo) dos revestimentos asfálticos delgados com espessuras inferiores a 5 cm.

Uma das razões do trincamento por envelhecimento é a oxidação do ligante sob ação do intemperismo. A velocidade em que ocorre este processo depende do seu tipo, espessura da película, qualidade (composição química), condições climáticas e do projeto de dosagem da mistura betuminosa.

Teores mais elevados de asfalto e baixa quantidade de vazios tem efeitos benéficos sobre a vida útil do revestimento, pois dificultam o processo de oxidação e promovem maior durabilidade.

Segundo CERATTI (1996), houve um aumento na vida de fadiga da ordem de 9 a 18 vezes para misturas densas com ligante modificado com 2 e 5% de polímero SBS, respectivamente, comparado às misturas densas convencionais.

O trincamento devido a redução brusca de temperatura é resultante da combinação da retração térmica e da alta rigidez do ligante betuminoso. Em essência, muito se assemelha ao processo de trincamento por envelhecimento.

Não se pode deixar de citar o trincamento por reflexão de trincas das bases, conhecido por trincamento de bloco, ocorrentes nas condições de bases cimentadas ou que contraíram por perda de umidade. Este trincamento reduz, da mesma forma que aquele por fadiga, a vida útil do pavimento.

2.2.2. Deformações Permanentes

As deformações permanentes representadas, principalmente, por afundamentos nas trilhas de roda e ondulações no revestimento asfáltico, são decorrentes da atuação de cargas elevadas de longa duração ou de intensa freqüência associadas a elevadas temperaturas.

Estes defeitos causam acréscimos na irregularidade longitudinal afetando a dinâmica das cargas, a qualidade de rolamento, o custo operacional dos veículos e, devido ao acúmulo de água, riscos à segurança dos usuários.

Em pavimentos com seção transversal exibindo pequena declividade e quando a profundidade nas trilhas de roda atinge cerca de 13 mm, criam-se condições para que o acúmulo de água na superfície seja suficiente para uma situação potencial de hidroplanagem (DNER, 1998).

Segundo BOULDIN & COLLINS (1992), em temperaturas elevadas (60°C) as propriedades mecânicas do ligante tem uma influência significativa na resistência à deformação permanente em misturas betuminosas a quente e

os asfaltos modificados com polímeros do tipo SBS apresentam maior resistência à deformação permanente quando comparados aos asfaltos convencionais.

Segundo CORTÉ et al., (1994), o tipo de asfalto interfere no melhoramento da resistência à deformação permanente de uma mistura asfáltica e o asfalto modificado com polímero SBS consegue melhorar a resistência à deformação permanente.

Segundo MOTTA & PINTO (1994), um dos principais mecanismos que determinam o fim da vida útil estrutural dos pavimento é a expressão da deformação permanente em forma de afundamento na trilha de roda.

Para CERATTI et al., (1996), as propriedades mecânicas dos ligantes asfálticos modificados tem mostrado um grande potencial para evitar deformações permanentes das misturas, podendo-se indicá-las como causa da melhora no desempenho das misturas estudadas por sua equipe.

Segundo MOTTA et al., (1996), "o afundamento na trilha de roda é resultante do somatório das deformações permanentes que ocorrem a cada passagem de um veículo, sendo cumulativo, podendo-se ter dois tipos nos pavimentos com revestimentos de misturas asfálticas: um resultante da contribuição de todas as camadas e subleito, e outro resultante da deformação exclusiva (ou preponderante) da própria mistura asfáltica; então, além das condições de tráfego e ambientais, também as propriedades da própria mistura asfáltica são de suma importância no entendimento do fenômeno e, consequentemente, no controle de sua ocorrência. A revisão dos métodos de dosagem das misturas asfálticas, bem como a adição de modificadores aos ligantes asfálticos, são algumas tentativas para melhorar o desempenho dos revestimentos asfálticos".

2.2.3. Desagregações

Segundo o DNER (1998), a desagregação pode ser definida como a perda do agregado superficial devido a fratura mecânica do filme do ligante (perda de coesão) ou pela perda de adesão entre o ligante e o agregado em presença de água.

A fratura mecânica ou coesiva da película de asfalto que envolve o agregado ocorre quando o ligante, devido ao aquecimento exagerado na usinagem ou oxidação durante sua vida de serviço (envelhecimento), torna-se muito duro e/ou o filme muito esbelto, frente à ação dos esforços horizontais e de sucção gerados pelo tráfego.

A perda de adesão entre o filme de ligante e a partícula de agregado, geralmente ocorre pela presença de água. Seu poder de molhar os agregados é bem maior que o dos cimentos asfálticos, promovendo o deslocamento da película de betume que recobre a superfície pétrea.

Segundo WHITEOAK (1990), a natureza dos agregados, principalmente do filer mineral, exerce uma considerável influência na adesão do ligante asfáltico. Os agregados ácidos ou eletronegativos (altamente silicosos) são hidrofílicos (granitos, gnaisses, quartzitos, etc.) e, portanto, mais suscetíveis à ação da água que os agregados básicos ou eletropositivos (basaltos, diabásicos, calcários, etc.).

Segundo BERNUCCI et al., (1999), uma maneira tradicionalmente eficaz de reduzir os efeitos combinados da água e do tráfego é aumentar a adesividade na interface ligante/agregado através do uso de melhoradores de adesividade, tais como: aditivos sólidos (cimento Portland ou cal hidratada) e aditivos líquidos a base de aminas de alto peso molecular.

A perda de adesão também pode ocorrer se o agregado estiver contaminado com pó. O uso de pedras limpas evita o isolamento da película de ligante asfáltico com a superfície do mineral.

Segundo VINHA (1975), além da estrutura química, mineralógica e da presença de pó, as características físicas da superfície como textura e porosidade do agregado são de fundamental importância no que se refere à adesividade do ligante betuminoso ao agregado.

2.3. Breve Histórico do SMA

O SMA – *Stone Matrix Asphalt* (ou Matriz Pétrea Asfáltica) foi concebido na Alemanha em 1968, quando foi aplicada uma capa de rolamento de apenas 2 cm de espessura, composta por 75% de agregados de 5 - 8 mm, 15% de material de 0 - 2 mm, 10% de fíler mineral e 7% de ligante betuminoso sob o peso total da mistura.

Para evitar o escorrimento, sobretudo do ligante asfáltico, uma vez que a mistura era aplicada em torno de 180°C, foram empregadas fibras orgânicas (de celulose) como aditivo estabilizador.

As fibras são utilizadas para evitar o escorrimento de parte da argamassa, rica em ligante asfáltico, do agregado graúdo durante a usinagem, estocagem, transporte e aplicação da mistura SMA. Se não empregadas, ou se forem utilizadas de forma / dosagem inadequada, provavelmente, pontos de exsudação e de segregação da mistura serão observados na pista.

As fibras comumente utilizadas na Europa e na América do Norte são as de celulose ou minerais, correspondendo a 0,3% em peso do total da mistura no caso europeu, e a 0,3 a 0,4% no norte-americano.
Do ponto de vista funcional, as fibras de celulose apresentam vantagens em relação as minerais, por serem totalmente inócuas à saúde e serem produzidas a partir de fontes renováveis.

As fibras de celulose podem ser fornecidas soltas ou em forma granular, podendo ou não ser impregnadas com ligante asfáltico. Se contiver betume, seu conteúdo deverá ser levado em consideração na determinação do teor ótimo de ligante na mistura SMA.

Considerando a produção inferior a 10000 toneladas, em usinas do tipo *Drum-Mixer* o emprego da fibra de celulose em forma granular, geralmente, se torna mais econômica por não necessitar de sistema de dosagem especial.

Segundo catálogo do produto da empresa distribuidora Ecofibras, as fibras de celulose em forma granular, já contendo ligante asfáltico, reduzem o tempo de pré-mistura a seco na usinagem com os agregados, resultando em maior produtividade e uniformidade da mistura SMA.

Segundo BROWN et al., (1994), a resistência ao escorrimento das misturas SMA são substancialmente afetadas pelo tipo de fíler mineral, quantidade de agregado menor que 4,75 mm (#4), conteúdo de ligante asfáltico e, principalmente pelo tipo e quantidade de fibras empregadas.

Em geral, as misturas com 0,3% de fibras de celulose ou mineral exibiram menor escorrimento. O estudo mostrou que o tipo de agregado não possui efeito significativo no escorrimento. Obviamente, a temperatura exerce o maior efeito, porém não foi avaliada neste estudo.

Decorrido mais de 30 anos, o excelente desempenho desta técnica em rodovias de tráfego pesado, provou ser uma solução eficaz para reduzir, principalmente, os afundamentos nas trilhas de roda e o desgaste da superfície causado pelo atrito entre o pneu e o revestimento.

Em 1984, a Alemanha publicou a primeira norma para o SMA e, então, sua utilização como camada de rolamento foi difundida e normatizada para vários países do continente Europeu.

Segundo dados publicados pela EAPA (1998), a Alemanha apresentava em 1996, mais de 100 milhões de metros quadrados construídos em SMA, seguida pela Espanha com 69 milhões, Suécia com 50 milhões, Holanda com 32 milhões e França com 18 milhões de metros quadrados.

As faixas granulométricas 0/8 mm e 0/11 mm da norma alemã são as mais empregadas neste país. A adoção do SMA vem sendo intensificada em outros países europeus, como na Bélgica, Holanda, Suíça, entre outros, dados os sucessos consagrados ao longo de mais de duas décadas.

Na Bélgica, a experiência tem se estendido com SMA na faixa cujo tamanho máximo do agregado é maior (0-16mm), com sucessos em vias de tráfego pesado e espessuras de cerca de 6 cm (Francken e Vanelstraete, 1995).

Em 1990, especialistas em pavimentos dos EUA visitaram cinco países da Europa. Um dos propósitos da missão técnica era a transferência e a implementação desta nova tecnologia na América do Norte.

Em 1991, segundo a *National Center Highway Research Program* - NCHRP, vários projetos e artigos técnicos foram publicados no Canadá e EUA relatando aspectos relacionados ao projeto de dosagem, aplicação e de desempenho do SMA (NCHRP, 1999).

Em 1993, vinte e um estados americanos executaram aproximadamente cinquenta e quatro projetos em SMA e estavam sendo planejados a execução de mais vinte (NAPA, 1994).

Em 1994 a *National Asphalt Pavement Association* – NAPA, publicou o primeiro documento , contendo informações gerais a respeito dos materiais, produção e aplicação do SMA (NAPA, 1999).

Em 1996, foi executado uma seção experimental em SMA na área urbana de Londres, Inglaterra. Os resultados iniciais indicaram um substancial aumento na aderência pneu / pavimento (SLATER, 1996).

Em 1997, duas experiências em Toronto, Canadá, sendo uma delas, um teste acelerado de durabilidade no circuito urbano da fórmula Indy, demonstraram a viabilidade técnica e econômica do SMA para o revestimento de vias urbanas (WOODMAN et al., 1997).

Neste mesmo ano, no mínimo vinte e oito estados americanos já tinham executado mais de cem projetos, totalizando cerca de três milhões de toneladas de SMA. A *National Center for Asphalt Technology* – NCAT em conjunto com *Federal Highway Administration* - FHWA, publicaram, um relatório desta pesquisa, atestando o bom comportamento do SMA em áreas sujeitas a alto volume de tráfego sendo o maior custo de construção amplamente compensado pelo aumento de seu desempenho (NAPA, 1999).

Em 1998, a NCAT desenvolveu e validou para a NCHRP, uma metodologia detalhando os procedimentos para o projeto de mistura, construção e controle de qualidade do SMA (NCHRP, 1999).

A partir de 1999, a Alemanha adotou o uso do SMA para rodovias de tráfego pesado em substituição ao concreto asfáltico de granulometria densa (ZTV Asphalt – StB 94, 1998).

Portanto, desde o início da década de 90, o SMA é muito popular na América do Norte e na Europa (SCHMIEDLIN, 1999; WOODMAN et al., 1997, EMERY et al., 1996).

O emprego desta tecnologia, também, foi estendido para o México com sucesso (PERDRAZA, 1999).

Recentemente uma experiência pioneira foi realizada na Argentina, nas faixas 0/11 mm e 0/19 mm, em auto-estrada nas proximidades de Buenos Aires (BOLZAN, 2000).

Outra experiência de sucesso relatada do SMA foi realizada na China, no aeroporto de Pequim (XIN, 1998). Nesta experiência, o SMA foi comparado com um CBUQ e um OGFC (*open graded friction course* – camada porosa de atrito), tendo o SMA apresentado melhor comportamento em todos os requisitos estruturais, de durabilidade, sendo seu desempenho similar ao OGFC quanto ao caráter funcional.

Em 2000, a mistura asfáltica SMA foi utilizada nos serviços de recapeamento do Audódromo de Interlagos – SP para a realização da etapa Brasil do circuito da Fórmula I (BELIGNI et al., 2000).

Em 2001, também no Brasil, foi realizada uma aplicação pioneira em rodovia de alto tráfego no estado de S. Paulo, com o objetivo de avaliar o desempenho do revestimento SMA, cujo projeto de dosagem e análise preliminar da seção experimental é um dos objetivos da presente dissertação.

As experiências com o SMA tem mostrado de forma geral que se trata de um revestimento de alto desempenho estrutural e funcional. Os relatos sobre insucessos 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.

2.4. Conceito e Princípio de Funcionamento do SMA

O SMA (*Stone Matrix Asphalt* – Matriz Pétrea Asfáltica) é um revestimento asfáltico a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão e a resistência à ação do tráfego; a mistura se caracteriza por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos, geralmente, 70-80% maiores que 4,75 mm. Devido a esta 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. A fração areia é constituída essencialmente de material britado na fração areia.

Para garantir a durabilidade do SMA (impermeabilidade e coesão), o conteúdo final de vazios com ar da mistura deve estar compreendido entre 3 a 6%. – Figura 2.1.

As fibras são geralmente orgânicas (de celulose) ou minerais, e são adicionadas durante a usinagem para evitar a segregação da mistura em seu transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento, principalmente, do ligante asfáltico.

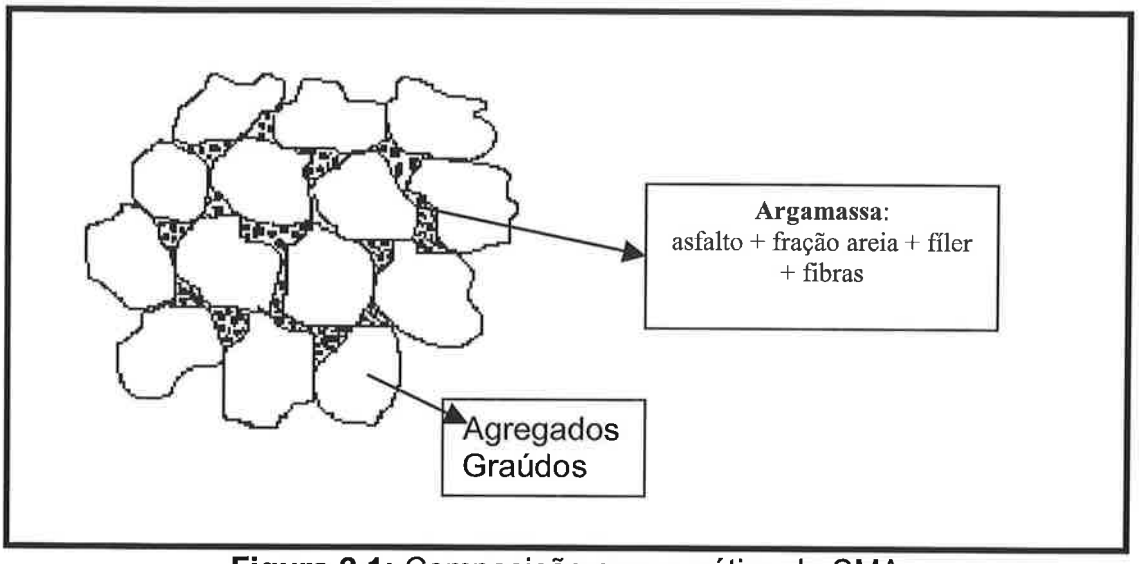

Figura 2.1: Composição esquemática do SMA

O SMA é uma mistura rica em ligante asfáltico devido sua constituição granulométrica particular, com um consumo de ligante em geral, entre 6 e 7%.

Um maior teor ótimo de ligante na mistura , proporciona maior espessura do filme de betume que recobre o agregado, incrementando a resistência do revestimento à fadiga, desgaste e ao envelhecimento (WHITEOAK 1990).

Para aumentar o ciclo de vida do pavimento, (menor deformação permanente, menor desgaste superficial e maior vida de fadiga), tem sido empregado ligante asfáltico modificado por polímero (EAPA, 1998).

A principal diferença entre a mistura SMA e o concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ convencional é a descontinuidade da curva granulométrica resultando em maior volume de vazios no agregado mineral (VAM) – Figura 2.2. e Tabela 2.1. A figura compara também o SMA, com outra alternativa de revestimento para a questão funcional – a CPA, Camada Porosa de Atrito.

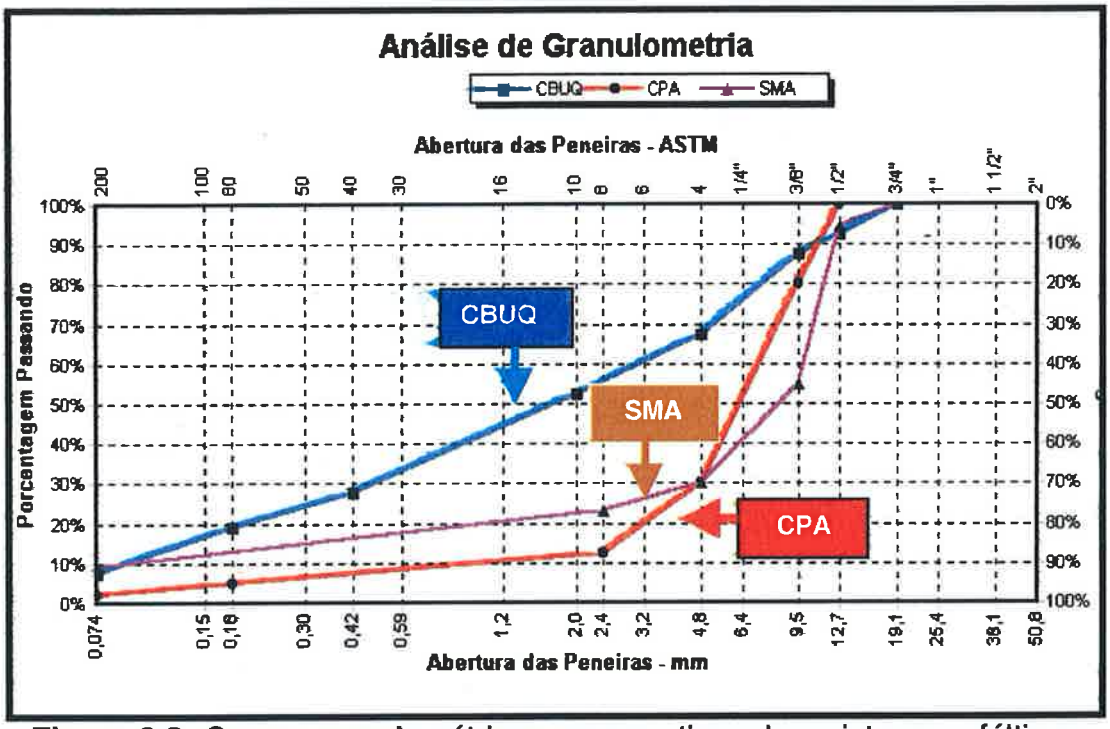

Figura 2.2: Curvas granulométricas comparativas das misturas asfálticas

Do ponto de vista volumétrico, os agregados graúdos do SMA representam o resistente esqueleto mineral da estrutura, semelhante a camada porosa de atrito – CPA. A diferença básica é que a mistura CPA necessita um menor conteúdo de argamassa para preencher seus vazios, permanecendo um volume residual de vazios com ar, em média, de 20%. - Figura 2.3 e Tabela 2.1.

No SMA a condição para se garantir um elevado atrito interno da mistura é satisfeita quando o volume de vazios da fração de agregado graúdo (VCAdrc) é maior que o volume da argamassa, permanecendo um volume residual de vazios com ar, em média, entre 3% a 4%.

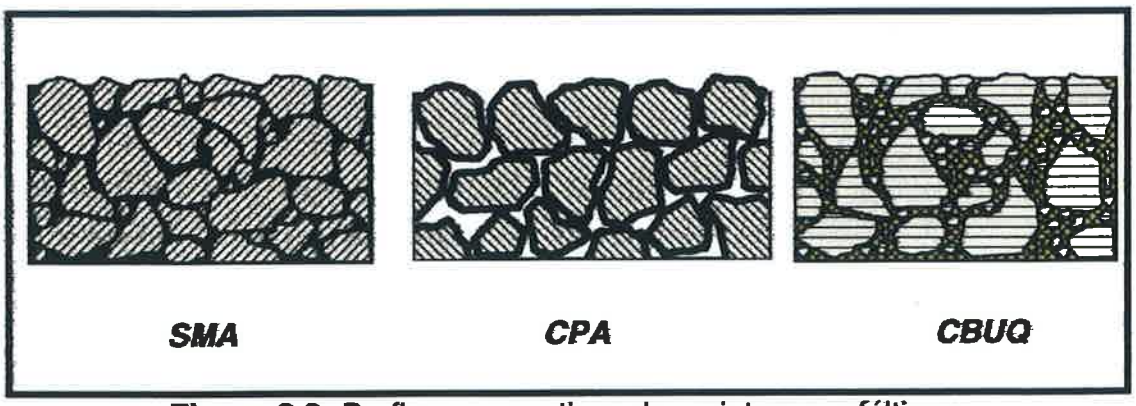

Figura 2.3: Perfis comparativos das misturas asfálticas

Do ponto de vista ponderal, a Tabela 2.1, exemplifica uma composição média dos componentes destas misturas asfálticas.

Tabela 2.1: Composição média dos materiais nas misturas asfálticas

MATERIAIS	SMA 0/11	CPA 0/11	CBUQ 0/11
Agregado graúdo > 4,75mm, (%p/p)	70 – 80	70 – 90	45 – 55
Agregado Fino < 4,75mm, (%p/p)	20 –30	10 – 30	45 – 55
Filer mineral, < 0,075mm, (%p/p)	8 – 13	2 – 5	5 – 10
Ligante Asfáltico, (%, p/p)	6 –7	4 – 5	5 – 6
Fibras, (% p/p)	0,3 – 1,0	---	---
Vazios na mistura, (%v/v)	3 – 4	18 – 25	3 – 5

Alguns conceitos e requisitos volumétricas do SMA, a seguir descritos, não são usualmente empregados para outras misturas asfálticas e são obtidos através de relações matemáticas (massa / volume) definidos, segundo os diagramas de componentes de amostras compactadas, conforme apresentado na Figura 2.4:

- O valor de VCAdrc é obtido, considerando apenas o volume de ar, quando somente a fração de agregado graúdo é compactada;
- O valor de VCAmix é obtido, considerando todos os componentes da mistura, exceto o agregado graúdo;
- O valor de VAM é obtido, considerando todos os componentes da mistura, exceto os agregados (graúdo e fino), expresso em percentagem do volume total do corpo de prova compactado;
- Os valores de VCAmix e VAM são obtidos, considerando o ligante asfáltico absorvido pelo agregado como parte integrante do mesmo.

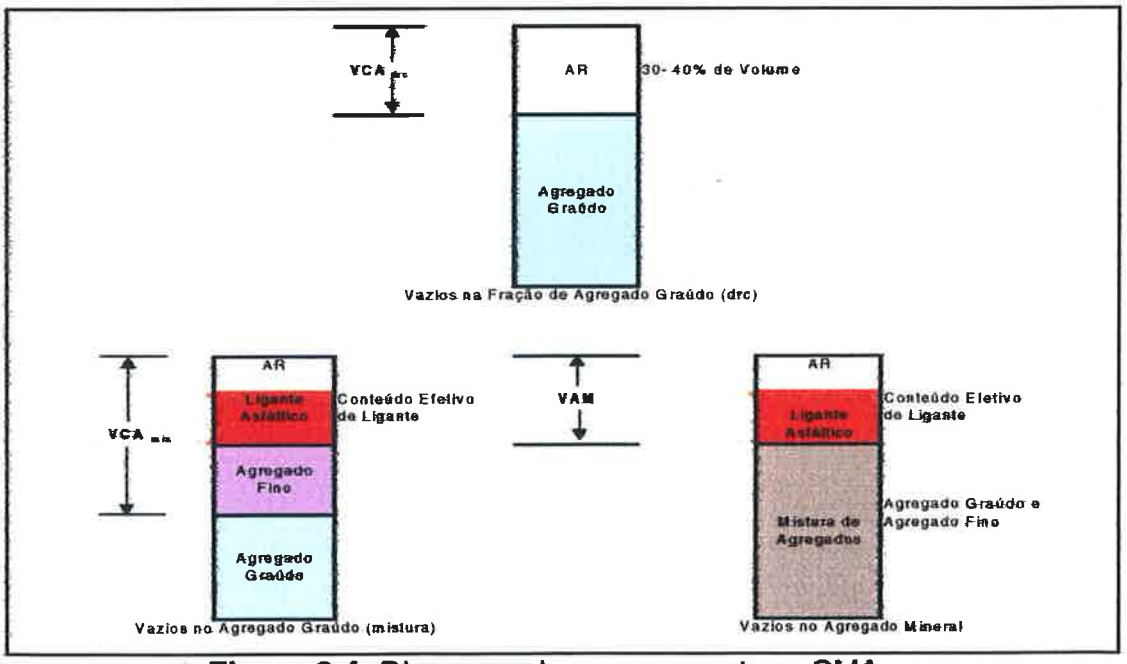

Figura 2.4: Diagrama dos componentes - SMA

2.5. Características de Desempenho do SMA

A seguir, são descritos os principais aspectos relacionados ao desempenho da técnica do SMA.

2.5.1. Deformação Permanente e Qualidade de Rolamento

O contato pedra-pedra do esqueleto mineral proporciona um elevado atrito interno da matriz de agregados, resultando em aumento na resistência a afundamentos nas trilhas de roda e, consequentemente, na regularidade longitudinal e transversal do revestimento sob tráfego pesado, de modo a garantir maior conforto ao usuário.

Segundo resultados da EAPA (1998), a resistência à deformação permanente da mistura SMA aumentou em 4 vezes quando foram utilizados ligantes modificados com polímero ao invés do ligante convencional CAP 45/60, e em 5 a 10 vezes em relação ao concreto asfáltico denso comum.

O relatório da NCAT registrou o desempenho de aproximadamente, oitenta e oito projetos experimentais de SMA, sendo que, 90% dos pavimentos apresentaram trilhas de roda inferiores a 6 mm e em 25% das pistas avaliadas não houve deformação permanente (TRB, 1999).

Quatro pistas experimentais com revestimento em SMA foram construídas e avaliadas no Canadá, confirmando a potencialidade da mistura para a redução da deformação permanente (EMERY et al., 1997).

A mistura SMA com asfalto modificado por polímero SBS, também foi utilizada no revestimento de várias pontes na Dinamarca apresentando bons resultados de resistência a deformação permanente e demais características estruturais e funcionais (WOHLK et al., 1996).

No estado de *Wisconsin* - EUA, várias seções experimentais em SMA foram executadas entre 1991 e 1993 e avaliadas durante um período de cinco anos. Embora este estudo ainda estivesse em progresso, na data de sua publicação, o autor relata que todos os pavimentos em SMA apresentaram desempenho funcional e estrutural melhor que o concreto asfáltico convencional, principalmente, quanto à resistência a deformações permanentes, desagregações, trincamentos por fadiga e por variação de temperatura (SCHMIEDLIN, 1998).

Em *Leipzig*, Alemanha, uma seção experimental em SMA com ligante modificado por polímero foi realizada em 1997 e monitorada periodicamente. Os autores confirmam o bom desempenho do revestimento sob tráfego pesado, principalmente sua resistência à deformação permanente (MARCHAND et al., 2000).

2.5.2. Trincamento e Desagregações

A excelente durabilidade do SMA deriva da natureza e quantidade de argamassa fíler-areia-ligante asfáltico presente na matriz de agregados, conferindo elevada coesão e impermeabilidade para a mistura, bem como resistência à oxidação para o asfalto.

Geralmente, ligantes asfálticos de maior consistência e modificados com polímeros, também são utilizados para melhorar a resistência à oxidação e coesão da mistura devido a sua maior espessura de película que recobre os agregados (EAPA, 1998).

O desgaste da superfície, principalmente pelo polimento dos agregados minerais, altera tanto a micro quanto a macrotextura da camada de rolamento podendo resultar em acidentes por derrapagem em condições de pista molhada.

Baseado na avaliação de vários pavimentos em diversos países, concluiu-se que trincamentos por fadiga e desagregações mecânicas devido aos efeitos térmicos, do tráfego e da ação da água, não tendem a ser relevantes no SMA em função de sua maior flexibilidade e resistência ao desgaste em relação ao concreto asfáltico denso convencional (EAPA, 1998).

Segundo a NCAT, as misturas SMA, além de apresentar maior resistência a afundamentos nas trilhas de roda, também têm estendido o ciclo de vida dos pavimentos, por sua maior resistência ao trincamento por fadiga e desagregações em condições adversas de clima e tráfego (NAPA, 1999).

2.5.3. Desempenho Quanto à Segurança

A resistência à derrapagem de um pavimento depende, basicamente do projeto de mistura do revestimento (seleção do tipo, resistência mecânica e graduação dos agregados, teor de vazios no agregado mineral , vazios totais com ar, rugosidade da superfície - macrotextura) admitindo-se que a chuva, o estado dos pneus dos veículos, estado de limpeza da pista etc, são variáveis sobre as quais os projetistas não podem atuar.

Nas misturas asfálticas SMA, devido à graduação e alta concentração de agregados graúdos, tem-se uma macrotextura superficial rugosa, formando pequenos "canais" entre os agregados graúdos, responsáveis por uma eficiente drenabilidade superficial, melhorando as condições de aderência pneu/ pavimento e reduzindo os efeitos de hidroplanagem e do borrifo.

Em conseqüência, as condições de segurança e visibilidade, principalmente em dias chuvosos e durante a noite são aumentadas, quando comparadas aos revestimentos asfálticos densos convencionais.

Na Inglaterra, foi estimado que o *borrifo* gerado, principalmente, pelos caminhões é responsável por 10% dos acidentes rodoviários e 33% do custo total de acidentes causados por derrapagem em pista molhada (WHITEOAK, 1990).

As misturas de SMA, quando novas apresentam um filme mais espesso de ligante asfáltico em relação ao concreto asfáltico denso convencional, prejudicando parte de sua macrotextura inicial. Nos primeiros meses de utilização da rodovia, a incidência de tráfego desgasta esta película, restabelecendo os índices de rugosidade originais, definidos em projeto. É prática comum em vários países aplicar areia de brita (0 –2 mm a 5 mm) na superfície durante a aplicação, com o propósito de eliminar qualquer problema de segurança para o usuário neste período inicial (EAPA, 1999).

Na Argentina, revestimentos em SMA com agregados de tamanho máximo nominal de 19 e 12,5 mm, apresentaram bons resultados de macrotextura no ensaio de mancha de areia; 2,0 mm e 1,2 mm, respectivamente (BOLZAN, 2000).

2.5.4. Redução de Ruído

As fontes de ruído do tráfego em rodovias podem ser divididas em duas categorias principais: ruído do motor / escapamento e atrito entre pneus e o pavimento.

Os ruídos do motor e escapamento são determinados basicamente pelo nível tecnológico e modo de operação dos veículos.

O ruído gerado pelo atrito entre os pneus e o pavimento está diretamente relacionado com a velocidade desenvolvida, com a rugosidade do pavimento e com o tipo de pneus utilizado.

Como o ensaio de homologação de ruído veicular é feito em aceleração, a 50 Km/h, o ruído dos pneus tem pouca interferência no mesmo, não sendo o foco de preocupação prioritária dos fabricantes.

Neste caso, a influência das características da rodovia no ruído é bastante relevante, sendo determinado pelo tipo e condições do pavimento, e tanto mais intenso quanto maior a velocidade de tráfego.

Durante o deslocamento de um veículo, cada pneu empurra a sua frente uma bolsa de ar, que precisa ser afastada, e que provoca ruídos típicos. A macrotextura mais rugosa do SMA absorve grande parte destas bolsas, diminuindo os ruídos do tráfego em níveis de 1 a 3 dB, em relação ao revestimento asfáltico denso convencional, (considerando agregados de mesmo tamanho máximo nominal), reduzindo assim o impacto do tráfego no ambiente, principalmente em áreas residenciais (EAPA, 1998).

Em *Ohio*, EUA, o nível de ruído pneu/pavimento foi determinado em 12 seções experimentais. De acordo com esta pesquisa, o revestimento em SMA apresentou redução de 2 dB em relação ao concreto de cimento Portland (HERMAN et al., 2000).

CAPÍTULO 3

PROJETO DE MISTURA SMA

3.1. Concepção do Projeto de Mistura

O projeto da mistura asfáltica não segue o procedimento de dosagem Marshall tradicional; a metodologia apresenta, energia de compactação dos corpos de prova, relações e parâmetros volumétricos específicos, bem como, ensaios de laboratório, que serão descritos neste capítulo.

Basicamente, a concepção do projeto de mistura segue duas exigências:

A primeira delas é a garantia da resistência interna da estrutura às solicitações do tráfego, através do contato grão/grão entre os agregados graúdos (formação da matriz pétrea).

A segunda exigência do projeto é a garantia de durabilidade da mistura (impermeabilidade / coesão) através de uma argamassa de elevada consistência formada pela fração de agregado fino (areia de brita e fíler) e ligante asfáltico.

A definição do agregado graúdo para o SMA é determinado pela relação entre o tamanho máximo nominal do agregado (um tamanho de peneira maior do que a primeira peneira que retém mais que 10%) e a fração retida na peneira # 4 (4,75 mm), # 8 (2,36 mm) ou peneira # 16 (1,18mm), conforme descrito na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Definição da fração de agregado graúdo

Abertura da Peneira		Porção de Agregado Retido na Peneira	
Mm	**in**	**mm**	**nº**
25	1"	4.75	#4
19	3/4"	4.75	#4
12,5	1/2"	4.75	#4
9,5	3/8"	2.36	#8
4,75	3/16"	1.18	#16

Exemplo: Para agregado de 25 mm, o agregado graúdo é definido como a quantidade de material retido na peneira 4,75 mm.

A metodologia e as especificações para o projeto de mistura seguem as recomendações da *National Center for Asphalt Technology* - NCAT (NAPA, 1999) e da *European Asphalt Pavement Association* (EAPA, 1998).
A seguir, são descritas as principais etapas do projeto de mistura:

- Seleção dos Componentes da Mistura;
- Seleção da Graduação Ótima;
- Seleção do Teor Ótimo de Ligante Asfáltico;
- Avaliação da Resistência à Ação Deletéria da Água;
- Avaliação da Sensibilidade ao Escorrimento;
- Avaliação Mecânica Complementar;
- Avaliação de Aderência.

3.2. Seleção dos Componentes da Mistura

3.2.1. Seleção dos Agregados Minerais

O SMA requer o uso de material granular 100% britado, sendo que em pelo menos 90% deste, haja duas faces britadas (NAPA, 1999).

Devido a concepção da mistura, o atrito interno entre os agregados graúdos no SMA é maior que nas misturas densas convencionais, exigindo valores de abrasão *Los Angeles* baixos e índice de forma cúbica que proporcionem resistência mecânica adequada durante a aplicação e em serviço.

As normas americanas têm requerido porcentagem máxima de 30% para a abrasão *Los Angeles*, embora haja estados que permitam valores máximos superiores, chegando até a 45% (NAPA, 1999). Valores baixos de abrasão *Los Angeles* podem ser de difícil cumprimento em algumas regiões brasileiras.

O agregado de graduação fina, praticamente não deve possuir em sua composição finos plásticos (argilas) e materiais reativos, apresentando equivalente de areia mínimo de 55% e azul de metileno máximo de 10 mg/g.

Tal como o Concreto Betuminoso Usinado a Quente - CBUQ, a resistência ao intemperismo e a porosidade dos agregados afetam o desempenho das misturas SMA. As especificações americanas limitam a sanidade (ciclo Na_2SO_4) em no máximo 15% e a absorção de água pelos agregados em no máximo 2% (NAPA, 1999).

A espessura do revestimento de SMA tem uma relação direta com o tamanho do agregado, geralmente, variando entre 3,0 a 5,0 vezes o seu diâmetro máximo nominal. Não se recomenda a utilização do SMA em espessuras superiores a 4 cm, em decorrência de maior probabilidade de afundamentos em trilhas de roda (EAPA, 1998).

Nos últimos anos o SMA vem sendo aplicado, em espessuras variando entre 1,5 a 2 cm, como nova alternativa para revestimentos não comprometidos estruturalmente, isto é, visando somente a melhoria do desempenho funcional da rodovia (BELIGNI et al., 2000).

3.2.2. Seleção do Material de Enchimento – Fíler

O material de enchimento ou fíler mineral deve ser ativo contribuindo para a melhoria da adesividade da mistura, homogêneo, não plástico, passando no mínimo 65% na peneira de 0,075 mm (#200), seco e livre de grumos provenientes de agregações de partículas finas. O fíler pode ser pó calcário, cal hidratada CH-I ou cimento Portland.

Segundo a norma do DNER-EM 367/97, o pó calcário deve conter no mínimo, 70% de carbonato de cálcio; a cal hidratada deverá obedecer às exigências de análise química e estabilidade, conforme especificação NBR 6473/96 da ABNT. O cimento Portland comum ou de alto forno deve atender a especificação DNER-EM 036-95 e apresentar expansibilidade em autoclaves de no máximo 0,8%.

O volume de água absorvido pelo revestimento asfáltico depende de sua permeabilidade (volume de vazios com o ar) e da natureza do fíler mineral.

Segundo WHITEOAK (1990), para um determinado volume de vazios da mistura, valores de estabilidade Marshall, obtidos a partir da imersão de corpos de prova compactados, comprovam que a quantidade de água absorvida é reduzida quando o pó calcário ou a cal são utilizados como parte do fíler na composição granulométrica, melhorando sensivelmente a resistência mecânica da mistura asfáltica à ação da água.

Este estudo demonstra que a estrutura degrada parte por quebra da ligação físico-química de adesão entre agregado e o ligante e parte devido a expansão de determinados tipos de fíler que chegam a absorver quantidade de água superior ao próprio volume de vazios da mistura.

Diferente da composição granulométrica da mistura asfáltica densa (CBUQ), que possui, em média, 1% a 2% de material de enchimento adicional, a composição da mistura SMA requer a adição de elevada quantidade de fíler comercial (5% a 10%), sendo sua alta taxa responsável, na maioria das aplicações de SMA, pela limitação na produção da usina.

Segundo a NCAT (1990), as propriedades volumétricas da mistura SMA são extremamente sensíveis as variações da graduação, especialmente do material que passa na peneira 4,75 mm (#4) e na peneira 0,075 mm (#200), sendo responsáveis por um alto teor de vazios verificados tanto na fase de projeto de mistura como *in situ*.

3.2.3. Seleção do Ligante Asfáltico

3.2.3.1. Cimentos Asfálticos de Petróleo – CAPs

Os CAPs são materiais termosensíveis utilizados na construção e manutenção de pavimentos, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possuem características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis.

"Classificam-se de acordo com sua consistência medida pela viscosidade dinâmica ou absoluta, isto é, o tempo necessário ao escoamento de um volume determinado de asfalto através de um tubo capilar, com auxílio de vácuo, sob condições rigorosamente controladas de vácuo e temperatura, e também por penetração, ou seja, pela medida em décimos de milímetros que uma agulha padronizada penetra em uma amostra nas condições do ensaio" (IBP, 1999).

Os CAPs classificados por penetração são fabricados somente nas Refinarias de Mataripe-Bahia (RELAM) e Fortaleza-Ceará (LUBNOR) (IBP, 1999).

Conforme o regulamento técnico 01/92 - revisão 02 - DNC, os CAPs são classificados por viscosidade e por penetração, de acordo com as Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2: Especificações para o CAP – classificação por viscosidade

ENSAIO	UNID.	MÉTODOS DE ENSAIO		ESPECIFICAÇÕES DOS TIPOS DE CAP		
		ABNT	ASTM	CAP-7	CAP-20	CAP-40
Viscosidade a 60°C	p	NBR 5847	D 2171	700 - 1500	2000 - 3500	4000 - 8000
Viscosidade Saybolt-Furol: a 135°C mín.	s	MB 517	E102	100	120	170
a 177°C	s	MB 517	D 2170 D 2161 (1)	15 - 60	30 - 150	40 - 150
Efeito do Calor e Ar (ECA) a 163°C P/5h						
Variação em massa, máx.	%	MB 425	D 1754	1,0	1,0	1,0
Relação Viscosidade, máx.	%	(2)	-	4,0	4,0	4,0
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	NBR 6293	D 113	50	20	10
Índice de Suscetibilidade Térmica		(3)	-	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	NBR 6576	D 5	90 (4)	50 (4)	30 (4)
Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	D 92	220 (4)	235 (4)	235 (4)
Solubilidade em Tricloroetileno	%	MB 166	D 2042	99,5 (4)	99,5 (4)	99,5 (4)

(1) Permitida sua determinação pelo método ASTM D 2170 e sua posterior conversão pelo método ASTM D 2161.

(2) Relação Viscosidade = $\frac{\text{VISC. a 60°C (poise) depois (ECA)}}{\text{VISC. a 60°C (poise) antes (ECA)}}$

(3) Ind.de Suscetibilidade = $\frac{(500)\,(\text{LOG PEN}) + (20)\,(t°C) - 1951}{120 - (50)\,(\text{LOG PEN}) + (t°C)}$ onde (t°C) = Ponto de amolecimento, em °C

(4) Valor Mínimo

Tabela 3.3: Especificações para o CAP – classificação por penetração

ENSAIO	UNID.	MÉTODOS DE ENSAIO		ESPECIFICAÇÕES DOS TIPOS DE CAP			
		ABNT	ASTM	30/45	50/60	85/100	150/200
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	NBR 6576	D 5	30 - 45	50 - 60	85 - 100	150 - 200
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	NBR 6293	D 113	60	60	100	100
Efeito do Calor e Ar (ECA) a 163°C p/5h							
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	NBR 6576	D 5	50	50	47	40
Variação em massa, máx.	%	MB 425	D 1754	1,0	1,0	1,0	1,0
Índice de Suscetibilidade Térmica		(1)	-	(-1,5) a (+1)			
Ponto de Fulgor, mín.	°C	NBR 11341	D 92	235	235	235	220
Solubilidade em Tricloroetileno, mín.	% massa	MB 166	D 2042	99,5	99,5	99,5	99,5
Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C, mín.	s	NBR 5847	E 102 D 2170 e D 2161 (2)	110	110	85	70

O produto não deve produzir espuma quando aquecido a 175°C

(1) Ind.Suscetibilidade = $\frac{(500)\,(\text{LOG PEN}) + (20)\,(t°C) - 1951}{120 - (50)\,(\text{LOG PEN}) + (t°C)}$, onde (t°C) = Ponto Amolecimento em °C

(2) Permitida sua determinação pelo método ASTM D 2170 e sua posterior conversão pelo método ASTM D 2161

Segundo o IBP, as principais aplicações e restrições quanto ao emprego dos CAPs são:

- Os CAPs são aplicados, principalmente, em misturas a quente, do tipo concretos asfálticos e pré-misturados; recomenda-se o uso dos tipos CAP-20 e CAP-40 bem como os do tipo CAP 30/45, CAP 50/60 e CAP 85/100, com teor de ligante asfáltico de acordo com o respectivo projeto Marshall;
- Os CAPs não podem ser aquecidos acima de 177°C, sendo que a temperatura ideal de trabalho é obtida pela relação temperatura-viscosidade. Esta temperatura limite visa evitar o possível craqueamento (oxidação) térmica do ligante;
- Não se aplicam em dias de chuva, ou em temperatura ambiente inferior a 10°C ou em superfícies molhadas (IBP,1999).

3.2.3.2. Asfaltos Modificados por Polímeros – AMPs

Ao longo destes trinta anos, muitos modificadores têm sido desenvolvidos para produzir revestimentos menos sensíveis às variações climáticas, mais flexíveis e resistentes à ação do tráfego.

Estes modificadores devem melhorar as propriedades reológicas do ligante asfáltico, apresentar resistência à temperatura de trabalho, facilidade de dispersão, disponibilidade no mercado e custo adequado para atender os critérios básicos de desempenho, praticidade e economia. Já o ligante asfáltico modificado deve ser processado por meios convencionais, manter suas propriedades e estabilidade durante as etapas de armazenamento, aplicação e ao longo de sua vida útil.

O termo polímero pode ser aplicado a qualquer molécula gigante (macromolécula). Mas nem todos podem ser usados em mistura com o cimento asfáltico para fins de pavimentação. Alguns polímeros têm propriedades adequadas para altas temperaturas, enquanto outros têm boas propriedades em baixas temperaturas; alguns materiais exibem bom desempenho tanto em alta quanto em baixas temperaturas.

Além da resistência ao afundamento nas trilhas de roda, determinados polímeros podem proporcionar um elevado grau de flexibilidade ou elasticidade para uma mistura betuminosa e assim melhorar o comportamento à fadiga dos pavimentos flexíveis.

A incorporação de elastômeros sem o processo de vulcanização não forma uma rede tridimensional elástica, alterando muito pouco o comportamento reológico do ligante e, consequentemente suas propriedades finais.

A utilização de elastômeros vulcanizados, inclusive pó de borracha proveniente da reciclagem de pneumáticos, pode modificar as características dos ligantes, entretanto, estes polímeros são de difícil

dispersão requerendo altas temperaturas, tempo de digestão e elevada compatibilidade com o meio asfáltico.

A tecnologia de incorporação do pó de borracha previamente ao ligante (processo via-úmida) parece ser a mais promissora para a redução do impacto ambiental e de saúde pública proveniente do descarte de pneus, embora o domínio das condições e dos materiais envolvidos no processo, ainda permaneçam como fatores críticos para homogeneidade e eficácia do produto final.

Em outras palavras, o pó de borracha uma vez incorporado ao ligante asfáltico, deve atuar como um agente modificador de suas propriedades físico-químicas e reológicas e não, simplesmente, assumir o papel de um fíler flexível, quando em misturas com os agregados minerais (WAY, 2000).

Os polímeros Termo-Rígidos (Epóxi, por exemplo) formam sistemas de bom desempenho, porém seu custo é extremamente elevado o que praticamente inviabiliza sua aplicação em larga escala.

Os Polímeros Termoplásticos (Polietileno, Polipropileno, PVC, Poliestireno, etc.) aumentam a viscosidade do ligante asfáltico à temperatura ambiente. Infelizmente, apresentam propriedades elásticas e compatibilidade reduzidas; normalmente o que ocorre é a migração do polímero provocando uma dispersão grumosa e heterogênea.

Todavia, resultados satisfatórios tem sido relatados com o emprego de asfaltos modificados por polímero EVA (Etileno Acetato de Vinila), principalmente em revestimentos sujeitos à trafego pesado ou canalizado, com o intuito de melhorar a resistência à deformação permanente de pavimentos flexíveis (IBP, 1996).

O EVA é uma macromolécula que apresenta propriedades similares ao Polietileno de baixa densidade. A medida em que a concentração de Acetato de Vinila é aumentada, as propriedades de compatibilidade e flexibilidade do polímero também melhoram.

Segundo BERNUCCI et al., (2000), a modificação com EVA eleva a rigidez da mistura, que passa a trabalhar com elevados módulos de resiliência. Os revestimentos asfálticos com EVA podem ser utilizados com estruturas de baixa deflexão, ou seja, com boa rigidez ou com espessuras expressivas, para evitar trincamento precoce.

É fato relevante que, nos últimos 15 anos excelentes resultados tem sido obtidos na aplicação em larga escala, principalmente, na Europa e América do Norte, de polímeros que apresentam recuperação elástica e resistência mecânica à tração. Isto não é de surpreender, visto que estas propriedades são essenciais para determinados materiais, como os pneus dos veículos

que permanecem resistentes e flexíveis sob tensões e temperaturas de serviço do pavimento (WHITEOAK, 1990).

Estas macromoléculas combinam as propriedades termoplásticas e elastoméricas sem necessidade de vulcanização e são denominadas quimicamente de copolímeros em bloco de Estireno-Butadieno (SBS).

Conhecidos comercialmente como Borrachas Termoplásticas (TRs), estes materiais apresentam blocos finais de Poliestireno associados em "domínios" incorporados a uma matriz de borracha (Butadieno). Quando o polímero é disperso no asfalto, a quente, os domínios de Poliestireno dissolvem-se completamente, assumindo características termoplásticas que facilitam a mistura e a compactação da massa asfáltica. Sob resfriamento, os blocos de Poliestireno reassociam-se promovendo a formação de uma rede tridimensional, o que confere ao ligante asfáltico propriedades de resistência e elasticidade semelhantes a da borracha vulcanizada (WHITEOAK ,1990).

Baseado no tipo de técnica a ser empregada, é possível otimizar a seleção do asfalto modificado por polímero do tipo SBS, a fim de melhorar as quatro propriedades fundamentais dos ligantes asfálticos:

- *Termo-Suscetibilidade Reduzida* - A Consistência do betume modificado permanece inalterada sob larga faixa de temperaturas. Em clima frio, seu caráter flexível aumenta a resistência às trincas e fissuras na superfície do revestimento. Em clima quente, o incremento do ponto de amolecimento e da viscosidade do ligante reduzem o risco de exsudação, afundamentos em trilhas de roda e perda da macrotextura do revestimento;
- *Resistência Coesiva* - Esta propriedade faz com que o ligante asfáltico mantenha os agregados unidos, quando sujeitos à ação das cargas de tráfego, principalmente em baixas temperaturas;
- *Excelente Comportamento Reológico* - A resistência à fluência e/ou boa recuperação elástica do ligante modificado sob tensões de tração mantém a integridade do revestimento, mesmo quando sujeito a níveis elevados de carga e deslocamento;
- *Poder de Adesão* - Os revestimentos betuminosos, quando sujeitos à ação da água e aos efeitos abrasivos dos veículos tendem a perder adesão entre a superfície do agregado e o ligante, podendo resultar em descolamento ou *Stripping*. O asfalto modificado aumenta a resistência do revestimento a estes fatores.

Segundo a NAPA (1999), os ligantes asfálticos modificados com polímeros são empregados na mistura SMA visando os seguintes objetivos:

- Aumentar a resistência à deformação permanente;
- Aumentar a vida útil do revestimento asfáltico;
- Reduzir custos e riscos de aplicação em caso de camadas delgadas;
- Reduzir a quantidade do aditivo estabilizador.

A pouca divulgação no país de investigações relacionadas às modificações dos ligantes asfálticos, principalmente as associadas à concepção de projetos estruturais de pavimentos e especificações de serviços, motivou a Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico – IPR do DNER a implementar, por intermédio da Divisão de Pesquisas e Desenvolvimento – DPqD, uma pesquisa sobre asfaltos modificados por polímeros.

A pesquisa de asfaltos modificados por polímeros realizada pela DPqD identificou de modo sistemático as propriedades mais relevantes conferidas ao asfalto pela adição de polímeros, dando ênfase às características físicas, físico-químicas, reológicas e comportamentais frente a carregamentos repetidos de curta duração, e apresentou um procedimento de projeto estrutural de pavimentos com maior benefício-custo" (DNER, 1999).

O DNER publicou em 1998 os principais resultados da pesquisa, empregando, principalmente, polímeros do tipo SBS. Em 1999 incluiu às suas Especificações Gerais, uma coletânea de normas para asfaltos modificados por polímeros, englobando métodos de ensaios, especificações de materiais e de serviço.

Na Tabela 3.4, é apresentada a ficha técnica do Betuflex, asfalto modificado por polímero do tipo SBS, produzido pela empresa Ipiranga Asfaltos S.A.

Na Tabela 3.5, de acordo com a especificação de material DNER-EM 396/99, são relacionadas as características do asfalto modificado por polímero SBS, bem como seus valores mínimos e máximos.

Nesta dissertação, foram empregados nas misturas SMA dois tipos de asfalto modificado, a saber: AMP-1 com 3% a 4% de polímero SBS (Betuflex B 60/60) e AMP-2 com 5% a 6% de polímero SBS (Betuflex B 80/60) .

Tabela 3.4: Especificação do asfalto modificado por polímero SBS - Betuflex

ENSAIO	MÉTODO (c/ base em)	UNID.	ESPECIFICAÇÃO BETUFLEX		
			B 60/60	B 65/60	B 80/60
Ponto de Amolecimento	NBR 6560	°C	55 - 65	60 - 75	75 - 90
Penetração (100g, 5s, 25°C)	NBR 6576	dmm	50 - 70	50 - 70	50 - 70
Viscosidade a 135°C	ASTM D 4402-87	cP	3000 máx	3000 máx	3000 máx
Viscosidade a 145°C	ASTM D 4402-87	cP	2000 máx	2000 máx	2000 máx
Viscosidade a 175°C	ASTM D 4402-87	cP	450 máx	450 máx	450 máx
Ductilidade a 25°C	NBR 6293	cm	100 mín	100 mín	100 mín
Recuperação Elástica a 25°C	DNER ME 382/99	%	60 mín	70 mín	85 mín
Ponto de Fulgor	NBR 11341	°C	235 mín	235 mín	235 mín
Densidade Relativa a 20/4°C	DNER ME 193/96	---	1,00 - 1,04	1,00 - 1,04	1,00 - 1,04
Estabilidade a 163°C, 5 dias,	DNER ME 384/99	°C	4,0 máx	4,0 máx	4,0 máx
Efeito do Calor e do Ar					
Variação em massa	MB - 425	%	1,0 máx	1,0 máx	1,0 máx
% Penetração original	MB - 425	%	50 mín	50 mín	50 mín
Recuperação elástica a 25°C	DNER ME 382/99	%	50 mín	60 mín	80 mín

Tabela 3.5: Especificação técnica para o cimento asfáltico modificado por polímero SBS (DNER-EM 396/99)

CARACTERÍSTICA	EXIGÊNCIA	
	Mínima	Máxima
Penetração, 100g, 5s, 25ºC, 0,1 mm	45	-
Ponto de Fulgor, °C	235	-
Ductibilidade, 25°C, 5 cm/mín, cm	100	-
Densidade Relativa, 25°C / 25°C	1.00	1,05
Ponto de Amolecimento, °C	60	85
Ponto de Ruptura Fraass, °C	-	-13
Recuperação Elástica, 20 cm, 25°C, %	85	-
Viscosidade Cinemática, 135°C, Cst	850	-
Viscosidade Cinemática, 155°C, Cst	350	-
Estabilidade ao armazenamento: 500 ml em estufa a 163°C, 5 dias:		
diferença de ponto de amolecimento, °C	-	4
diferença de recuperação elástica, 20 cm, 25°C, %	-	3
Índice de Suscetibilidade Térmica (IST x10²)	2	5
Efeito Calor e do Ar: variação de massa, %	-	1.0
percentual de penetração original	50	-
variação do ponto de amolecimento,°C	-	4
recuperação elástica, %	80	-

Nota 1 - O índice de suscetibilidade térmica (IST), deve ser determinado a partir da inclinação da reta penetração x temperatura, para temperaturas de 15°C, 20°C, 25°C, 30°C e 35°C.
A inclinação da reta é determinada pelo ajuste da equação lon (pen) = C + AT, aos pontos dos ensaios, onde:

log (pen) - logarítimo da penetração
A - inclinação da reta
C - constante
T - temperatura, °C

Nota 2 - O produto não deve produzir espuma quando aquecido a 175°C.

3.2.4 Fibras

Segundo a NCAT (1999), as fibras orgânicas (celulose) e minerais devem apresentar as características descritas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Principais características para as fibras orgânicas (celulose) ou minerais para misturas SMA

CARACTERÍSTICAS	FIBRA ORGÂNICA	FIBRA MINERAL
Comprimento máximo, mm	6,0	6,0
Espessura máxima, mm	-	5,0
Quantidade < 150 µm, %	63 a 77	-
Teor de Cinzas, %	17 a 19	-
pH	6,5 a 8,5	-
Absorção de Óleo	4,0 a 6,0	-
Teor de Umidade máximo, %	5,0	-

3.2.5 Aditivo Melhorador de Adesividade

Uma das qualidades essenciais que se exige de um revestimento asfáltico é este seja resistente à ação da água. Em geral, agregados básicos ou hidrofóbicos (calcários e basaltos) apresentam melhor adesividade que os agregados ácidos ou hidrofílicos (granitos, gnaisses).

A resistência da película de ligante asfáltico que recobre os agregados à ação da água é satisfeita, mediante o emprego de pequenas quantidades geralmente, entre 0,5% a 2% de produtos chamados melhoradores de adesividade.

Estes aditivos podem ser sólidos (cal, pó calcário ou cimento Portland) ou líquidos (dopes). Os mais largamente empregados são os dopes, a base de aminas, devido a sua eficiência e facilidade de aplicação no campo. São produtos facilmente miscíveis no cimento asfáltico de petróleo – CAP.

Estes melhoradores de adesividade, baseado na química das aminas de alto peso molecular, possuem natureza catiônica (carga positiva) e são fortemente atraídos pelas cargas negativas da superfície do agregado mineral estabelecendo uma ligação química do tipo iônica que torna a película de ligante resistente à ação da água.

3.3. Seleção da Graduação Ótima

A seleção da composição granulométrica da mistura, preferencialmente, deve ser realizada com base em faixas de desempenho comprovado, tais como as americanas (NCHRP, 1999) ou européias (EAPA, 1998).

A seguir são apresentadas algumas faixas granulométricas, especificadas em países onde o SMA possui uma grande popularidade, conforme Tabelas 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10.

Tabela 3.7: Faixas granulométricas – Alemanha

PENEIRAS (aberturas)	FAIXAS – SMA			
	0/11 S	0/8 S	0/8	0/5
> 11,2 mm	≤ 10	---	---	---
> 8,0 mm	≥ 40	≤ 10	≤ 10	---
> 5,0 mm	60 – 70	55 - 70	45 – 70	≤ 10
> 2,0 mm	75 – 80	75 – 80	70 – 80	60 – 70
< 90 μm	9 – 13	10 – 13	8 – 13	8 – 13

Tabela 3.8: Faixas granulométricas - Suécia

PENEIRAS (aberturas)	FAIXAS – SMA			
	0/ 22	0/16	0/ 11	0/ 8
45,0 mm	100	---	---	---
31,5 mm	98 – 100	100	---	---
22,4 mm	85 – 99	98 – 100	100	---
16,0 mm	50 – 80	85 – 99	98 – 100	100
11,2 mm	35 – 65	34 – 70	85 – 99	98 – 100
8,0 mm	27 – 50	27 – 50	35 – 60	85 – 99
4,0 mm	20 – 33	20 – 32	24 – 35	28 – 49
2,0 mm	16 – 29	16 – 29	19 – 30	20 – 30
75 μm	8 – 13	8 – 13	8 – 13	8 – 13

Tabela 3.9: Faixas granulométricas – Comunidade Européia

PENEIRAS (aberturas)	SMA – TIPO									
	D4	D6(1)	D6(2)	D8	D10	D11	D14	D16	D20	D22
31,5 mm									100	100
22,4 mm								100		90–100
20,0 mm							100		90-100	
16,0 mm						100		90-100		60-80
14,0 mm					100		90-100		60-80	
11,2 mm				100		90-100		45-75		35-60
10,0 mm			100		90-100		50-75		35-60	
8,0 mm		100		90-100		45-75		25-40		25-40
6,3 mm			90-100		30-50		20-35		20-35	
5,6 mm	100	90-100								
4,0 mm	90-100			25-45		25-40		30-35		20-35
2,0 mm	30-40	30-40	25-35	20-30	20-30	20-30	15-30	15-30	15-30	15-30
63 μm	8-12	8-12	8-12	8-12	8-12	8-12	8-12	8-12	8-12	8-12

Tabela 3.10: Faixas granulométricas – Estados Unidos

* PENEIRAS (aberturas)	FAIXAS				
	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm
37,5 mm	100	---	---	---	---
25,0 mm	90 – 100	100	---	---	---
19,0 mm	30 – 86	90 – 100	100	---	---
12,5 mm	26 – 63	50 – 74	90 – 100	100	---
9,5 mm	24 – 52	25 – 60	26 – 78	90 – 100	100
4,75 mm	20 – 28	20 – 28	20 – 28	26 – 60	90 – 100
2,36 mm	16 – 24	16 – 24	16 – 24	20 – 28	28 – 65
1,18 mm	13 – 21	13 – 21	13 – 21	13 – 21	22 – 36
0,6 mm	12 – 18	12 – 18	12 – 18	12 – 18	18 – 28
0,3 mm	12 – 15	12 – 15	12 – 15	12 – 15	15 – 22
0,075 mm	8 – 10	8 – 10	8 – 10	8 -10	12 - 15

* (% passando por volume)

A seleção da graduação ótima da mistura SMA deve satisfazer ambas as condições:

- Formação da matriz pétrea, através do estabelecimento do contato entre os grãos do agregado graúdo;

- Quantidade mínima requerida de vazios no agregado mineral da mistura compactada (VAM) superior a 17%.

Segundo a NCAT (1999), o requisito para que ocorra o contato grão/grão é que o volume de vazios do agregado graúdo presente na mistura SMA compactada (VCAmix) seja menor ou igual o volume de vazios da fração de agregado graúdo (VCAdrc).

O VCAdrc é determinado em duas etapas, a seguir descritas:

- Obtendo a massa específica da fração de agregado graúdo, segundo o procedimento descrito na AASHTO T-19, com a porção da mistura total de agregados que fica retida nas peneiras de quebra, relacionadas de acordo com o tamanho máximo nominal do agregado graúdo, conforme Tabela 3.1;

- Através da equação descrita no projeto de mistura para o SMA, que relaciona a densidade aparente do agregado graúdo, massa específica da fração de agregado graúdo (AASHTO T-19) e massa específica da água (NCHRP, 1999).

O VCAmix é calculado através de uma equação descrita no projeto de mistura para o SMA, que relaciona a densidade aparente da mistura SMA, densidade aparente do agregado graúdo e porcentagem de agregado do

total da mistura granulométrica retido na peneira de quebra, conforme Tabela 3.1 (NCHRP, 1999).

Se o VCAmix for maior que VCAdrc, a graduação da mistura deverá ser modificada, reduzindo-se a quantidade da mistura total de agregados que passa pela peneira 4,75 mm (#4).

Segundo a NAPA (1999), as tolerâncias da composição granulométrica da mistura SMA, admitidas para cada peneira, devem obedecer os valores da Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Tolerância para graduação da mistura SMA

ABERTURA DE PENEIRA		TOLERÂNCIA (% PASSANDO)
mm	**in**	
19.0	3/4	+/- 4.0
12.5	1/2	+/- 4.0
9.5	3/8	+/- 4.0
4.75	# 4	+/- 3.0
2.36	# 8	+/- 3.0
0.60	# 30	+/- 3.0
0.30	# 50	+/- 2.0
0.075	# 200	+/- 0.3
Conteúdo de Ligante Asfáltico		+/- 0.3

3.4. Seleção do Teor Ótimo de Ligante Asfáltico

O teor ótimo de ligante asfáltico é determinado segundo relações e parâmetros volumétricos da mistura SMA, descritos no item anterior, e físico-mecânicos, de acordo com o procedimento Marshall (AASHTO-T-245 ou DNER-ME 043/95).

Basicamente, a metodologia consiste em compactar os corpos de prova (CPs), com 50 golpes por face, para teores de ligante asfáltico superior a 6%, e que atendam simultaneamente, os requisitos volumétricos de vazios com ar de 4%, relação betume-vazios entre 75 a 82%, vazios no agregado mineral (VAM) mínimo de 17%, VCAmix menor ou igual ao VCAdrc e as demais especificações apresentadas na Tabela 3.12.

A determinação das propriedades mecânicas empíricas de estabilidade e fluência, baseia-se no princípio da ruptura dos corpos de prova (CPs) através da sua compressão diametral semi confinada.

Após a confecção e extração do molde, os CPs são imersos em um banho de água a temperatura de 60°C por 30 minutos e a seguir acondicionados

dentro de dois segmentos de molde sendo posteriormente, submetidos à compressão em uma prensa que se movimenta verticalmente em velocidade constante de 5 cm/min, até o ponto de ruptura.

A estabilidade Marshall é definida como a carga requerida para romper os CPs e a fluência é a medida da deformação correspondente a sua carga de ruptura.

Nos Estados Unidos vem sendo recomendada a dosagem pelo equipamento de compactação giratória *Superpave*, fixando os mesmos 4% de volume de vazios e 6% para o teor mínimo de ligante asfáltico, conforme Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Especificação para mistura SMA (NAPA, 1999)

Propriedades	Especificação
Ligante asfáltico,%,mín.	6,0 *
Conteúdo de vazios, %	** 3,5 - 4.0
Fluência, 0,01 in	8,0 - 16,0
VAM, %, mín	17.0
VCA mix, %, máx	VCA drc
Estabilidade, kgf, mín.	650 ***
RRT, %, mín.	70.0
Escorrimento @ temp. de produção,%, máx.	0.30

* Poderá ser reduzido o conteúdo de ligante asfáltico se a densidade aparente do agregado graúdo exceder a 2.75

** Em países de clima frio

*** Estabilidade sugerida, baseada na experiência americana

Segundo a NCAT, para a avaliação da densidade aparente do corpo de prova, 100 giros no compactador giratório corresponde, aproximadamente, ao mesmo esforço de compactação de 50 golpes por face no compactador Marshall, embora este último possa ocasionar uma maior fragmentação dos agregados com índice de abrasão *Los Angeles* superior a 30% (NCHRP, 1999).

A NCAT recomenda que o ligante asfáltico empregado na mistura SMA tenha um ou dois graus PG - *Performance Grade* acima do recomendado pela especificações *Superpave*.

Para um mesmo nível de vazios com ar, as misturas SMA são mais permeáveis que os concretos asfálticos densos convencionais.

A NCAT especifica, volume de vazios inferior a 6%, durante o controle tecnológico de execução do SMA. Para o projeto da mistura recomenda-se volume de vazios de 4%, em países de clima quente (maior resistência à

deformação plástica / exsudação) e volume de vazios entre 3,5 a 4%, em países de clima frio .

O volume de vazios com ar da mistura pode ser controlado através da quantidade de ligante asfáltico. Entretanto, quando o teor de ligante e vazios com ar forem inferiores ao mínimo especificado, recomenda-se estudar uma nova graduação da mistura com vazios no agregado mineral (VAM) superior a 17% para atender ambos os requisitos (NAPA ,1999).

O valor de VAM pode ser aumentado, reduzindo-se a quantidade da mistura de agregados passando na peneira 4,75mm (#4) ou do fíler mineral (# 200); outra possibilidade é mudar a procedência dos materiais (NAPA, 1999).

3.5. Avaliação da Resistência à Ação Deletéria da Àgua

A avaliação da resistência à ação deletéria da água para a mistura SMA é realizada segundo o procedimento Marshall AASHTO T-245 compactando-se os corpos de prova com 50 golpes por face, para um volume de vazios com ar entre 5% a 7%.

De acordo com a NCAT, a metodologia adotada é a da norma AASHTO T-283, eliminando-se o ciclo de congelamento e estabelecendo a relação de resistência à tração retida (RRT) mínima requerida de 70%.

Se mistura apresentar elevada suscetibilidade à ação da água, com valor de RRT inferior a 70% recomenda-se, preferencialmente, a adição de aditivos melhoradores de adesividade.

Basicamente, o procedimento AASHTO T-283 consiste em moldar corpos de prova no equipamento Marshall com 7% (+/- 1) de volume de vazios.

Após um período de 72 horas de cura, três dos seis corpos de prova moldados para cada tipo de ligante, são condicionados a uma saturação de água, colocando os corpos de prova dentro de um reservatório, imersos em água e aplicando uma pressão negativa para entrada de água forçada até que os mesmos atinjam 55% a 80% do grau de saturação em seus vazios inicialmente com ar.

Dependendo do grau de severidade da aplicação pode se optar pelo ciclo de congelamento, neste caso, os corpos de prova são submetidos a um resfriamento de (-18°C) por um período mínimo de 16 horas.

Ao término desta etapa, os corpos de prova são imediatamente colocados em banho-maria a 60°C por um período mínimo de 24 horas e posteriormente, em outro banho a 25°C por 2 horas.

Então, realiza-se a ruptura por tração indireta (compressão diametral) (DNER-ME 138/94) dos corpos de prova condicionados e não condicionados à saturação.

A relação da resistência à tração indireta dos corpos de prova condicionados e não condicionados expressa a RRT – Relação de Resistência à Tração Retida.

Além de prever o grau de desagregação ligante-agregado, o ensaio pode também ser utilizado para avaliação de desempenho de aditivos melhoradores de adesividade (BERNUCCI et al., 1999).

A Figura 3.1 apresenta o arranjo de equipamentos para a "saturação" dos corpos de prova, como parte dos ensaios para a verificação da ação deletérea da água (AASHTO T-283).

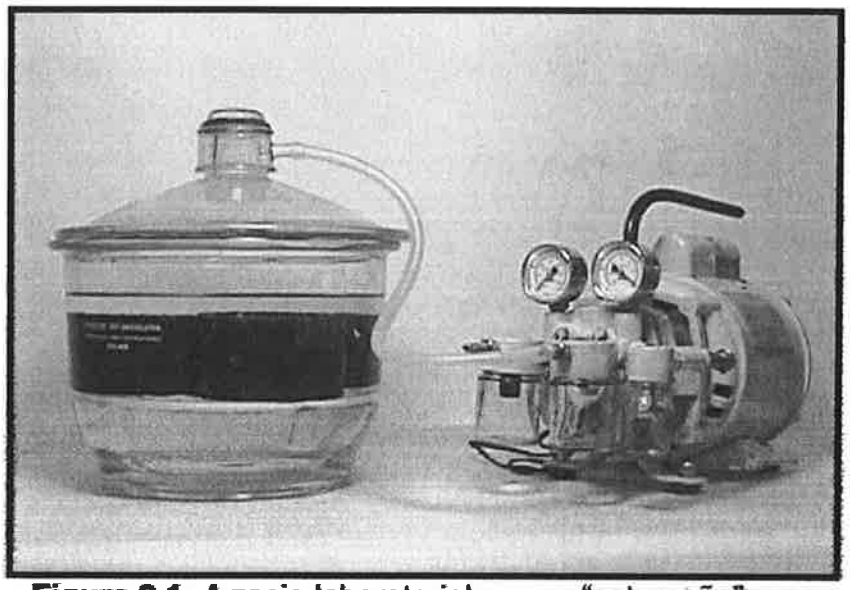

Figura 3.1: Arranjo laboratorial para a "saturação" com água dos corpos de prova Marshall para futura avaliação da resistência à ação da água

3.6. Avaliação da Sensibilidade ao Escorrimento

A metodologia proposta pela AASHTO T-305-97 para a avaliação da sensibilidade ao escorrimento (*Draindown Sensitivity*), consiste em simular as condições em que a mistura SMA estará sujeita no campo.

Basicamente, amostras de 1200g da mistura são acondicionadas em um cesto de tela metálica e aquecidas em estufa durante 1 hora, numa pré-selecionada temperatura de usinagem da massa asfáltica, reproduzindo as condições críticas de temperatura / tempo que a mesma estará sendo

submetida durante as operações de mistura, estocagem, transporte e aplicação.

A quantidade de material drenado de cada amostra é coletado e pesado. Os resultados são expressos em percentual, relativo ao peso original de cada amostra. O valor máximo estabelecido para o ensaio de sensibilidade ao escorrimento é 0,3% (NCHRP, 1999).

Se a mistura SMA apresentar baixa resistência ao escorrimento, recomenda-se aumentar a quantidade ou selecionar outro tipo de aditivo estabilizador (fibras orgânicas / minerais ou polímeros no ligante asfáltico).

3.7. Avaliação Mecânica Complementar

Alguns países Europeus, tais como: Hungria, Noruega, Itália e França, especificam para o projeto de SMA, além dos parâmetros volumétricos e empíricos (estabilidade, fluência), requisitos adicionais obtidos por caracterização mecânica das misturas (EAPA, 1998).

A seguir são descritos os principais ensaios avaliadores das propriedades mecânicas para a mistura SMA.

3.7.1. Avaliação da Resistência à Deformação Permanente

Os ensaios de Deformação Permanente nas trilhas de roda, geralmente, são realizados em simuladores de tráfego de laboratório ou ensaios tipo *Creep*.

Um dos equipamentos mais conhecidos e utilizados para o estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas é o desenvolvido pelo Laboratorie des Ponts et Chaussées - LCPC da França.

Os corpos de prova são placas retangulares moldadas com 500 mm de comprimento, 180 mm de largura e 50 mm de espessura da mistura asfáltica SMA que são compactadas por amassamento (rolagem de pneus), por meio de um equipamento denominado Mesa Compactadora tipo LPC – Figura 3.2, conforme especificação francesa NF P 98-250-2 (AFNOR, 1991a) "*Preparation des Mélages Hydrocarbonés*" .

Este equipamento simula melhor que o procedimento Marshall as condições de compactação de campo, obtendo amostras cujo estado do material assemelha-se mais ao de pista.

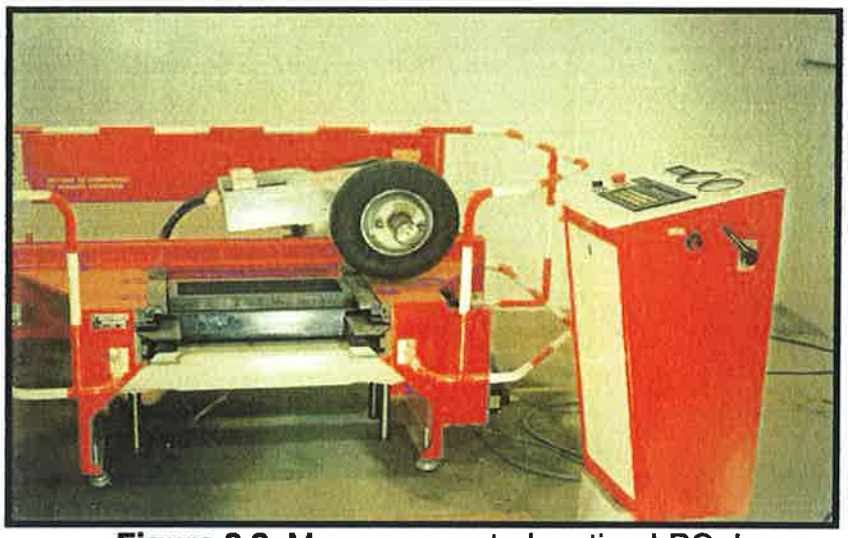

Figura 3.2: Mesa compactadora tipo LPC do LTP/EPUSP, usada na moldagem de placas de misturas asfálticas de SMA

O ensaio, propriamente dito, de deformação permanente nas trilhas de roda é conduzido a 60°C até 30.000 ciclos, no simulador de tráfego tipo LPC – Figura 3.3, segundo a especificação francesa NF P 98-253-1 (AFNOR, 1991b) "*Déformation Permanente des Mélages Hydrocarbonés*".

Além da temperatura, a pressão do pneu e a carga do eixo também são controladas. As passagens da roda sobre as placas são feitas em ciclos de ida e volta do pneu na freqüência de 1 Hz. As medidas de afundamento são realizadas em 15 pontos distintos da trilha de roda, conforme especifica a norma francesa.

Figura 3.3: Equipamento simulador de tráfego tipo LPC, para estudo do comportamento à deformação permanente, do LTP/EPUSP

3.7.2. Avaliação da Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os revestimentos asfálticos quando sujeitos às solicitações do tráfego, desenvolvem, geralmente, tensões de tração por flexão em suas fibras inferiores.

Através de ensaios mecânicos de laboratório, a relação entre o módulo de resiliência e o valor da resistência à tração na ruptura, permite avaliar de forma qualitativa, o comportamento das misturas asfálticas no que diz respeito a sua suscetibilidade ao trincamento, frente às solicitações impostas pelo trafego.

O ensaio de resistência à tração é realizado de acordo com a norma DNER-ME 138/94 (DNER, 1994a). Os corpos de prova são moldados e compactados de acordo o ensaio Marshall (DNER-ME 043/95).

Basicamente, o ensaio conduzido a 25°C, consiste em romper um corpo de prova cilíndrico segundo o plano diametral vertical, com a aplicação de uma carga progressiva de compressão a velocidade constante de 0,8 +/- 0,1 mm/s, obtida através da prensa Marshall - Figura 3.4.

A resistência à tração é obtida através da seguinte expressão:

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H}, \text{ onde,} \qquad (3.1)$$

σ_R – resistência à tração por compressão diametral, MPa;

F – carga de ruptura, N;

D – diâmetro do corpos de prova, cm;

H – altura do corpos de prova, cm.

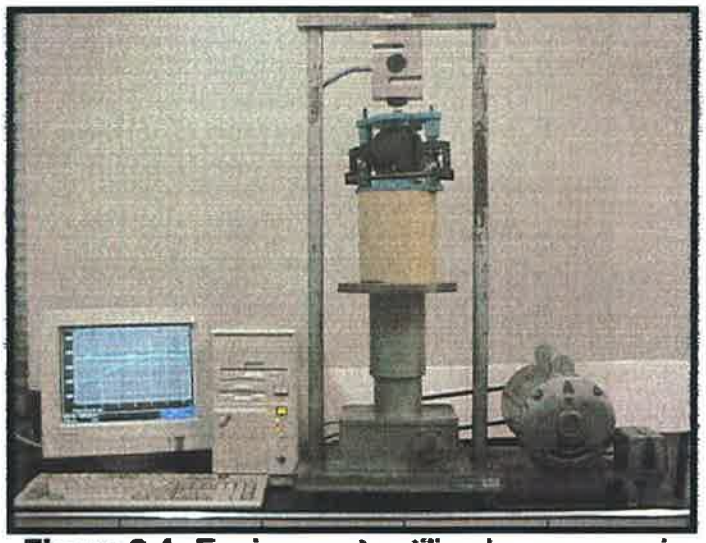

Figura 3.4: Equipamento utilizado para ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral

3.7.3. Avaliação do Módulo de Resiliência

O fenômeno da fadiga de um revestimento asfáltico consiste na sua ruptura (fissuração) quando solicitado inúmeras vezes por cargas menores que a sua resistência à tração.

A repetição das deformações recuperáveis ou resilientes é a responsável pela fadiga dos revestimentos asfálticos. Por outro lado, as deformações permanentes ou não recuperáveis são as responsáveis pela formação de afundamentos nas trilhas de roda.

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

$$MR = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_t}\right)_T \qquad (3.2)$$

MR - módulo de resiliência,

σ - tensão vertical resultante de carga aplicada dinamicamente,

ε_t - deformação específica recuperável ou resiliente horizontal correspondente à tensão aplicada.

O ensaio de módulo de resiliência é realizado de acordo com a norma DNER-ME 133/94 (DNER, 1994b). Os corpos de prova são moldados e compactados de acordo o ensaio Marshall (DNER-ME 043/95).

Basicamente, o ensaio conduzido a 25°C, consiste em aplicar 500 vezes uma carga vertical cíclica (F) diametralmente no corpo de prova, de modo a se obter uma tensão (σ) menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático.

As leituras de deslocamento e carga são realizadas a 300, 400 e 500 repetições de carga. Tem-se utilizado carga com magnitude de cerca de 10% a 15% da carga de ruptura nos ensaios conduzidos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação – EPUSP, de modo a minimizar danos aos corpos de prova. Os deslocamentos do corpo de prova são medidos através de LVDT (*linear variable differential transformer*). O ciclo de aplicação da carga é de 1Hz, sendo 0,1s o tempo de carga e 0,9s o tempo de alívio.

Todos os registros de carga e de deslocamento são efetuados por um programa de aquisição de dados instalado em um microcomputador que gerencia o ensaio de resiliência - Figura 3.5.

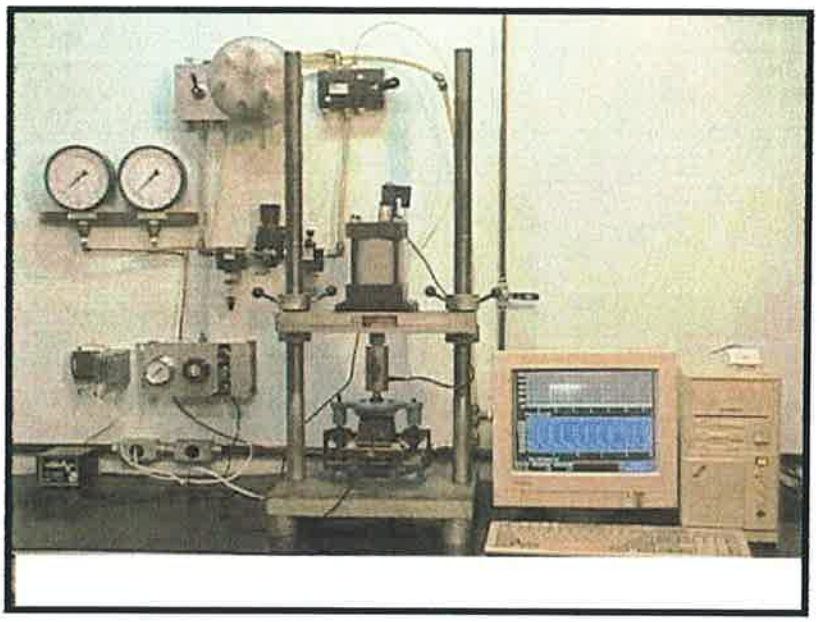

Figura 3.5: Equipamento utilizado para ensaio de determinação do módulo de resiliência por compressão diametral do LTP/EPUSP

Com os valores obtidos, é calculado com base em estudos de HONDROS, prosseguidos por GONZALEZ et al., (1975), o módulo de resiliência a partir da seguinte expressão:

$$MR = \frac{F}{100 d_R H} \cdot (0{,}9976\mu + 0{,}2692), \qquad (3.3)$$

onde:

MR - módulo de resiliência, em MPa

F - carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, em N

d_R - média do deslocamento elástico ou resiliente correspondente à carga aplicada, em cm

H - altura do corpo de prova, em cm

μ - coeficiente de Poisson (a norma do DNER recomenda adotar o valor de 0,3).

3.8. Avaliação de Aderência

A avaliação de aderência é dependente do tipo de equipamento utilizado para a realização dos ensaios. Podem ser utilizados veículos especialmente equipados para medir o coeficiente de atrito longitudinal (CAL) e transversal (CAT) ou equipamentos portáteis para medir o coeficiente de atrito e a macrotextura.

Embora forneçam dados bastante pontuais, os equipamentos portáteis, tais como: o pêndulo britânico e o ensaio de mancha de areia, são comumente empregados para coletar informações importantes sobre a aderência. Tendo em vista a facilidade e a economia em sua operação, foram utilizados tais recursos nesta pesquisa.

3.8.1. Pêndulo Britânico-SRT

O pêndulo britânico SRT (*Skid Resistence Tester*) determina o grau de aderência entre o pneu e a superfície do pavimento ou também chamado como coeficiente de atrito cinemático.

Os resultados deste ensaio (AASHTO T-278-90) servem como um referencial para a avaliação da microtextura dos agregados da camada de rolamento, componente do coeficiente de atrito (μ).

A microtextura desempenha um papel de grande importância na segurança do usuário para tráfego em baixas velocidades.

O equipamento consiste em uma placa de borracha, simulando a superfície de um pneu de veículo automotor, acoplado na extremidade de um pêndulo, que quando liberado em queda livre, descreve um arco circular que tangência e fricciona a superfície do pavimento.

A diferença de altura entre o centro de gravidade da placa de borracha, medida antes e após seu deslizamento sobre a superfície, é utilizada para avaliar a perda de energia devido ao atrito. As condições do ensaio foram definidas de tal forma que os valores obtidos pelo aparelho representam o Valor de Resistência à Derrapagem – VRD de um pneumático padrão a 48 km/h.

A Figura 3.6 apresenta o pêndulo britânico SRT.

Figura 3.6: Pêndulo britânico SRT

Segundo o DNER (1998), os valores limites de VRD relacionados ao tipo de segmento que oferece riscos potenciais à segurança do usuário, são descritos na Tabela 3.13.

Tabela 3.13: Valor limite para o VRD proposto pelo "*Marshall Commitee*"

CATEGORIA	TIPOS DE SEGMENTO	VRD LIMITE
A	Cruzamento em níveis Curvas com raio inferior a 150 m Rampas superiores a 5% c/extensão de 100 m Semáforos transversais urbanos	58
B	Rod. com Velocidade Superior a 80 km/h Rod. urbanas com VDM superior a 200	53 47
C	Rodovias sem sinuosidade, planas, sem tráfego expressivo e sem interseções perigosas	42

3.8.2. Ensaio de Mancha de Areia

O ensaio de mancha de areia tem sido utilizado sistematicamente, mesmo em países desenvolvidos, para avaliar a macrotextura, caracterizando a superfície quanto a sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu/pavimento para velocidades acima de 60 km/h. A altura média de mancha de areia é determinada de acordo com o método de ensaio ASTM E 965-87 (95). Basicamente, o ensaio consiste em preencher os vazios da textura superficial do revestimento através do espalhamento uniforme e circular de um determinado volume de areia.

O equipamento constitui-se de: um recipiente de volume conhecido preenchido com areia de granulometria padrão; um dispositivo para o espalhamento da mesma e uma régua para relacionar o diâmetro da mancha com o volume de areia espalhada Determinam-se três medidas de diâmetros do círculo obtido na superfície e faz-se a média aritmética dos valores (Dm).

A altura média de mancha de areia (HS), expressa em milímetros (mm) é dada pela equação:

$$HS = \frac{4 \times \text{Volume de areia}}{3{,}14 \times Dm^2}$$

A Figura 3.7 apresenta o equipamento necessário para a realização do ensaio de mancha de areia.

Figura 3.7: Equipamento necessário para o ensaio de mancha de areia

As classes de macrotextura, em função da altura de mancha de areia, apresentadas na Tabela 3.14, expressam conceitos de resistência à derrapagem em condições de pista molhada e velocidades elevadas.

Tabela 3.14: Intervalos de valores e respectivos conceitos para as medidas de macrotextura (mancha de areia)

CLASSE	PROFUNDIDADE MÉDIA	TEXTURA SUPERFICIAL
A	HS < 0,2 mm	Muito fina ou muito fechada
B	0,2 mm < HS < 0,4 mm	Fina ou fechada
C	0,4 mm < HS < 0,8 mm	Média
D	0,8 mm < HS < 1,2 mm	Rugosa ou aberta
E	HS > 1,2 mm	Muito rugosa ou muito aberta

Para fins comparativos, revestimentos asfáltico densos (CBUQ's), apresentam características, em termos de aderência pneu/pavimento, de textura fina até muito fina, em alguns casos.

Em contrapartida, microrrevestimentos asfálticos e tratamentos superficiais apresentam textura rugosa, proporcionando ao longo de sua vida útil, boas condições de segurança para os usuários em dias chuvosos.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo descreve o programa de laboratório e de campo adotado para a avaliação da mistura asfáltica SMA.

Inicialmente, foi desenvolvida uma sistemática experimental envolvendo os laboratórios do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Ipiranga Asfaltos S.A e de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP, visando:

- Selecionar o ligante asfáltico a ser empregado na mistura SMA, tendo em vista as condições climáticas brasileiras e o tipo de ligante disponível nas regiões sudeste e sul do país;

- Confeccionar o projeto de dosagem da mistura para execução de trecho experimental em rodovia;

Posteriormente, procedeu-se a execução do revestimento SMA em uma seção teste, com o objetivo de:

- Avaliar os principais aspectos executivos relacionados aos materiais, fabricação, armazenamento, transporte, aplicação e controles tecnológicos referentes aos componentes e a mistura asfáltica;

- Monitorar através de ensaios preliminares as principais características relacionadas à segurança do usuário.

4.2 Seleção do Ligante Asfáltico para a Mistura SMA

Neste item constam a procedência, natureza mineralógica e caracterização dos materiais utilizados, as relações / parâmetros volumétricos e estudo Marshall para atender aos requisitos do projeto de dosagem da mistura betuminosa, bem como, a apresentação e análise dos resultados de ensaios de deformação permanente, módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral e adesividade ligante/agregado para os três tipos de ligantes asfálticos estudados, definidos no item 3.2.3, a saber:

- AMP-1 (Asfalto modificado com 3% a 4% de polímero SBS);
- AMP-2 (Asfalto modificado com 5% a 6% de polímero SBS);
- CAP-20 (Cimento asfáltico de petróleo proveniente da refinaria REPLAN - SP).

4.2.1 Procedência e Natureza Mineralógica dos Materiais

Os materiais relacionados na Tabela 4.1 foram utilizados para a confecção dos corpos de prova e das placas de SMA.

Tabela 4.1: Procedência e natureza mineralógica dos materiais

MATERIAL	PROCEDÊNCIA	NATUREZA MINERALÓGICA
Brita ½	Pedreira Embú	Gnaisse
Pedrisco	Pedreira Embú	Gnaisse
Pó de Pedra	Pedreira Embú	Gnaisse
Filer Mineral	(Supercal) Depósito Mat. Construção	Cal Calcítica CH-I
Fibra de Vidro	Ipiranga Asfaltos S/A	Mineral
AMP-1	Ipiranga Asfaltos S/A	Deriv. de Petróleo
AMP-2	Ipiranga Asfaltos S/A	Deriv. de Petróleo
CAP-20	Ipiranga Asfaltos S/A	Deriv. de Petróleo

4.2.2 Caracterização, Massa Específica e Granulometria dos Agregados

A Tabela 4.2 traz a caracterização dos agregados graúdo e fino provenientes da região da grande São Paulo. A Tabela 4.3 apresenta a massa específica e a graduação dos agregados utilizados para compor o traço da mistura estudada. A curva granulométrica para cada material é apresentada na Figura 4.1.

Tabela 4.2: Caracterização dos agregados

ENSAIO	MÉTODO COM BASE	ESPECIFICAÇÃO MÍNIMO	ESPECIFICAÇÃO MÁXIMO	RESULTADO
Equivalente de Areia (%)	DNER 054/97	55.0	-	57.1
Índice de Forma	DNER 086 / 94	0.5	-	0.8
Adesividade	DNER 078 / 94	SATISF.	-	SATISF.
Abrasão Los Angeles(%)	DNER 035 / 98	-	30.0	29.0
Durabilidade(%)	DNER 089 / 94	-	12.0	< 12.0
Absorção (%)	AASHTO T-85	-	2.0	< 2.0
Azul de Metileno (mg/g)	ISSA TB-145	-	10.0	5.0

Tabela 4.3: Massa específica e granulometria dos agregados

MATERIAL	BRITA ½	PEDRISCO	PÓ DE PEDRA	FÍLER MINERAL
Massa Específica (KN/m³)	26.07	25.98	26.94	25.70
Peneiras e % de Material Passante				
12,7mm : ½"	100.0	100.0	100.0	100.0
9,5mm : 3/8"	95.3	100.0	100.0	100.0
4,8mm : nº4	14.0	0.0	100.0	100.0
2,0mm : nº10	1.3	0.0	86.7	100.0
0,074mm : nº200	0.4	0.0	17.5	95.0

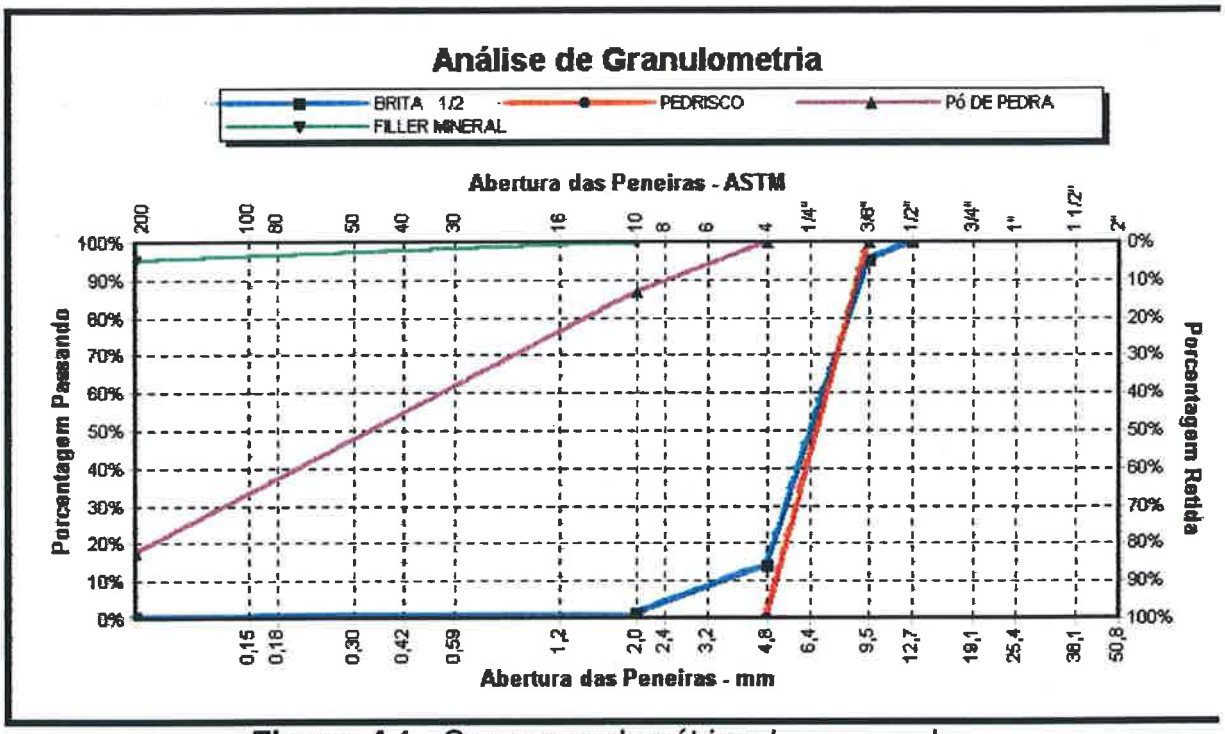

Figura 4.1 - Curva granulométrica dos agregados

4.2.3 Composição da Mistura Seca e Graduação do Traço

A Figura 4.2. apresenta uma foto dos componentes da mistura seca de SMA e a Tabela 4.4. traz a sua composição em peso. A graduação resultante do traço obedece a faixa granulométrica D-8 da comunidade européia (*European Standard*) para o SMA - Tabela 4.5 e Figura 4.3.

Figura 4.2: Componentes da mistura seca de SMA

Tabela 4.4: Composição da mistura seca

MATERIAL	PORCENTAGEM
Brita ½	10.0
Pedrisco	56.8
Pó de Pedra	29,9
Fibra de Vidro	0,3
Fíler Mineral	3.0

Tabela 4.5: Porcentagens de material passante nas peneiras para composição do traço de SMA

PENEIRAS	TRAÇO (%)	FAIXA D8 (%)		TOLERÂNCIA (%)
		Limite Inferior	Limite Superior	
12,7mm : ½"	100	100.0	100.0	+/- 4.0
9,5mm : 3/8"	99.5	90.0	100.0	+/- 4.0
4,8mm : nº4	34.4	25.0	45.0	+/- 3.0
2,0mm : nº10	29.1	20.0	30.0	+/- 3.0
0,074mm : nº200	8.0	8.0	12.0	+/- 2.0

Conforme observa-se na Figura 4.3 é fundamental garantir a descontinuidade da curva granulométrica entre as peneiras nº 04 e nº10 e uma alta porcentagem de fíler para obtenção de mistura impermeável, porém de macrotextura adequada para proporcionar alta drenabilidade superficial e alta aderência pneu/pavimento em pista molhada.

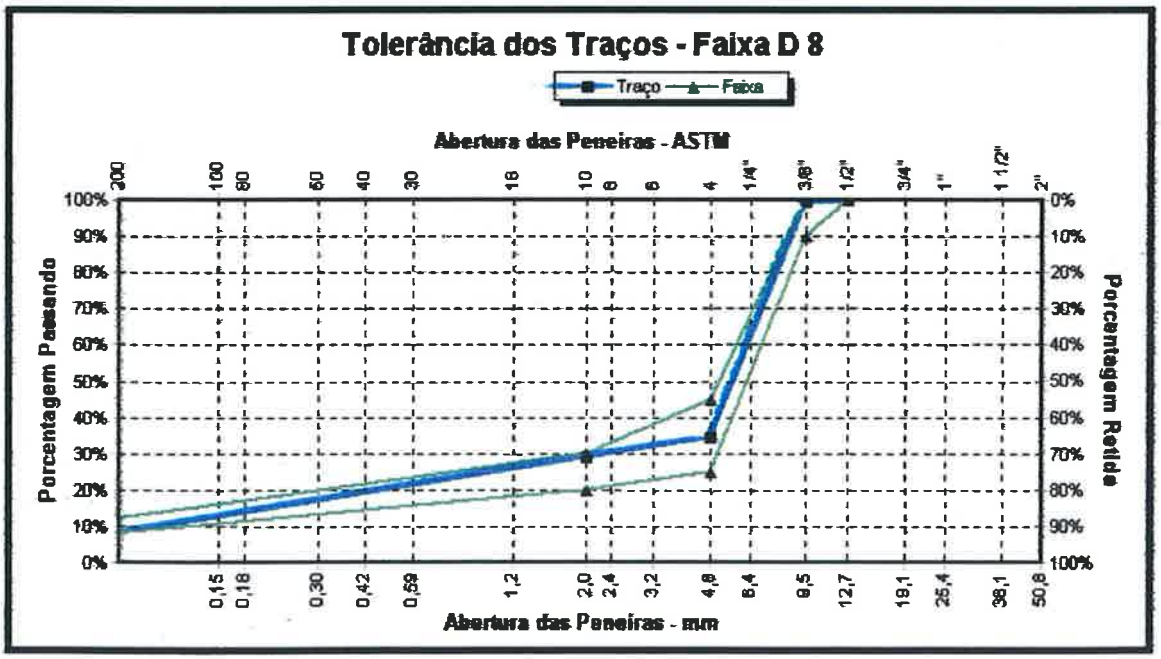

Figura 4.3: Graduação de SMA estudado, enquadrado na faixa D-8 da comunidade européia

4.2.4 Ligante Asfáltico

Na Tabela 4.6 são descritas as principais características dos asfaltos modificados por polímeros tipo SBS selecionados para esta pesquisa, e as de um asfalto convencional CAP-20, utilizado para comparação de resultados de comportamento.

Tabela 4.6: Características dos ligantes asfálticos utilizados na pesquisa

ENSAIOS	CAP-20	AMP-1	AMP-2
Ponto de amolecimento (°C)	50,0	58,0	85,8
Penetração (dmm)	48	55	59
Índice de suscetibilidade térmica	1,28	2,37 (*)	3,25 (*)
Viscosidade a 60°C (P)	2884,0	---	---
Viscosidade a 175°C (cP)	68,4	250,0	348,0
Recuperação elástica (%)	0,0	75,0	98,5
Estabilidade ao armazenamento, 163°C, 5 dias (°C)	---	1,0	0,8

(*) Calculado a partir do IP – Índice de Penetração

4.2.5 Fibras

Fibras inorgânicas de vidro de diâmetro nominal de 12 microns e comprimento médio, entre 4 a 5 mm, foram utilizadas nesta pesquisa. A motivação de tal uso deu-se uma vez 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 (*Draindown Sensitivity*), através de exposição em estufa por uma hora, à temperatura de mistura, de cerca de 1200g de amostra, calculando, após este período de exposição, a massa de ligante que saiu (escorreu) da mistura, conforme norma AASHTO-T-305-97.

O valor obtido neste ensaio foi inferior ao 0,3%, conforme recomendado (NAPA, 1999), resultando, praticamente, em 0,3% de fibras de vidro em peso da mistura SMA para os três tipos de ligantes asfálticos estudados, conforme Tabela 4.8.

4.2.6 Estudo Marshall para os Ligantes Asfálticos

Os corpos de prova Marshall foram moldados e compactados, nas respectivas temperaturas de usinagem e compactação de acordo com a Figura 4.4. e Tabela 4.7. A Tabela 4.8 apresenta a composição da mistura SMA para quatro teores de ligante asfáltico, de acordo com o procedimento do Ensaio Marshall (DNER ME – 043/95).

As Figuras 4.5., 4.6 e 4.7 apresentam o Estudo Marshall para os três tipos de ligantes asfálticos pesquisados. A dosagem ótima de ligante asfáltico foi realizada de forma a obter 4% de volume de vazios, em corpos de prova

compactados com 50 golpes por face, conforme recomendação da NAPA, (1999).

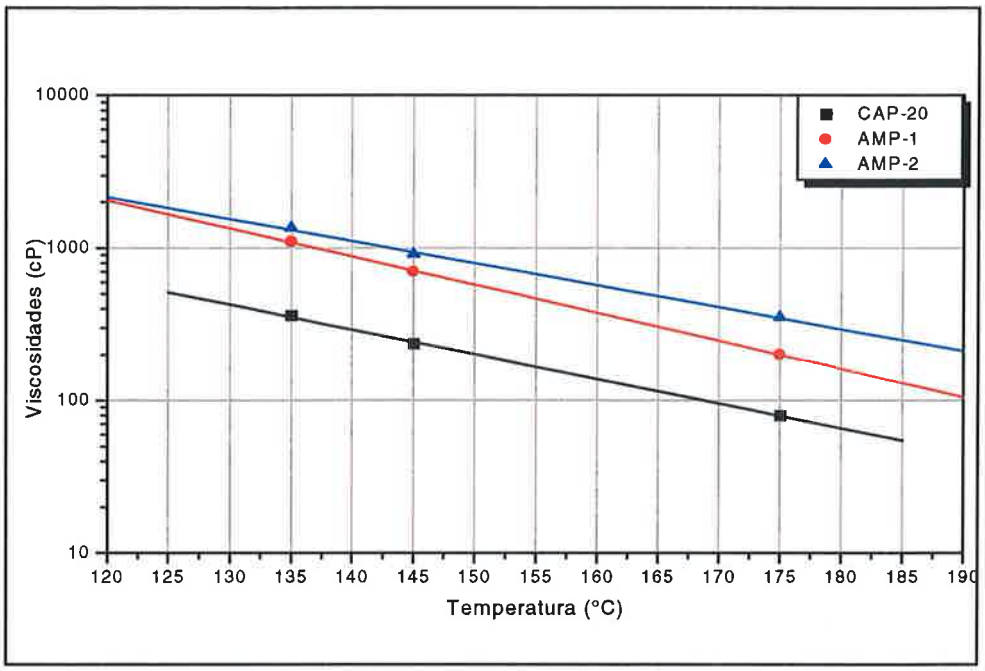

Figura 4.4: Gráfico de viscosidade x temperatura para os ligantes asfálticos

Observando-se as figuras 4.5, 4.6 e 4.7 verifica-se que os teores ótimos obtidos, segundo este critério, são praticamente iguais para os três tipos de ligantes estudados, correspondendo a 6,0% em peso da mistura SMA.

Tabela 4.7: Temperatura de usinagem e compactação para o SMA

LIGANTE	FAIXAS DE TEMPERATURA (°C)	
	USINAGEM	COMPACTAÇÃO
CAP – 20	133 – 152	120 – 138
AMP-1	158 – 165	132 – 142
AMP-2	170 – 180	137 –150

Tabela 4.8: Composição da mistura para quatro teores de ligante

COMPOSIÇÃO DA MISTURA	TRAÇOS ESTUDADOS (%)			
	I	II	III	IV
BRITA ½	9.416	9.372	9.318	9.275
PEDRISCO	53.672	53.421	53.112	52.866
Pó DE PEDRA	28.249	28.116	27.954	27.824
FILER MINERAL	2.825	2.812	2.795	2.782
FIBRA DE VIDRO	0.301	0.300	0.298	0.297
LIGANTE ASFALTICO*	5.537	5.979	6.523	6.956
TOTAL	100.000	100.000	100.000	100.000

* CAP-20, AMP-1, AMP-2

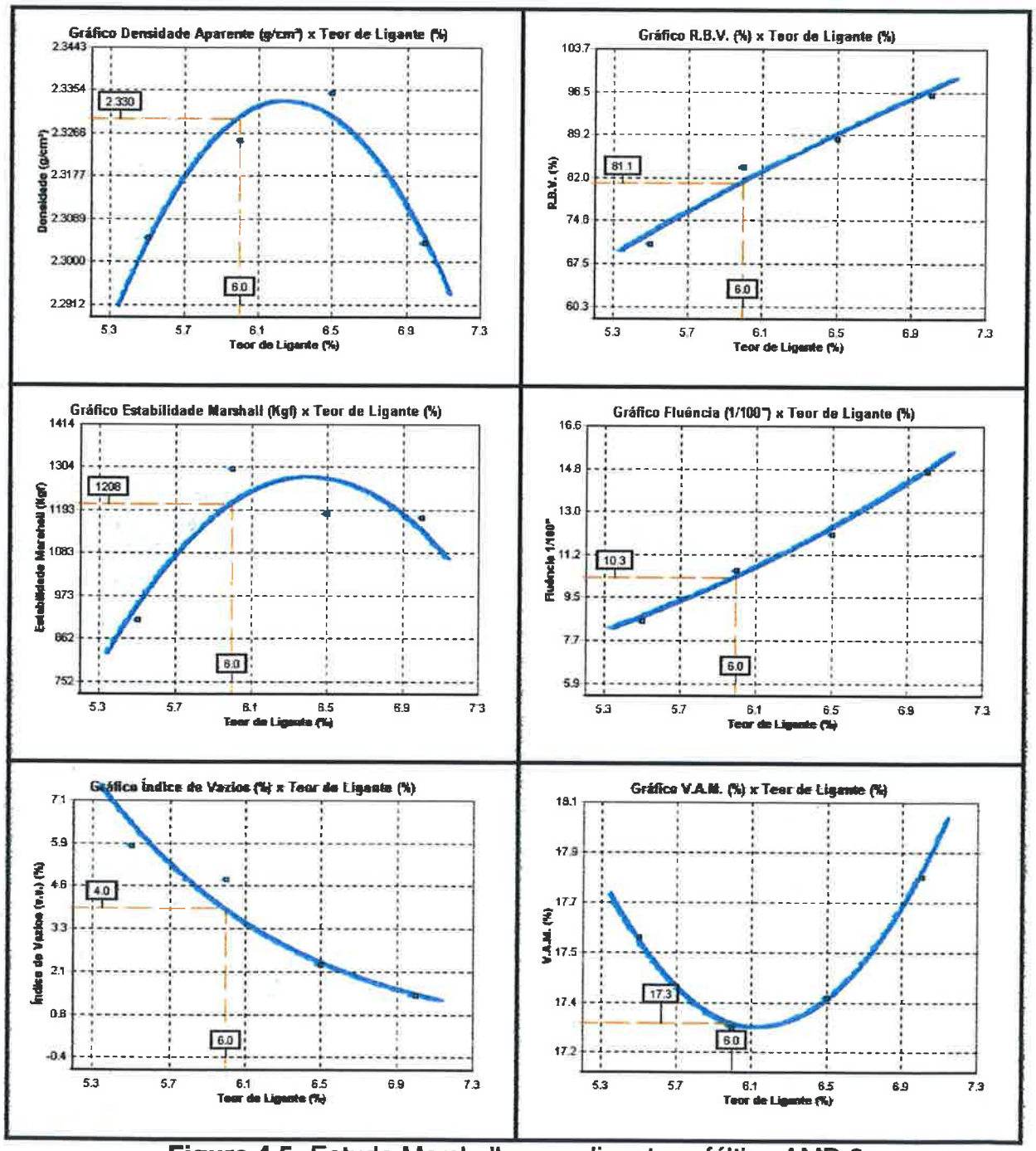

Figura 4.5: Estudo Marshall para o ligante asfáltico AMP-2

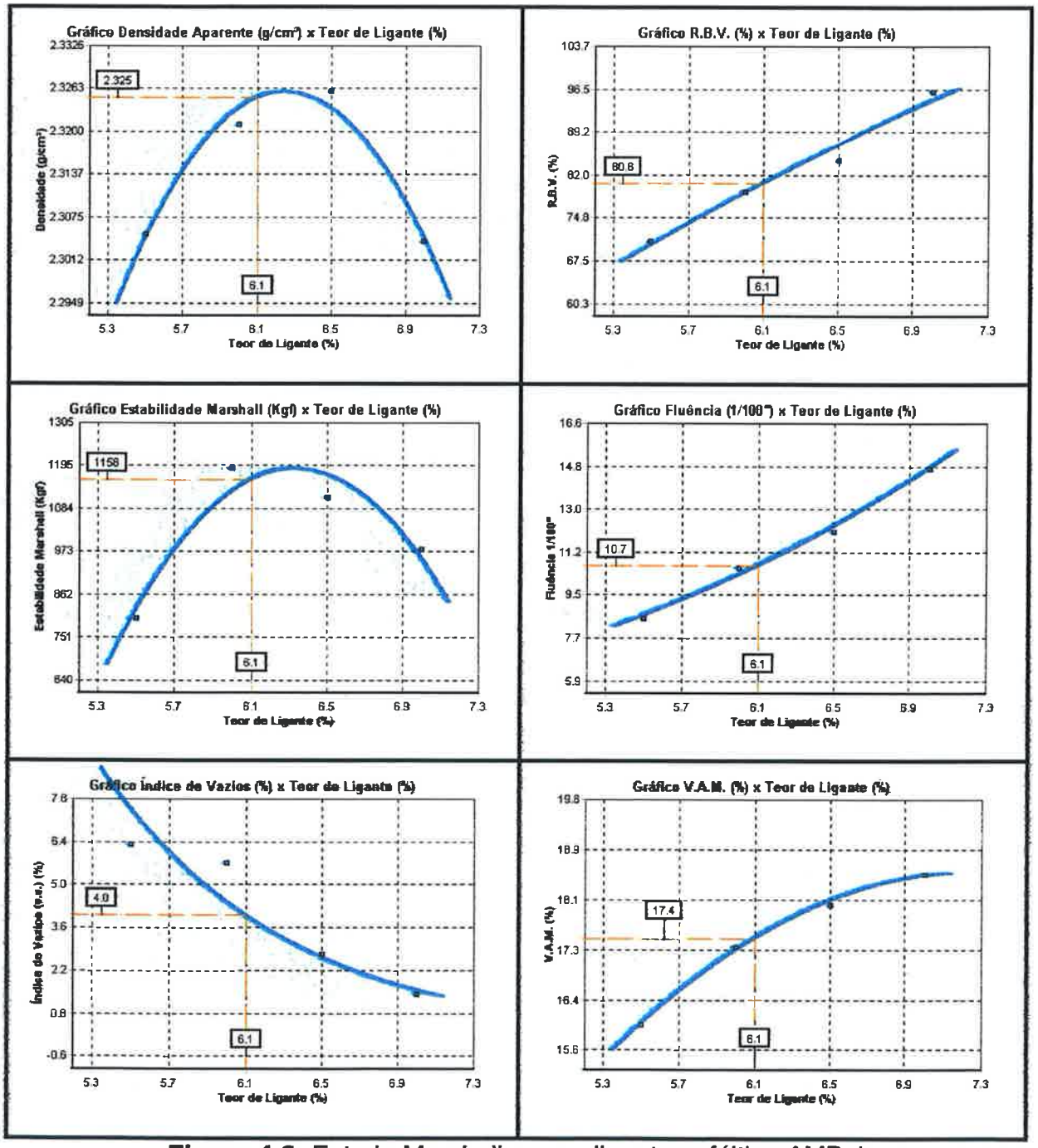

Figura 4.6: Estudo Marshall para o ligante asfáltico AMP-1

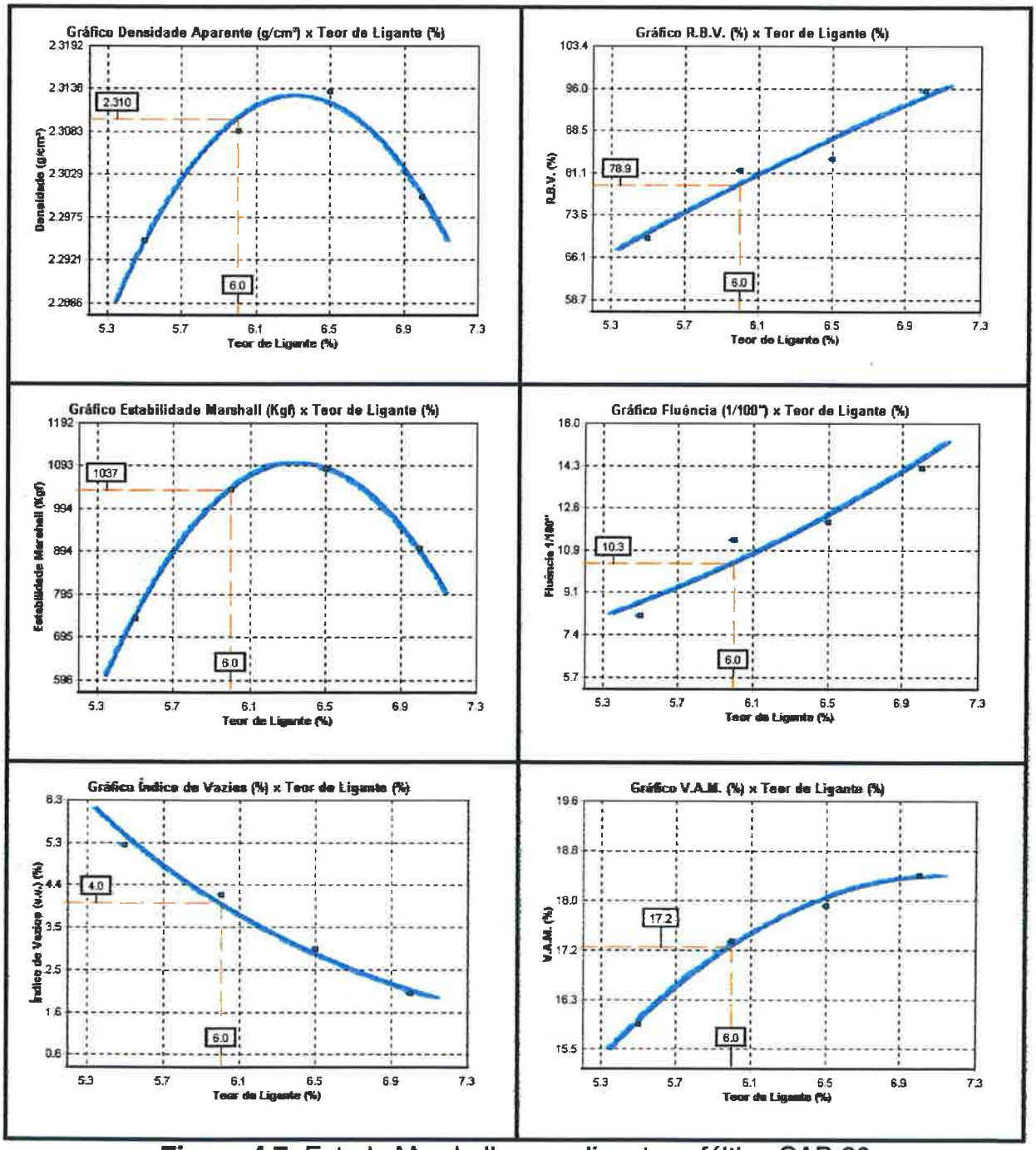

Figura 4.7: Estudo Marshall para o ligante asfáltico CAP-20

4.2.7 Composição Final da Mistura e Resultados do Projeto de Dosagem

A seguir são apresentados a composição em peso de cada componente na mistura SMA, bem como os resultados do projeto de dosagem para os ligantes asfálticos estudados – Tabelas 4.9 e 4.10.

Tabela 4.9: Composição final da mistura

Materiais	Traço (%)	Tolerância (%)
BRITA ½	9.4	+/- 4.0
PEDRISCO	53.4	+/- 3.0
Pó DE PEDRA	28.1	+/- 2.0
FILER MINERAL	2.8	+/- 2.0
FIBRA DE VIDRO	0.3	+/- 10.0
LIGANTE ASFALTICO*	6.0	+/- 2.0

*CAP-20, AMP-1, AMP-2

Tabela 4.10: Resultados do projeto de dosagem

CARACTERISTICAS	LIGANTE ASFALTICO			ESPECIFICAÇÃO	
	CAP-20	AMP-1	AMP-2	Mínimo	Máximo
Massa Específica Aparente (kN/m³)	23.10	23.25	23.30	-	-
Estabilidade Marshall (kgf)(1)	1037	1158	1208	650	-
Fluência (1/100")(1)	10.3	10.7	10.3	8.0	16.0
Vazios (%)(1)	4.0	4.0	4.0	3.0	4.0
R.B.V. (%)(3)	78.9	80.6	81.1	75.0	82.0
V.A.M. (%)(1)	17.2	17.4	17.3	17.0	-
V.C.Amix. (%)(1)	44.4	44.1	43.9	-	45.2(2)
Relação Fíler – Betume	1.3	1.3	1.3	0.6	1.6
0Resist. Tração, R1 (kgf/cm²)	11,0	9,1	13,0	-	-
Resist. Tração, R2 (kgf/cm²)	13,8	10,1	15,0	-	-
Relação Resist. Tração RRT, (%)(1)	125,0	112,0	116,0	70.0	-
Escorrimento, 1hora, (%)(1)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	-	0.3

(1) - Conforme recomendação (NAPA - AASHTO, 1999)
(2) - V.C.A drc (AASHTO T-19)
(3) - Conforme (DNER-ES 385/99)

4.2.8 Estudo de Comportamento da Mistura

Com o objetivo de selecionar o tipo de ligante asfáltico para a mistura SMA foram executados ensaios de deformação permanente, módulo de

resiliência, resistência à tração por compressão diametral e de resistência à ação deletéria da água.

Todos os ensaios foram realizados em amostras de SMA no teor ótimo de 6,0% de ligante asfáltico, tanto para os ligantes modificados, como para o convencional CAP 20. A graduação e composição foram fixadas para todos os ligantes pesquisados, sendo o teor de fibra de vidro e cal de 0,3% e 2,8% em peso da mistura SMA, respectivamente.

4.2.8.1. Deformação Permanente em Trilhas de Roda

O processo de mistura dos materiais teve o seguinte procedimento: pesagem de cada componente já aquecidos na quantidade exata do traço, conforme apresentado na Tabela 4.9.

Primeiramente, colocou-se a brita ½", o pedrisco e o pó de pedra no tacho da misturadora, previamente aquecida e, após homogeneização dessas partes, foi adicionado o fíler e as fibras.

Após o processo de misturação acrescentou-se o ligante asfáltico e tornou-se a homogeneizar a massa. Todo este processo decorre em um período de 5 a 8 minutos, na temperatura de usinagem da mistura, de acordo com a Tabela 4.7.

A Figura 4.8 mostra a misturadora desenvolvida para esta finalidade.

Figura 4.8: Misturadora de massa asfáltica Instalada no LTP-EPUSP

Após a retirada da mistura asfáltica da misturadora, a mesma é colocada dentro de uma estufa regulada na temperatura de moldagem (temperatura correspondente à compactação), conforme a Tabela 4.7.

Duas placas, com dimensões de 180 mm de largura x 500 mm de comprimento x 50 mm de espessura foram moldadas para cada tipo de ligante estudado, na mesa compactadora tipo LPC até se obter a densidade de projeto.

Após um dia, foram submetidas ao ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego tipo LPC, segundo procedimento descrito no ítem 3.7.1.

Os ensaios foram conduzidos a 60ºC até 30.000 ciclos de carga, como preconiza o procedimento francês, apresentado no capítulo 3. A pressão de inflação do pneu foi de 6 psi.

As curvas de afundamento nas trilhas de roda, bem como a deformação em porcentagem nas respectivas placas são apresentadas na Figura 4.9. A Figura 4.10 apresenta as amostras retiradas (cerradas) da parte central das placas ensaiadas no simulador de tráfego após 30.000 ciclos, para efeito ilustrativo e comparação de afundamentos.

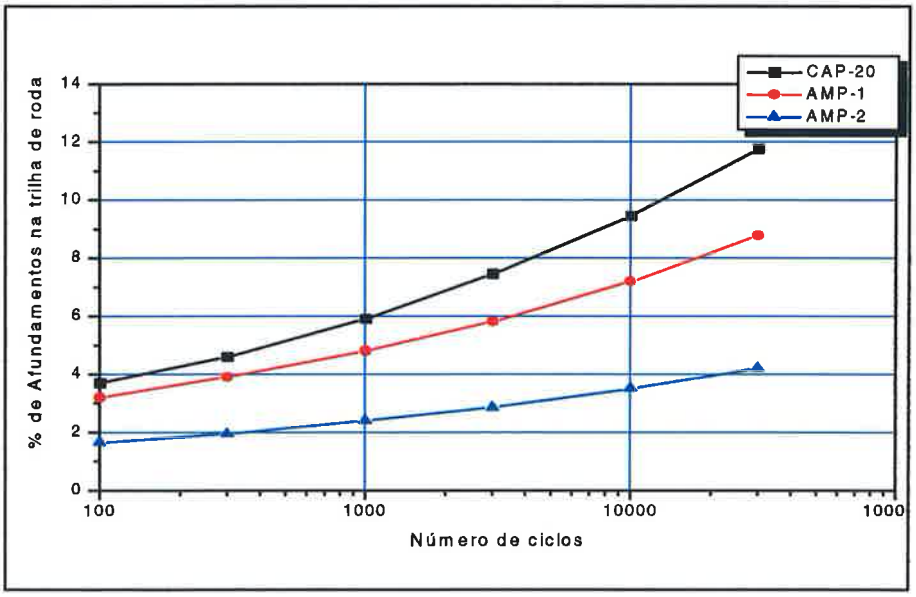

Figura 4.9: Afundamentos em trilhas de roda no simulador de tráfego tipo LPC, para misturas de SMA testadas com três diferentes ligantes asfálticos

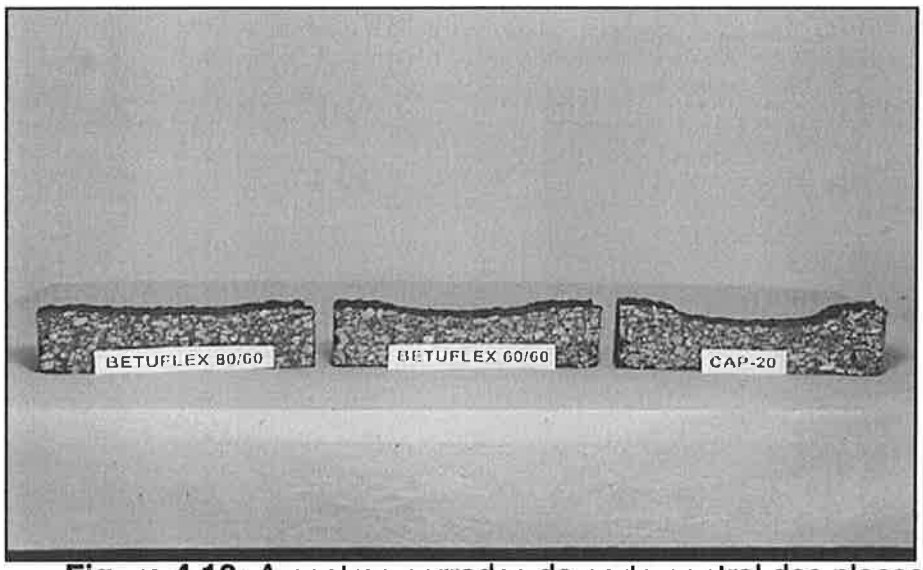

Figura 4.10: Amostras cerradas da parte central das placas ensaiadas no simulador de tráfego tipo LPC para comparação visual entre afundamentos nas trilhas de roda

Analisando os resultados de deformação permanente, pode-se verificar o efeito importante do ligante asfáltico modificado na deformação permanente, reduzindo o afundamento de forma expressiva.

Para o ligante asfáltico CAP-20 observa-se um afundamento de aproximadamente 12% para solicitação de 30.000 ciclos; já para o ligante asfáltico modificado por SBS, AMP-1, este valor foi de cerca de 9% e para o ligante modificado por SBS, AMP-2, este valor foi ainda menor, da ordem de 4%.

Deve-se ressaltar que os valores obtidos de deformação permanente demonstram a alta resistência da mistura com asfalto modificado por polímero (AMP-1 e AMP-2), viabilizando suas utilizações em camada de revestimento para vias de alto volume de tráfego, conforme recomendação francesa; já o ligante asfáltico CAP-20 disponível nas regiões sul e sudeste do Brasil, está acima do máximo admissível pelas especificações européias.

4.2.8.2 Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral

Foram confeccionados três corpos de prova cilíndricos, com 101,6 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, para cada um dos tipos de ligante asfáltico, a saber: AMP-1, AMP-2 e CAP-20. A compactação dos corpos de prova foi realizada com compactador automático tipo Marshall e energia mecânica de 50 golpes por face. As temperaturas de mistura e compactação dos CPs foram obtidas a partir da Tabela 4.7, apresentadas anteriormente.

Os ensaios para a determinação dos valores de módulo de resiliência e de resistência à tração por compressão diametral foram ambos realizados a 25°C, segundo os procedimentos descritos nos itens 3.7.3 e 3.7.2, respectivamente, do capítulo 3.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados obtidos de módulo de resiliência e de resistência à tração por compressão diametral das misturas de SMA ensaiadas.

Observa-se que os valores de módulo de resiliência e de resistência à tração são da mesma ordem de grandeza de bons concretos asfálticos. Ou seja, o SMA não é uma mistura significativamente rígida, possibilitando seu uso em situações de estruturas de pavimentos compatíveis com aquelas onde se indicariam CBUQ, sem necessidade adicional de redução de deflexões por meio de enrijecimento de bases ou sub-bases, ou mesmo requerendo espessuras de SMA mais expressivas.

Afirmar que, quanto maior o valor de módulo de resiliência, melhor o desempenho da mistura asfáltica pode não ser verdadeiro. As misturas asfálticas devem possuir flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego e boa resistência à tração para evitar rupturas precoces.

A rigidez do revestimento deve estar compatibilizada com toda a estrutura do pavimento. A vida de fadiga deve ser a maior possível; o emprego de asfalto modificado por polímero deve aumentar a vida de fadiga do SMA por causa da expressiva recuperação elástica imprimida no ligante pelo SBS; para confirmação da melhoria de comportamento, devem-se realizar ensaios para tais finalidades.

Comparando-se valores da relação MR/RT como indicativo de vida de fadiga, pode-se observar que o menor valor é apresentado pela mistura SMA confeccionada com AMP-2. Quanto menor este valor, melhor o comportamento mecânico garantindo uma combinação de alta flexibilidade com elevada resistência à tração. Uma possível causa do valor alto de resistência à tração da mistura com CAP-20, deve-se provavelmente ao fato da adição de cal em quantidade expressiva (2,8%).

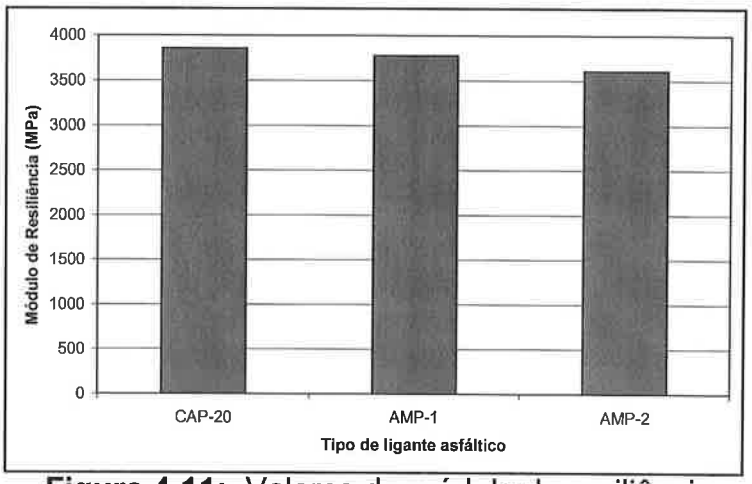

Figura 4.11: Valores de módulo de resiliência das misturas tipo SMA ensaiadas

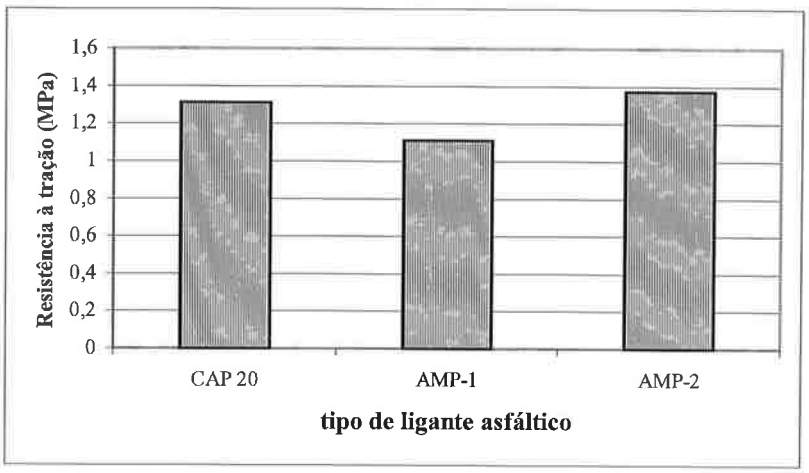

Figura 4.12: Valores de resistência à tração por compressão diametral das misturas tipo SMA ensaiadas

4.2.8.3 Resistência à Ação Deletéria da Água

Os ensaios de adesividade ligante/agregado das misturas asfálticas foram realizados em seis corpos de prova, moldados com 50 golpes por face, para cada um dos tipos de ligante asfáltico, a saber: AMP-1, AMP-2 e CAP-20, de acordo com o procedimento descrito no item 3.5.

A Tabela 4.11 mostra os resultados obtidos de resistência à ação deletéria da água das misturas de SMA ensaiadas. Observa-se que neste estudo não houve perda, mas um ganho de resistência para os três ligantes asfálticos.

O processo de condicionamento, provavelmente em função da temperatura, enrijeceu os ligantes promovendo maior resistência à mistura, sem desmobilizar o contato grão / ligante. Ressalta-se que o agregado é de boa qualidade quanto à adesividade. O bom comportamento dos três tipos de ligantes estudados também está relacionado à quantidade expressiva de cal adicionada na composição do traço.

Tabela 4.11: Resultados da resistência à ação deletéria da água

Amostra	RT com condicionamento	RT sem condicionamento	RRT (%)
AMP-1	1.01	0.91	112
AMP-2	1.50	1.30	116
CAP-20	1.38	1.10	125

4.2.8.4 Conclusão do Estudo de Comportamento da Mistura

Baseado nos resultados do estudo de deformação permanente, módulo de resiliência, resistência à tração e resistência à ação da água, podemos concluir que os ligantes asfálticos modificados por polímeros apresentaram melhor comportamento em relação ao CAP-20.

Destaca-se, o emprego do AMP-2 nas misturas SMA que oferece as seguintes vantagens:

- Redução de afundamentos em trilhas de roda;
- Provável aumento da vida de fadiga;
- Aumento da coesão da mistura SMA e, consequentemente, melhoria das condições de segurança em função da preservação da macrotextura do revestimento.

4.3 Projeto de Dosagem da Mistura SMA para Execução de Trecho Experimental

Baseado na conclusão do estudo de comportamento, apresentado no item anterior, foi selecionado o ligante asfáltico modificado por polímero SBS (AMP-2) para o projeto de dosagem da Mistura SMA, visando a execução de trecho experimental em rodovia.

4.3.1 Procedência e Natureza Mineralógica dos Materiais

Os materiais relacionados na Tabela 4.12 foram utilizados para a confecção dos corpos de prova e das placas de SMA.

Tabela 4.12: Procedência e natureza mineralógica dos materiais

MATERIAL	PROCEDÊNCIA	NATUREZA MINERALÓGICA
Brita ½	Pedreira Embú	Gnaisse
Pedrisco Limpo	Pedreira Embú	Gnaisse
Pó de Pedra	Pedreira Embú	Gnaisse
* Fíler Composto 70/30	Ecovias dos Imigrantes	Calcário
Fibra Celulose	Ecofibras	Orgânica
Melhorador Adesividade	Ipiranga Asfaltos S/A	-
AMP-2	Ipiranga Asfaltos S/A	Deriv. Petróleo

* 70% fíler calcário + 30% cal calcítica CH-I

4.3.2 Caracterização, Massa Específica e Granulometria dos Agregados

A Tabela 4.13 traz a caracterização dos agregados graúdo e fino provenientes da região da grande São Paulo. A Tabela 4.14 apresenta a massa específica e a graduação dos agregados utilizados para compor o traço da mistura estudada. A curva granulométrica para cada material é apresentada na Figura 4.13.

Tabela 4.13 : Caracterização dos agregados

ENSAIO	Método com Base	Especificação		Resultado
		Mínimo	Máximo	
Equivalente de Areia (%)	DNER 054/97	55.0	-	58.0
Índice de Forma	DNER 086 / 94	0.5	-	0.8
Adesividade	DNER 078 / 94	SATISF.	-	INSATISF.
Abrasão Los Angeles(%)	DNER 035 / 98	-	30.0	29.0
Durabilidade(%)	DNER 089 / 94	-	12.0	< 12
Absorção (%)	AASHTO T-85	-	2.0	< 2.0
Azul de Metileno (mg/g)	ISSA TB-145	-	10.0	5.0

Tabela 4.14: Massa específica e granulometria dos agregados

MATERIAL	BRITA ½	PEDRISCO LIMPO	PÓ DE PEDRA	FÍLER COMPOSTO 70/30
Massa Específica (KN/m³)	25.29	25.32	26.72	26.32
Peneiras e % de Material Passante				
19.1mm : 3/4"	100.0	100.0	100.0	100.0
12,7mm : 1/2"	92.5	100.0	100.0	100.0
9,5mm : 3/8"	35.6	97.6	100.0	100.0
4,8mm : nº4	1.8	69.8	100.0	100.0
2,4mm : nº8	1.2	15.3	77.2	100.0
0,074mm : nº200	0.4	1.2	14.6	78.3

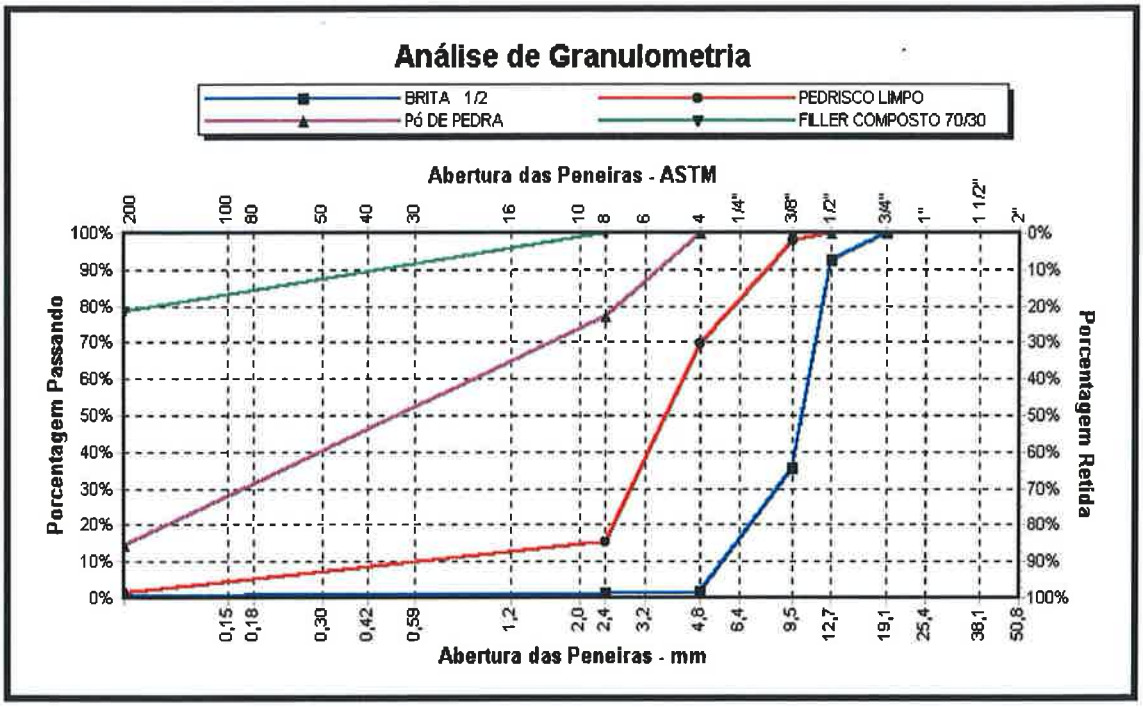

Figura 4.13: Curva granulométrica dos agregados

4.3.3 Composição da Mistura Seca e Graduação do Traço

A Figura 4.14 apresenta uma foto dos componentes da mistura seca de SMA e a Tabela 4.15 traz a sua composição em peso. Em função do tráfego intenso e pesado e das características do trecho experimental proposto para ser realizado na Via Anchieta, sentido São Paulo – Santos, em região de grande declive seguido de curva extremamente fechada, foram escolhidas a faixa granulométrica e a espessura do revestimento de 4 cm.

A graduação resultante do traço obedece a faixa granulométrica D 11/S da Alemanha para o SMA - Tabela 4.16 e Figura 4.15.

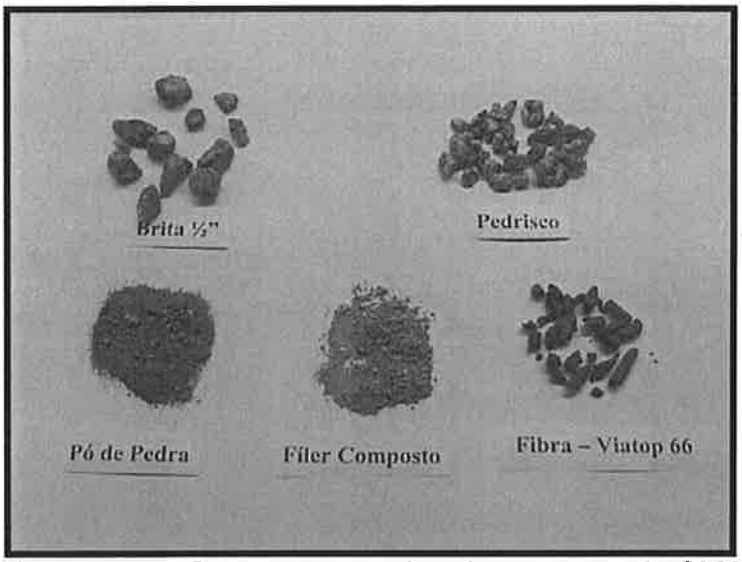

Figura 4.14: Componentes da mistura seca de SMA

Tabela 4.15: Composição da mistura seca

MATERIAL	PORCENTAGEM
Brita ½	70.0
Pedrisco Limpo	4.0
Pó de Pedra	17.5
Fibra Celulose	0.5
Fíler Composto 70/30	8.0

Tabela 4.16: Porcentagens de material passante nas peneiras para composição do traço de SMA

PENEIRAS	TRAÇO (%)	FAIXA D 11/S (%)		TOLERÂNCIA (%)
		LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	
19.1mm : ¾"	100	100.0	100.0	+/- 4.0
12,7mm : ½"	94.8	90.0	100.0	+/- 4.0
9,5mm : 3/8"	54.8	40.0	60.0	+/- 4.0
4,8mm : nº4	30.1	30.0	40.0	+/- 3.0
2,4mm : nº8	23.3	20.0	25.0	+/- 3.0
0,074mm : nº200	9.2	9.0	13.0	+/- 2.0

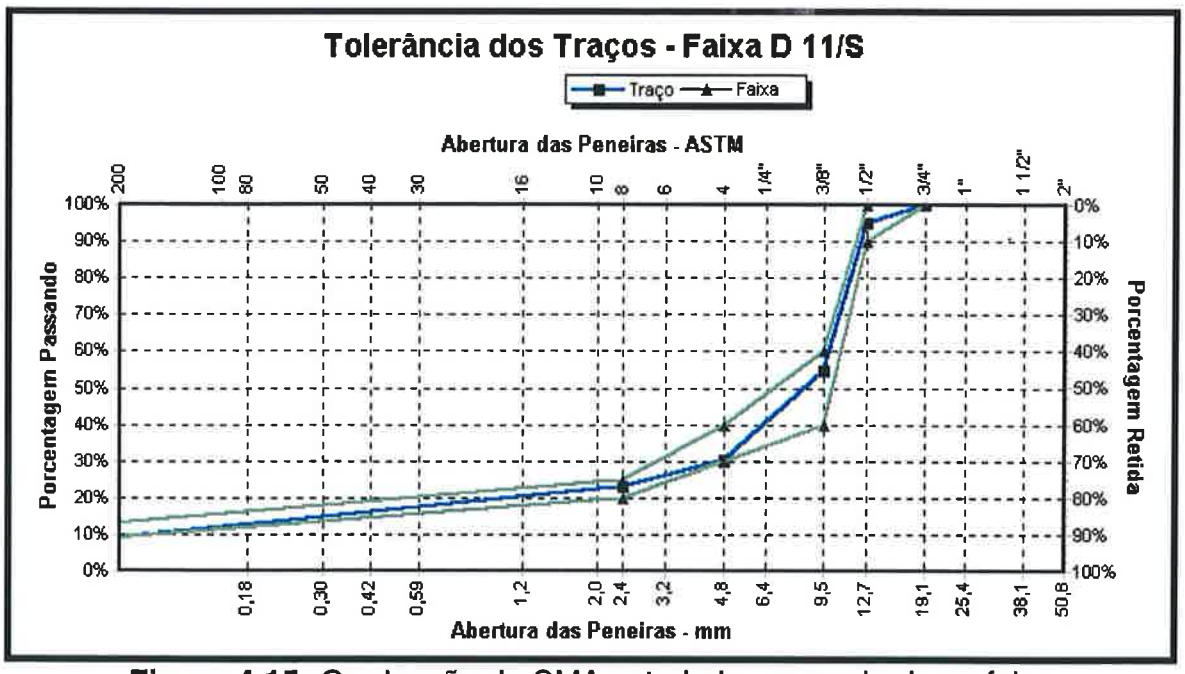

Figura 4.15: Graduação de SMA estudada, enquadrada na faixa D 11/S da Alemanha

4.3.4 Ligante Asfáltico

Na Tabela 4.17 são descritas as principais características do asfalto modificado por polímero tipo SBS selecionado para o projeto de mistura do trecho experimental (AMP-2).

Tabela 4.17: Característica do ligante asfáltico AMP-2

ENSAIOS	MÉTODO	UNIDADE	CARATERISTICAS AMP-2
Ponto de Amolecimento	NBR 6560	°C	82,6
Penetração (100g, 5s, 25°C)	NBR 6576	dmm	56
Viscosidade a 135°C	ASTM D 4402-87	cP	1351
Viscosidade a 145°C	ASTM D 4402-87	cP	908
Viscosidade a 175°C	ASTM D 4402-87	cP	353
Ductilidade a 25°C	NBR 6293	cm	> 100
Recuperação Elástica a 25°C	DNER ME 382/99	%	99
Ponto de Fulgor	NBR 11341	°C	370
Densidade Relativa a 20/4°C	DNER ME 193*96	—	1,033
Estabilidade a 163°C, 5 dias,	DNER ME 384/99	%	0,8
Efeito do Calor e do Ar			
Variação em massa	MB - 425	%	0,1
% Penetração original	MB - 425	%	> 60
Recuperação elástica a 25°C	DNER ME 382/99	%	94

4.3.5 Aditivo Melhorador de Adesividade

Foi empregado o aditivo melhorador de adesividade (Betudope) fabricado pela empresa Ipiranga Asfaltos S.A . Segundo sua ficha técnica, o produto é um composto químico obtido a partir da síntese de poliaminas e ácidos graxos. Adotou-se neste estudo a quantidade recomendada pelo fabricante, de 5 kg do aditivo por tonelada de ligante asfáltico. Na tabela 4.18 são descritas as principais características do aditivo melhorador de adesividade.

Tabela 4.18: Características do aditivo melhorador de adesividade

PROPRIEDADES	VALORES TÍPICOS
Estado Físico @ 25°C	Líquido
Viscosidade @ 25°C, cP	1500 – 4000
Densidade 20/4°C, g/cm^3	0,96 – 1,00
Ponto de Fulgor (VAC), °C, mín	180
* Índice de Neutralização Total, mgKOH/g	140
* Ponto de Fluidez, °C	0,0

*** Valores típicos**

4.3.6 Fibras

No projeto foram empregadas as fibras de celulose na forma granular (*pellets*), impregnada com betume na proporção 2:1 em peso, respectivamente (Viatop 66), distribuída pela empresa Ecofibras. A quantidade requerida foi determinada conforme descrito no item 3.6, estabelecendo o valor máximo obtido no ensaio de escorrimento de 0,3% em peso de amostra.

4.3.7 Estudo Marshall para o Ligante Asfáltico

Os corpos de prova Marshall foram moldados e compactados, nas respectivas temperaturas de usinagem e compactação, de acordo com a Tabela 4.7. A Tabela 4.19 apresenta a composição da mistura SMA para quatro teores de ligante asfáltico, de acordo com o procedimento do Ensaio Marshall (DNER ME – 043/95). A Figura 4.16 apresenta o Estudo Marshall para o AMP-2. A dosagem ótima de ligante asfáltico foi realizada de forma a obter 4% de volume de vazios, em corpos de prova, compactados com 50 golpes por face conforme recomenda a NAPA (1999). Observando-se a Figura 4.16, verifica-se que o teor ótimo de ligante asfáltico, obtido segundo este critério, corresponde a 6,1% em peso da mistura SMA.

Tabela 4.19: Composição da mistura para quatro teores de ligante asfáltico

Composição Da Mistura	Traços Estudados (%)			
	I	II	III	IV
BRITA ½	66.150	65.800	65.450	65.100
PEDRISCO LIMPO	3.780	3.760	3.740	3.720
Pó DE PEDRA	16.510	16.420	16.330	16.240
FÍLER COMPOSTO 70/30	7.560	7.520	7.480	7.440
FIBRA CELULOSE	0.500	0.500	0.500	0.5
AMP-2	5.500	6.000	6.500	7.000
TOTAL	100.000	100.000	100.000	100.000

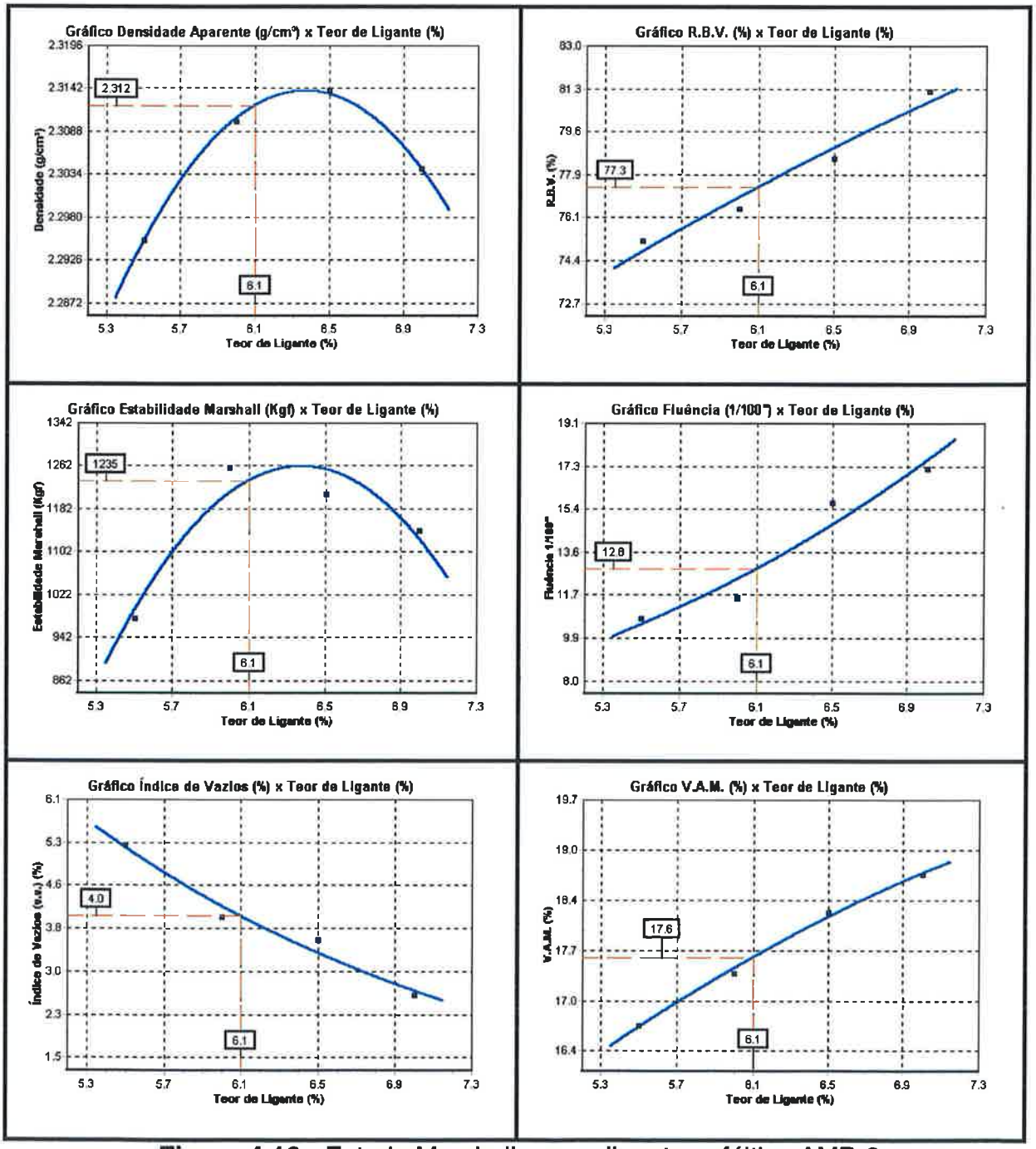

Figura 4.16: Estudo Marshall para o ligante asfáltico AMP-2

4.3.8 Composição Final da Mistura e Resultados do Projeto de Dosagem

A seguir são apresentados a composição em peso de cada componente na mistura SMA, bem como os resultados do projeto de dosagem para o ligante asfáltico AMP-2 – Tabelas 4.20 e 4.21.

Tabela 4.20: Composição final da mistura

Materiais	Traço (%)	Tolerância(%)
BRITA ½	65.7	+/- 4.0
PEDRISCO LIMPO	3.8	+/- 3.0
Pó DE PEDRA	16.4	+/- 2.0
FÍLER COMPOSTO 70/30	7.5	+/- 2.0
FIBRA CELULOSE – VIATOP 66	0.5	+/- 10.0
MELHORADOR ADESIVIDADE*	0.5	+/- 10.0
AMP-2	6.1	+/- 2.0

(*) % em peso de AMP-2

Tabela 4.21: Resultados do projeto de dosagem

CARACTERISTICAS	LIGANTE ASFÁLTICO AMP-2	Especificação	
		Mínimo	Máximo
Massa Específica Aparente (kNg/m³)	23.12	-	-
Estabilidade Marshall (kgf)(1)	1235	650	-
Fluência (1/100")(1)	12.8	8.0	16.0
Vazios (%)(1)	4.0	3.0	4.0
R.B.V. (%)(3)	77.3	75.0	82.0
V.A.M. (%)(1)	17.6	17.0	-
V.C.Amix. (%)(1)	40.3	-	40.5(2)
Relação Filer-Betume	1.5	0.6	1.6
Resist. Tração R1 (kgf/cm²)	11.9	-	-
Resist. Tração R2 (kgf/cm²)	9,7	-	-
Relação Resist. Tração RRT (%)(1)	81,5	70.0	
Escorrimento ,175°C, 1hora (%)(1)	< 0.3	-	0.3

(1) - Conforme recomendação (NAPA - AASHTO, 1999)
(2) - V.C.Adrc (AASHTO T-19)
(3) - Conforme (DNER-ES 385/99)

4.3.9 Verificação do Teor Ótimo de Ligante e do Comportamento Mecânico da Mistura SMA

Neste item constam a apresentação e a análise dos resultados dos ensaios obtidos no simulador de tráfego tipo LPC, realizados para a verificação do teor ótimo de ligante asfáltico (AMP-2), bem como, os ensaios de comportamento mecânico de módulo de resiliência e de resistência à tração por compressão diametral.

4.3.9.1 Verificação do Teor Ótimo de Ligante através do Simulador de Tráfego tipo LPC

Com o objetivo de verificar o teor ótimo de ligante asfáltico obtido no Estudo Marshall, conforme item 4.3.7, foram realizados os ensaios de deformação permanente no simulador de tráfego tipo LPC. Foram adotados os procedimentos descritos no item 4.2.8.1 para a mistura dos componentes, repetindo-se o processo para quatro teores de ligante asfáltico, a saber: 6,0%, 6,3%, 6,5% e 7,0%.

Duas placas, com dimensões de 180mm de largura x 500 mm de comprimento x 50 mm de espessura, foram moldadas, para cada teor de ligante estudado, na mesa compactadora até se obter a densidade de projeto e submetidas ao ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego tipo LPC, segundo procedimento descrito no item 3.7.1. Os ensaios foram conduzidos a 60ºC até 30.000 ciclos de carga.

As curvas de afundamento nas trilhas de roda, bem como a deformação em porcentagem nas respectivas placas são apresentadas na Figura 4.17. A Figura 4.18 apresenta as amostras retiradas (cerradas) da parte central das placas ensaiadas no simulador de tráfego, após 30.000 ciclos para efeito ilustrativo e de comparação de afundamentos.

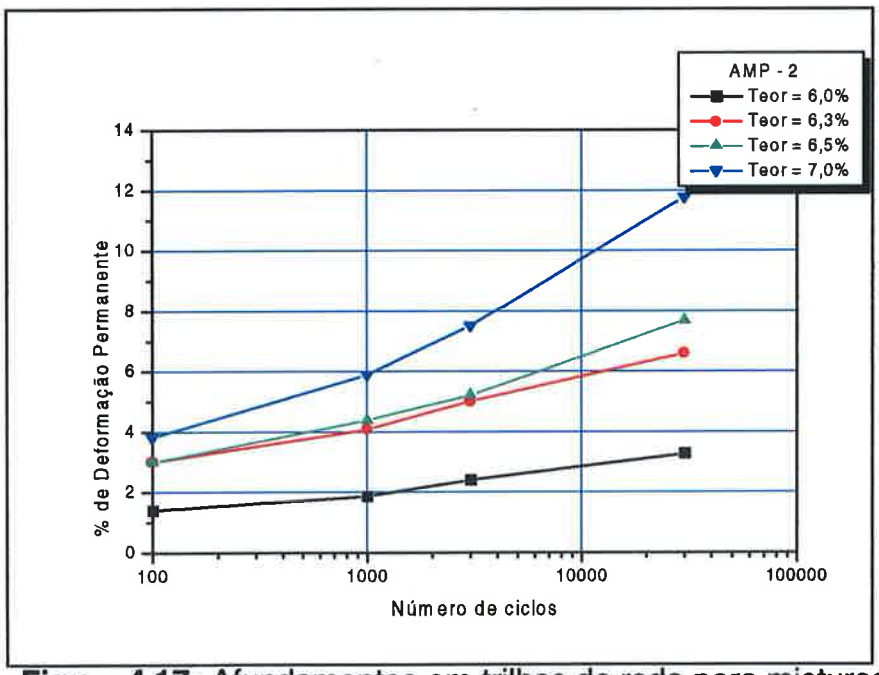

Figura 4.17: Afundamentos em trilhas de roda para misturas de SMA testadas com quatro teores de ligante asfáltico

A Figura 4.19 apresenta a placa usinada com 6,5% e a mancha de areia em sua superfície antes de ser submetida ao ensaio de deformação permanente. Para os quatro teores de ligante asfáltico utilizados neste estudo, a textura obtida foi sempre a mesma.

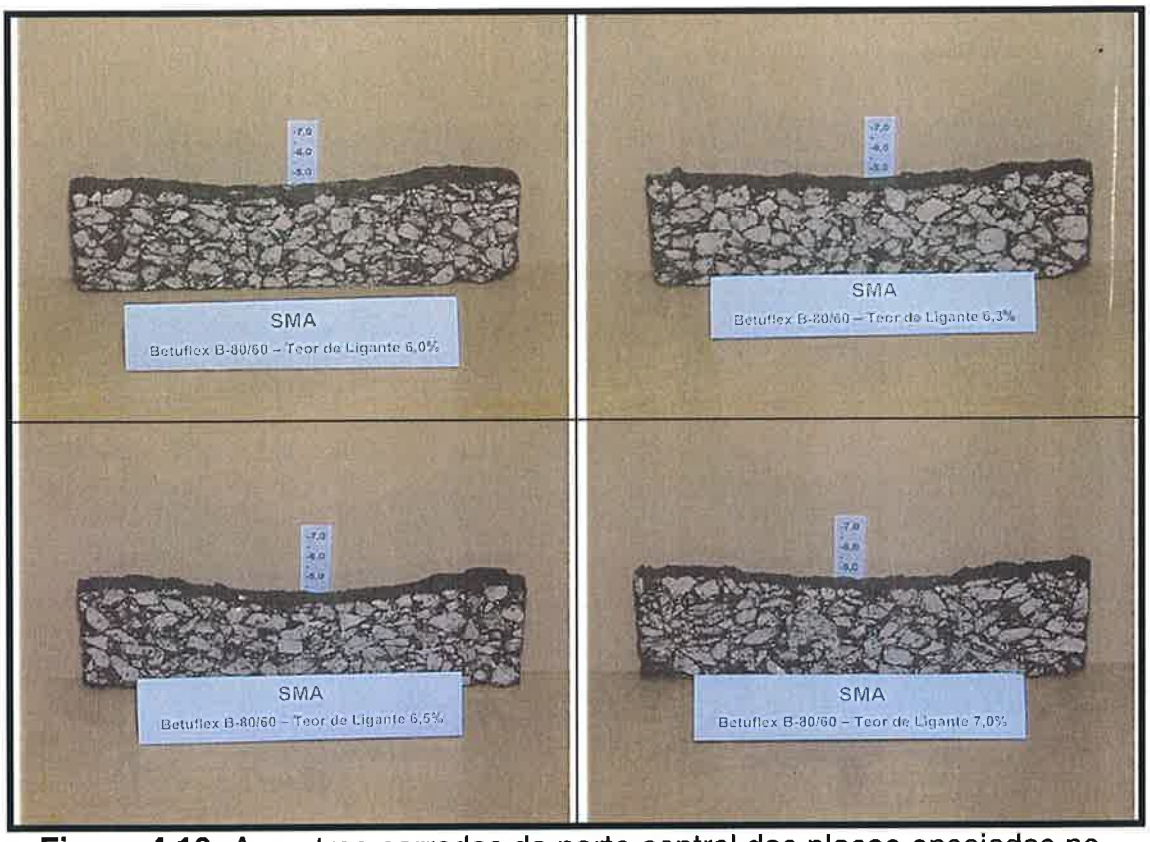

Figura 4.18: Amostras cerradas da parte central das placas ensaiadas no simulador de tráfego tipo LPC para comparação visual entre afundamentos nas trilhas de roda

Os afundamentos nas trilhas de roda observados na Figura 4.18 apresentam-se bastante próximos, com diferença visual quase imperceptível de um teor para outro. Entretanto, o valor do afundamento na trilha de roda é obtido através da média aritmética de quinze pontos distintos e distribuídos sobre toda a área de contato do pneu com a placa.

Com base na análise dos resultados da Figura 4.17 pode-se observar que a mistura asfáltica usinada com 6,0% de ligante asfáltico apresentou a menor deformação permanente, inferior a 5% após 30.000 ciclos a uma temperatura de 60°C.

Para o teor de 6,3% de ligante asfáltico a deformação permanente ficou ligeiramente acima de 5% para solicitação de 30.000 ciclos. Quanto aos demais teores, a deformação permanente em trilha de roda foi maior em função do incremento no teor de ligante. Observa-se, ainda, a elevada sensibilidade à deformação permanente com a variação do teor de ligante na faixa estudada. Portanto, verifica-se que o teor ótimo de 6,1% de AMP-2,

determinado através do Estudo Marshall, conforme descrito no item 4.3.7, atende a especificação da comunidade européia do Grupo COST 333, para tráfego pesado.

Cabe ressaltar que o teor ótimo efetivo de ligante asfáltico para o projeto do trecho experimental é de 6,27% em peso de mistura SMA, correspondendo ao teor obtido pela dosagem Marshall (6,1%) acrescido do conteúdo de betume presente na fibra de celulose - Viatop 66 (0,17%).

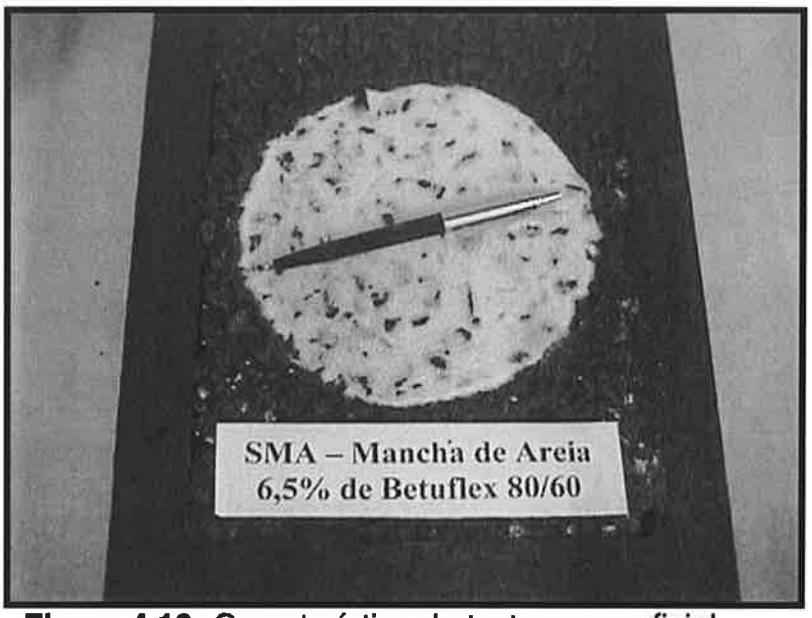

Figura 4.19: Característica da textura superficial obtida com misturas asfálticas tipo SMA

4.3.9.2 Verificação do Comportamento Mecânico – Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral.

Para verificação do comportamento mecânico da mistura SMA, foram confeccionados três corpos de prova com 101,6 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, para cada teor de ligante asfáltico estudado, a saber: 6,0%, 6,3%, 6,5% e 7,0%.

A compactação dos corpos de prova foi realizada com compactador automático e energia mecânica de 50 golpes por face. As temperaturas de mistura e compactação dos CPs foram obtidas a partir da Tabela 4.7.

Os ensaios para a determinação dos valores de módulo de resiliência e de resistência à tração por compressão diametral foram ambos realizados a 25ºC, segundo os procedimentos descritos nos itens 3.7.3 e 3.7.2, respectivamente.

Cada corpo de prova foi submetido a duas determinações de módulo de resiliência, ou seja, após a obtenção da primeira determinação, o corpo de prova foi girado a 90° em relação ao seu eixo axial para que fosse aplicada tensão vertical no plano que havia sofrido o deslocamento resiliente horizontal.

Os três corpos de prova moldados para o ensaio de módulo de resiliência foram, em seguida, submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Este procedimento foi possível uma vez que, o ensaio de módulo de resiliência não é um ensaio destrutivo e a carga aplicada não impõe excessivos deslocamentos permanentes, garantido pelo procedimento atualmente adotado no LTP.

Os resultados de módulo de resiliência e de resistência à tração por compressão diametral são apresentados nas Figuras: 4.20 e 4.21, respectivamente. Os teores correspondem à quantidade de AMP-2 adicionado à mistura. Não foram computadas as contribuições adicionais de 0,17% de ligante presente nas fibras de celulose.

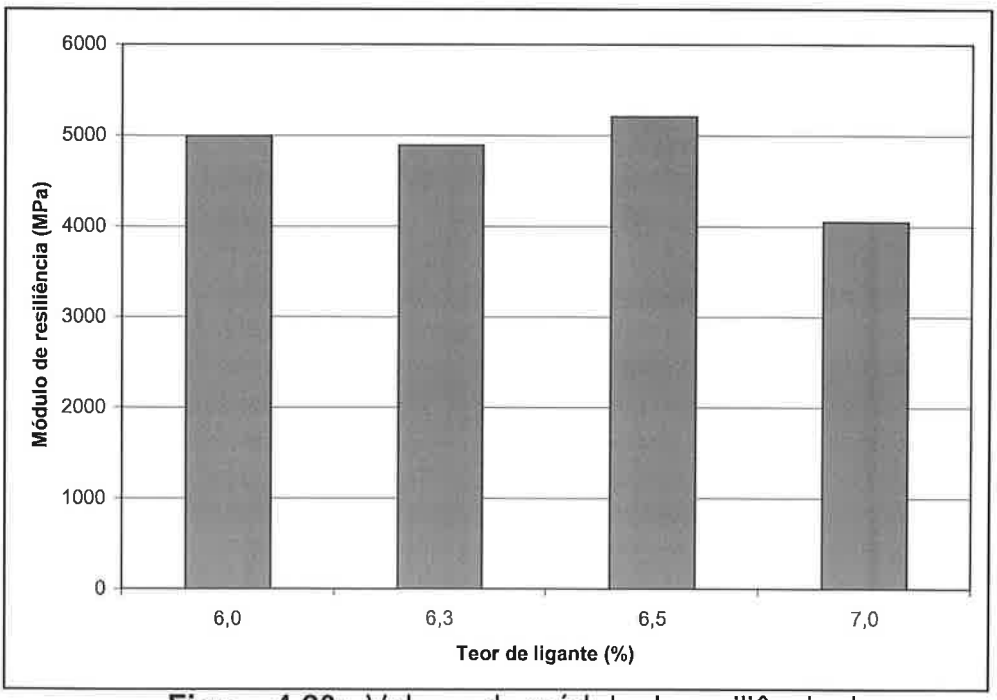

Figura 4.20: Valores de módulo de resiliência das misturas tipo SMA ensaiadas

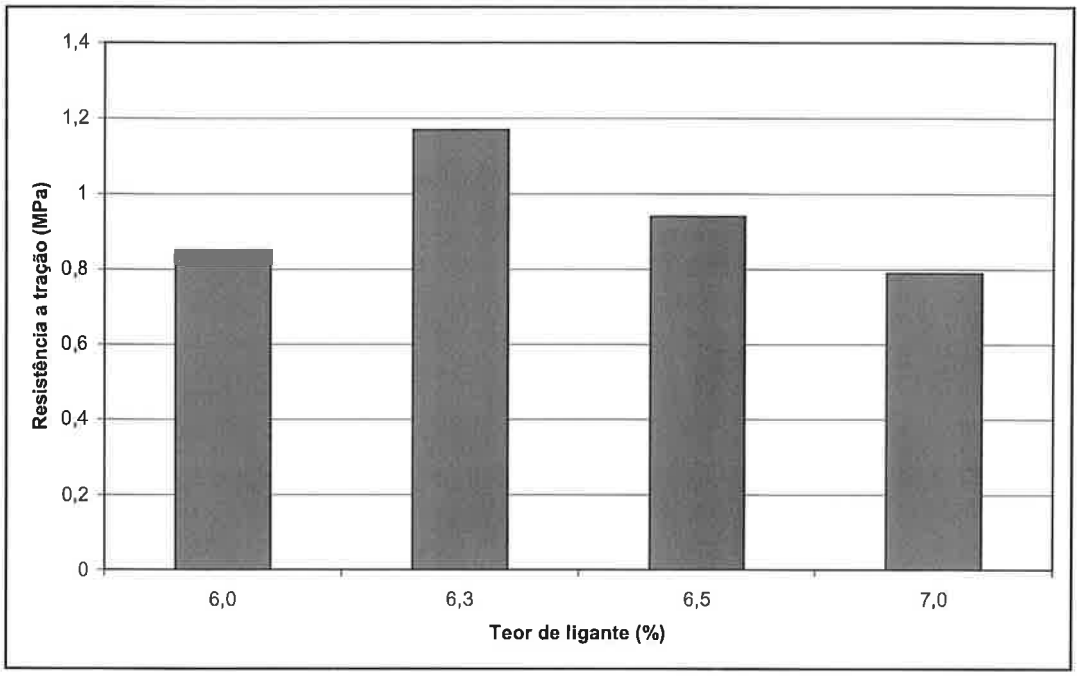

Figura 4.21: Valores de resistência à tração por compressão diametral das misturas tipo SMA ensaiadas

Com base na análise dos resultados da Figura 4.20 verifica-se que a sensibilidade dos valores de módulo de resiliência é muito pequena no intervalo compreendido pelos quatro teores de ligante asfáltico estudados.

Com relação a resistência à tração por compressão diametral verifica-se na Figura 4.21 a ocorrência de um ponto de máximo para o teor de 6,3% de ligante asfáltico, coincidindo com o ponto de maior estabilidade Marshall apresentado na Figura 4.16, provavelmente associado ao maior estado coesivo da mistura.

Pode-se concluir que uma variação de dosagem do ligante na usina dentro da faixa de teores estudados possivelmente não acarrete grandes alterações no comportamento mecânico da mistura no que se refere a sua flexibilidade e à resistência à ruptura, embora, esta variação apresente influência na sua resistência à deformação permanente, conforme anteriormente observado no item 4.3.9.1.

4.4 Execução do SMA em Pista Experimental

Uma vez concluída a parte experimental de laboratório, descrita nos itens 4.2 e 4.3, procedeu-se a etapa experimental *in situ* a partir da execução do revestimento SMA numa seção teste no km-44 + 400 m ao km-45, pista sul da via Anchieta.

4.4.1 Seleção do Trecho Experimental

A via Anchieta faz parte do sistema rodoviário Anchieta-Imigrantes, que nos últimos quatro anos vem sendo administrado pela concessionária Ecovias dos Imigrantes. Possui trechos com elevado volume de cargas, com VDM acima de 40000, sendo 30% em média, de veículos pesados.

O projeto desta rodovia data dos anos 40 e apresenta características de geometria inadequadas às condições atuais dos veículos de carga. Principalmente nos trechos em curva, na descida da Serra do Mar em direção ao porto de Santos, 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, conforme observa-se na Figura 4.22.

Figura 4.22: Detalhe do trecho experimental antes da execução do SMA

Além dos problemas da infra-estrutura, a via Anchieta apresenta diversos "pontos negros", locais onde os acidentes rodoviários ocorrem em maior frequência. O interesse da concessionária Ecovias por uma solução de melhor relação benefício-custo para a administração e para os usuários, vem, justamente, de encontro aos objetivos da técnica do SMA.

O bom desempenho de uma seção teste realizada em um trecho representativo das piores condições de solicitação de tráfego, como por exemplo, a chamada "curva da onça" da via Anchieta é, sem dúvida, a resposta na prática para estas expectativas de resistência, durabilidade e de segurança que o revestimento SMA deve proporcionar .

Como descrito anteriormente, em função do tráfego intenso, pesado, e da geometria do trecho experimental adotou-se a faixa D 11/S da especificação Alemã e 4 cm para a espessura final do revestimento.

Antes da execução do trecho experimental propriamente dito, procedeu-se à confecção de um segmento teste para verificação das condições de operação através do controle de granulometria, teor de ligante e constância das temperaturas dos agregados, ligante e da massa asfáltica na usina e na vibroacabadora. Neste segmento foram verificadas as condições da vibroacabadora para o espalhamento nas espessuras e larguras predeterminadas, bem como a capacidade de pré compactação da mesma.

Com relação ao trem de compactação, foram determinados: tipo e quantidade de rolos, grau de compactação obtido, número de passadas, abatimento da massa após a compactação e qualidade de acabamento da junta longitudinal.

A seguir são feitas algumas considerações a respeito dos materiais, fabricação, armazenamento, transporte, aplicação e controle tecnológico referentes aos componentes e à mistura asfáltica SMA, bem como, os principais aspectos executivos da pista experimental realizada em agosto de 2001 na via Anchieta - pista Sul, na "curva da onça" - km-44 + 400 m.

4.4.2 Materiais Utilizados na Mistura SMA

4.4.2.1 Agregados

Para garantir a formação da matriz pétrea (contato grão-grão), 70 a 80% da composição granulométrica deve ser de agregado graúdo. O controle sistemático da graduação deste material (retido na peneira 4,75 mm) e da quantidade de fíler mineral (passando na peneira 0,075 mm) é de fundamental importância para a qualidade da massa asfáltica produzida.

Na execução do trecho experimental foi empregada a usina gravimétrica da Empresa EBEC Engenharia, distante aproximadamente 30 km do local da aplicação; foram necessárias modificações nas peneiras classificatórias da usina a fim de atender a composição da mistura seca e sua graduação, conforme Tabelas 4.15 e 4.16, respectivamente.

Como a quantidade de material de enchimento no SMA excede à empregada normalmente em misturas densas convencionais, recomenda-se o emprego de um sistema mecânico de dosagem de fíler a fim de evitar uma redução na produtividade da usina. Em função da pequena quantidade de massa asfáltica produzida na usina, apresentada na Figura 4.23, o fíler calcário foi incluído na massa, via silo frio, e a cal CH-I diretamente no misturador.

Em usinas do tipo *Drum-mixer* a linha de alimentação do fíler deve ser próxima a do ligante asfáltico com a finalidade de impedir que os gases arrastem o material de enchimento para o sistema de recuperação de finos.

Figura 4.23: Usina gravimétrica utilizada na fabricação da mistura SMA

4.4.2.2 Ligantes Asfálticos e Aditivo Melhorador de Adesividade

Como em qualquer mistura a quente, os cimentos asfálticos de petróleo - CAPs não podem ser aquecidos acima de 177ºC, sendo que a temperatura ideal de trabalho (usinagem e compactação) é obtida pela relação temperatura-viscosidade. Esta temperatura limite visa evitar o possível "craqueamento" térmico do ligante.

Quando ligantes asfáltico modificados por polímeros são preconizados, existem certos procedimentos relacionados a sua manipulação que os empreiteiros envolvidos na sua utilização devem respeitar. Eles não precisam compreender a química do asfalto modificado, mas necessitam saber trabalhar suas misturas, atendendo alguns requisitos básicos, como por exemplo:

- Deve-se armazenar o asfalto modificado com polímero como um fluido homogêneo a fim de ser misturado com os agregados;
- Deve-se estabelecer as temperaturas ideais durante a usinagem, temperaturas, tanto para o asfalto modificado com polímero, quanto para a mistura betuminosa;
- Deve-se adotar medidas especiais no transporte da mistura a quente em caminhões;
- Deve-se adotar procedimentos especiais durante o espalhamento e a compactação em campo.

Os principais procedimentos a serem observados para o asfalto modificado por polímero SBS, de acordo com a ficha técnica do produto, reproduzida a seguir, são:

"Betuflex B pode ser danificado por aquecimento a altas temperaturas (acima de 180°C), reaquecimentos sucessivos ou prolongados. Normalmente é entregue na faixa de temperatura de usinagem (160 – 175°C) e deverá ser descarregado em tanques isentos de lastro de Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP. As temperaturas ideais de usinagem e compactação são determinadas através da relação viscosidade x temperatura constante no Certificado de Qualidade do Produto.

Recomenda-se durante o armazenamento por um período superior a 5 dias, estocar o produto à temperatura mais branda que a usual (100–120°C), sendo a máxima recomendável para períodos curtos de armazenamento de 165°C. Estocar a temperatura ambiente se o produto ficar armazenado por longos períodos (20 dias ou mais).

A temperatura ao longo do tanque deverá ser uniforme e a distribuição de calor deverá ocorrer de forma homogênea através da utilização de bomba de recirculação. O aquecimento nunca deverá realizar-se de forma direta e sim em tanques providos com serpentina de fluido térmico."

Para a execução do trecho experimental foi utilizado o asfalto modificado por polímero SBS – AMP-2 e o aditivo melhorador de adesividade apresentado no ítem 4.3.5, sendo este adicionado previamente ao ligante asfáltico e homogeneizado por uma hora, mediante bomba de circulação do betume.

Os teores empregados de ligante e do aditivo melhorador de adesividade foram requeridos pelo projeto de mistura, conforme Tabela 4.20.

4.4.2.3 Fibras

Devido à elevada porcentagem de agregado graúdo e, consequentemente, sua baixa superfície específica, torna-se fundamental a utilização de fibras para reter a argamassa finos-fíler-betume em torno do material graúdo.

As fibras de celulose aumentam a viscosidade desta argamassa, rica em betume, em até 10 vezes, evitando problemas de escorrimento durante as operações de usinagem, transporte e aplicação da massa asfáltica (BELIGNI et al., 2000).

As fibras devem ser armazenadas em local seco, isento de impurezas e incorporadas à massa asfáltica através de dispositivos mecânicos dotados de medidores mássicos ou volumétricos.

Nas usinas gravimétricas, as fibras devem ser adicionadas, previamente à adição do ligante asfáltico, diretamente no misturador; em usinas do tipo *Drum-Mixer* devem ser adicionadas no segundo compartimento do tambor, também antes da injeção do ligante, sem contato direto com a chama do maçarico.

Para o trecho experimental a fibra de celulose (Viatop 66) foi adicionada à massa asfáltica diretamente no misturador, na quantidade requerida pelo projeto, conforme Tabela 4.20.

A incorporação de fibras de celulose na sua forma granular (*pellets*), em ambas as usinas, pode ser realizada de maneira simples, via correia transportadora e evitam problemas operacionais que, geralmente, as fibras soltas causam, tais como: formação de grumos e/ou absorção pelo sistema de filtros das usinas.

4.4.2.4 Fabricação da Massa Asfáltica

Segundo a NCAT (1999), as misturas SMA com asfalto modificado por polímeros, geralmente, requerem temperaturas mais elevadas de mistura em relação aos ligantes asfálticos convencionais (CAPs) e, devem ser limitadas a no máximo 177°C, a fim de evitar a oxidação / degradação térmica e escorrimento de parte do ligante modificado.

Essas misturas devem ser realizadas, preferencialmente, em usinas gravimétricas para melhor controle de dosagem dos materiais envolvidos.

De modo geral, a temperatura de usinagem do ligante está compreendida entre 155°C e 177°C; porém, recomenda-se estabelecer a faixa ideal de trabalho através do gráfico viscosidade x temperatura, em função do tipo de ligante asfáltico empregado.

Preconiza-se a seguinte ordem de adição dos componentes da mistura:
a) agregados
b) fíler mineral
c) fibras
d) ligante asfáltico

O tempo total de usinagem da mistura deverá ser aumentado entre 10 a 30 segundos, igualmente distribuídos entre a mistura seca e úmida, para a perfeita dispersão da fibra na massa asfáltica e recobrimento dos agregados pelo ligante asfáltico.

Na fabricação da mistura para o trecho experimental, a temperatura de usinagem do ligante asfáltico AMP-2 foi obtida conforme Tabela 4.7, sendo o tempo total de misturação de 60 segundos (20 segundos para a mistura seca e 40 segundos para a mistura úmida), observando-se uma distribuição uniforme da mistura sem segregação de seus componentes .

4.4.2.5 Armazenamento e Transporte da Massa Asfáltica

A mistura SMA não deve ser armazenada por períodos que excedam 2 a 3 horas, em condições de temperatura elevada a fim de impedir um potencial escorrimento da argamassa, rica em ligante asfáltico. O tempo em conjunto com a vibração proveniente do transporte da massa também, deve ser limitado tanto quanto possível, pela mesma razão.

Deve-se tomar o cuidado de cobrir com lonas impermeáveis a massa asfáltica ao longo do transporte para evitar o seu resfriamento. Temperaturas inferiores a 145°C podem prejudicar as operações manuais e de compactação do revestimento.

De modo geral, as etapas de fabricação, armazenamento, transporte e aplicação do SMA devem ocorrer de forma integrada, evitando grandes intervalos de tempo e, consequentemente, perdas excessivas de temperatura.

4.4.2.6 Aplicação da Massa Asfáltica

A mistura SMA pode ser utilizada como camada de rolamento em novas construções ou em serviços de manutenção sobre pavimentos asfálticos ou de concreto de cimento Portland .

De maneira similar aos procedimentos executivos que precedem a aplicação de qualquer revestimento asfáltico, deve-se realizar a preparação prévia da superfície que receberá a massa asfáltica.

Estes reparos podem incluir selagem de trincas, remendos e, até mesmo, fresagem e/ou recapeamento de áreas contendo grandes deformações permanentes.

O substrato a ser revestido deve estar limpo e seco, assegurando a aderência entre as camadas através de uma pintura de ligação, preferencialmente, com emulsão de asfalto modificado por polímero, na taxa de 0,5 l/m^2 , sem diluição – Figura 4.24.

Figura 4.24: Execução da pintura de ligação

A logística de fabricação, transporte e aplicação da massa asfáltica é de fundamental importância para que a vibroacabadora seja alimentada e opere de forma contínua, com o objetivo de assegurar a regularidade transversal e longitudinal da camada de rolamento.

A vibroacabadora deve possuir dispositivos mecânicos (*Tampers*) para garantir uma elevada pré-compactação, em torno de 88 a 90%.

A compactação da mistura é realizada imediatamente após o seu espalhamento com no mínimo dois rolos metálicos estáticos tipo Tandem de 10 a 12 toneladas (tão próximos quanto possível da vibroacabadora), limitando entre seis a oito o número de passadas de cada rolo, conforme Figura 4.25.

Figura 4.25: Detalhe do espalhamento e compactação da mistura SMA

Geralmente, a temperatura inicial e final de compactação mínima é 150°C e 140ºC, respectivamente, porém, recomenda-se estabelecer a faixa ideal de trabalho obtida no gráfico viscosidade x temperatura em função do tipo de ligante asfáltico empregado.

A utilização de rolos compactadores vibratórios somente é recomendada para temperaturas elevadas da mistura asfáltica e após a compactação com rolo estático tipo Tandem, para camadas com espessuras superiores a 3 cm. Para camadas com espessuras inferiores a 2 cm, não se deve utilizar rolos vibratórios, pois poderá haver fragmentação do agregado e/ou exsudação do ligante asfáltico (BELIGNI et al., 2000). Não se recomenda a utilização de rolos pneumáticos; parte da argamassa da mistura SMA adere aos pneus do compactador, causando defeitos na superfície do revestimento.

A NCHRP (1999), recomenda que a densidade da mistura SMA compactada seja no mínimo 94% da densidade máxima teórica para a garantia da impermeabilidade do revestimento.

Quando compactadas, as misturas a quente convencionais apresentam uma redução de 20-25% na sua espessura de aplicação, enquanto que a mistura SMA apresenta um abatimento de 10-15% na sua espessura original.

A Figura 4.26 apresenta aspectos da espessura e da textura superficial do revestimento antes de sua liberação ao tráfego. Verifica-se a elevada quantidade de material graúdo (contato grão / grão) responsável pela resistência à deformação permanente da mistura.

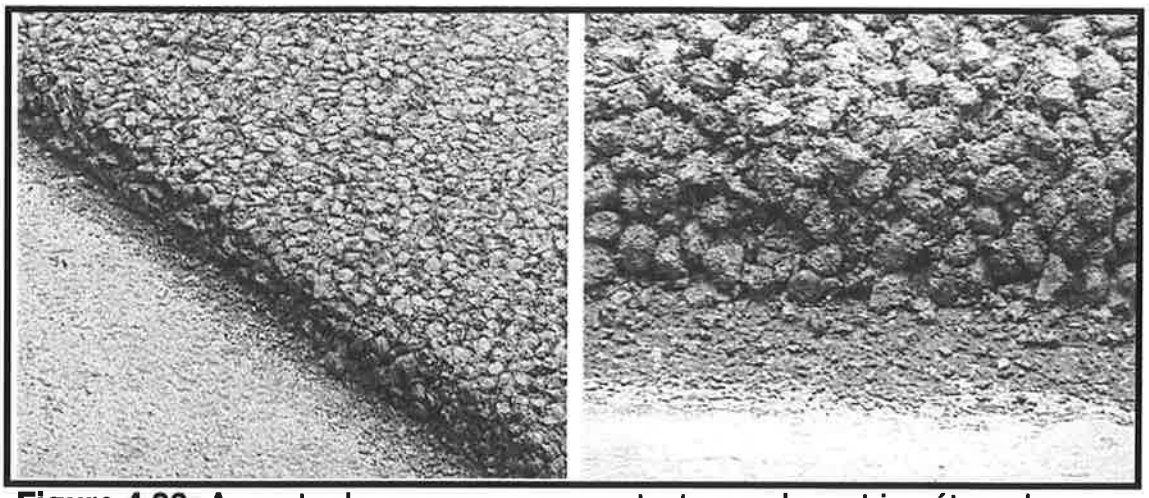

Figura 4.26: Aspecto da espessura, macrotextura e da matriz pétrea do revestimento SMA

Normalmente a rodovia é liberada ao tráfego uma hora após a sua execução e/ou quando a temperatura do revestimento for inferior a 60°C.

A Figura 4.27 apresenta a seção teste da via Anchieta liberada ao tráfego.

Figura 4.27: Seção teste em SMA na via Anchieta

A Figura 4.28 apresenta o aspecto da macrotextura do trecho experimental, imediatamente após sua liberação ao tráfego.

Figura 4.28: Aspecto da macrotextura do trecho experimental, imediatamente após sua liberação ao tráfego

4.4.2.7 Controles Tecnológicos

Durante o processo executivo, recomenda-se que sejam realizados controles sistêmicos, cuja freqüência deverá ser estabelecida pelas especificações de serviço do órgão contratante, tais como:

- **Agregados**: composição granulométrica dos agregados, equivalente de areia, azul de metileno, índice de forma e abrasão *Los Angeles*;

- **Ligante Asfáltico Modificado**: penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica;

- **Fibras: c**onferência do certificado de qualidade do fabricante;

- **Misturas Usinadas**: teor de ligante, composição granulométrica, volume de vazios com ar, vazios no agregado mineral, ensaio de sensibilidade ao escorrimento e de resistência à ação da água;

- **Misturas Aplicadas**: grau de compactação, macrotextura (ensaio da mancha de areia), aderência (pêndulo britânico – SRT) e QI - irregularidade longitudinal (através do integrador tipo resposta ou similar).

Na Tabela 4.22 são apresentados os resultados do controle de qualidade da mistura SMA para o trecho experimental. As tolerâncias da composição granulométrica, admitidas para cada peneira em amostras extraídas de SMA, são apresentadas na Tabela 3.11.

Observa-se que foi garantida a qualidade da mistura SMA no que tange ao produto extraído da pista

Tabela 4.22: Controle de qualidade da mistura SMA para o trecho experimental

IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS										
NÚMERO DE CONTROLE			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Caminhão			EO - 104	EO - 408	EO - 110	VMB-198	E - 103	EO - 40	EO - 110	EO - 42	EO - 109
Data			28/08/01	27/08/01	28/08/01	28/08/01	28/08/01	28/08/01	27/08/01	27/08/01	27/08/01
Hora			09:40	15:20	11:55	12:20	11:25	11:00	13:45	16:18	12:40
CONTROLE DA TEMPERATURA DA MASSA ASFÁLTICA											
Temperatura de usinagem			176°C	180°C	166°C	170°C	163°C	163°C	170°C	165°C	176°C
Temperatura início da aplicação			162°C	170°C	160°C	164°C	158,5°C	157°C	163°C	160°C	170°C
Temperatura início da compactação			148°C	153°C	148°C	147°C	147°C	146°C	148°C	151°C	152°C
CONTROLE DAS CARATERÍSTICAS DE PROJETO											
ENSAIO	MÉTODO		RESULTADOS								
% de Vazios , %	DNER ME - 043		3,7	3,5	4	3,7	4,2	4,4	4,4	3,9	3,9
Resistência à Tração, kgf/cm^2	DNER ME - 138		11,6	11,0	11,1	11,2	11,3	11,3	11,3	11,5	11,4
Grau de Compactação, %	DNER ME - 043		98,1	98,0	99,6	98,1	99,4	99,3	98,0	97,6	98,0
CONTROLE DO LIGANTE ASFÁLTICO											
ENSAIO	MÉTODO		RESULTADOS								
Teor de Betume, %	ASTM D 2172		6,2	6,3	6,4	6,3	6,2	6,2	6,2	6,3	6,1
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560		69,5	69,0	70,7	68,0	70,0	70,0	67,0	71,0	68,5
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	NBR 6576		42,0	33,0	35,0	36,0	36,0	39,0	39,0	37,0	38,0
Viscosidade Brookfield, cP, a											
135°C	ASTM D 4402		1615	1732	1845	1570	1932	1702	1310	1812	1552
145°C			641	1005	1047	910	1155	990	789	1024	895
175°C			291	301,5	314,5	275	331,5	301	248,5	320	276,5
Recuperação Elástica a 25°C, %	DNER ME- 382		91,5	83,0	91,0	83,0	92,0	87,0	82,0	87,6	87,6
CONTROLE DA GRADUAÇÃO DA MISTURA SMA 11/S											
PENEIRAS	FAIXA	PROJETO	TOLERÂNCIAS	RESULTADOS							
3/4"	100	100	96 - 104	100	100	100	100	100	100	100	100
1/2"	90 - 100	94,8	91 - 99	90,3	93,2	94,7	91,7	91,1	91,0	94,2	90,2	94,0
3/8"	40 - 60	54,8	53 - 57	41,0	52,7	55,1	47,2	47,7	52,5	51,4	47,6	50,4
nº 04	30 - 40	30,1	29 - 31	30,0	31,0	30,4	30,2	30,2	31,0	30,3	30,3	32,7
nº 08	20 - 25	23,3	22- 24	21,9	22,6	21,5	21,6	21,6	20,5	25,4	23,1	28,8
nº 200	9 - 13	9,2	9,0 - 9,4	8,4	8,6	8,5	8,6	8,8	8,0	9,1	9,0	9,2

Ainda, durante o controle tecnológico do trecho experimental, foram ensaiadas placas de SMA confeccionadas a partir da mistura asfáltica produzida na usina, reaquecida no LTP, compactadas na mesa compactadora tipo LPC e testadas no simulador de tráfego LPC.

Para efeitos comparativos, a Figura 4.29 apresenta as curvas de afundamento nas trilhas de roda, bem como as deformações em porcentagem nas placas confeccionadas a partir das misturas asfálticas produzidas na usina e em laboratório na fase de projeto.

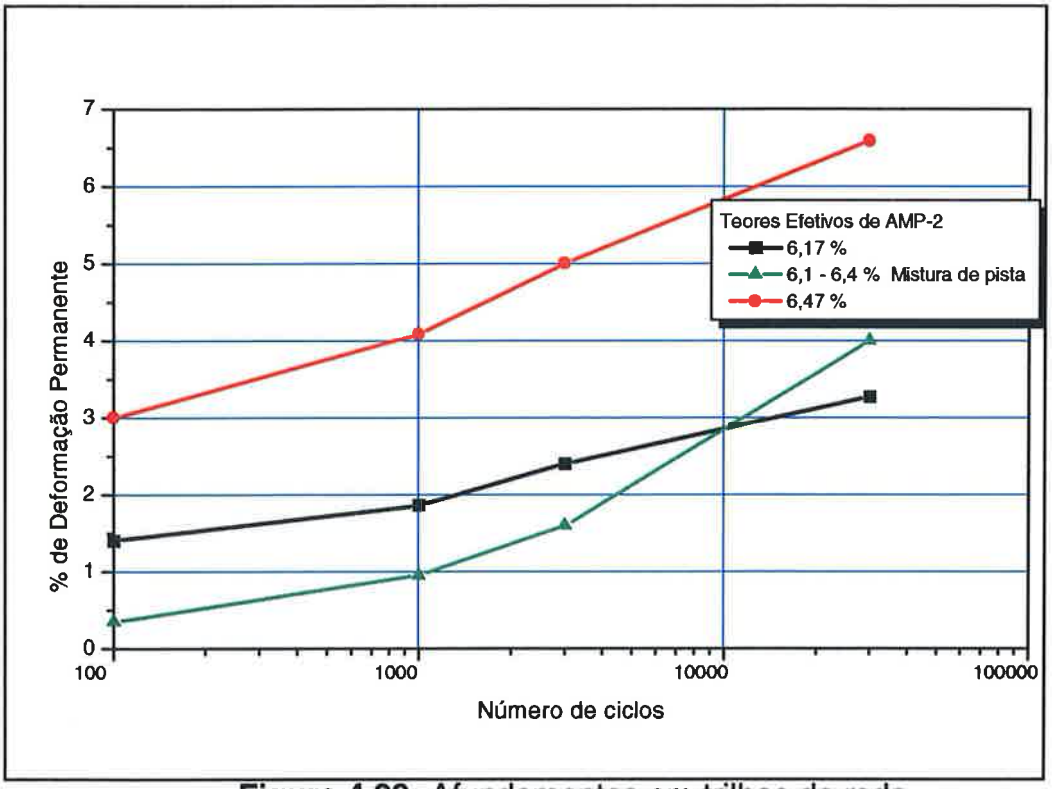

Figura 4.29: Afundamentos em trilhas de roda para as misturas SMA produzidas na usina e no laboratório

Pela análise dos resultados da Figura 4.29, verifica-se que as placas compactadas com material colhido na usina apresentam valores de deformação permanente baixos, cerca de 4% após 30000 ciclos, para teores efetivos de ligante asfáltico (AMP-2 + betume da fibra Viatop 66) de 6,1% a 6,4%, conforme Tabela 4.22.

Este valor de afundamento em trilhas de roda está de acordo com os resultados apresentados na Figura 4.17, tendo sido determinante a execução dos ensaios no simulador de tráfego tipo LPC, na fase de projeto da mistura, para verificação do teor ótimo de ligante.

4.4.3: Avaliação preliminar das características relacionadas à segurança do usuário

Em março de 2002 foi realizada uma avaliação preliminar das principais características do trecho experimental relacionadas à segurança do usuário.

Na Tabela 4.23 são apresentados os resultados da avaliação da macrotextura através do ensaio de mancha de areia e do valor de resistência à derrapagem – VRD, a partir do pêndulo britânico – SRT.

Os ensaios para a avaliação de aderência pneu-pavimento foram realizados segundo os procedimentos descritos nos itens 3.8.1 e 3.8.2.

Tabela 4.23: Ensaios para avaliação de aderência

LOCAL		(*) MANCHA DE AREIA HS (mm)	(**) ESPECIF. HS (mm)	(*) PÊNDULO BRIT. SRT (Valor VRD)	(**) ESPECIF. VRD - LIMITE
Km	**Faixa**				
44 + 450 m	Externa (Eixo)	1.06	0.6 a 1.2	54	47
44 + 520 m	Interna (TRI)	1.07	0.6 a 1.2	47	47
44 + 600 m	Interna (TRE)	0.91	0.6 a 1.2	49	47
44 + 800 m	Externa (TRE)	1.22	0.6 a 1.2	50	47
44 + 900 m	Interna (Eixo)	0.97	0.6 a 1.2	52	47

(*) Valor obtido a partir da média aritmética de cinco pontos distintos
(**) Especificação da comissão de concessões
(TRI) Trilha de roda interna
(TRE) Trilha de roda externa
(Eixo) Eixo da pista

Conforme observa-se na Tabela 4.23, os valores de aderência, obtidos através dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico – SRT, atendem à especificação preconizada pela Comissão de Concessões de Rodovias.

A partir da análise comparativa entre estes valores e os apresentados na Tabela 3.14, verifica-se que o trecho experimental apresenta características de macrotextura rugosa ou aberta, proporcionando boas condições de segurança ao usuário para tráfego em alta velocidade, em dias chuvosos.

Com relação à resistência à derrapagem, a partir do ensaio de pêndulo britânico – SRT, que avalia a microtextura dos agregados, verifica-se que os agregados do trecho experimental apresenta valores de SRT, próximos ao limite, conforme apresentado na Tabela 3.13. Para tanto, recomenda-se monitorar sistematicamente a evolução do desempenho do trecho experimental, quanto à segurança do usuário para tráfego em baixas velocidades.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

O SMA é um tipo de mistura asfáltica muito empregada na Europa e América do Norte para vias de tráfego intenso e pesado, tendo se mostrado ao longo de sua experiência, de mais de duas décadas, um revestimento de pavimento resistente, durável e de bom comportamento funcional relativo à qualidade de rolamento, aumento de aderência, redução de *borrifo,* da reflexão de luzes em pistas molhadas e de ruído, entre outros aspectos.

A seguir são apresentadas as principais conclusões sobre o tema proposto, fundamentadas no desenvolvimento da pesquisa e nos resultados do programa experimental desta dissertação:

- O SMA é uma mistura de particular resistência à deformação permanente graças as suas características volumétricas e de graduação descontínua;

- Fibras de celulose ou de vidro são 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; principalmente as fibras de celulose na forma granular facilitam seu manuseio e sua adição à mistura;

- Os ensaios para avaliação de comportamento mecânico, principalmente no simulador de tráfego tipo LPC, mostraram que a modificação do ligante asfáltico por polímero SBS reduz consideravelmente os afundamentos em trilhas de roda em relação ao cimento asfáltico de petróleo CAP-20; é necessário ressaltar que nas condições climáticas prevalecentes na maior parte do território brasileiro as temperaturas de trabalho e máximas superam aquelas constadas na maior parte dos países que empregam normalmente a tecnologia do SMA; devido a este fato, acredita-se que a adição de polímeros seja um dos pontos requeridos para o SMA ter sucesso no Brasil;

- O aumento da resistência à deformação permanente é proporcional ao grau de modificação das propriedades de consistência e reológicas do ligante asfáltico, provavelmente em função do teor de polímero SBS utilizado;

- O SMA para os três tipos de ligantes estudados, possui flexibilidade compatível com concretos asfálticos densos de boa qualidade, refletida pelos ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração por compressão diametral;

- A exemplo dos concretos asfálticos densos com asfalto modificado por polímero SBS e a partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração, a vida de fadiga da mistura SMA com o emprego deste ligante, provavelmente deve ser maior; para confirmação da melhoria do comportamento, recomenda-se a execução de ensaios de fadiga comparativos com o CAP convencional para tal finalidade;

- Ainda, à luz dos resultados de módulo de resiliência e de resistência à tração, variações na dosagem de ligante asfáltico modificado por polímero SBS (AMP-2) dentro da faixa de teores estudados (6% a 7%), não acarretam grandes alterações no comportamento mecânico da mistura no que se refere a sua flexibilidade e resistência à ruptura;

- Verifica-se, entretanto, a elevada sensibilidade à resistência à deformação permanente com a variação no teor de asfalto modificado com polímero SBS (AMP-2) dentro da faixa de teores estudados (6% a 7%), tendo sido determinante a execução dos ensaios no simulador de tráfego tipo LPC, na fase de projeto da mistura, para verificação do teor ótimo de ligante para execução do trecho experimental;

- 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;

- Através da avaliação preliminar das características relacionadas à segurança do usuário, observa-se que o revestimento tipo SMA, apresenta, até a publicação desta pesquisa, condições adequadas de aderência e atrito entre a sua superfície e os pneus dos veículos. Recomenda-se, entretanto, monitorar sistematicamente a evolução do desempenho do trecho experimental executado, especialmente quanto às características funcionais relativas à segurança ao usuário para tráfego em baixas velocidades;

- À luz dos resultados obtidos na execução do trecho experimental na via Anchieta - pista Sul, na "curva da onça" - km-44 + 400 m, sentido normalmente de descida de São Paulo rumo a Santos, esta tecnologia é perfeitamente factível à realidade brasileira, desde que obedecidos os procedimentos de projeto, executivos e de controle tecnológico preconizados pela NCAT / EAPA e efetuadas as devidas adaptações nas usinas usualmente empregadas para as misturas a quente .

5.2 Recomendações para Pesquisas Futuras

Tendo em vista os resultados obtidos nesta dissertação, o autor sugere os seguintes tópicos para estudos futuros:

- Avaliação mecânica complementar de comportamento à fadiga e de sensibilidade do módulo de resiliência das misturas SMA, na faixa de temperaturas de serviço;

- Desenvolvimento de novas experimentos de laboratório e de campo, com graduações, espessuras e ligantes asfálticos produzidos ou modificados para atender condições específicas de clima, tráfego e de infra-estrutura do pavimento;

- Avaliação funcional das misturas SMA a partir do monitoramento sistêmico dos índices de qualidade de rolamento e de segurança aos usuários;

- Estudos comparativos, em trechos experimentais para verificação da redução de ruído em vias urbanas, com espessuras do revestimento tipo SMA da ordem de 2 cm;

- Avaliação mecânica de laboratório e em trecho experimental do revestimento em SMA (3 cm) em relação ao concreto betuminoso usinado a quente (5 cm), comumente utilizado no Brasil. Esta espessura proposta leva somente em consideração a equivalência do custo de construção (materiais, usinagem, transporte e execução), embora várias referências consultadas, demonstrem que as misturas SMA oferecem uma melhor relação benefício-custo devido ao aumento do ciclo de vida, redução nas intervenções de manutenção da infra-estrutura e dos níveis de acidentes por derrapagem;

- Estudo complementar de redução de acidentes, na área de engenharia de tráfego, com a implantação desta tecnologia para revestimento de pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - *European Asphalt Study Tour* – Report on the 1990. AASHTO; FHWA; NAPA; SHRP; TAI; TRB. USA, 1990.

AASHTO – Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing – Part II Twentieth Edition, 2000.

AFNOR - *Preparation des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2: Compactage des plaques.* NF P 98-250-2. Association Française de Normalisation, Paris, França, 1991a.

AFNOR - Association Française de Normalisation, Paris, França., 11p. Juillet, *Deformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 1: Essai d'orniérage.* NF P 98-253-1, 1991b.

ASTM - *Annual Book of ASTM Standards* – Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, v.04.03. USA, 2000.

BELIGNI, M. - *Misturas Asfálticas do tipo SMA (Stone Mastic Asphalt): Solução para Revestimentos de Pavimentos de Rodovias e Vias Urbanas de Tráfego Pesado* – 1º Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico, 2000.

BERNUCCI, L.B.; CERATTI, J.AP.; CHAVES, J.M.; MOURA, E.; CARVALHO A D. - *Estudo da Adesividade no Comportamento de Misturas Asfálticas – 10º Congresso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto. Espanha,* 1999.

BERNUCCI, L.B.; CERATTI, J.AP.; LEITE, L. F.M.; MOURA, E.; - *Asfalto Mofidificado com EVA: Uma Solução para Revestimentos Asfálticos de Alto Módulo e Alta Resistência à Deformação Permanente* - 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília – DF, 2000.

BOLETIM TÉCNICO: Fibras de Celulose Viatop – J.RS. Ecofibras – *Granulados Fibrosos para a Construção Rodoviária.*

BOLZAN, P.E. - *Stone-Mastic Asphalt and Micro-SMA As Premium Overlay Asphalt Mixtures on the Ricchieri Highway in Argentina,* 2000.

BOULDIN, M.G.; COLLINS, H.H. - *Influence of Binder Rheology on rut Resistance of Polymer Modified and Unmodified Hot Mix Asphalt – Polymer Modified Asphalt Binders.* – ASTM STP 1108, 1992.

BROWN, E R.; RAJIB, B.M. - Laboratory Study on Draindown of Asphatl Cement in Stone Matrix Asphalt. – *Transportation Research Record* TRR-1513, 1994.

CERATTI, J.A.; RUWER, P.M.; OLIVEIRA, J.A. - *Estudo do Comportamento Mecânico de Concreto Asfáltico com Ligante Modificado com Polímero* – 13º Encontro de Asfalto. IBP, Rio de Janeiro, 1996.

CNT - Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte – *Pesquisa Internet - Site CNT,* 2001.

CORTÉ, J.F.; BROSSEAUD, Y.; SIMONCELLI, J.P.; CAROFF, G. *Investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder and axle Loading Configuration – TRR 1436.* TRB, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Ministério dos Transportes, Brasil - *Método de Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral* - DNER-ME 138/94, 1994a.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Ministério dos Transportes, Brasil – *Método de Ensaio Determinação do Módulo de Resiliência.* DNER-ME 133/94, 1994b.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Ministério dos Transportes, Brasil – M*isturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall.* DNER-ME 043/95, 1995.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Ministério dos Transportes, Brasil - *Manual de Pavimentação,* 1996.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Ministério dos Transportes, Brasil - M*anual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos,* 1998.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Ministério dos Transportes, P*esquisa Site DNER,* 1998.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Ministério dos Transportes, Brasil - *Coletânea de Normas - Asfalto Modificados por Polímeros,* 1999 .

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Ministério dos Transportes, Brasil - *Especificações Gerais para Obras Rodoviárias – Pavimentos Flexíveis,* 2000.

EAPA - *Heavy Duty Surfaces: The Arguments for SMA* European Asphalt Paving Association, Holanda, 1998.

ECOFIBRAS (S/D) BOLETIM TÉCNICO: Fibras de Celulose Viatop – J.R.S. – Granulados Fibrosos para a Construção Rodoviária.

EMERY, J. J.; W. SCHENK, J. J. CARRICK, J. K. DAVIDSON, W. K. MACINNIS E G. J. A. KENNEPOHL - Stone Mastic Asphalt Trials in Ontario. *77th Transportion Research Record*, USA, 1996.

FHWA - *An Overview of Surface Rehabilitation Techniques for Asphalt Pavement* – Instructor's Guide – FHWA-AS-94-074, 1994.

FRANCKEN, L.e A. VANELSTRAETE - SMA en Belgique: un revêtement pour l'avenir. *XIIe Journée du Betume*. Belgique, 1995.

GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes – *Anuário Estatístico – Pesquisa Internet Site Geipot,* 1999.

GONZALEZ, G.; KENNEDY, T.W.; ANAGNOS, J.N. Evaluation of the resilient elastic characteristics of asphalt mixtures using indirect tensile test. *Research Report n. 183-6,* Center of Highway Res., Univ. of Texas, Austin, nov. 1975. 71p.

HERMAN, L A.; AMBROZIAK, M.J.; PINCKENY E. - *Investigation of Tire Road Noise Levels for Ohio Pavement Types* – Transportation Research Board – TRB, 79 th Annual Meeting January, Washington, D.C., 2000.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – *Dados do Censo 2000,* 2000.

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo - *Informações Básicas Sobre Materiais Asfálticos.* 1999.

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo - Informativo "*O asfalto*" – Rio de Janeiro, 1996 .

IPIRANGA ASFALTOS - FITEP - Ficha Técnica de Produto: *Betuflex B, Betutope e CAP-20* – Publicação da Ipiranga Asfaltos S/A, 2000.

LU, X - On polymer modified road bitumens – Tese (Doutorado) – Royal Institute of Technology – Suécia, 1997.

MARCHAND, J.P.; BARTH, R. - *From Splittmastixasphalt to Anti-Rutting Asphalt* – Eurobitume, Barcelona – Espanha, 2000.

MOTTA, L.M.G.; PINTO, S - *O Uso de Ensaios Estatísticos na Definição de Parâmetros de Comportamento das Misturas Asfálticas* – 12º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro, 1994.

MOTTA, L.M.G.; SÁ; M.F.P.; OLIVEIRA, P.M.F.; SOUSA, A M. - *O Ensaio de Creep Estatístico e Dinâmico na Avaliação das Misturas Asfálticas* – 30ª Reunião Anual de Pavimentação. ABPV, 1996.

NAPA - *National Asphalt Pavement Association, Quality Improvement Series* 122. USA, Designing and Constructing SMA Mixtures – State-of-the-Practice, 1999.

NCHRP - *National Cooperative Highway Research Program, Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements,* Part 1 and Part 2, Report 425, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1999.

PERDRAZA, G.D. - Pavimentos tipo SMA com la Adicción de Granulado de Fibra de Celulose Recobiertas com Asfalto o Bitumen. La experiencia en Mexico. *10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto.* Vol II, p 723-726, Novembro, Sevilla, Espanha, 1999.

REIS, R.M.M; BERNUCCI, L.B.; ZANON; A. L. - *Revestimento Asfáltico tipo SMA para alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado – XV* ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino de Transportes – Campinas – SP, 2001.

REIS, R.M.M; NASCIMENTO, H.R.C.; - *Camada Porosa de Atrito com Utilização de Asfalto Modificado com Polímeros* – 10º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Sevilha – Espanha - 1999.

REIS, R.M.M; SANTO, N.R.E.; - *Asfalto Modificado com Polímero - Tecnologia de Ponta para Prolongar a Vida dos Pavimentos Asfálticos* – Publicação da Ipiranga Asfaltos S/A, São Paulo – Brasil, 1999.

SCHMIEDLIN, R. B. - Stone Matrix Asphalt – The Wisconsin Experience *80th Transportation Research Board.* USA, 1999.

SLATER, K.; PHILLIPS, P.; WOODSIDE, A. R.; WOODWARD, W.D.H.; *Assessing The Performance of SMA As a Surfacing in an Urban Environment* – Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1996.

VINHA, A.M. - *Cap-Dop Agente Melhorador de Adesividade – Produtos Asfálticos Aplicáveis em Pavimentação Rodoviária* – Petrobrás Distribuidora S/A, 1975.

WAY, G.B.; - *OGFC Meets CRM Where the Rubber meets the Rubber 12 Years of Durable Success* – Asphalt Rubber, 2000.

WHITEOAK; D - *The Shell Bitumen Handbook,* U.K – England, 1990.

WOHLK, C.J.; NIELSEN, C.B. - *Heavy Duty Stone Mastic Asphalt* – Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1996.

WOODMAN, C.; R. BURLIE e J. EMERY - Stone Mastic Asphalt Technology for Urban Pavements. *XIII International Road Federation World Meeting*, nº 418-E, Toronto, Ontario, Canadá, 1997.

XIN, S. -The Application of PMB & SMA Technology in Airport Runway of CAAC. Proceedings of *3rd International Conference on Road & Airfield Pavement Technology*. Volume 1. Beijing, China, 1998.

ZTV – Asphatl – StB 94 – Especificações de Serviço para Asfalto – Alemanha, 1998.