

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Caracterização de mistura de alto desempenho tipo SMA e  
avaliação do processo executivo em pista experimental no Estado  
do Rio Grande do Sul**

**Maurício Batista da Silva**

Porto Alegre  
outubro de 2012

**MAURÍCIO BATISTA DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DE ALTO  
DESEMPENHO TIPO SMA E AVALIAÇÃO DO PROCESSO  
EXECUTIVO EM PISTA EXPERIMENTAL NO ESTADO DO  
RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia

Porto Alegre

2012

**MAURÍCIO BATISTA DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DE ALTO  
DESEMPENHO TIPO SMA E AVALIAÇÃO DO PROCESSO  
EXECUTIVO EM PISTA EXPERIMENTAL NO ESTADO DO  
RIO GRANDE DO SUL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 29 de outubro de 2012

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
D.Sc. pela COOPE – UFRJ  
Orientador

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr. Pela UFRGS

**Prof. Luciano Pivoto Specht**  
Dr. pela UFRGS

**Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito**  
PhD pela University of Nottingham

Dedico este trabalho ao amor da minha vida, Larissa,  
meus pais, Sérgio e Solange e minhas irmãs, Caroline e  
Clarissa!

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a DEUS que está sempre ao meu lado, me dando paciência, inteligência e força de vontade para seguir adiante.

Agradeço também a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho. Independentemente da participação de cada um, todos tiveram parcela importante nesta conquista.

Ao Prof. Washington Peres Núñez por me receber de braços abertos neste programa, quando quase havia desistido de fazer o mestrado. Além disso, agradeço pelos momentos de discussão em que me foi passado conhecimento inigualável.

Ao meu orientador, Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti, por aceitar coordenar minha pesquisa, orientando-o de forma segura e confiando na minha capacidade em realizar esta pesquisa.

A equipe do LAPAV/UFRGS, em especial ao Luciana Rohde, pelo tempo dispensado no auxílio a minha pesquisa.

Aos professores do PPGEC/UFRGS pelos ensinamentos recebidos nestes anos de estudo.

A Betunel S.A., pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

A Superintendência de Pesquisas Rodoviárias do DAER, em especial a Eng Maria Cristina, por autorizar a execução do trecho experimental e incentivar esta pesquisa.

A equipe da Construtora Brasília Guaíba Ltda, que entendeu minhas ausências. Aos engenheiros Giovani Nicoletti, Adriano Pereira, Gabriela Mâncio e Lenísio Alves pelas conversas sempre produtivas e incentivadoras. Em especial ao Eng Paulo Battastini, que confiou a mim esta tarefa tão importante.

A minha família, agradeço aos meus pais, Sérgio e Solange, pelo incentivo permanente para o aprimoramento dos meus conhecimentos. Agradeço a eles por transferir aos filhos a importância dos estudos e de que não há limites para quem detém o conhecimento. As minhas irmãs, sou muito grato pelo incentivo e torcida que me acompanharam neste período.

Ao meu primeiro e eterno amor, Larissa, não tenho palavras. Esteve sempre ao meu lado, entendendo a minha ausência e me incentivando a cada minuto.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim!”

*Chico Xavier*

## RESUMO

SILVA, M.B. Caracterização de misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA e avaliação do processo executivo em pista experimental no Estado do Rio Grande do Sul. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Esta pesquisa foi baseada em um projeto de *Stone Mastic Asphalt* – SMA na faixa I da especificação ET-DE-P00-031 do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, com ligante modificado por polímero, classificação 60/85, em trecho experimental da rodovia ERS-122, km 6+400 ao km 7+000. O volume elevado de veículos pesados neste trecho e as deformações decorrentes desta carga motivaram o estudo de novas tecnologias. Foram realizados ensaios laboratoriais para confirmar a dosagem da mistura e determinar as propriedades mecânicas através de ensaios de módulo de resiliência, resistência a tração na compressão diametral e deformação permanente em trilha de roda. A mistura apresentou bom desempenho a deformação permanente, módulo de resiliência e resistência a tração no teor de projeto. Além disso, foi analisado o processo executivo da mistura, desde a produção do agregado, passando pelo processo de usinagem, transporte, lançamento e compactação. Inicialmente, foi executada pista teste na praça de pedágio do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Estado do Rio Grande do Sul (DAER/RS) localizada no município de Portão/RS para posterior execução no trecho experimental. Constatou-se que o processo de usinagem produziu misturas com variações positivas de até +0,3% em relação ao teor de ligante, influenciando no desempenho da mistura no que se refere aos ensaios de desempenho. Os resultados e análises apontam para uma mistura que requer uma metodologia de controle de qualidade efetiva, mas que mesmo com algumas variações, o revestimento ainda apresentou bom desempenho.

**Palavras-chave:** *SMA; deformação permanente; misturas de alto desempenho; processo executivo.*



## ABSTRACT

SILVA, M.B. Caracterização de misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA e avaliação do processo executivo em pista experimental no Estado do Rio Grande do Sul. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

This research was based on a Stone Mastic Asphalt- SMA project in the grading smolop #1 of ET-DE-P00/031 specification of São Paulo Highways Department , with modified binder, grade 60/85, in a test section in ERS-122 highway, between km 6+400 and km 7 +0. The high volume of heavy vehicles on this highway and the resulting deformations, led to the study of new technologies. Laboratory tests were conducted to confirm the mixture design and determine the mechanical properties through resilient modulus test, tensile strength in diametrical compression and wheel-tracking test. The mixture had a good performance at the Wheel-tracking test, resilient modulus and tensile strength at the design binder content. In addition, it was analyzed the production process of the mixture, since the production at the crushing plant, mix plant facilities, delivery and compaction process. Initially, the test was performed at the toll plaza of DAER/RS in the city of Portão/RS for later execution in test section. It was found that the mixing plant produced mixtures up to 0.3% over the design binder content, influencing in the performance of the mixture on performance tests. The results and analyzes indicate that the mixture requires a effective methodology of quality control, but even with some variations, the layer still performed well.

**Key words:** *SMA; deformation; high performance mixture; production processes.*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS.....</b>	<b>15</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	19
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1 HISTÓRICO DA MISTURA SMA.....	21
2.2 DEFINIÇÃO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	22
2.3 DOSAGEM DA MISTURA.....	24
2.4 MATERIAIS QUE COMPÕE A MISTURA.....	26
2.4.1 Agregados.....	26
2.4.2 Material de Enchimento.....	28
2.4.3 Fibras.....	29
2.4.4 Ligante Betuminoso.....	31
2.5 PROCESSO EXECUTIVO.....	33
2.5.1 Produção da Mistura – Usinagem.....	33
2.5.2 Espalhamento e Compactação.....	34
<b>3 TRECHO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>36</b>
3.1 DESCRIÇÃO DO TRECHO.....	36
3.2 TRAÇO DA MISTURA.....	38
<b>4 CARACTERÍSTICA E ORIGEM DOS MATERIAIS.....</b>	<b>44</b>
4.1 Agregados.....	44
4.2 Fíler.....	51
4.3 Fibra.....	52
4.4 Ligante Asfáltico.....	52
<b>5 ENSAIOS UTILIZADOS NA PESQUISA.....</b>	<b>53</b>
5.1 PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS.....	53
5.2 ENSAIO DE ESCORRIMENTO.....	54

5.3 ENSAIOS RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	55
5.4 ENSAIO MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	56
5.5 ENSAIO DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	59
<b>6 RESULTADOS E EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>63</b>
6.1 PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS.....	63
6.2 ENSAIO DE ESCORRIMENTO.....	63
6.3 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL E MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	64
6.4 DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM TRILHA DE RODA.....	68
6.5 PROCESSO EXECUTIVO – PISTA EXPERIMENTAL.....	71
<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>83</b>
7.1 CONCLUSÕES.....	83
7.2 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Esqueleto mineral da mistura SMA x CBUQ (NAPA, 2002).....	22
Figura 2:	Granulometria da mistura SMA x CBUQ.....	23
Figura 3:	Identificação de afundamento em trilha de roda km 4+200 ERS-122.....	37
Figura 4:	Identificação de afundamento em trilha de roda km 9+400 ERS-122.....	37
Figura 5:	Trecho experimental km 6+400 a km 7+000 da ERS-122.....	38
Figura 6:	Parâmetros de dosagem Marshall (a) Volume de Vazios e (b) V.C.B.....	40
Figura 7:	Parâmetros de dosagem Marshall (a) Dens. Aparente e (b) V.A.M.....	41
Figura 8:	Parâmetros de dosagem Marshall – R.B.V.....	41
Figura 9:	Composição Granulométrica da mistura – Faixa I ET-DE-P00/031.....	43
Figura 10:	Layout da britagem para produção de CBUQ.....	44
Figura 11:	Britador primário Jawmaster 907HD .....	45
Figura 12:	Britador primário Jawmaster 907HD instalado na unidade produtiva da empreiteira.....	46
Figura 13:	Britador de cone série H-3000EC.....	46
Figura 14:	Rebritador Barmac VSI 6000.....	47
Figura 15:	Layout da britagem para produção de SMA.....	50
Figura 16:	Parâmetros Volumétricos da Mistura.....	53
Figura 17:	Prensa para realização do ensaio de resistência a tração na compressão diametral.....	55
Figura 18:	Equipamento para realização do ensaio de módulo de resiliência.....	58
Figura 19:	Mesa compactadora LCPC instalada no LTP-EPUSP.....	61
Figura 20:	Simulador de tráfego LCPC instalado no LTP-EPUSP.....	62
Figura 21:	Resultado do ensaio de deformação permanente em trilha de roda.....	69
Figura 22:	Deformação plástica no pavimento da Praça de Pedágio de Portão/RS.....	71
Figura 23:	Processo de mistura do fíler natural com a Cal Hidratada.....	72
Figura 24:	Processo de inserção das fibras na mistura, (a) saco de fibra dosado para uma tonelada da mistura e (b) janela de colocação das fibras.....	73
Figura 25:	Produção de mistura heterogênea.....	74
Figura 26:	Amostra da mistura tipo SMA retirada da usina de asfalto.....	74
Figura 27:	Realização do ensaio de extração de betume.....	75
Figura 28:	Análise granulométrica da mistura após usinagem.....	75

Figura 29:	Fresagem da pista teste – Praça de Pedágio.....	76
Figura 30:	Correção dos defeitos da fresagem.....	76
Figura 31:	Processo de compactação da mistura.....	77
Figura 32:	Primeira cancela executada em SMA.....	78
Figura 33:	Extração de CP na Praça de Pedágio.....	78
Figura 34:	CP com diferentes revestimentos executados.....	79
Figura 35:	Lançamento da mistura SMA no trecho experimental.....	81
Figura 36:	Trecho experimental liberado para a aplicação da mistura tipo SMA.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Requisitos para mistura SMA.....	25
Tabela 2:	Especificação Agregado Graúdo.....	27
Tabela 3:	Definição da fração de agregado graúdo.....	27
Tabela 4:	Especificação Agregado miúdo.....	28
Tabela 5:	Granulometria do material de enchimento .....	29
Tabela 6:	Propriedade das Fibras de Celulose.....	30
Tabela 7:	Propriedade das fibras de vidro.....	30
Tabela 8:	Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo.....	31
Tabela 9:	Especificação ligante asfáltico modificado por polímero.....	33
Tabela 10:	Granulometria enquadrada na faixa I da especificação ET-DE-P00/031 do DER/SP.....	39
Tabela 11:	Parâmetros da dosagem Marshall para SMA.....	40
Tabela 12:	Composição da mistura segundo especificação ET-DE-P00/031, faixa I DER/SP.....	42
Tabela 13:	Resultados obtidos da dosagem Marshall modificada para SMA.....	42
Tabela 14:	Organização das peneiras para produção de mistura asfáltica densa contínua.....	48
Tabela 15:	Especificação do material x resultado dos ensaios.....	48
Tabela 16:	Comparativo de especificações dos agregados para emprego em misturas tipo SMA.....	49
Tabela 17:	Organização das peneiras para produção de mistura asfáltica tipo SMA...	50
Tabela 18:	Granulometria do fíler utilizado na pesquisa.....	51
Tabela 19:	Caracterização da Fibra.....	51
Tabela 20:	Propriedade do ligante asfáltico utilizado na pesquisa.....	52
Tabela 21:	Resultado dos valores de $VCA_{MIX}$ x $VCA_{DRC}$ .....	63
Tabela 22:	Resultado dos ensaios realizados durante o processo de dosagem.....	64
Tabela 23:	Variações no teor de ligante durante o processo de usinagem da mistura..	65
Tabela 24:	Resultado dos ensaios de MR e RT.....	66
Tabela 25:	Resultado dos ensaios de RT e MR para ligantes diferentes.....	67
Tabela 26:	Resultado do ensaio de RT.....	68
Tabela 27:	Resultado do ensaio de MR.....	68

Tabela 28: Ensaio de deformação permanente para diferentes teores e tipos de ligantes.....	70
Tabela 29: Verificação do grau de compactação da mistura na pista teste.....	80
Tabela 30: Verificação do grau de compactação da mistura na pista experimental.....	82

## LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

AASHTO:	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS:	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
AMP:	Asfalto modificado por polímero
ANP:	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM:	American Society for Testing and Materials
CAP:	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ:	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT:	Confederação Nacional dos Transportes
CONTRAN:	Conselho Nacional de Transito
DAER:	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DER:	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DNER:	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (substituído pelo DNIT)
DNIT:	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAPA:	European Asphalt Pavement Association
EVA:	Acetato de Vinila
FHWA:	Federal highway Administration
LCPC:	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LTP-EPUSP:	Laboratório de Tecnologia de Pavimentação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
LVC:	Levantamento Visual Contínuo
LVDT:	Linear Variable Differencial Transformer
MR:	Módulo de Resiliência
NAPA:	National Asphalt Pavement Association
NCAT:	National Center for Asphalt Technology
Pca:	% da fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura
RBV:	Relação betume-vazios
RT:	Resistência a tração
SB:	Estireno-Butadieno



SBS:	Estireno-Butadieno-Estireno
SEBS:	Estireno-Etileno-Butadieno-Estireno
SIS:	Estireno-Isopropeno-Estireno
SMA:	Stone Mastic Asphalt - Matriz Pétreo Asfáltica
SP:	São Paulo (estado)
TM:	Tamanho máximo
TMN:	Tamanho máximo nominal
VAM:	Vazios do agregado mineral
VCAdrc:	Vazios da fração graúda do agregado compactado
VCAmix:	Vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada
VCB:	Vazios cheios de betume
VDM:	Volume diário médio
Vv:	Volume de Vazios

# 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, dentre os modais que movimentam a economia, o rodoviário é responsável por uma grande fatia do mercado. Em recente pesquisa realizada pela CNT (Confederação Nacional dos Transportes) (2010) com empresas que utilizam algum modal de transporte, constatou-se que 32% das entrevistadas utilizam apenas o modal rodoviário. Outros 62% utilizam predominantemente este modal combinado com outros modais, contra 6% que raramente o utilizam.

Dada esta predominância do modal rodoviário, o pavimento torna-se item fundamental na matriz de transportes brasileira. Seu objetivo principal é oferecer ao usuário condições mínimas de conforto, segurança e economia. O primeiro está atrelado a sensação de bem estar quando o usuário se desloca pela via, com nenhuma ou pequenas perturbações na suspensão do veículo. A segurança refere-se ao controle do veículo quando usuário percorre seu trajeto. Por último, a economia está vinculada ao desgaste do veículo, consumo de combustível e tempo de deslocamento. Logo, vias pavimentadas e o estado de conservação do revestimento são fundamentais nesta análise.

O estado da camada de rolamento depende da sua execução e manutenção periódica, do carregamento a que ela está sujeita e as condições climáticas locais. A abundância de veículos comerciais de carga e transporte de passageiros elevam as solicitações ao pavimento, o que compromete o estado de superfície do revestimento.

A resolução 258/07 do Contran, popularmente conhecida como “Lei da Balança”, limita a carga por eixo. No entanto, o avanço tecnológico da indústria automobilística produz veículos com maiores capacidades de carga. Da mesma forma, os veículos leves estão sendo produzidos cada vez mais potentes e velozes, exigindo melhores condições de trafegabilidade.

Desta forma, sendo o modal rodoviário o principal utilizado no Brasil, a busca pela melhoria das propriedades do pavimento torna-se um desafio constante. Além disso, a falta de planejamento na realização das manutenções traz transtornos aos usuários e acarreta em custos operacionais adicionais e de reparos no pavimento.

Sobre o exposto, a deformação permanente em trilha de roda aparece como um dos principais problemas a que um pavimento está sujeito, comprometendo o conforto ao rolamento e a segurança ao usuário. Na ocorrência de chuva, a água acumula na área dos afundamentos, tendo dificuldade no escoamento, diminuindo o contato pneu/pavimento.

Os afundamentos e ondulações podem estar associados à deformação plástica do subleito ou do próprio revestimento. No caso do revestimento, a origem está associada à variação de volume de vazios causado pela ação do tráfego e ao comportamento plástico da mistura frente a um determinado nível de solicitações.

Segundo BELIGNI *et. al.*(2000) as principais causas do desenvolvimento de deformações permanentes são:

- Consolidação do revestimento pelo tráfego;
- Comportamento visco-plástico das misturas asfálticas a altas temperaturas;
- Baixa resistência mecânica do revestimento asfáltico, quando da liberação ao tráfego logo após a execução.

Por outro lado, as principais causas pelo processo de fadiga estão associadas ao ligante asfáltico, sendo elas:

- Envelhecimento do ligante, devido às variações climáticas e solicitações do tráfego;
- Oxidação do ligante devido a falhas durante as etapas de transporte, estocagem e usinagem.

Em vista desta situação, a aplicação de novas soluções e técnicas executivas, priorizando ligantes de alto desempenho, são as alternativas para atender a demanda da sociedade frente ao conforto e segurança e, ao poder público, maior retorno sobre os investimentos no setor rodoviário.

Sobre este aspecto, o SMA (Stone Matrix Asphalt – Matriz Pétreo Asfáltica) surge como uma alternativa que proporciona maior durabilidade, segundo pesquisas realizadas no Brasil e no Exterior. Destaca-se pela elevada resistência à deformação permanente e trincamento por fadiga ou reflexão por trincas. Além disso, proporciona melhor aderência pneu-pavimento e,

devido a sua macrotextura, diminui a ocorrência de *spray* provocado pelo acúmulo de água da chuva que permanece na superfície em relação aos revestimentos convencionais.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta pesquisa tem por objetivo principal avaliar o processo executivo de mistura asfáltica tipo SMA em pista experimental na ERS-122, no Estado do Rio Grande do Sul.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Analisar o comportamento mecânico da mistura através da realização de ensaios de: (i) resistência a tração por compressão diametral, (ii) módulo de resiliência e (iii) deformação permanente em trilha de roda;
- Avaliar o processo executivo da mistura SMA em relação às misturas densas contínuas;

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa está organizada conforme descrito abaixo:

- Capítulo 1: apresenta, além da organização da dissertação, o contexto a qual está inserida;
- Capítulo 2: traz a revisão bibliográfica, apresentando um breve histórico da mistura, princípio de ação, o processo de dosagem e seus materiais, além do processo executivo desde sua produção até o lançamento e compactação na pista;
- Capítulo 3: apresenta o trecho experimental onde será aplicada a mistura, a condição do pavimento e o traço utilizado na pesquisa;
- Capítulo 4: este capítulo traz a origem e caracterização dos materiais utilizados na pesquisa;
- Capítulo 5: apresenta os ensaios realizados na pesquisa para conhecimento de seu desempenho e princípio de ação;

- Capítulo 6: traz os resultados dos ensaios apresentados no capítulo anterior e o acompanhamento da execução do trecho experimental;
- Capítulo 7: de posse dos resultados, a pesquisa é avaliada e apontadas as conclusões resultantes desta pesquisa, além da sugestão de outras linhas de pesquisa sobre este tema.

## 2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO DA MISTURA SMA

O SMA foi desenvolvido na Alemanha no final da década de 60. Tinha por objetivo reduzir o desgaste superficial e as deformações plásticas ocasionadas pela utilização de pneus com artefatos metálicos durante o inverno. Sua primeira aplicação consistia em uma camada de 2cm composta por 75% de agregados entre 5 e 8 mm, 15% entre 0 e 2 mm, 10% de material de enchimento e aproximadamente 7% de ligante asfáltico. O alto teor de asfalto na mistura e temperatura de usinagem entorno de 180°C, ocasionava o escorrimento do ligante durante o processo de transporte da massa asfáltica. A forma encontrada para que a mistura apresentasse a consistência necessária durante o trajeto usina/pista, sem perda de material asfáltico, foi a introdução de aditivos estabilizantes, as fibras.

A mistura, desde então, foi utilizada com sucesso pela Europa e, em 1990, chegou a América do Norte, mais precisamente aos Estados Unidos. Técnicos americanos visitaram alguns países europeus para observar a qualidade das rodovias e procedimentos executivos com o objetivo de adquirir conhecimento sobre o SMA. Em 1991, cinco estados americanos já haviam executado seções experimentais da mistura. Seis anos após, em 1997, a NCAT (National Center for Asphalt Technology) em conjunto com a FHWA (Federal Highway Administration) atestaram o bom desempenho do SMA para condições de alto volume de tráfego (NAPA, 2002).

No Brasil, a primeira pista a utilizar o revestimento asfáltico tipo SMA foi a do autódromo de Interlagos, em São Paulo, no ano de 2000 (BELIGNI *et. al.*, 2000). Após esta primeira aplicação, a via Anchieta foi o primeiro teste desta mistura em vias de tráfego pesado (REIS, 2002).

Apesar de pouco utilizado em relação as mistura convencionais, observa-se, segundo SILVA *et. al.*, (2005) que o SMA tem sido empregado em vários trechos de rodovias brasileiras, destacando-se a região sudeste com trechos no Corredor Tecnológico de Barueri (SP), sujeito a tráfego severo de caminhões e declividade de 10%, no ano de 2002; na Rodovia Presidente Dutra, sob administração da concessionária Nova Dutra, em 2002 e em trechos sob responsabilidade da Concessionária de Rodovia Colinas, em 2003. As mais recentes obras

estão localizadas em rodovias dos estados de São Paulo e Minas Gerais, além do uso urbano em São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador (BERNUCCI *et. al.*, 2007).

## 2.2 DEFINIÇÃO E PRINCÍPIO DE AÇÃO

O SMA é um revestimento asfáltico usinado a quente, estruturado para privilegiar a interação dos agregados graúdos, maximizando o contato entre as faces deste agregado e aumentando a resistência à ação do tráfego (BALBO, 2007). Possui distribuição granulométrica uniforme, com quantidade elevada de agregados graúdos, em torno de 70% a 80% de agregados retidos na peneira 10 (de abertura 2mm). Devido a esta granulometria, tem-se um elevado volume de vazios, a serem preenchidos por um masticque asfáltico, composto pela fração areia, filler, ligante asfáltico e fibras assegurando durabilidade a mistura (Figura 1).

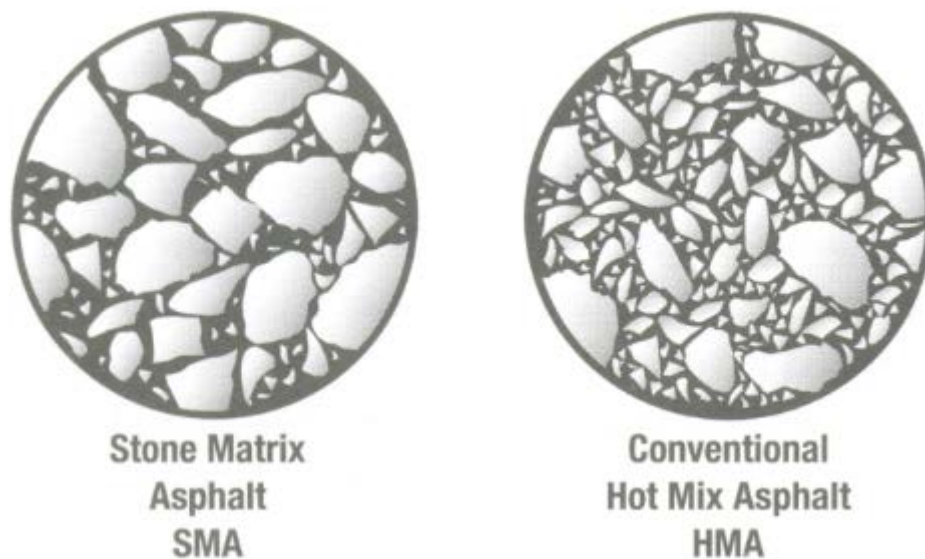


Figura 1: Esqueleto mineral da mistura SMA x CBUQ (NAPA, 2002)

Este esqueleto formado pelos agregados graúdos, priorizando o contato entre os grãos, proporciona elevada resistência a deformações plásticas, em relação às misturas asfálticas densas contínuas, que são concebidas para “[...] apresentar resistência ao cisalhamento baseada no conceito de enchimento de vazios por meio da interação entre grãos de diâmetros variados [...]” (BALBO, 2007) (Figura 2). A interação da fração graúda nas misturas asfálticas tipo SMA, absorve os esforços de compressão gerados pelo tráfego, sendo

necessária resistência mecânica do agregado compatível com o nível de tensões (MERIGHI *et al.*, 2001).

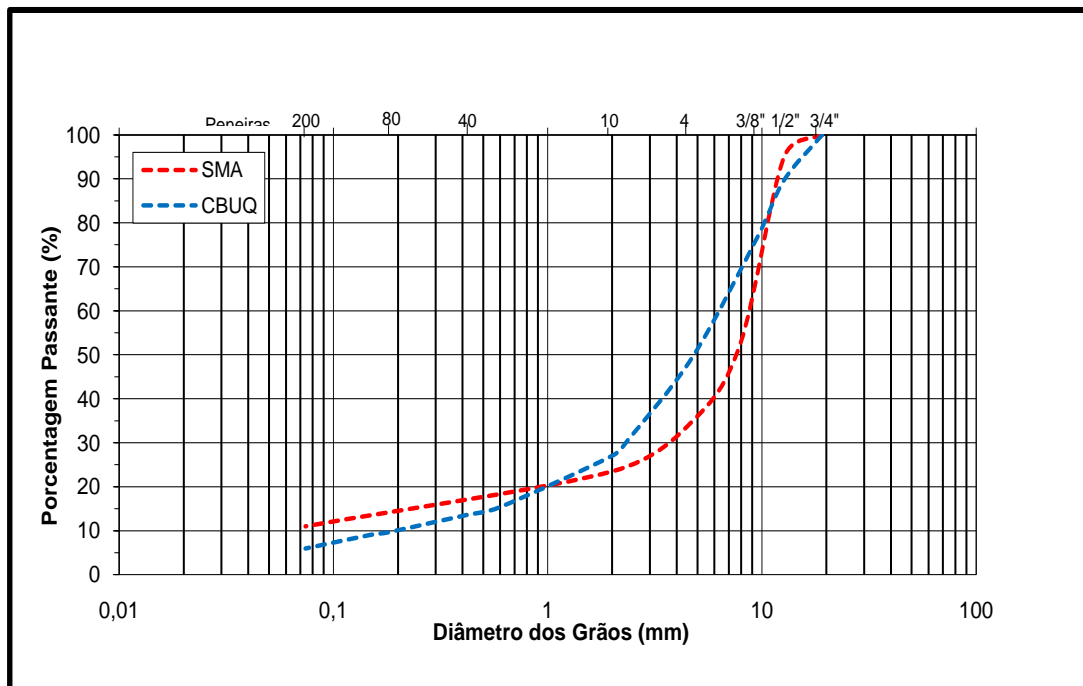


Figura 2: Granulometria da mistura SMA x CBUQ

Roberts (1996) salienta a importância da granulometria nas misturas betuminosas, influenciando nas principais propriedades como trabalhabilidade, durabilidade, estabilidade, permeabilidade, resistência a umidade, aderência, rigidez e vida de fadiga. Kandhal *et al.* (2001) salienta que o tamanho máximo dos agregados influencia no desempenho da mistura, sendo os que possuem maior TM (tamanho máximo) são capazes de resistirem a maiores cargas.

Em virtude da composição granulométrica o SMA é uma mistura rica em ligante, na ordem de 6% a 7% aproximadamente. Podem ser utilizados ligantes modificados ou convencionais, sendo que a utilização do produto modificado pode melhorar as propriedades mecânicas da mistura, influenciando nos parâmetros de resistência a deformação permanente em trilha de roda, vida útil, vida de fadiga e desgaste superficial (EAPA, 1998). O teor elevado de ligante obriga a utilização de fibras, orgânicas ou minerais, aplicadas na usinagem da mistura, evitando a segregação durante o transporte e o escorrimento do material betuminoso (REIS, 2002). Segundo EAPA (1998), a utilização de ligante modificado por polímero pode reduzir o percentual de fibras na mistura.



Segundo NAPA (2002), a mistura SMA reúne as seguintes características:

- Maior vida de serviço em relação às misturas asfálticas densas contínuas;
- Redução de ruídos: devido a sua textura, proporciona diminuição de ruídos em relação às misturas asfálticas densas convencionais;
- Aderência Pneu/pavimento: sua granulometria descontínua forma uma textura superficial que retém a água da chuva, impedindo que a mesma permaneça na superfície de rolamento, favorecendo o contato pneu/pavimento e aumentando a segurança em dias de chuva;
- Visibilidade: ao impedir que se forme uma lâmina d'água sobre o pavimento, o SMA reduz o reflexo dos faróis dos veículos que trafegam no sentido contrário, aumentando a visibilidade da sinalização no pavimento.

Por suas características, o SMA pode ser utilizado como camada de rolamento em pavimentos sujeitos a tráfego intenso e grandes solicitações. É adequado à implantação em interseções, terminais rodoviários de carga e corredores de ônibus, por exemplo. Na Europa, é utilizado para renovar a condição de aderência do pavimento ou manutenção de pavimentos existente através de camadas delgadas de 20 mm a 30 mm (NAPA, 2002).

### 2.3 DOSAGEM DA MISTURA

Diferentemente do procedimento de dosagem Marshall tradicional, a definição do traço da mistura asfáltica tipo SMA é baseada em duas características importantes desta tecnologia. A primeira delas refere-se à resistência interna da estrutura, garantida através do contato grão/grão entre os agregados graúdos. A segunda trabalha com a garantia da durabilidade da mistura através da formação de um mástique de elevada consistência, formado pela fração de agregado fino e ligante asfáltico.

Para garantir o contato entre os grãos do agregado graúdo, é preciso que os vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada ( $VCA_{MIX}$ ) sejam menores ou iguais aos vazios da fração graúda do agregado compactado ( $VCA_{DRC}$ ). Esses parâmetros podem ser calculados através das equações 1 e 2.

$$VCA_{drc} = \left( \frac{G_{CA} \times \gamma_W - \gamma_S}{G_{CA} \times \gamma_W} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$VCA_{mix} = 100 - \left( \frac{G_{MB}}{G_{CA}} - P_{CA} \right) \quad (2)$$

onde:

$\gamma_S$  – massa específica aparente da fração graúda do agregado seco compactado, g/cm<sup>3</sup>

$\gamma_W$  – massa específica da água

$G_{CA}$  – densidade aparente da fração graúda do agregado

$G_{MB}$  – densidade aparente da mistura compactada

$P_{CA}$  – % da fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura

O segundo ponto importante refere-se a durabilidade da mistura. Para o bom desempenho do SMA, faz-se necessário a produção de uma argamassa consistente, com alto teor de ligante. Devido a isto, conjugado a meta de produzir misturas com aproximadamente 4% de volume de vazios (Vv), os vazios do agregado mineral (VAM) devem exceder o especificado em norma (Tabela 1).

Tabela 1: Requisitos para mistura SMA

CARACTERÍSTICA	ET-DE-P00/031 (DER/SP)	AASHTO MP8-01
% de Vazios Totais	4	4
Vazios do Agregado Mineral – VAM (%)	≥ 17	17
Vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada – $VCA_{MIX}$ (%)	≤ $VCA_{DRC}$	≤ $VCA_{DRC}$
Porcentagem de fibras (celulose/ mineral)	0,3 a 1,5	0,3/0,4
Escorrimento na temperatura de usinagem, máximo, %	0,3	0,3
Resistência à Tração por Compressão Diametral Estática a 25° C, mínima, MPa	0,6	

Tabela 1: Requisitos para mistura SMA

CARACTERÍSTICA	ET-DE-P00/031 (DER/SP)	AASHTO MP8-01
% de ligante asfáltico mínimo	-	6

Como processo para obtenção de uma boa mistura, deve-se, primeiramente (NAPA, 2002):

- a) Selecionar os agregados apropriados, determinando a graduação que proporcione o contato entre os grãos;
- b) Garantir que a granulometria escolhida atenda ao mínimo exigido de vazios do agregado mineral (VAM);
- c) Escolher a quantidade de ligante que proporcione a quantidade de vazios desejada, avaliando a suscetibilidade à umidade e o nível de escorrimento do ligante.

## 2.4 MATERIAIS QUE COMPÕE A MISTURA

Neste capítulo serão apresentados os materiais necessários a produção de mistura asfáltica tipo SMA, suas propriedades e parâmetros. Com o objetivo de explorar as especificações vigentes, optou-se por analisar cada material frente a especificação ET-DE-P00/031 do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo e AASHTO MP8-01.

### 2.4.1 Agregados

A principal função do agregado na composição do revestimento é proporcionar resistência e flexibilidade, sendo necessário que o mesmo possua características adequadas, resistência mecânica e aderência ao ligante asfáltico.

A norma ET-DE-P00/031 do DER de São Paulo, exige que a fração do agregado graúdo deva ser constituída por “[...] pedra britada ou seixo rolado britado, apresentando partículas sãs, limpas e duráveis, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas”. Para a norma americana, os agregados devem ser 100% britados, sendo 100% com ao menos uma das faces britadas e 90% com ao menos duas faces britadas, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Especificação do agregado graúdo

CARACTERÍSTICA	ET-DE-P00/031 (DER/SP)	AASHTO MP8-01
Abrasão Los Angeles – perda (%)	$\leq 30$	$\leq 30$
Índice de Forma	$\geq 5$	
% partículas lamelares	$\leq 10$	
Partículas alongadas e achatadas		
3:1	-	<20
5:1	-	<5
Sanidade – 5 ciclos (%)		
Sulfato de Sódio	<12	<15
Sulfato de Magnésio	-	<20

Referente ao agregado graúdo, a fração, em ambas as especificações, é definida como sendo a porção relativa à mistura total de agregados, retida numa determinada peneira que varia de acordo com o diâmetro nominal máximo, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Definição da fração de agregado graúdo

Diâmetro Nominal Máximo do Agregado		Porção de Agregado Retida na Peneira	
mm	ASTM	mm	ASTM
25	1"	4,75	Nº 4
19	3/4"	4,75	Nº 4
12,5	1/2"	4,75	Nº 4
9,5	3/8"	2,36	Nº 8
4,75	Nº4	1,18	Nº 16

(fonte: DER/SP, 2007; NAPA, 2002)

Por outro lado, a fração de agregado miúdo pode ser constituída por areia, pó de pedra ou mistura de ambos. Deve apresentar partículas individuais resistentes, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas. O equivalente de areia deve ser igual ou superior a 55%, conforme NBR 12052. A Tabela 4 apresenta os requisitos para utilização do agregado miúdo em misturas tipo SMA.

Tabela 4: Especificação Agregado miúdo

CARACTERÍSTICA	ET-DE-P00/031 (DER/SP)	AASHTO MP8-01
Sanidade – 5 ciclos (%)		
Sulfato de Sódio	-	<15
Sulfato de Magnésio	-	<20
Angularidade (%)		<45
Limite de Liquidez (%)	-	<25
Índice de Plasticidade	-	Não

(fonte: DER/SP, 2007; NAPA, 2002)

#### 2.4.2 Material de Enchimento

Segundo a NBR 7225/1993 da ABNT, fíler é um material constituído de pó-de-pedra ou outros materiais (inertes) com dimensão nominal máxima inferior a 0,075mm, utilizado como enchimento em misturas asfálticas. Quando obtido do processo de britagem do agregado graúdo e miúdo, denomina-se fíler natural. Caso contrário, quando da utilização de outros materiais, como cal hidratada, pó calcáreo ou cimento, por exemplo, chama-se fíler comercial. Ao se incorporar o fíler na mistura asfáltica, tem-se o objetivo de melhorar o desempenho mecânico, térmico e reológico da mesma.

A atuação deste material na mistura ocorre de duas formas. As partículas maiores serão parte do agregado mineral e preencherão os vazios deixados pelo agregado graúdo, sendo responsável pelo contato pontual entre eles, dando maior resistência a mistura. Por outro lado, as partículas menores se misturarão com o ligante asfáltico, dando-lhe maior consistência, formando o mástique que cimenta a partículas maiores (MOTTA e LEITE, 2000).

Segundo especificação do DER de São Paulo, o fíler deve ser de natureza mineral finamente dividido. Pode ser utilizado cimento portland até o limite de 2%, cal extinta, pó calcário, etc. A granulometria deve atender ao especificado na Tabela 5. De forma simples, para a especificação americana, fíler é todo o material passante na peneira de abertura 0,075mm.

Tabela 5: Granulometria do material de enchimento

PENEIRA		% em massa, passando
mm	ASTM	
0,42	Nº 40	100
0,18	Nº 80	95 – 100
0,075	Nº200	65 - 100

(fonte: DER/SP, 2007)

### 2.4.3 Fibras

Por apresentar granulometria descontínua e alto teor de ligante, em relação às misturas densas contínuas tradicionais, o SMA necessita do uso de fibras que inibam o escorrimento do material asfáltico. Sua adição não modifica quimicamente o ligante, mas aumenta as propriedades físicas do produto final, pois possibilita o uso de teores elevados do mesmo.

As fibras podem ser oriundas de celulose, vidro ou material mineral. Podem ser utilizadas soltas ou envolvidas por ligante asfáltico formando grânulos ou *pellets*. Neste caso, o percentual de ligante incorporado a fibra deverá ser levado em consideração quando da elaboração do traço da mistura. Sob o aspecto funcional, as fibras de celulose possuem vantagens em relação as minerais por serem inócuas a saúde e serem produzidas a partir de fontes renováveis (SILVA, 2005).

Vale (2007) realizou pesquisa sobre a viabilidade de se utilizar fibras de coco em misturas asfálticas tipo SMA. De acordo com a pesquisa, a utilização deste material mantém os parâmetros de desempenho da mistura em comparação a utilização da fibra de celulose. Babadopulos *et al.* (2008) também estudou alternativa a utilização de fibras de celulose com o análise de viabilidade técnica da incorporação de microfibras de polipropileno em misturas tipo SMA. Este tipo de fibra tem utilização em diversas áreas e em confecção de diferentes produtos como fraudas descartáveis, roupas médicas e, na engenharia civil, como reforço de concreto (BABADOPULOS *et al.*, 2008).

Em relação as normas, a ET-DE-P00/031 não traz qualquer exigência em relação as propriedades da fibra. A norma americana possui exigências diferentes para os diferentes tipos de fibra (Tabela 6 e Tabela 7).

Tabela 6: Propriedade das Fibras de Celulose

PROPRIEDADES	FIBRA DE CELULOSE
Análise com Peneiras	
Método A – Análise com Peneira Alpina Comprimento da Fibra - máximo Passante na Peneira n°. 100 (0,150 mm)	6 mm 70 +/- 10%
Método B – Análise com Peneira de Malha Quadrada Comprimento da Fibra - máximo Passante na Peneira n°. 20 (0,850 mm) Passante na Peneira n°. 40 (0,425 mm) Passante na Peneira n°. 140 (0,106 mm)	6 mm 85 +/- 10 % 65 +/- 10% 30 +/- 10%
Teor de cinza	18 +/- 5% não voláteis
pH	7,5 +/- 1,0
Absorção de óleo	5,0 +/- 1,0 (massa da vibra)
Teor de umidade	Menos de 5% (de massa)

(fonte: NAPA, 2002)

Tabela 7: Propriedade das fibras de vidro (NAPA, 2002)

PROPRIEDADES	FIBRA DE VIDRO
Análise das dimensões	
Comprimento da Fibra – valor máximo médio Espessura – valor máximo médio	6 mm 0,005 mm
Teor de “Shot”	
Passante na Peneira n°. 60 (0,250 mm) Passante na Peneira n°. 230 (0,063 mm)	90 +/- 5% 70 +/- 10%

(fonte: NAPA, 2002)

#### 2.4.4 Ligante Betuminoso

Segundo Bernucci *et al.* (2007), o asfalto é “[...] um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável á água e pouco reativo”.

Para a mistura SMA podem ser utilizados ligantes convencionais ou modificados. A ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia), publicou em julho de 2005 uma nova especificação de CAP convencional, conforme transcrito na Tabela 8.

Tabela 8: Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150- 200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt- Furol							
- a 135°C, mín	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
- a 150°C, mín		90	50	43	36		
- a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield							
- a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
- a 150°C, mín		203	112	97	81		
- a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Susceptibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)		
Ponto de Fulgor, mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutilidade a 25°C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos							

(fonte: ANP, 2005)



Tabela 8: Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150- 200	ABNT	ASTM
Varição em massa, Max	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutibilidade a 25°C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, Max	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Esta especificação atende a maioria das aplicações rodoviárias. No entanto, para condições especiais, onde o volume de tráfego de veículos comerciais com peso por eixo crescente a cada ano faz-se necessário a utilização de asfaltos modificados, pois poderá melhorar as propriedades da mistura.

Os modificadores mais comuns são os polímeros, “macromoléculas sintéticas, estruturalmente simples, constituídas de unidades estruturais repetidas em sua longa cadeia, denominadas manômeros. Os homopolímeros são constituídos por apenas um manômero, e os copolímeros são os que apresentam pelo menos dois manômeros em sua estrutura” Bernucci *et al.* (2007).

Os polímeros mais comumente utilizados como modificadores das propriedades do ligante consistem de copolímeros em blocos de estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-isopreno-estireno (SIS), estireno-etileno-butadieno-estireno (SEBS), acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e acetato de vinila (EVA).

Segundo Bernucci *et al.* (2007) “os asfaltos modificados por SBS, a partir de petróleos brasileiros, mostran-se compatíveis empregando cimentos asfálticos de baixa penetração (inferior a 30 décimos de milímetro) com diluentes aromáticos convencionais, sendo que o uso de diluente altamente aromático possibilitou a compatibilização de qualquer tipo de CAP de petróleo brasileiro com SBS”. Segundo a ANP, os ligantes modificados por polímeros devem obedecer a resolução nº 32 publicada pela agência em 2010(Tabela 9).

Tabela 9. Especificação ligante asfáltico modificado por polímero

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	MÉTODO	LIGANTE		
			55/75	60/85	65/90
Penetração (100 g, 5 s, 25° C)	0,1 mm	NBR 6576	45 – 70	40 - 70	40 - 70
Ponto de amolecimento, mín.	°C	NBR 6560	55	60	65
Viscosidade Brookfield a 135° C, spindle 21, 20 rpm máx.	cP	NBR 15184	3000	3000	3000
Viscosidade Brookfield a 150 °C, spindle 21, 50 rpm, máx.	cP	NBR 15184	2000	2000	2000
Viscosidade Brookfield a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx.	cP	NBR 15184	1000	1000	1000
Estabilidade à estocagem, máx.	°C	NBR 15166	5	5	5
Recuperação elástica a 20 °C, 20cm, min	%	NBR15086	75	85	90
<b>Ensaio no Resíduo do RTFOT:</b>					
Varição de massa, máx	%	NBR 15235	1	1	1
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	NBR 6560	-5 a +7	-5 a +7	-5 a +7
Porcentagem de penetração original, mín	%	NBR 6576	60	60	60
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín	%	NBR 15086	80	80	80

(fonte: ANP, 2010)

## 2.5 PROCESSO EXECUTIVO

### 2.5.1 Produção da Mistura - Usinagem

A produção da mistura é um dos elementos mais importantes na construção de um pavimento com SMA. O processo é semelhante ao empregado para concreto asfáltico, com exceção de que se deve prestar atenção ao correto fracionamento dos grãos e os tempos de mistura (MOURÃO, 2003).

A calibração dos silos de alimentação é fundamental para a produção de uma mistura de qualidade. Na usinagem, os agregados são aquecidos em temperaturas entre 170°C e 180°C, no caso de utilização de ligantes asfálticos modificados. As diferentes frações são introduzidas em silos quentes separadamente, sendo pesadas novamente com o objetivo de garantir a correta dosagem.

A introdução das fibras deverá ser realizada imediatamente antes do ligante, em compartimento apropriado e misturada aos agregados de forma a se obter uma mistura seca homogênea. Segundo NAPA (2002), pela experiência acumulada nos EUA, a adição de fibras na mistura asfáltica eleva o tempo de usinagem em relação às misturas densas contínuas. Este acréscimo de tempo no ciclo permite que a fibra seja perfeitamente distribuída na mistura. Estima-se que em usinas gravimétricas, os ciclos de mistura seca e úmida sejam elevados entre 5 e 15 segundos cada.

Da mesma forma, Mourão (2003) salienta que as fibras devem ser incorporada a mistura diretamente no misturador, antes da adição do ligante, sem contato direto com a chama da caldeira. Ainda recomenda iniciar o processo de mistura com os agregados minerais (inclusive fíler), após aquecimento e mistura, introduzir as fibras, misturas e adicionar o ligante. A definição quanto ao tempo adequado de mistura do aditivo estabilizante é feita de forma visual. Se grumos de fibras forem observados após a usinagem ou as partículas dos agregados não estiverem suficientemente revestidas, os tempos de usinagem deverão ser aumentados.

### 2.5.2 Espalhamento e Compactação

Assim como para outras misturas, segundo NAPA (2002) e especificações brasileiras, o revestimento asfáltico não deve ser aplicado quando a temperatura ambiente estiver abaixo dos 10°C. No entanto, a decisão também deve levar em consideração as condições de vento, umidade, espessura da camada a ser aplicada e temperatura do pavimento existente.

O transporte da mistura também deve ser executado com atenção. O tempo de transporte para o SMA deve ser o menor possível. É importante salientar que a temperatura da mistura não deve ser aumentada devido à necessidade de transporte a longas distâncias. Temperaturas elevadas, em relação à temperatura de projeto, associadas às vibrações do transporte podem separar o mástique asfáltico do agregado graúdo, segregando a mistura (NAPA, 2002).

A temperatura de aplicação na pista deve ser entorno de 140°C, no caso de asfaltos modificados. O limite inferior de aplicação da mistura deve ser fixado com base na curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido, com o objetivo de atingir o grau de compactação mínimo fixado em projeto.

É importante examinar a superfície de aplicação, seja ela base ou revestimento antigo. No caso de revestimentos, faz-se necessário uma análise mais criteriosa da superfície, identificando a necessidade de intervenções antes da aplicação da nova camada (MOURÃO 2003; NAPA 2002). Embora o SMA tenha apresentado grande desempenho quando solicitado, não se pode esperar uma boa performance quando aplicado sobre superfícies com presença de patologias (afundamentos, trincas, trilhas de rodas, etc).

O espalhamento da mistura na pista não difere do processo para misturas asfálticas densas contínuas. O ciclo de usinagem e lançamento deve estar em harmonia para que a vibroacabadora não tenha que parar a produção ou oscilar a velocidade de espalhamento.

Uma vez iniciado o processo de lançamento da mistura na pista, os rolos compactadores devem trabalhar logo atrás da vibroacabadora. Devem ser utilizados equipamentos estáticos, tipo tandem, entre 8 e 12 toneladas. Não devem ser aplicados rolos vibratórios e pneumáticos, devido ao elevado teor de ligante na mistura. Deve-se tomar cuidado com a sobrecompactação da camada já compactada, pois poderá ocasionar a exsudação do ligante. O processo deve ser iniciado do bordo interno para o externo e as juntas transversais deverão ser compactadas no sentido na junta, transversalmente ao pano de pavimentação. Após a execução do trecho, o mesmo poderá ser liberado quando a mistura atingir a temperatura ambiente.

### 3 TRECHO EXPERIMENTAL

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO TRECHO

Para a realização desta pesquisa, foi selecionado, juntamente com o DAER (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem) do Rio Grande do Sul, trecho localizado ao longo da rodovia ERS-122. Esta rodovia serve de ligação da região metropolitana e a serra gaúcha. Possui 168,65 km de extensão, sendo aproximadamente 40 km em pista dupla, com duas faixas por sentido. Possui VDM (volume diário médio) aproximado de 17.868 veículos (DAER, 2005) no trecho de execução da pista experimental.

Esta rodovia é administrada pelo DAER através de receitas oriundas do pedágio comunitário instalado no município de Portão, na ligação da ERS-122 e a ERS-240. Foi implantada em 1970 e duplicada nos anos de 1997 e 2002. Em 2007, foram realizadas análises do pavimento pelo poder público em seguimento de 23 km extensão, do entroncamento da ERS-240/ERS-122 até o início do Contorno de Bom Princípio, através de LVC (Levantamento Visual Contínuo). Constatou-se que o pavimento não apresenta problemas estruturais, identificando apenas problemas de superfície, em especial afundamento em trilhas de roda, conforme Figura 3 e Figura 4. Os valores de trilhas de roda encontrados foram bastante elevados, sendo, na pista esquerda (sentido Porto Alegre/Interior) 49% das ocorrências com valores acima de 15mm e 76% delas acima do valor desejado de 10mm. Em ambas as pistas, os valores mais críticos estão localizados nas faixas externas que recebem o tráfego pesado.

A existência de afundamento em trilha de roda representa um perigo à vida dos usuários da rodovia, sobretudo em dias de chuva. A água acumula na superfície, diminui a aderência pneu/pavimento produzindo o efeito de aquaplanagem, resultando na perda da dirigibilidade.



Figura 3: Identificação de afundamento em trilha de roda km 4+300 ERS-122 (DAER, 2007)



Figura 4: Identificação de afundamento em trilha de roda km 9+400 (DAER, 2007)

O pavimento existente tem estrutura composta por um reforço de argila, camada drenante, brita graduada e CBUQ (15 a 23 cm) na pista original. Na pista duplicada na última década, a estrutura é composta por um reforço de argila, camada drenante, rachão, brita graduada e CBUQ (12 cm).

Em virtude desta situação, foi contratada através de licitação pública, uma empresa para a realização da recuperação deste trecho da rodovia. A solução definida pelo DAER estabelece a remoção do pavimento existente na faixa externa de ambas as pistas e a pavimentação com mistura asfáltica densa contínua com a utilização de asfalto modificado por polímero, classificação 60/85.

O segmento escolhido tem extensão de 600m, localizado entre os km 6+400 e km 7+000, no sentido interior/capital, e, assim como o restante da rodovia, apresenta deformações permanentes, conforme Figura 5.



Figura 5: Trecho experimental km 6+400 a km 7+000 da ERS-122

### 3.2 DOSAGEM DA MISTURA EMPREGADA NO TRECHO

Em parceria com a empresa distribuidora de ligantes registrada nos órgãos competentes, a construtora responsável pela recuperação do trecho, definiu o traço da mistura que harmonizasse o ligante asfáltico modificado por polímero e os agregados disponíveis na região.

Após a seleção dos agregados, realizou-se a análise granulométrica individual dos materiais (DNER-ME 083/98) e definiu-se a faixa granulométrica da mistura (Tabela 10), seguindo as orientações da especificação ET-DE-P00/031 do DER de São Paulo. Por tratar-se de rodovia

com elevado volume de veículos, optou-se por enquadrar a mistura na faixa I da especificação abaixo, destinada ao tráfego pesado.

Tabela 10: Granulometria enquadrada na faixa I da especificação ET-DE-P00/031 do DER/SP

PENEIRAS	FAIXA I – ET-DE-P00/031	MISTURA
3/4”	100-100	100
5/8”	100-100	100
1/2”	90-100	92
5/16”	45-60	47,5
Nº 4	30-40	30,5
Nº10	20-27	23,9
Nº200	9-13	10,6

De acordo com esta granulometria foram moldados corpos-de-prova com os teores de 5,50%, 6,00%, 6,50% e 7,00%. Foi calculada a massa específica aparente e massa específica máxima medida, de acordo com a NBR 15.573 e NBR 15.619 respectivamente, calculando os parâmetros da dosagem Marshall, segundo especificação DNER-ME 043/95 modificado de 75 (setenta e cinco) golpes por face para 50 (cinquenta) golpes por face, conforme Tabela 11 e Figura 6, Figura 7 e Figura 8.



Tabela 11: Parâmetros da dosagem Marshall para SMA

% LIGANTE	DENS. APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )	RICE (g/cm <sup>3</sup> )	V.v. (%)	V.C.B (%)	V.A.M. (%)	R.B.V. (%)
5,50	2,496	2,610	4,35	13,70	18,06	75,89
6,00	2,511	2,588	2,96	15,04	18,00	83,57
6,50	2,504	2,566	2,42	16,25	18,67	87,03
7,00	2,489	2,545	2,21	17,89	19,60	88,71

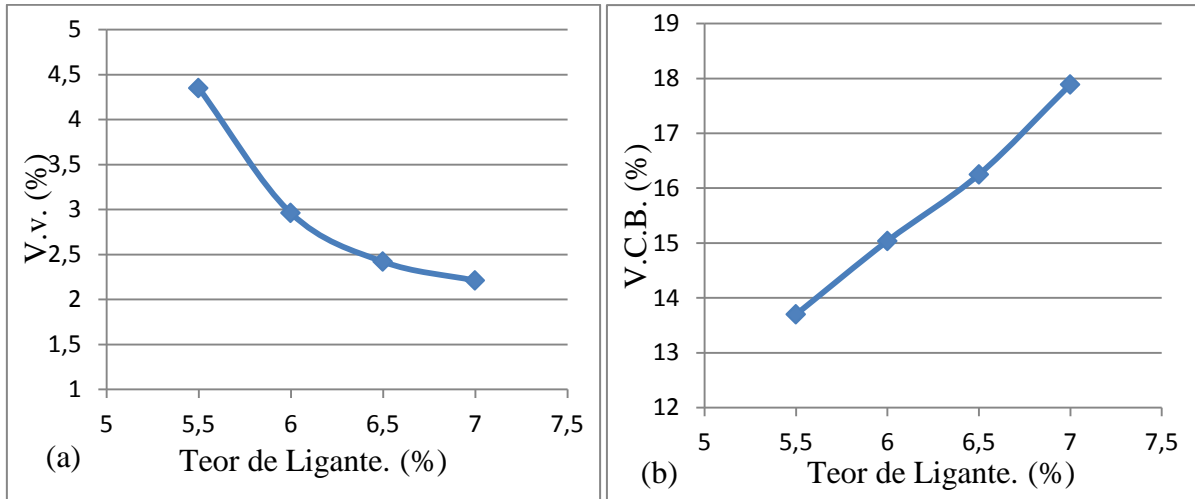


Figura 6: Parâmetros de dosagem Marshall (a) Volumes de Vazios e (b) V.C.B

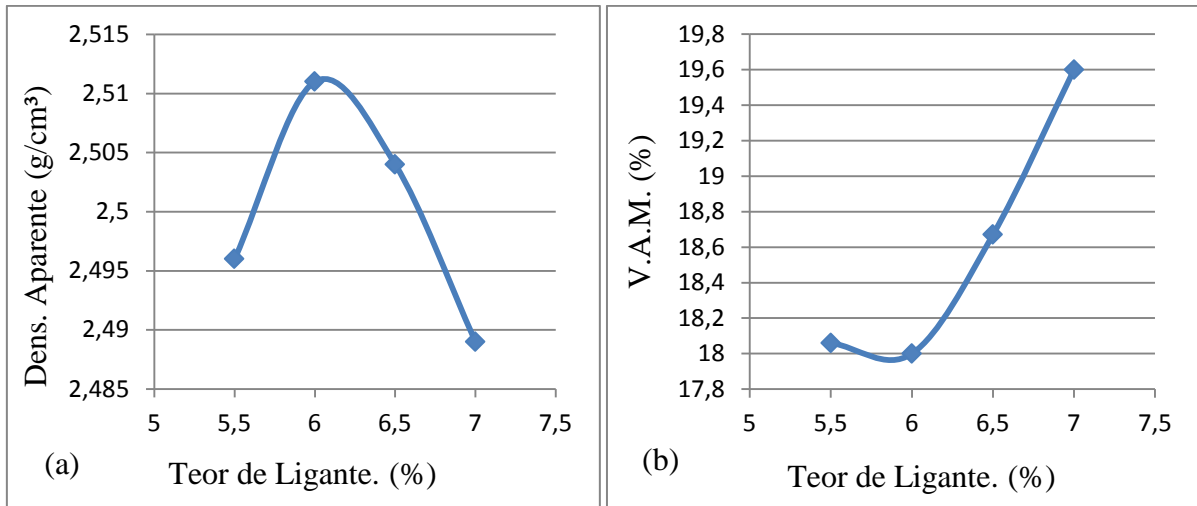


Figura 7: Parâmetros de dosagem Marshall (a) Dens. Aparente e (b) V.A.M

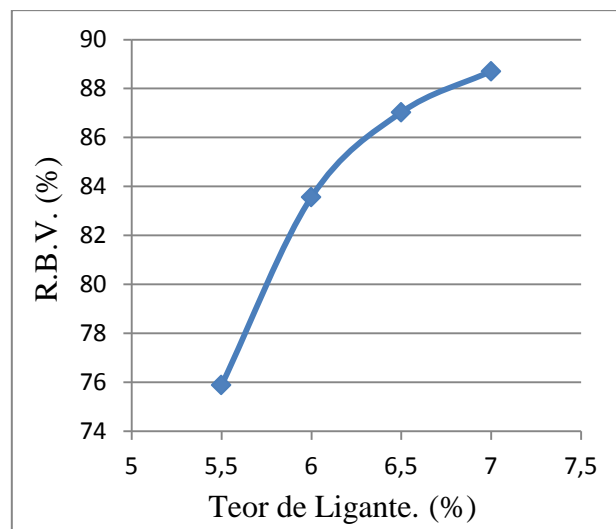


Figura 8: Parâmetros de dosagem Marshall – R.B.V.

A curva estudada empregou 30,5% de fração passante na peneira de abertura de 4,75mm, atendendo a relação  $VCA_{MIX} < VCA_{DRC}$ , resultando, para um volume de vazios (Vv) de 4%, um teor de ligante de 5,60%. A composição e parâmetros da mistura estão apresentados nas Tabela 12 e Tabela 13, assim como a distribuição granulométrica (Figura 9).

Tabela 12: Composição da mistura segundo especificação ET-DE-P00/031 faixa 1

MATERIAL	AGREGADOS	AGREGADO + LIGANTE
Brita 3/4"	39,9%	37,37%
Brita 1/2"	29,9%	28,20%
Pó de Pedra	22,9%	21,60%
Fíler mineral	5%	4,70%
Cal hidratada CH1	2%	1,90%
Fibra de Celulose	0,3%	0,30%
Ligante asfáltico	-	5,60%

Tabela 13: Resultados obtidos da dosagem Marshall modificada para SMA

PARÂMETROS	VALOR OBTIDO
Densidade Aparente – NBR 15.573	2,502
Densidade real da mistura – NBR15.619	2,606
Volume de Vazios	4,00%
Relação Betume Vazios	77,80%
Vazios do Agregado Mineral	18,00%
Resistência a tração por compressão diametral	1,14MPa
Escorrimento 175°C (SCHELEMBERG)	0,10%

Tabela 13: Resultados obtidos da dosagem Marshall modificada para SMA

PARÂMETROS	VALOR OBTIDO
Vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada – VCA mix	39,48%
Vazios da fração graúda do agregado compactado – VCA drc	40,12%

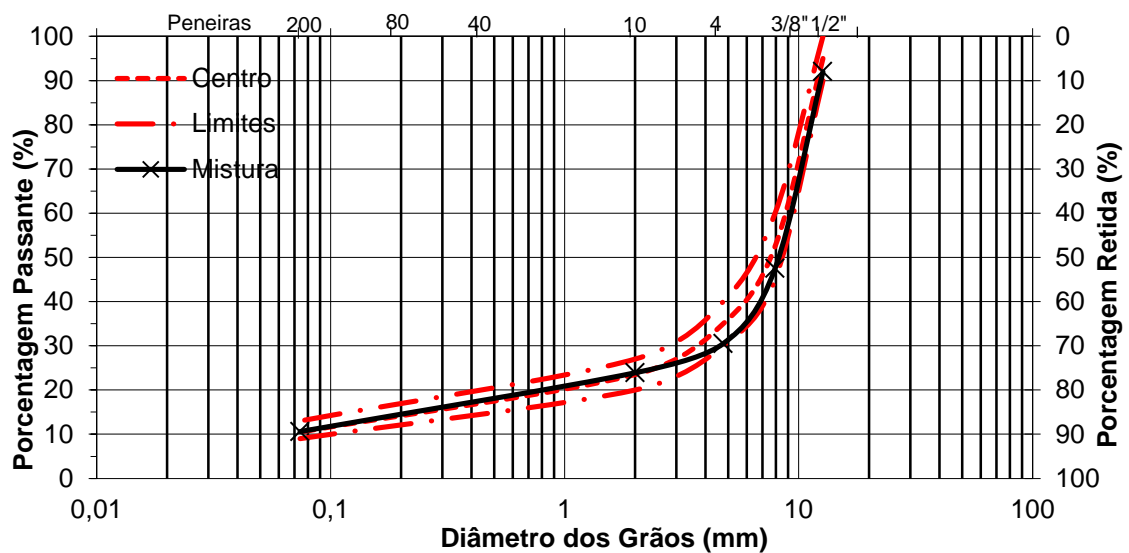


Figura 9: Distribuição granulométrica da mistura - Faixa I ET-DE-P00/031

## 4 CARACTERÍSTICAS E ORIGEM DOS MATERIAIS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, suas origens e suas propriedades. Além disso, são apresentadas as alterações necessárias para que os mesmos se enquadrassem nas especificações estudadas nesta pesquisa.

### 4.1 AGREGADOS

Os agregados utilizados neste trabalho são oriundos de pedreira e britagem de propriedade da Construtora Brasília Guaíba Ltda, localizadas na ERS-122, km 32+500, no distrito de Santa Terezinha, no município de Bom Princípio. Na ocasião deste estudo, os equipamentos de britagem existentes e a configuração conjunto estavam dimensionados para atender as especificações do DAER quanto as características necessárias a execução de misturas asfálticas densas contínuas, segundo especificação DNIT 031/2006-ES faixa C e DAER-ES-P 16/91 (Figura 10).

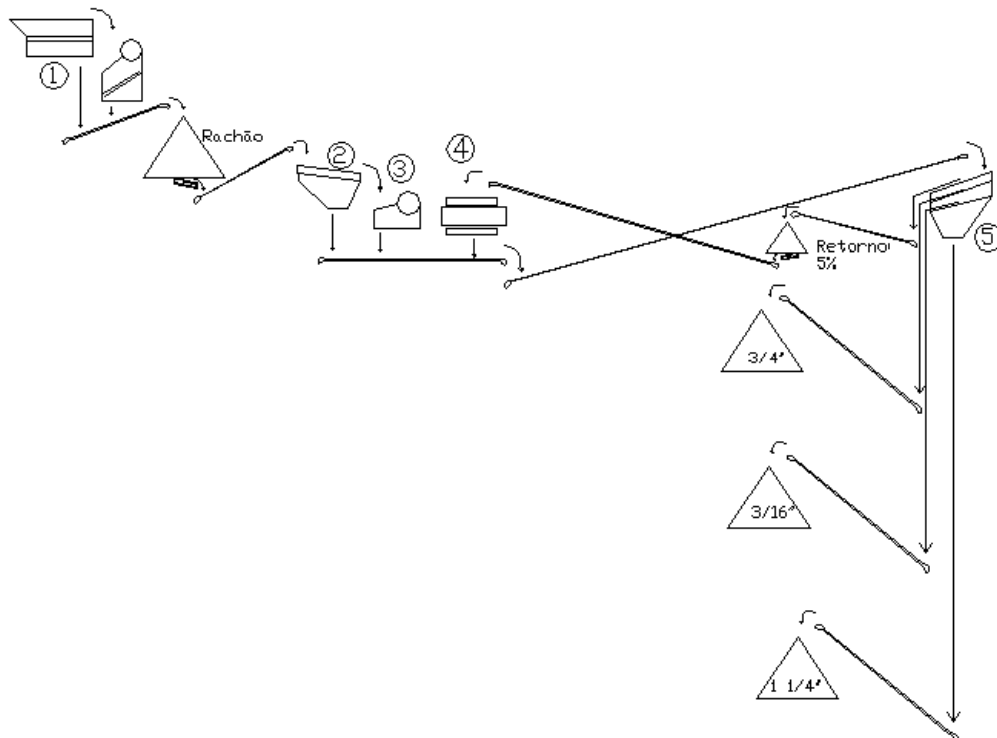


Figura 10: layout da britagem para produção de CBUQ

Onde:

- 1: Peneira Classificatória e Britador Primário
- 2: Peneira Classificatória
- 3: Britador Giratório
- 4: Rebritador de Impacto
- 5: Calha c/ peneira classificatória

O processo de produção dos agregados é simples, mas é importante descrevê-lo com o objetivo de compararmos as alterações necessárias a produção de material para a mistura asfáltica tipo SMA. Desta forma, após exploração da pedreira, a rocha fragmentada é encaminhada a britagem. O primeiro britador tem a responsabilidade de reduzir o material a diâmetros adequados aos britadores que o seguem. O britador primário instalado nesta unidade de produção é de mandíbula com um eixo, modelo Jawmaster 907HD (Figura 11), produzido pela FAÇO (Fábrica de Aço Paulista). Atua, basicamente, pelo impacto da mandíbula móvel contra a mandíbula fixa, pressionando o material e produzindo agregado com diâmetros entre 2” e 5”, comumente chamado de rachão ou pedra pulmão.

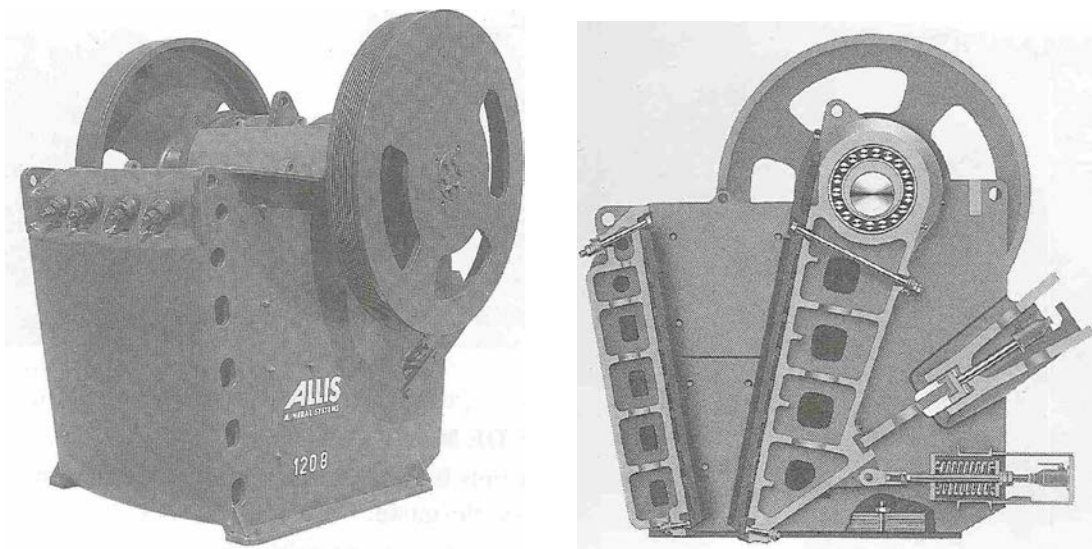


Figura 11: Britador primário Jawmaster 907HD



Figura 12: Britador primário Jawmaster 907HD instalado na unidade produtiva da empreiteira

O material do monte, então gerado pelo britador primário, é transportado, através de esteira, até a uma peneira vibratória que realiza a pré-classificação do material e o encaminha para a próxima unidade de britagem ou outro conjunto de peneiras para classificação final. O material retido é então rebitado através do britador giratório, Hydrocone, série H-3000EC (Figura13), produzido pela FAÇO. Seu mecanismo de funcionamento baseia-se no impacto do agregado no revestimento interno da câmara de britagem, através da rotação da estrutura do eixo e cone (integralizados). O diâmetro do material de saída é definido através do ajuste na posição de saída, através de acionamento hidráulico do eixo e cone. O material britado é então encaminhado ao conjunto de peneiras vibratórias, localizadas ao final do processo de britagem, que o classifica e distribui ao seu respectivo monte.

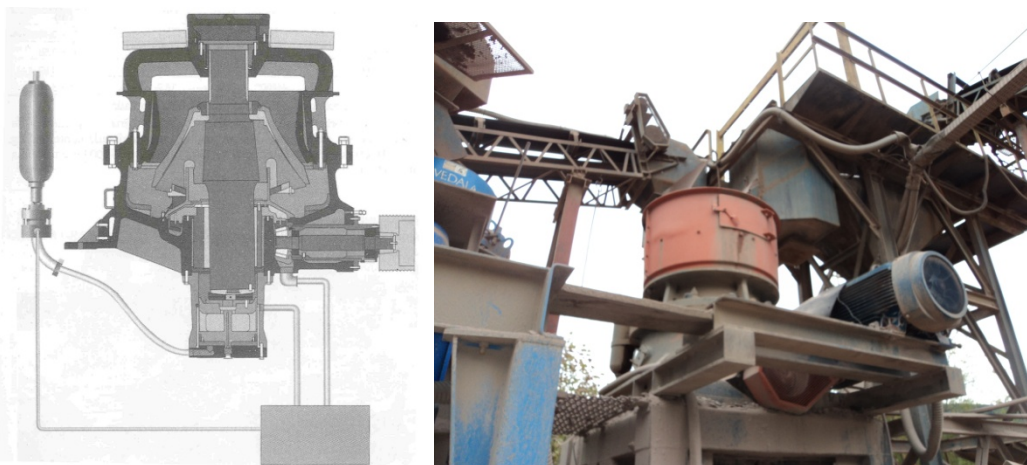


Figura 13: Britador de cone série H-3000EC

De acordo com a característica do produto final a ser obtido, parte do material encaminhado às peneiras é retornado (podendo ser o material retido ou passante, dependendo da necessidade e aplicação) ao processo de britagem em outro equipamento, o Barmac VSI 6000 (Figura 14), com objetivo de se obter agregados com diâmetros menores ou menos lamelares.

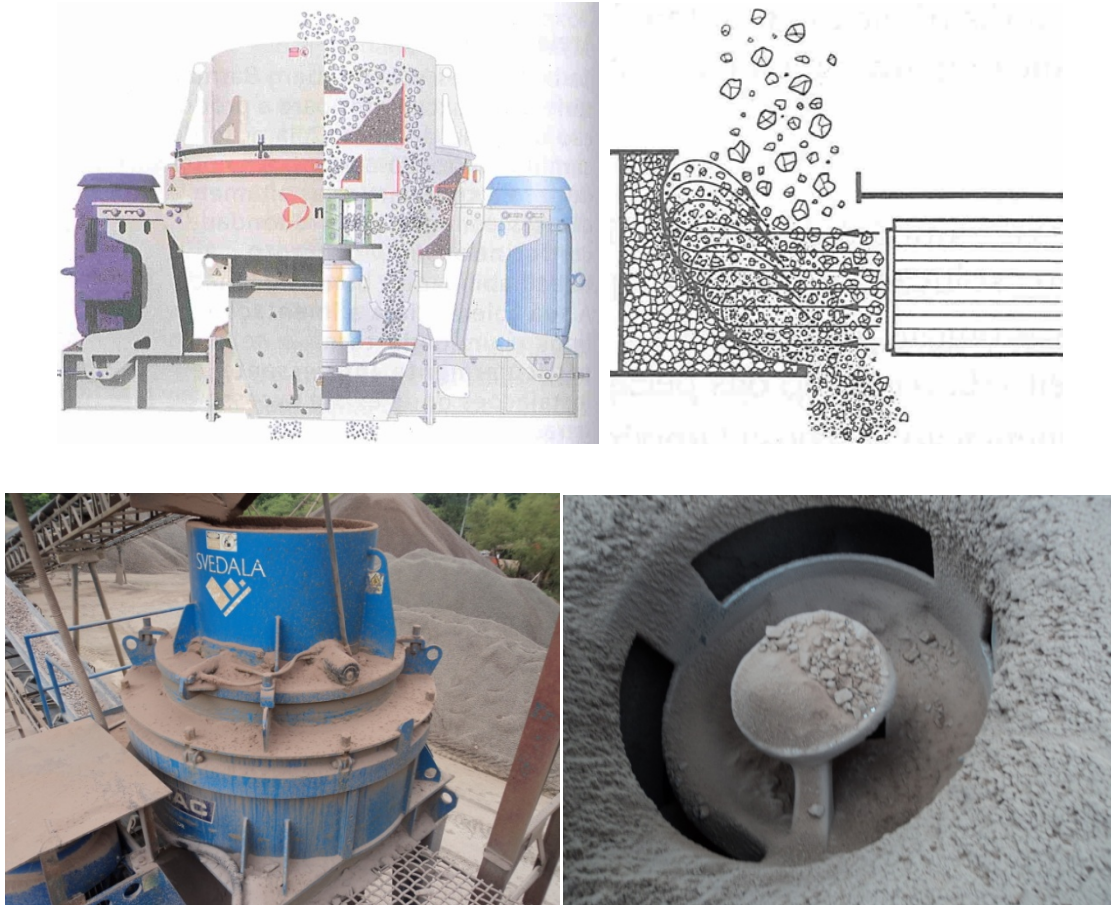


Figura 14: Rebritador Barmac VSI 6000

O Barmac atua na fragmentação dos agregados através do sistema rocha-contra-rocha. Uma vez que o material entra na tremonha, parte dele segue pelo rotor, após passar pela placa dosadora, e o material excedente transborda pelas laterais, como em cascata, em direção a câmara de britagem. O rotor acelera o material interno e o lança com velocidade entre 50m/s e 100 m/s contra o material excedente. Nesta fase, as partículas permanecem em suspensão por até 20 segundos, até perderem energia, saírem do equipamento e serem novamente encaminhados a peneiras vibratórias para classificação. Esta configuração resulta na produção de materiais com as características necessárias a execução de misturas asfálticas densas contínuas, conforme especificação DNIT 031/2006-ES e DAER-ES-P 16/91.



As peneiras instaladas ao final do processo (item 5 da Figura 7) estavam organizadas em três decks com 8 (oito) peneiras cada (Tabela 14), de forma a se extrair material com as características necessárias a produção da mistura objeto do contrato com o DAER/RS (Tabela 15).

Tabela 14: Organização das peneiras para produção de mistura asfáltica densa contínua

1° deck		2° deck		3° deck	
3/4"	3/4"	3/8"	3/8"	3/16"	3/16"
1/2"	1/2"	3/8"	3/8"	3/16"	3/16"
1/2"	1/2"	3/8"	3/8"	3/16"	3/16"
1/2"	1/2"	3/8"	3/8"	3/16"	3/16"

Tabela 15: Especificação do material x resultado dos ensaios

ENSAIO	DNIT 031/2006-ES	DAER-ES-P 16/91	PARÂMETROS
Abrasão Los Angeles	50% (máximo)	40% (máximo)	25%
Ensaio de Sanidade	12% (máximo)	10% (máximo)	3%
Equivalente Areia	55% (mínimo)	50% (mínimo)	62%
Lamelaridade		50% (máxima)	18%

Ao analisarmos as características de cada fração e compara-las com os resultados necessários a produção de misturas asfálticas densas descontínuas tipo SMA, conclui-se que as mesmas não atendem a algumas especificações vigentes no Brasil e exterior (Tabela 16). Logo, foi necessário alterações no processo produtivo.

Tabela 16: Comparativo de especificações dos agregados para emprego em misturas tipo SMA

ENSAIO	DNIT 031/2006-ES / DAER-ES-P 16/91	ET-DE- P00/031	AASHTO MP8-01
Abrasão Los Angeles	50%/40% (máximo)	$\leq 30$	$\leq 30$
Ensaio de Sanidade	12%/10% (máximo)	$< 12^*$	$< 15^*$
*sulfato de sódio			
**sulfato de magnésio		$< 20^{**}$	$< 20^{**}$
Equivalente de Areia	55%/50% (mínimo)	-	-
Lamelaridade	/ 50% (máxima)	$\leq 10$	

Portanto, buscou-se alterar o processo produtivo nas instalações de britagem de forma a atender as necessidades da mistura. Esta nova configuração levou em consideração a necessidade de produzir agregados menos lamelares e com elevado teor de finos (Figura 15).

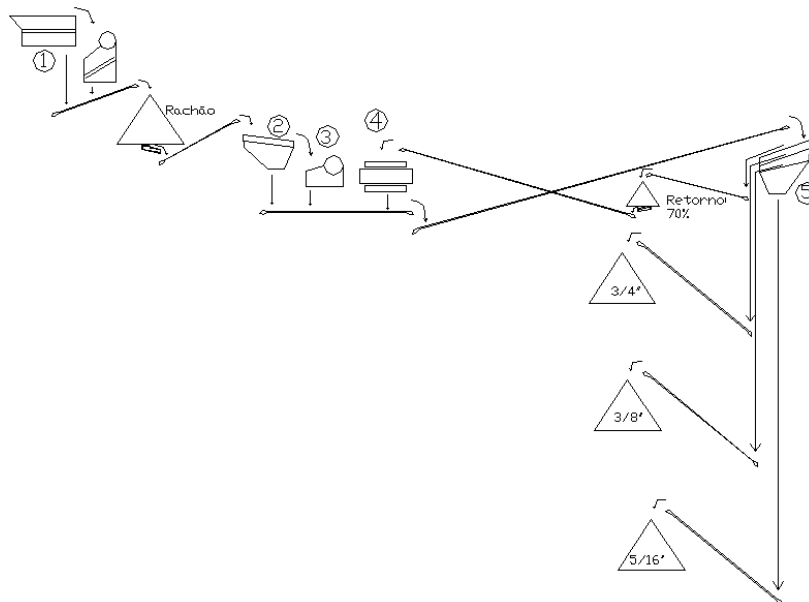


Figura 15: Layout da britagem para produção de SMA

De forma objetiva, foram alteradas as peneiras classificatórias (Tabela 17) após o Hydrocone/Barmac, o que resultou em um aumento do material retornado sendo, portanto, necessário o aumento da produção do Barmac VSI.

Tabela 17: Organização das peneiras para produção de mistura asfáltica tipo SMA

1° deck		2° deck		3° deck	
3/8"	3/4"	3/8"	1/2"	3/8"	3/8"
3/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/8"	3/8"
1/2"	1/2"	1/4"	3/8"	1/4"	3/8"
1/2"	1/2"	1/4"	3/8"	1/4"	1/4"

Desta forma, o material obtido, no que se refere a lamelaridade, enquadrou-se nas especificações estudadas neste trabalho. Cabe ressaltar que o arranjo utilizado comprometeu a produtividade da central de britagem, uma vez que optou-se por adaptar as peneiras existentes nas instalações ao invés de se adquirir peneiras novas como a com abertura de 5/16", por exemplo.

## 4.2 FÍLER

Como material de enchimento, foi utilizado o material passante na peneira nº 200 e cal hidratada CH-1, dolomítica, com origem em Caçapava do Sul/RS, com distribuição granulométrica conforme Tabela 18.

Tabela 18: Granulometria do fíler utilizado na pesquisa

PENEIRA	LIMITE (% retido)	ANÁLISE (% retido)
0,600mm	≤5%	0,00%
0,075mm	≤10%	8,59%

### 4.3 FIBRAS

O aditivo empregado para inibir o escorrimento da mistura foi a fibra de celulose denominada comercialmente de TC 1004 (Tabela 19), produzido pela empresa americana Creafill, importado pela empresa BPtech. Optou-se pela utilização deste material em virtude de sua disponibilidade no mercado e facilidade da mistura na usina de asfalto.

Tabela 19: Caracterização da Fibra

CARACTERÍSTICAS	RESULTADO
Aparência	Fibra cinza
% de celulose	>75%
Densidade solta	15-40g/cm <sup>3</sup>
% de cinzas	<13-23%
Teor de umidade	<5%
pH	6-8,5

Tabela 19: Caracterização da Fibra

CARACTERÍSTICAS	RESULTADO
Comprimento médio da fibra	3028 micrômetros (3,03 milímetros)
Largura média da fibra	130 micrômetros (0,13 milímetros)

#### 4.4 LIGANTE ASFÁLTICO

Segundo EAPA (1998), pode ser utilizado para mistura asfáltica tipo SMA ligantes convencionais ou modificados. No entanto, a escolha por produtos de melhor desempenho (asfalto modificado) podem melhorar as propriedades mecânicas da mistura. Desta forma, buscou-se utilizar produto diferenciado, atendendo as especificações da ANP, resolução nº 32 de 21 de setembro de 2010, classificado nas propriedades dos ligantes modificados por polímero, tipo 60/85, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20: Propriedade do ligante asfáltico utilizado na pesquisa

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	MÉTODO	LIGANTE 60/85	PRODUTO
Penetração (100 g, 5 s, 25° C)	0,1 mm	NBR 6576	40 - 70	56
Ponto de amolecimento, mín.	°C	NBR 6560	60	75
Ponto de fulgor, mín.	°C	NBR 11341	235	239
Viscosidade Brookfield a 135° C, spindle 21, 20 rpm máx.	cP	NBR 15184	3000	1255
Viscosidade Brookfield a 150 °C, spindle 21, 50 rpm, máx.	cP	NBR 15184	2000	523
Viscosidade Brookfield a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx.	cP	NBR 15184	1000	192
Recuperação elástica a 20 °C, 20cm, min	%	NBR15086	85	88

## 5 ENSAIOS UTILIZADOS NA PESQUISA

O projeto de mistura SMA aplicada no trecho experimental foi desenvolvida em parceria com a empresa fornecedora do ligante e a construtora. Uma vez definido o traço, procedeu-se a análise do mesmo através dos principais pontos que garantem o bom desempenho da mistura, sendo eles os parâmetros volumétricos ( $VCA_{DRC}$ ,  $VCA_{MIX}$  e  $VAM$ ) e a qualidade do mástique. Além disso, foram realizados ensaios de escorrimento, módulo de resiliência, resistência à tração na compressão diametral e deformação permanente em trilha de roda.

### 5.1 PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS

Segundo NAPA (2002) a integridade do esqueleto mineral é assegurada quando o  $VCA_{MIX}$  é menor ou igual ao  $VCA_{DRC}$ . A mistura tipo SMA é muito sensível em relação ao percentual de material passante na peneira de quebra entre agregado graúdo e agregado miúdo. Excesso de material passando nesta peneira, resultando na redução da fração graúda do agregado, acarretará na diminuição do contato grão-a-grão.

O  $VCA_{DRC}$  corresponde aos vazios da fração graúda do agregado compactado e o  $VCA_{MIX}$  consiste nos vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada (Figura 16). Estes parâmetros são obtidos através das equações 1 e 2, apresentadas no capítulo 2.

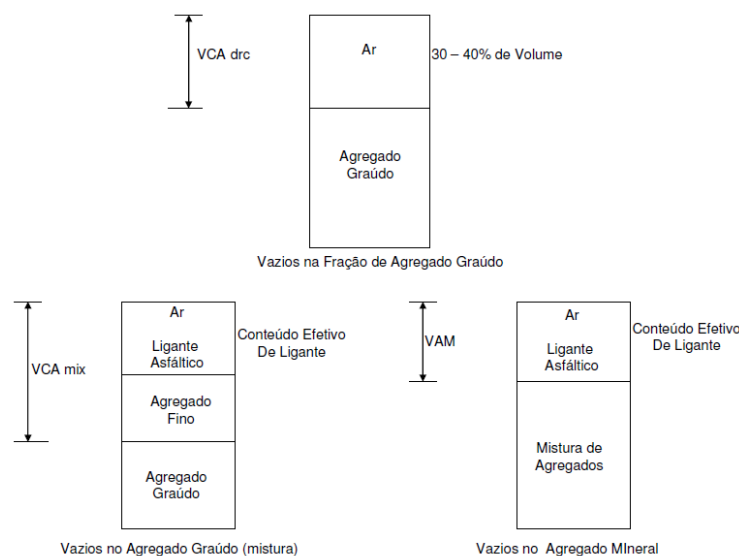


Figura 16: Parâmetros volumétricos da mistura (REIS, 2002)

O VAM (vazios do agregado mineral) é obtido considerando os componentes da mistura, exceto os agregados (gráudo e fino), expresso em % do volume total do corpo-de-prova (Equação 3). A absorção de ligante pelo agregado é considerada como parte do mesmo, no cálculo dos parâmetros volumétricos.

$$VAM = V_v - VCB \quad (3)$$

$$VCB = \frac{Gmb \times \%asfalto}{Ga} \quad (4)$$

Onde:

*VAM*: vazios do agregado mineral

$V_v$ : volume de vazios total da mistura

*VCB*: vazios preenchidos com betume

*Gmb*: massa específica aparente do corpo-de-prova

*Ga*: massa específica real do asfalto

## 5.2 ENSAIO DE ESCORRIMENTO

A utilização de fibras em misturas tipo SMA é fundamental para inibir o escorrimento do ligante durante sua produção, transporte e execução. Os teores podem variar de 0,3% a 1,5%, desde que o escorrimento seja inferior a 0,3%, segundo ET-DE-P00/031 do DER de São Paulo.

O método utilizado para caracterizar o escorrimento da mistura e validar o valor indicado pela distribuidora de ligante foi o Ensaio Schellenberg. Ele consiste na separação de 1000g da mistura asfáltica a ser utilizada, lançada em um Becker, previamente tarado. A mistura é então colocada em estufa por 1 (uma) hora na temperatura de compactação. Transcorrido este intervalo, o Becker é então esvaziado em outro recipiente. Pesa-se o Becker com o material retido em suas paredes e, pela diferença entre o peso vazio e peso final do Becker sem a mistura, define-se o percentual de ligante que escorreu.

### 5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As solicitações desenvolvidas pelo tráfego e aplicadas no pavimento geram situações diferentes na superfície da camada e em sua base. Na superfície, a carga aplicada desenvolve nas fibras uma tensão de compressão. Já nas fibras inferiores, se desenvolve uma tensão de tração.

O ensaio de resistência à tração na compressão diametral, realizado de acordo com a norma DNIT 136/2010 – ME (DNIT, 2010), consiste na aplicação de uma carga diametral em corpos-de-prova (CP) cilíndricos com dimensões padronizadas. Os corpos-de-prova extraídos através de sonda rotativa ou moldados em laboratório (Marshall) são colocados em estufa até atingir a temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Após este período, os CPs são então coletados e colocados em uma prensa (Figura 17), com sensibilidade inferior ou igual a 19,6 N (equivalente a 2kgf).



Figura 17: Prensa para realização do ensaio de resistência a tração na compressão diametral

A carga “F” é aplicada com velocidade de  $0,8 \pm 0,1 \text{ mm/s}$  até a ruptura, que se dá pela separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical. O valor encontrado da carga “F” aplicada no momento da ruptura possibilita o cálculo da resistência à tração, através da Equação 5.



$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (5)$$

onde:

$\sigma_R$ : resistência à compressão

$F$ : carga aplicada na prensa

$D$ : diâmetro do corpo-de-prova

$H$ : altura do corpo-de-prova

$\pi$ : constante

## 5.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O projeto de pavimento deve combinar os materiais e espessuras das camadas de acordo com a rigidez de cada uma dessas camadas, com o objetivo de proporcionar uma resposta estrutural do conjunto condizente com as solicitações do tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A avaliação das propriedades mecânicas dos pavimentos tem o objetivo de simular as condições reais das solicitações em campo. A parcela dinâmica das solicitações dos pavimentos, ocasionada pelas diferentes intensidades e frequências variáveis ao longo do dia e do ano, são de difícil simulação (MEDINA *et al.*, 2005).

Os primeiros estudos do comportamento resiliente dos materiais empregados em pavimentação foram elaborados por Francis Hveen, no início da década de 1930 (BERNUCCI *et al.*, 2007), quando associou as deformações recuperáveis com as fissuras desenvolvidas nos revestimentos asfálticos.

Para Medina *et al.* (2005), “resiliência significa a energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessão as tensões causadoras das deformações”. O ensaio simula o comportamento mecânico frente as solicitações do tráfego, na região onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada.

É importante ressaltar que o módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas tem influência marcante do tipo de ligante asfáltico e da granulometria dos agregados, tendo uma influência menor do teor de ligante (MEDINA *et al.*, 2005).

Os valores de MR podem ser obtidos através de vários tipos de ensaios de cargas repetidas (BRITO, 2006):

- Ensaio de tração uniaxial;
- Ensaio de compressão uniaxial;
- Ensaio de viga a flexão;
- Ensaio de tração por compressão diametral (tração indireta);
- Ensaio de compressão triaxial;

Dentre os ensaios listados, o ensaio diametral apresenta as seguintes vantagens (BRITO, 2006):

- Facilidade de execução;
- O equipamento utilizado é o mesmo do ensaio de compressão;
- O corpo-de-prova ser moldado no compactador Marshall;
- A variabilidade dos resultados é baixa em relação a outros ensaios;
- Pode ser realizado com carga estático ou cargas repetidas;
- Pode fornecer informações sobre a resistência a tração, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, características de fadiga e deformações permanentes;
- Simula o estado de tensão na zona de tração, parte inferior da camada asfáltica;

Além disso, BRITO (2006) salienta que, por ser um ensaio não-destrutivo, permite que sejam determinadas outras propriedades da mistura como teor de ligante, resistência a tração, desgaste, densidade, etc.

O ensaio consiste na aplicação de uma carga cíclica no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico regular ao longo de duas geratrizes opostas e medição das deformações horizontais recuperáveis geradas (Figura 18). Os corpos-de-prova cilíndricos são de aproximadamente 100 mm de diâmetro e 63,5mm de altura no caso de corpos-de-prova moldados no compactador Marshall, ou 100 mm de diâmetro e altura entre 35mm e 65 mm, extraídos de pista ou amostras de maiores dimensões (BERNUCCI *et al.*, 2007).



Figura 18: Equipamento para realização do ensaio de módulo de resiliência

Inicialmente, é executada a fase de condicionamento do corpo-de-prova onde o mesmo é submetido a 200 aplicações da carga vertical repetida ( $F$ ) até que se obtenha uma tensão ( $\sigma$ ) menor ou igual a 30% da resistência a tração obtida no ensaio de compressão diametral estático. A carga  $F$  é aplicada a frequência de 60 ciclos por minuto, sendo o tempo de cada aplicação de 0,1 segundos e, conseqüentemente, o tempo de repouso ou descarregamento de 0,9 segundos. Após o condicionamento, são registrados os deslocamentos para 300, 400 e 500 aplicações da carga  $F$ .

Portanto, o módulo de resiliência é definido pela equação 6:

$$M_r = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

onde:

$M_r$ :Módulo de Resiliência

$\sigma$ : Tensão aplicada dinamicamente

$\varepsilon$ : Deformação recuperável para um determinado número de ciclos

Segundo a norma brasileira (DNIT 135/2010-ME), para a execução do ensaio de compressão diametral de carga repetida, são necessários:

- Prensa;
- Sistema pneumático de carregamento;
- Sistema de medição de deformação do corpo-de-prova;
- Sistema automático de refrigeração e aquecimento;

Com os resultados obtidos, é calculado o módulo de resiliência através da equação 7.

$$M_r = \frac{F}{\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (7)$$

Onde:

$M_r$  : Módulo de Resiliência (kgf/cm<sup>2</sup>);

F : Carga vertical;

$\Delta$  : Deformação elástica ou resiliente para aplicações de carga F (cm);

H : Altura do corpo-de-prova em cm;

$\mu$  : Coeficiente de Poisson

Segundo orientação da norma brasileira, recomenda-se 0,30 para o Coeficiente de Poisson e, quando não houver indicação da temperatura do ensaio, utilizar 25°C+/- 1°C.

## 5.5 DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM TRILHA DE RODA

A deformação permanente em rodovias é um dos maiores vilões no que diz respeito ao conforto e segurança dos usuários. Sua causa pode ser atribuída ao revestimento ou as demais camadas do pavimento.

Para o estudo de deformação permanente, destacam-se o ensaio triaxial com carregamento repetido e compressão uniaxial não-confinada (denominado *creep* estático ou *creep* dinâmico), os simuladores de tráfego em laboratório e os simuladores em verdadeira grandeza. Os ensaios realizados em laboratório “permitem uma investigação mais próxima da realidade, porém em geral também acarretam a necessidade de uso de fatores laboratório-campo para as previsões de deformação permanente *in situ* ou do estabelecimento de limites de deformação permanente em laboratório por análises empíricas de resultados em campo” (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Para Moura (2010), embora o ensaio de *creep* possa ser facilmente executável e seus resultados, da mesma forma interpretáveis, a variabilidade nos resultados e a dificuldade de repetibilidade, fazem deste ensaio pouco efetivo na análise da previsão de comportamento em campo. Por outro lado, os simuladores de tráfego, seja em laboratório ou em verdadeira grandeza, são uma alternativa para determinação da resistência de deformação permanente em trilha de roda.

O equipamento utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido pelo LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), denominado de *orniéreur* (“produtor de trilha”), instalado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP. Para a realização do ensaio, compacta-se a mistura em placas de 500mm de comprimento e 180mm de largura, podendo a espessura ser de 50mm ou 100 mm. Esta compactação se dá através do amassamento por roda de pneu com carga e pressão de inflação reguláveis, na temperatura de projeto, em equipamento denominado mesa compactadora LCPC (Figura 19), conforme especificação francesa NF P 98-250-2 (AFNOR, 1991a).



Figura 19: Mesa compactadora LCPC instalada no LTP-EPUSP

Uma vez compactada a mistura e aguardado seu resfriamento e “cura” (aproximadamente 3 dias) procede-se a execução do ensaio de deformação através do equipamento simulador de tráfego do LCPC da França (Figura 20). O ensaio é realizado simulando-se a passagem de um eixo simples, com 5kN por roda, cuja pressão de inflação é de 0,6MPa, a 60°C. A frequência é de 1Hz, sendo 1 ciclo correspondente a duas passadas da roda. Para cada intervalo de ciclos de carregamento, são aferidos quinze pontos de deformação, sendo o resultado correspondente a média aritmética dos afundamentos, conforme norma francesa NF P 98-253-1 (AFNOR, 1991b). Encerra-se o ensaio ao se atingirem os 30.000 ciclos ou caso haja deformação excessiva que dificulte a medição acurada dos afundamentos. Moura *apud* LPC (2007), informa que as diretrizes francesas limitam o valor obtido no ensaio de deformação em trilha de roda em 10% como valor aceitável para revestimentos asfálticos com espessura entre 6cm e 8cm.



Figura 20: Simulador de tráfego LCPC instalado no LTP-EPUSP

## 6 RESULTADOS E EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

### 6.1 PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS

De acordo com o projeto desenvolvido pela construtora com auxílio da empresa distribuidora de ligantes, o valor do  $VCA_{DRC}$  referente ao traço executado é igual a 40,12%. Durante o processo executivo, para cada dia de produção de misturas asfálticas tipo SMA, foram moldados corpos de prova e verificados os parâmetros da mistura compactada (Tabela 21) e  $VCA_{MIX}$ , conforme equação apresentada no capítulo 2.

Tabela 21: Resultado dos valores de  $VCA_{MIX}$  x  $VCA_{DRC}$

DATA	Densidade Aparente da mistura (g/cm <sup>3</sup> )	$VCA_{MIX}$	$VCA_{DRC}$	SITUAÇÃO
01/09/2011	2,494	39,67%	40,12%	Aprovado
02/09/2011	2,503	39,45%	40,12%	Aprovado
06/09/2011	2,496	39,62%	40,12%	Aprovado
08/09/2011	2,487	39,84%	40,12%	Aprovado
12/09/2011	2,500	39,52%	40,12%	Aprovado
13/09/2011	2,496	39,62%	40,12%	Aprovado
14/09/2011	2,510	39,28%	40,12%	aprovado

### 6.2 ENSAIO DE ESCORRIMENTO

A verificação do teor adequado de fibras com a função de inibir o escorrimento do ligante durante o processo de transporte, lançamento e compactação foi realizada através do Ensaio Schellenberg. Para o teor de projeto de 5,60% de ligante, a concentração de fibra especificada em projeto foi de 0,30% em relação ao peso da mistura, resultando em um escorrimento de aproximadamente 0,10%.



### 6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL E MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Para o traço elaborado para este projeto, foram realizados ensaios anteriores e posteriores a aplicação da mistura no trecho experimental. Durante o processo de dosagem, foram realizados ensaios pela própria distribuidora de ligantes, pelo Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV) e pela construtora (Tabela 22). Os valores apresentados correspondem a média dos resultados encontrados.

Tabela 22: Resultado dos ensaios realizados durante o processo de dosagem

ORIGEM	MR (MPa)	RT (MPa)
LAPAV/UFRGS	3.353	1,13
Distribuidora de Ligante asfáltico	-	1,14
Construtora	-	0,90

Além desta campanha de ensaios, foram coletadas amostras durante a produção na usina e compactação na pista. O processo de execução pode, de acordo com a metodologia de controle do produto final, apresentar alguma variação em relação ao traço de projeto, tanto sob o aspecto da granulometria quanto do teor de ligante (Tabela 23).

Tabela 23: Variações no teor de ligante durante o processo de usinagem da mistura

Dia	Teor de Ligante	Local de Aplicação
01/09/2011	5,6%	Cancela nº4 do Posto de pedágio
02/09/2011	5,9%	Cancela nº5 do Posto de pedágio
06/09/2011	5,9%	Cancela nº6 do Posto de pedágio
08/09/2011	5,9%	Cancela nº6 do Posto de pedágio
12/09/2011	5,9%	Cancela nº7 do Posto de pedágio
13/09/2011	5,8%	Km 6+400 da RS-122, lado esquerdo da faixa de tráfego
14/09/2011	5,7%	Km 6+730 da RS-122, lado esquerdo da faixa de tráfego

De acordo com os resultados apresentados, percebe-se que o processo de produção apresenta variações no lançamento da taxa de ligante na mistura, embora as variações apresentadas respeitem a norma brasileira (+/- 0,3%). Os resultados dos ensaios de resistência à tração na compressão diametral e módulo de resiliência dos corpos-de-prova extraídos da pista são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Resultado dos ensaios de MR e RT

CP e Localização	MR (MPa)	RT (MPa)	Data de extração
1 – km 6 +940	4.129	0,80	Agosto/12
2 – km 6 + 840	4.559	0,84	Agosto/12
3 – km 6 + 640	5.077	0,82	Agosto/12
4 – km 6 + 780	1.936	0,55	Setembro/11
5 – km 6 + 480	1.977	0,52	Setembro/11

Os valores encontrados para o ensaio de módulo de resiliência realizado nos corpos-de-prova 1 a 3 são superiores ao encontrado na fase de dosagem da mistura, com exceção aos corpos-de-prova extraídos de setembro de 2011 (CP 4 e CP 5). Para os valores de RT, os corpos-de-prova extraídos em 2012 apresentaram valores inferiores ao realizado na fase de projeto, mas atenderam ao mínimo especificado em norma, 0,60MPa. Da mesma forma que os resultados de MR, os CP 4 e CP 5 apresentaram valores próximos ao limite especificado, mas em desacordo com a norma.

Mourão (2003) apresenta resultados de módulo de resiliência e resistência à tração na compressão diametral para mistura asfáltica tipo SMA utilizando a curva granulométrica média da faixa 0/11S da norma alemã de 2001, variando o tipo de ligante e de fíler. Além disso, segundo o autor, após o processo de mistura dos materiais, os mesmos foram colocados em estufa e envelhecidos por duas horas a temperatura de compactação. Para efeito de comparação utilizaremos apenas as misturas que utilizaram ligantes modificados (Tabela 25).

Tabela 25: Resultado dos ensaios de RT e MR para ligantes diferentes

Mistura	Tipo de Ligante	Tipo de Fíler	RT médio 25°C (MPa)	MR médio 25°C (MPa)
1B	AMP (6,5% SBS)	Pó Calcário + 1,5% de Cal	0,68	2484
2B	AMP (6,5% SBS)	Cimento Portland	0,67	2095
3B	AMP (6,5% SBS)	Pó de pedra	0,90	2034

(fonte: Mourão, 2003)

Reis (2002) estudou as características desta mistura utilizando a faixa granulométrica D-8 da comunidade europeia com três ligantes diferentes, CAP 20, AMP-1 (3% a 4% SBS) e AMP-2 (5% a 6% SBS) cujo teor foi de 6%, fíler mineral (cal hidratada) e 3% de fibra de vidro. O melhor valor de RT foi obtido pela mistura que continha o AMP-2, 1,37MPa seguido pela mistura com CAP 20, 1,30MPa. Já para os resultados de módulo de resiliência, o maior valor de encontrado de 3800MPa foi da mistura com CAP 20, sendo a mistura com AMP-1 a segunda colocada com 3600MPa.

Silva (2005) analisou o comportamento mecânico de misturas descontínuas tipo SMA 0/8S. Foi estudado o desempenho de modo a comparar quatro diferentes tipos de ligantes asfálticos (CAP 20, CAP 50/60 Fazenda Alegre, AMP 3% SBS e AMP 6,5% SBS) em diferentes teores (6,5%, 7% e 7,5%), permanecendo inalterados os demais componentes da mistura. De acordo com a pesquisa, os maiores valores encontrados para RT a 25°C (Tabela 26) foram das misturas que utilizaram CAP 20, seguidos pelas amostras que utilizaram o AMP 6,5% SBS (Tabela 26). Para o ensaio de módulo de resiliência a 25°C, novamente os maiores valores encontrados pertencem a mistura com CAP 20, principalmente no teor de 6,5% (Tabela 27).

Tabela 26: Resultado do ensaio de RT

TEOR DE LIGANTE	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO MÉDIO A 25°C			
	CAP 20	CAP 50/60 Fazenda Alegre	AMP 3% SBS	AMP 6,5% SBS
6,5%	1,02	0,92	0,81	1,00
7,0%	0,96	0,81	0,92	0,91
7,5%	0,99	0,75	0,84	0,88

(fonte: Silva, 2005)

Tabela 27: Resultado do ensaio de MR

TEOR DE LIGANTE	MÓDULO DE RESILIÊNCIA MÉDIO A 25°C			
	CAP 20	CAP 50/60 Fazenda Alegre	AMP 3% SBS	AMP 6,5% SBS
6,5%	8206	6280	5553	5563
7,0%	7182	4421	4886	5024
7,5%	7798	4300	4984	4780

(fonte: Silva, 2005)

Pelos resultados apresentados, conclui-se que os valores de MR encontrados nesta pesquisa estão próximos aos publicados na literatura consultada, com relação a utilização de ligantes modificados por polímero. De forma contrária, os valores de RT apresentados nas dissertações acima consultadas são superiores aos encontrados nesta pesquisa. Este descompasso se deve, além das diferenças no traço (granulometria e teor de ligante) também as variações do teor de CAP durante o processo de produção da mistura, o que resultou em valores diferentes dos calculados na dosagem do revestimento.

#### 6.4 DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM TRILHA DE RODA

Com o objetivo de caracterizar a mistura de acordo com uma de suas principais vantagens frente a outros revestimentos, foi realizado ensaio de deformação permanente em trilha de roda. O ensaio foi realizado pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP (Figura 21) através do equipamento LCPC. Ele aponta para uma deformação de 4,30% em relação à espessura da placa utilizada para a realização do ensaio a 60°C após 30.000 ciclos.

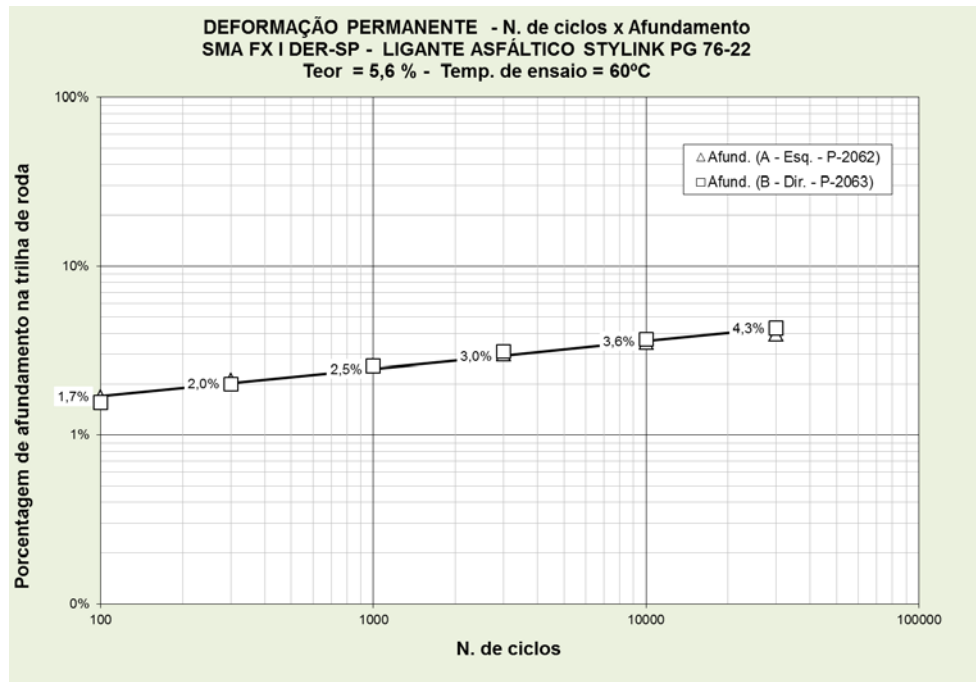


Figura 21: Resultado do ensaio de deformação permanente em trilha de roda

Reis (2002) estudou a deformação permanente em trilha de roda desta mistura utilizando a faixa granulométrica D-8 da comunidade europeia com três ligantes diferentes, CAP 20, AMP-1 (3% a 4% SBS) e AMP-2 (5% a 6% SBS) cujo teor foi de 6%, fíler mineral (cal hidratada) e 3% de fibra de vidro, através do equipamento LCPC. A mistura com ligante asfáltico CAP 20 apresentou afundamento de aproximadamente 12%. Por outro lado, as misturas com asfalto modificado apresentaram melhores resultados, sendo de 9% o afundamento da mistura com AMP-1 e 4% o valor medido para a mistura com AMP-2, aproximadamente.

Mourão (2003) analisou a deformação permanente em trilha de rodas através do equipamento Analisador de Pavimento Asfáltico (APA) para duas misturas (1A e 1B) que obedeceram a faixa granulométrica 0/11S da norma alemã de 2001. Estas misturas se diferenciam pelo tipo de ligante utilizado (CAP 50/60 e AMP 6,5% SBS), sendo o fíler utilizado pó-calcário e Cal. Além disso, as misturas, antes da realização do ensaio, foram colocadas em estufa por duas horas a temperatura de compactação para simular o envelhecimento de curto prazo. Após 8000 ciclos de carregamento, a mistura 1B apresentou afundamento de 8% e a mistura 1A o equivalente a 16%, aproximadamente, em relação a altura da viga (75mm +/-0,5mm).

Silva (2005) analisou a influência do tipo e teor de ligante no comportamento da mistura asfáltica tipo SMA, de acordo com a norma alemã de 2001, faixa 0/8S. Foram estudados três tipos de ligantes (CAP 20, CAP 50/60 Fazenda Alegre, AMP 3% SBS e AMP 6% SBS) para os teores de 6,5%, 7% e 7,5%. Os menores valores encontrados foram para as misturas com AMP 6,5% SBS, sendo a menor deformação igual a 4,60% para o teor de 6,50% de ligante, seguido pelas misturas com CAP 50/60 Fazenda Alegre (Tabela 28).

Tabela 28: Ensaio de deformação permanente para diferentes teores e tipos de ligantes

TIPO DE LIGANTE	TEOR DE LIGANTE	CICLOS
		30.000
CAP 20	6,5%	6,6
	7,0%	9,0
	7,5%	8,5
CAP 50/60 Fazenda Alegre	6,5%	5,3
	7,0%	5,6
	7,5%	5,2
AMP 3% SBS	6,5%	6,1
	7,0%	6,9
	7,5%	7,6
AMP 6,5% SBS	6,5%	4,6
	7,0%	5,2
	7,5%	5,4

(fonte: Silva, 2005)

A análise dos resultados da literatura consultada frente aos valores encontrados nesta pesquisa apontam para um bom desempenho da mistura SMA. Ao considerarmos o teor de ligante do projeto de 5,60%, a deformação encontrada para 30.000 ciclos de carregamento foi de 4,60%. As alterações deste teor durante o processo de produção da mistura, poderão alterar o desempenho frente a resistência a deformação permanente. No entanto, mesmo com estas variações, os teores encontrados durante a execução ainda são inferiores aos apresentados na literatura podendo apresentar resultados semelhantes, o acarretaria em redução no custo da mistura, sendo o ligante produto nobre com maior valor agregado.

## 6.5 PROCESSO EXECUTIVO – PISTA EXPERIMENTAL

Uma vez definido e verificado o traço da mistura a ser aplicado no trecho designado, programou-se a aplicação na pista. Inicialmente, com o objetivo de tornar o serviço familiar a equipe de execução (usina de asfalto, transporte e compactação) definiu-se um segmento com extensão inferior, com pouca interferência do tráfego e que oferece pouco risco a segurança dos usuários em caso de insucesso da mistura.

O pedágio de Portão, administrado pelo DAER, possui 7 cabines que recebem diariamente 12.000 veículos, aproximadamente, e que ao longo dos anos vem apresentando patologias severas no que se refere a deformações permanentes, principalmente afundamento em trilha de rodas (Figura 22). Nesta situação, foram escolhidas 4 faixas de acesso as cabines, com extensão de aproximadamente 150 m e largura de 3,6m para execução do SMA.



Figura 22: Deformação plástica no pavimento da Praça de Pedágio de Portão/RS

A primeira etapa do processo consistiu em calibrar a usina de asfalto de forma a produzir uma mistura homogênea, de qualidade e que atendesse ao traço do projeto. Inicialmente, procedeu-se a verificação da britagem, a qualidade do material produzido e sua granulometria. Em virtude da grande variabilidade de material encontrado na pedreira, esta aferição foi de grande



importância, pois variações na densidade, tipo de material e forma do mesmo, possuem grande influência no desempenho desta mistura.

Outro ponto importante analisado foi como e onde colocar o fíler comercial (cal hidratada) com os demais materiais da mistura de forma a garantir a dosagem correta no mesmo. Neste ponto havia algumas possibilidades, entre elas a colocação do material em silo específico, realizar a mistura juntamente com o fíler mineral (material passante na peneira nº 200) para posterior colocação em silo ou ainda colocá-lo juntamente com a fibra, imediatamente antes da mistura do ligante aos agregados.

A primeira alternativa foi descartada, pois no mês de setembro a região de Bom Princípio, localização da unidade industrial, apresenta grande umidade e haveria a possibilidade de o fíler, quando colocado no silo da usina de asfalto, formar grumos e prejudicar sua dosagem na mistura. A alternativa de misturá-lo a fibra para posterior lançamento na mistura imediatamente antes do lançamento do ligante também foi descartada devido a fato de ser necessária maior mão-de-obra e seu lançamento seria realizado por meio de baldes plásticos comuns sendo, portanto, muito difícil garantir percentual correto por batelada da usina.

Optou-se, então, por misturar o fíler mineral (material passante na peneira nº200) e a cal hidratada em área aberta, próxima a usina, com auxílio da concha de uma pá carregadeira (Figura 23). A dosagem, neste caso, foi realizada através do lançamento de volume conhecido de fíler mineral frente a quantidade necessária, em sacos, da cal hidratada, considerando ainda alguma perda devido ao vento e processo de mistura.



Figura 23: Processo de mistura do fíler natural com a Cal Hidratada

A mesma dúvida sobre o fíler recaiu sobre as fibras. Juntamente com o fabricante e, de acordo com o traço da mistura, customizaram-se embalagens com a quantidade necessária para uma tonelada da mistura, ou seja, cada batelada. A colocação da fibra, conforme orientação da literatura, deveria ser colocada imediatamente antes da injeção de ligante na mistura seca. Portanto, foi utilizado-se de janela existente no misturador de agregados para lançar as fibras (Figura 24).



Figura 24: Processo de inserção das fibras na mistura, (a) saco de fibra dosado para uma tonelada da mistura e (b) janela de colocação das fibras

Uma vez dispondo de todos os materiais, os mesmos foram colocados nos silos e iniciou-se a calibração da usina. Este acerto consiste em garantir que cada batelada, produção de uma tonelada de mistura a cada ciclo da usina, seja homogênea e pronta para a aplicação na pista.

A produção de misturas asfálticas do tipo SMA exige que os tempos de mistura seca e úmida sejam elevados de forma a garantir a homogeneidade e correta distribuição de todos os materiais. As primeiras bateladas na usina não tiveram seus tempos internos modificados, pois se acreditava que os mesmos tempos utilizados para misturas densas contínuas seriam suficientes a correta mistura. As cargas então produzidas apresentaram problemas de homogeneidade, tanto nos agregados quanto no recobrimento do ligante (Figura 25) e foram descartadas.



Figura 25: Produção de mistura heterogênea

Uma vez identificado o problema, o mesmo foi corrigido acrescentando 5 segundos na mistura seca e 5 segundos na mistura úmida, totalizando 10 segundos a mais no tempo total da mistura. As cargas seguintes apresentaram, visivelmente, boa homogeneidade e, para assegurar que o problema estava resolvido, amostras da carga foram retiradas para realização do ensaio de extração de betume, conforme DNER-ME 053/94 e verificação da granulometria (Figura 26, Figura 27 e Figura 28).



Figura 26: Amostra da mistura tipo SMA retirada da usina de asfalto



Figura 27: Realização do ensaio de extração de betume

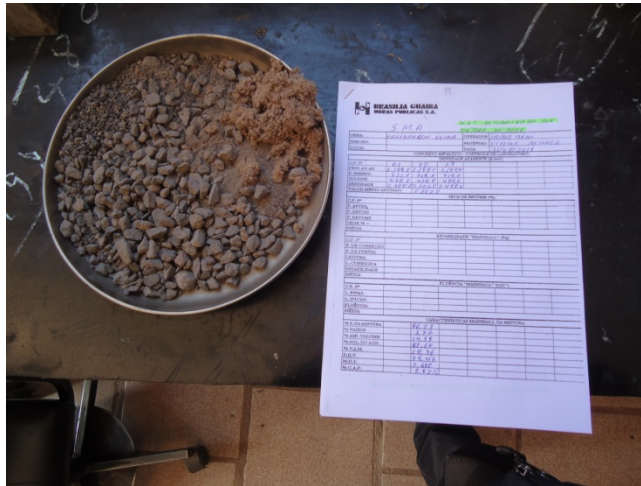


Figura 28: Análise granulométrica da mistura após usinagem

Corrigido o processo de usinagem, o transporte foi realizado com caminhões de 15 toneladas de capacidade. O tempo necessário para a carga completa do equipamento foi de aproximadamente 20 minutos.

A carga, antes do início do transporte, foi coberta por lona de forma a garantir a manutenção da temperatura da mistura durante o trajeto até o local de descarga. A distância da usina até o pedágio de Portão é de 32 km, aproximadamente, com tempo de deslocamento de aproximadamente 25 minutos.

A pista, durante o processo de usinagem, foi preparada conforme projeto do DAER, onde 5 (cinco) cm do revestimento antigo foram removidos através de fresadora (Figura 29) e posteriormente receberam a pintura de ligação com emulsão asfáltica RR-2C.



Figura 29: Fresagem da pista teste – Praça de Pedágio

Cabe salientar que a camada inferior que recebe a mistura SMA precisa estar isenta de defeitos e patologias para garantir o bom desempenho desta mistura. Logo, as imperfeições deixadas pela fresadora na faixa de tráfego precisaram ser refeitas (Figura 30).



Figura 30: Correção dos defeitos de fresagem

Após a fresagem, foram removidas da superfície todo o material remanescente (resíduos da fresagem) através da utilização de vassoura mecânica e, posteriormente, executada a pintura de ligação. A mistura foi, então, lançada e compactada com a utilização de equipamentos disponibilizados pela construtora, sendo uma vibro acabadora e um rolo compactador tandem liso. Este rolo, modelo Volvo DD70, possui peso operacional de 6,7 toneladas, inferior ao apresentado na literatura consultada, o que, inicialmente, criou a expectativa da necessidade de aumentar significativamente o número de passadas sobre a mistura. Desta forma, foram executadas, na pista teste, entre 10 (dez) e 12 (doze) passadas com o objetivo de avaliar o atendimento ao grau de compactação especificado para a mistura (Figura 31).



Figura 31: Processo de compactação da mistura

Além disso, é importante salientar que a mistura tipo SMA, quando do seu lançamento pela vibroacabadora na espessura desejada, apresenta apenas 25% de empolamento em relação a sua densidade solta, diferentemente das misturas densas contínuas que apresentam empolamento de 35% aproximadamente. Isto se manifesta de forma muito visível no momento da regulagem da mesa da vibroacabadora. Para assegurar a espessura final da camada em 5,00 cm, a mistura foi lançada com 6,20 cm para posterior compactação. Uma vez que o serviço foi executado com confinamento lateral (pista existente), a compactação foi executada do bordo para o centro, de forma a garantir o nivelamento com a faixa de tráfego adjacente.

Uma vez concluído o serviço (Figura 32), foram extraídos corpos-de-prova com o objetivo de se avaliar a mistura e compará-la com as camadas inferiores do pavimento existente (Figura

33). A extração foi realizada com sonda rotativa, alternado o bordo esquerdo, centro e bordo direito (Figura 34).

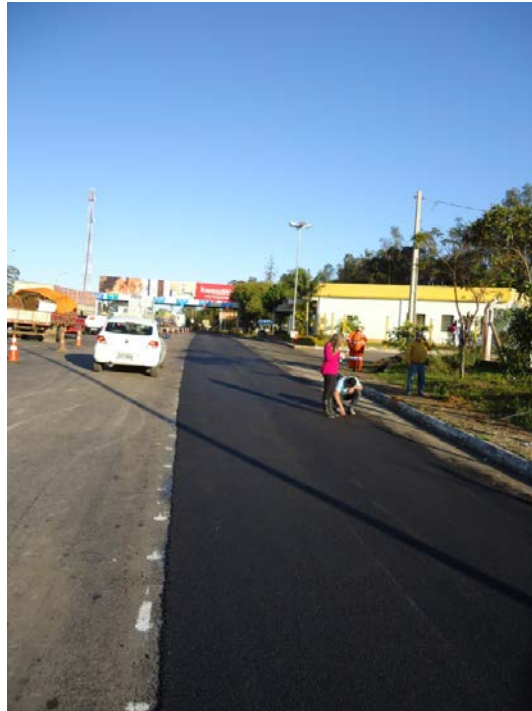


Figura 32: Primeira cancela executada em SMA



Figura 33: Extração de CP na Praça de Pedágio

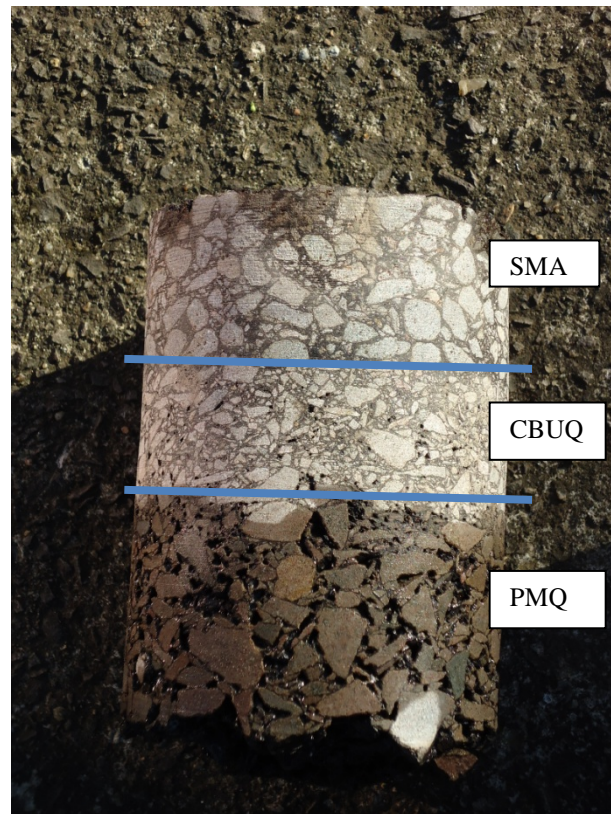


Figura 34: CP com diferentes revestimentos executados

A extração do corpo-de-prova possibilita observar a diferença entre as misturas densas contínuas e descontínuas. A primeira camada refere-se ao revestimento em SMA executada com 5 (cinco) cm de espessura, ressaltando o contato grão-a-grão e o mático que garante a durabilidade da mistura. A segunda camada refere-se a mistura densa contínua, conforme especificação DAER-ES-P 16/91. É importante ressaltar que nesta última, em comparação a mistura SMA, os agregados graúdos “flutuam” em um mático composto por ligante e agregados das mais diversas granulometrias, comprometendo o intertravamento da mistura e seu desempenho perante o tráfego.

Além disso, através dos corpos-de-prova extraídos, foi possível verificar o grau de compactação através do cálculo da densidade aparente (DNER-ME 117/94) e adequar o número de passadas do rolo compactador de forma a atingir o valor indicado na especificação. Para cada trecho executado, foi extraído um CP, conforme Tabela 29.



Tabela 29: Verificação do grau de compactação da mistura na pista teste

CP e localização	Dens. Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Grau de compactação (%)
1 – Praça de Pedágio/cabine 4	2,521	100,8
2 – Praça de Pedágio/cabine 5	2,443	97,6
3 – Praça de Pedágio/cabine 6	2,478	99,0

Desta forma, constatou-se que os equipamentos de compactação empregados na execução da mistura, ultrapassavam significativamente o grau de compactação exigido pela especificação quando da opção por 12 passadas sobre o revestimento. Com base nestes resultados, definiu-se que para a execução da pista experimental, seriam executadas apenas 10 (dez) passadas do rolo compactador, de forma a atender confortavelmente a especificação, ao volume de vazios especificado em projeto e manter a qualidade do revestimento evitando a exsudação do ligante.

Finalizados os serviços na praça de pedágio, foi executada a pavimentação do trecho experimental entre os km 6+200 e km 7+000 da RS 122, sentido interior/capital. Da mesma forma, foram fresados 5 (cinco) cm do pavimento existente da faixa externa e acostamento para recebimento da camada em SMA (Figura 35 e Figura 36).



Figura 35: Lançamento da mistura SMA no trecho experimental



Figura 36: Trecho experimental liberado para aplicação da mistura tipo SMA

A execução deste segmento ocorreu sem percalços, sendo realizado em dois dias consecutivos devido ao intenso fluxo de veículos nos horários de pico. A opção por realizar 10 (dez) passadas do rolo compactador para atendimento ao grau de compactação mostrou-se acertada (Tabela 30), atingido valores de compactação levemente superiores ao especificado. A liberação do segmento ao tráfego ocorreu no dia seguinte a execução do revestimento, aproximadamente 18h após a execução.

Tabela 30: Verificação do grau de compactação da mistura na pista experimental

CP e localização	Dens. Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Grau de compactação (%)
1 – km 6 + 500	2,450	97,9
2 – km 6 + 700	2,448	97,8
3 – km 6 + 900	2,468	98,6

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho buscou-se analisar o funcionamento da mistura asfáltica tipo SMA, a infraestrutura necessária a sua correta produção e seu processo executivo em pista experimental. Neste processo de pesquisa e aprendizado, são apresentados os resultados obtidos através da realização dos ensaios de deformação permanente em trilha de roda, resistência a tração na compressão diametral e módulo de resiliência. Além disso, serão apresentadas sugestões sobre análise complementares a este estudo de forma a explorar e divulgar o tema deste trabalho.

### 7.1 CONCLUSÕES

A pesquisa realizada na literatura existente sobre esta tecnologia, possibilitou ter o entendimento de que:

- a) O desempenho da mistura frente as solicitações do tráfego está diretamente associada ao intertravamento do esqueleto mineral, comandado pela fração graúda da mistura;
- b) O controle de produção do agregado no que se refere a granulometria, forma e lamelaridade é fundamental para o bom desempenho da mistura;
- c) O mástique asfáltico composto pela fração miúda, fibras e ligante é responsável pela durabilidade da mistura, envolvendo e protegendo o esqueleto mineral;

O estudo em laboratório e a análise da técnica executiva em trecho experimental possibilitaram concluir que:

- d) Diferentemente das misturas densas contínuas, o SMA exige um controle de produção mais apurado no que tange ao material produzido na usina de asfalto. Devido a adição de fibras e fíler comercial, os tempos de mistura seca e úmida foram aumentados de forma a garantir a homogeneidade do produto;
- e) Outro ponto importante é o teor de asfalto. Embora a norma brasileira permita uma variação de +/- 0,3%, acréscimos na quantidade de ligante da mistura, que apresenta teor elevado, poderá comprometer seu desempenho, como visto nos resultados de

resistência a tração e módulo de resiliência frente a outras pesquisas realizadas sobre o tema;

- f) Além disso, há também a importância da adição de cal e fibra. É necessário estudo sério e completo sobre como e onde serão inseridos estes materiais sob pena de não se ter garantia de produção do traço definido em projeto;
- g) Embora o SMA seja uma mistura de alto desempenho, a superfície de aplicação deve estar isenta de falhas, irregularidades significantes, trincas, fissuras, etc para que o novo revestimento apresente bom desempenho e não reflita os problemas existentes na base;
- h) Deve-se ter cuidado com o controle de compactação de forma a atingir o especificado em norma evitando a sobrecompactação que pode acarretar na exsudação do ligante;

Em relação aos ensaios realizados, constatou-se que:

- i) Na dosagem da mistura, os valores de módulo de resiliência, resistência à tração na compressão diametral e deformação permanente em trilha de roda foram, em sua maioria, satisfatórios, quando comparados com a bibliografia consultada;
- j) As alterações no teor de asfalto na mistura produzida em usina e aplicada na pista experimental podem ter comprometido seu desempenho, alterando os resultados dos ensaios, principalmente no que se refere a resistência a tração na compressão diametral e módulo de resiliência;

Portanto, o processo de análise e conhecimento de novas tecnologias é contínuo. O domínio do conhecimento da dosagem da mistura atrelado o conhecimento e o controle de qualidade na execução são necessários a correta produção do produto final, atendendo as expectativas do cliente (DAER/RS) e usuários. Constata-se que, mesmo ocorrendo variações no processo executivo que de alguma forma alteraram o desempenho da mistura, os resultados deste trabalho comparados a outras pesquisas realizadas no Brasil, apresentaram valores semelhantes, demonstrando que o SMA pode ser utilizado em vias submetidas a tráfego intenso, caracterizando-se como uma alternativa as tecnologias empregadas atualmente.

## 7.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com o objetivo de complementarmos este estudo, recomenda-se a realização de ensaios de módulo d e resiliência, resistência a tração na compressão diametral e deformação permanente em trilha de roda na temperatura de 10°C e acima de 25°C para avaliarmos o desempenho do ligante frente a esta variação.

Outro ponto importante refere-se a execução de misturas tipo SMA com TMN superiores e inferiores ao desta pesquisa, variando ainda a espessura da camada a ser implantada, definindo assim uma relação granulometria x espessura x desempenho. Desta forma, seria possível definir a aplicabilidade das diferentes variações na mistura frente as condições do tráfego.

Por último, a realização de uma retroanálise do revestimento com vistas a definir a vida útil desta tecnologia frente a solução amplamente utilizada na rodovia, acompanhada do monitoramento do trecho experimental executado, com a realização de medidas de deformação permanente, deflexões, medidas de macrotextura e microtextura. Estes dados enriqueceriam a pesquisa e complementariam o conhecimento sobre esta tecnologia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL (2005). Resolução nº19 – Regulamento técnico nº 03/2005. Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.abeda.org.br/legislacao/RESOLUCAO-NR-19.pdf>
- AGENCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL (2010). Resolução nº32 – Regulamento técnico nº 04/2010. Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.abeda.org.br/biblioteca/especificacoes/especificacao-asfalto2.pdf>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12052: *Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15573: *Misturas asfálticas - Determinação da massa específica aparente de corpos-de-prova compactados*. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15619: *Misturas asfálticas — Determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactadas*. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais de pedra e agregados naturais – Terminologia*. NBR 7225. Rio de Janeiro, 1993.
- BABADOPULOS, L. F. A. L.; VALE, A. C.; SOARES, J. B.; LOPES, M. M. e CASAGRANDE, M. D. T. (2008). *Análise do escoamento em misturas asfálticas do tipo SMA com fibras de polipropileno*. In: Anais do 19º Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro, 8p.
- BALBO, J. T. (2007). *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração*. 1ª Ed., São Paulo, Oficina de Textos.
- BELIGNI, M; D. F. VILLIBOR e J. R. CINCERRE (2000). *Misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Mastic Asphalt): solução para Revestimentos de Pavimentos de Rodovias e Vias Urbanas de Tráfego Intenso*. In. Anais da Reunião Anual de Pavimentação – 32º RAPv, Brasília, Distrito Federal, v.01, p. 590 – 605.
- BERNUCCI, L. B.; J. A. P. CERATTI; L. M. G. MOTTA e J. B. SOARES (2007). *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. 1ª Ed., Rio de Janeiro, Edição PETROBRAS/ABEDA.
- BRITO, L. A. T (2006). *Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado. PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 180p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (2006). *Atlas do Transporte*. Confederação Nacional dos Transportes, 1ª Ed., Brasília Distrito Federal.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (2010). *Pesquisa CNT de Rodovias 2010: relatório gerencial*. Confederação Nacional dos Transportes, Brasília, Distrito Federal.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2005). *Relatório de Acompanhamento do Programa de Pedágios Sob Administração Direta: janeiro a dezembro de 2005*. Rio Grande do Sul.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2007). *Solução para recuperação do pavimento RS-122*. Rio Grande do Sul.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DAER-ES-P 16/91: *Concreto Asfáltico*. Rio Grande do Sul, 1991.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (2007). *ET-DE-P00/031 - Concreto Asfáltico tipo SMA*. São Paulo, SP, 41p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 083/98: *Agregados – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro: IPR, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 043/95: *Misturas Betuminosas a quente – Ensaio Marshall*. Rio de Janeiro: IPR, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 053/94: *Misturas Betuminosas – Percentagem de Betume*. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 117/94: *Misturas Betuminosas – Determinação da densidade aparente*. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT031/2006-ES: *Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA TERRESTRE (2007). *Terminologias rodoviárias utilizadas usualmente*. Brasília, Distrito Federal, v.1.1, 17 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT136/2010-ME: *Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT135/2010-ME: *Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

EAPA – European Asphalt Pavement Association (1998). *Heavy Duty Surfaces: The Arguments For SM*. Holanda, 1998, 40p.

KANDHAL, P. S. e R .B. MALLICK (2001) *Effect of Mix Gradation on Rutting Potential of Dense Graded Asphalt Mixtures*. Transportation Research Board –TRB, Washington DC.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2005). *Mecânica dos Pavimentos*. 2ª Ed, Rio de Janeiro, Editora UFRJ.



MERIGHI, J. V.; FORTES, R. M. e MERIGHI, C. *Study of Cold mixes bitumen emulsions under de optics of de concept of stone mastic asphalt*. In: SYMPOSIUM ON MAINTENANCE AND REHABILITATION OS PAVEMENTS AND TECHNOLOGICAL CONTROL, 2, Auburn, 2001. USA. 17p. 1 CD-ROM.

MOURA, E. (2010). *Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica – Universidade de São Paulo. São Paulo, 299p.

MOURÃO, F. A. L. (2003). *Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA*. Dissertação de Mestrado. COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 131p.

NAPA – National Asphalt Pavement Association (2002). *Designing and Constructing SMA: Mixtures – State-of-practice*. Quality Improvement Series 122.

REIS, R. M. M. (2002). *Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado*. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 110p.

ROBERTS, F. L.; P. S. KANDHAL; R. E. BROWN; D. LEE e T. W. KENNEDY (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mix Design and Construction*. National Asphalt Pavements Association – NAPA, Maryland, USA.

SILVA, P. B.; L. L. B. BERNUCCI; E. MOURA; L. F. M. LEITE e V. FARIA (2005). *Estudo de Revestimento Asfáltico SMA 0/8S Utilizado em Trecho Experimental*. In: Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – XIX ANPET, Recife, PE, v. 02, p. 1505 – 1506.

SILVA, P. B. (2005). *Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S*. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 132p.

VALE, A. C. (2007). *Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 125p.