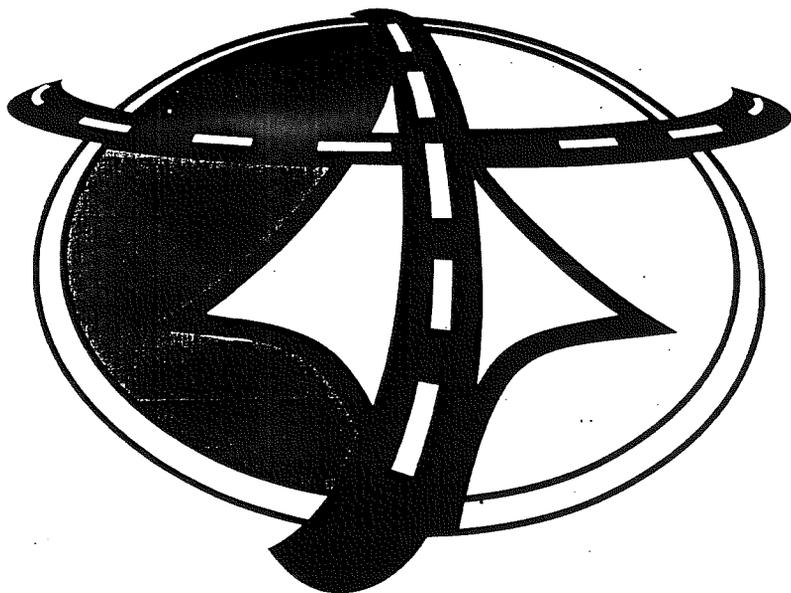


Pavimentação

A ROTA PARA O DESENVOLVIMENTO NACIONAL



32ª RAPV

32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO

16 A 20 DE OUTUBRO DE 2000

PROMOÇÃO:



REALIZAÇÃO:



SESSÃO 2 – AVALIAÇÃO E DIMENSIONAMENTO (2ª PARTE)	
TRABALHO/AUTOR	Pá
OS “MÓDULOS” DE MECÂNICA DOS SOLOS Thomas Ulf Nilsson & Lúcia Regina A. Montanhini	3
A FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS E O FATOR CAMPO-LABORATÓRIO (SHIFT-FACTOR) Antonio Carlos Valle de Souza	3
IMPACT OF HIGHER TIRE PRESSURE AND SUPER SINGLE TIRES ONLOAD EQUIVALENCY FACTORS W. Ronald Hudson	3
FATOS, MITOS E FALÁCIAS SOBRE OS MODELOS EXPERIMENTAIS DE FADIGA José Tadeu Balbo	3
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO PAVIMENTO DO AEROPORTO FRANCISCO ÁLVARES DE ASSIS Márcio Marangon	3
PAVIMENTOS ESTRUTURALMENTE ARMADOS Públio Penna Firme Rodrigues & Wagner Edson Gasparetto	3
ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DE “MÓDULOS DE ELASTICIDADE” Thomas Ulf Nilsson & Lúcia Regina Assumpção Montanhini	3
INFLUÊNCIA DA ANISOTROPIA TRANSVERSA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS Márcio Muniz de Farias	3
ANÁLISE DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES DE PLACAS UTILIZADAS NO SIMULADOR DE TRÁFEGO, COM BASE NO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS João Virgílio Merighi, Alfonso Papalardo Junior, Fabio Raia & Rita Moura Fortes	3
ESTUDO DO COMPORTAMENTO QUANTO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS DE AREIA ASFALTO USINADAS A QUENTE Daniel Rodrigues Aldigueri, Liedí Bariani Bernucci & Edson de Moura	3
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DE PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO PARA ÁREAS PORTUÁRIAS E INDUSTRIAIS Abdo Hallack	3

SESSÃO 3 – CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE OBRAS (1ª PARTE)	
TRABALHO/AUTOR	Pág.
USO EFICAZ DE MATERIAIS LOCAIS COM ESTABILIZANTES QUÍMICOS José Carlos de Carvalho & Luiz Cesar Szabo	478
RECICLAGEM DE CAMADA BETUMINOSA COMO SUB-BASE ESTABILIZADA COM CIMENTO NA BR 381: UMA EXPERIENCIA Juarez Miranda Junior & César Augusto Rodrigues da Silva	488
BR-232/PE: UMA ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTAÇÃO Adriana de Campos Rossiter, Ariovaldo Lustosa Roriz Júnior, Mirtes Maria de Macedo & Elsen Pontual Sales	498
INCORPORAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS AO CONCRETO BETUMINOSO USINADO À QUENTE Romulo Barroso Villaverde, Delchi Migotto Filho & Eliana Fachada	511
ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE USINAS DE TAMBOR SECADOR MISTURADOR (DRUM MIXER) Manoel Francisco Simon, Ruby Aldyr Keil, Álvaro Siqueira Pitta & Danilo Martinelli Pitta	518
INFLUÊNCIA DA HETEROGENEIDADE DO SUBLEITO NA COMPACTAÇÃO E DESEMPENHO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS URBANOS Jean-Marie Konrad, José Camapum de Carvalho, Deni Lachance & Serge Fortin	526
DIFUSÃO GENERALIZADA DO USO DE BIOENZIMAS NA PAVIMENTAÇÃO Rubens Brazetti & Sheldon R. Murphy	535
PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA COM O USO DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS – UMA PROPOSTA DE REDUÇÃO DE CUSTOS E ECOLÓGICAMENTE CORRETA Paulo Roberto Dias Morales & Carlos Alberto Oian	545
STONE MASTIC ASPHALT - S M A - PAVIMENTO ASFÁLTICO RUGOSO Adilson Moreira Vinha	554
PAVIMENTO RÍGIDO NA 3ª AVENIDA PERIMETRAL DE PORTO ALEGRE Léo Rocha Azmus & Manoel João Souza de Freitas	565
ESTUDO DE <i>WHITETOPPING</i> PARA O ANEL RODOVIÁRIO TRECHO ENTRE OLHOS D'ÁGUA E AV. AMAZONAS -BELO HORIZONTE - MG Dalter Pacheco Godinho & Luiz Carlos Grossi	575
MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO SMA (STONE MASTIC ASPHALT): SOLUÇÃO PARA REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS DE RODOVIAS E VIAS URBANAS DE TRÁFEGO INTENSO Mauro Beligni, Douglas Fadul Villibor, José Roberto Cincerre	589

32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO

BRASÍLIA/DF

16 a 20 de outubro de 2000

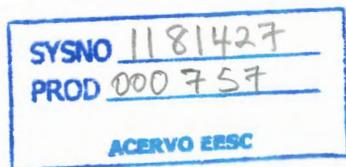
**MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO SMA (STONE MASTIC ASPHALT): SOLUÇÃO
PARA REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS DE RODOVIAS E VIAS URBANAS
DE TRÁFEGO INTENSO**

AUTORES: Eng.º Consultor Mauro Beligni ⁽¹⁾
Prof. Dr. Douglas Fadul Villibor ⁽²⁾
Eng.º Consultor José Roberto Cincerre ⁽¹⁾

⁽¹⁾Tecpav – Engenharia e Consultoria S/C Ltda. – Tel: (011) 3813-9454

⁽²⁾Lenc – Laboratório de Engenharia e Consultoria Ltda.

– Tel: (011) 3815-7877



MISTURA ASFÁLTICA DO TIPO SMA (STONE MASTIC ASPHALT): SOLUÇÃO PARA REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS DE RODOVIAS E VIAS URBANAS DE TRÁFEGO INTENSO

Eng.º Mauro Beligni
Prof. Dr. Douglas Fadul Villibor
Eng.º José Roberto Cincerre

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o crescimento do tráfego associado ao aumento da carga por eixo nas últimas décadas, tornou-se imprescindível o emprego de misturas asfálticas mais resistentes no setor rodoviário como também em vias urbanas e aeroportos.

O interesse pelo desenvolvimento de materiais mais resistentes no setor rodoviário, principalmente nos países europeus, começou a aumentar quando da observação de grandes deformações permanentes (afundamentos de trilha de roda e ondulações) decorrentes da atuação de cargas elevadas associadas a elevadas temperaturas.

Um outro fator que leva à degradação do pavimento é o processo de fadiga dos materiais, especialmente das misturas asfálticas. Este processo é mais acelerado quando da atuação de baixas temperaturas e cargas excessivas, fazendo com que a mistura asfáltica enrijeca resultando no trincamento da mesma em decorrência de tensões de tração nas fibras inferiores da camada asfáltica.

Paralelamente ao desenvolvimento de materiais mais resistentes a elevadas temperaturas resultando em redução das deformações permanentes, tornou-se necessário o emprego de misturas asfálticas mais flexíveis quando submetidas a baixas temperaturas, retardando assim o processo de fadiga do material.

As principais causas do desenvolvimento de deformações permanentes em camadas asfálticas são:

- Consolidação da mistura asfáltica pelo tráfego;
- Comportamento visco-plástico das misturas asfálticas a altas temperaturas e
- Baixa resistência mecânica da mistura asfáltica, quando da liberação logo após a execução.

Quanto ao processo de fadiga as principais causas são:

- Variações térmicas, especialmente em relação ao ligante betuminoso, durante as etapas de estocagem, usinagem e transporte da mistura asfáltica, enrijecendo o betume via oxidação e destilação.
 - A oxidação leva a um aumento da massa molecular e conseqüente aumento da consistência do asfalto (endurecimento) através de processo químico.
 - A destilação é o fenômeno de evaporação das moléculas leves de carbono e hidrogênio dos maltenos, acarretando numa perda de massa e conseqüente aumento da consistência devido a concentração de betume mais viscoso (pesado).
- Envelhecimento do ligante betuminoso, durante a vida de serviço, sob a ação climática e solitação pelo tráfego. Alguns fatores que levam ao envelhecimento do ligante asfáltico são:
 - variações climáticas;

- presença permanente de ar nos vazios e
- atuação da luz, principalmente raios ultra-violetas, acelerando a oxidação do ligante asfáltico.

Outros fatores menos significantes na fadiga da mistura asfáltica são:

- a alteração da estrutura do ligante asfáltico, processo este considerado físico, decorrente de sollicitações térmicas e variações de umidade e
- a absorção seletiva de moléculas de carbono e hidrogênio dos maltenos no ligante asfáltico pelos poros capilares dos minerais, aumentando também a consistência do asfalto e acelerando conseqüentemente o processo de fadiga.

2. HISTÓRICO E EMPREGO DA MISTURA ASFÁLTICA SMA

2.1. Histórico

A mistura asfáltica SMA foi desenvolvida na Alemanha, no final da década de 60, sob denominação de "Splittmastixasphalt". Em outros países a mistura é denominada de Stone Matrix Asphalt ou Stone Mastic Asphalt. O objetivo de desenvolvimento de tal mistura era reduzir o desgaste da superfície do pavimento causado pelo atrito entre o pneu e o revestimento. O desgaste da superfície, principalmente pelo polimento dos agregados minerais, altera tanto a micro- quanto a macrotextura da camada de rolamento podendo resultar em acidentes por derrapagem. Visando a redução do desgaste superficial dos revestimentos asfálticos foram empregadas misturas asfálticas coesivas com elevada porcentagem de betume e conseqüentemente baixo índice de vazios.

A tecnologia empregada no final da década de 60 logicamente não é a mesma da atual, porém os conceitos desta nova composição de mistura asfáltica datam de tal época.

A utilização de misturas ricas em ligante betuminoso na Alemanha levaram a um aumento das deformações permanentes em forma de afundamentos de trilha de roda, principalmente no verão de 1976. Em decorrência foi realizado em 1977 um simpósio em Zurique, Suíça, para discussões destes insucessos.

Como conseqüência, no final da década de 70, houve mudanças conceituais na dosagem de misturas asfálticas, com o intuito de se utilizar misturas mais resistentes quanto à deformações permanentes. Para tanto as seguintes medidas foram tomadas para a obtenção de tais misturas:

- dosagem com porcentagens mais baixas de betume;
- utilização de asfaltos mais resistentes (asfaltos de menor penetração);
- redução do teor de filler;
- emprego preferencialmente de areia natural e
- utilização de uma porcentagem mais elevada de agregados graúdos.

Tais alterações na dosagem, resultaram em camadas asfálticas com índices de vazios relativamente superiores quando comparados com as camadas executadas anteriormente. No entanto observou-se, na prática, que estas misturas eram difíceis de serem compactadas quando da execução, necessitando conseqüentemente de maior energia de compactação e resultando muitas vezes num esmagamento dos agregados ou mesmo na exsudação do ligante betuminoso na superfície do revestimento. Portanto a tendência foi de uma compactação insuficiente da mistura asfáltica.

Para resolver este problema, foram fixados os limites máximos para o índice de vazios de diversas misturas asfálticas. Tal procedimento leva a uma redução da consolidação da mistura após compactada, ou seja, após a liberação para o tráfego, reduzindo a infiltração de água e sujeiras indesejáveis, principalmente na camada de rolamento. A fixação de limites máximos para o índice de vazios, no caso da mistura SMA da ordem de 6%, contribui para uma redução

da oxidação prematura do ligante betuminoso, decorrente da presença constante do oxigênio do ar nos vazios da mistura asfáltica.

No final da década de 80, com a introdução em grande escala dos ligantes modificados por polímeros no mercado europeu, a mistura asfáltica SMA voltou a ser empregada quase que exclusivamente na Alemanha, utilizando-se também aditivos especiais (fibras naturais ou sintéticas) para evitar o escorrimento do ligante betuminoso em relação aos agregados. Os asfaltos modificados por polímeros permitiram uma intensificação no emprego das misturas asfálticas do tipo SMA, pois apresentam uma viscosidade bem superior aos asfaltos convencionais quando da atuação de elevadas temperaturas. Portanto os polímeros contribuíram substancialmente para uma redução das deformações visco-plásticas da mistura asfáltica, pois elevam o ponto de amolecimento e reduzem a penetração do ligante betuminoso, além de proporcionarem uma maior coesão do sistema.

Portanto a mistura asfáltica do tipo SMA apresenta uma elevada porcentagem de betumim, porém com maior resistência à deformação permanente, quando da atuação de elevadas temperaturas e tráfego pesado, principalmente pelo uso de asfaltos modificados por polímeros e adição de fibras naturais em sua composição.

2.2. Emprego da Mistura Asfáltica SMA

A Alemanha publicou a primeira Norma da Mistura Asfáltica SMA em 1984, devido ao excelente desempenho desta mistura até então observado "in situ".

Segundo dados do documento "Heavy Duty Surfaces – The arguments for SMA" publicado em 1998 pela EAPA (European Asphalt Pavement Association) a Alemanha apresentava em 1996 uma extensão aproximada de 28.600 km de pista simples correspondendo a mais de 100 milhões de metros quadrados construídos com SMA, segundo a Espanha com 69 milhões de m², Suécia com 50 milhões de m², Holanda com 32 milhões de m² e França com 18 milhões de m².

A Figura 1, também retirada do mesmo documento ilustra a evolução da utilização da mistura asfáltica SMA no Estado da Bavária, na Alemanha, em substituição as seguintes misturas asfálticas: concreto asfáltico, asfalto drenante, asfalto fundido e concreto.

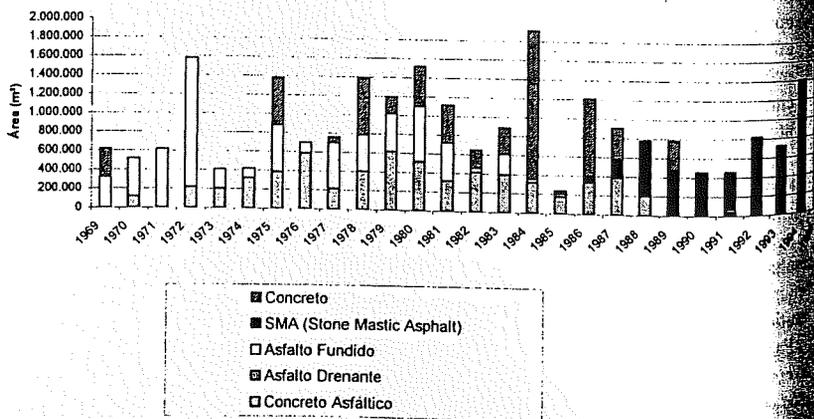


FIGURA 1: Evolução da Utilização da Mistura Asfáltica SMA no Estado da Bavária, Alemanha.

No caso específico do Estado da Bavária, a camada de revestimento drenante, hoje em voga no Brasil, foi totalmente substituída por camada de rolamento de SMA em função de sua onerosa manutenção e perda de funcionabilidade, pelo entupimento dos vazios.

3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA MISTURA ASFÁLTICA SMA

A mistura asfáltica SMA é utilizada como camada de rolamento numa espessura variando de 1,5 a 4,0 cm em função do diâmetro máximo do agregado mineral utilizado na composição da mistura. Não recomenda-se a utilização do SMA em espessuras muito superiores a 4,0 cm, em decorrência de deformações permanentes, maior probabilidade de formação de afundamentos de trilha de roda.

Nos últimos anos o SMA vem sendo utilizado como nova alternativa para rejuvenescimento de superfícies deterioradas, porém para pavimentos que apresentem uma elevada capacidade estrutural, visto que neste caso o SMA é empregado visando apenas uma melhoria do desempenho funcional, ou seja, melhoria do conforto e da segurança aos usuários. Neste caso a camada delgada de SMA pode ser denominada de micro concreto asfáltico a quente, sendo aplicada numa espessura variando entre 1,0 e 2,0 cm.

A mistura asfáltica SMA é caracterizada pela sua elevada resistência à deformações permanentes, visto que a mesma apresenta uma estrutura mineralógica estável, com elevado teor de agregados graúdos e uma argamassa composta por uma porcentagem elevada de finos e de ligante betuminoso. Devido a elevada porcentagem de agregados graúdos, ou seja, baixa superfície específica na mistura de agregados, torna-se fundamental a utilização de aditivos estabilizadores, tais como, fibras de celulose para reter a argamassa em torno dos agregados graúdos.

As fibras de celulose também exercem a função de evitarem o escorrimento do ligante betuminoso e da argamassa quando da usinagem, transporte e aplicação, pelo fato de desempenharem uma ação de microarmadura (reticulado tridimensional) que em conjunto com os polímeros presentes no ligante betuminoso aumentam a coesão do sistema.

Devido a incorporação de parte do ligante pelas fibras, pode-se formular misturas flexíveis com alta porcentagem de ligante betuminoso, sem riscos de exsudação ou perda de estabilidade mecânica.

As fibras possibilitam a utilização de granulometrias descontínuas que aumentam a macrot textura do revestimento, melhorando as características mecânicas, de drenagem superficial e aderência dos pneus ao pavimento, principalmente pela redução dos efeitos de hidroplanagem e spray em dias chuvosos.

A mistura asfáltica SMA é constituída por uma elevada porcentagem de agregados graúdos e elevado teor de filler, geralmente cal hidratada, resultando em uma curva granulométrica descontínua, conforme pode ser observado nas faixas granulométricas da Figura 2.

A função da argamassa (MASTIC) é preencher os vazios dos agregados graúdos minerais conferindo conseqüentemente ao sistema uma elevada coesão.

A Figura 3 ilustra o esqueleto de agregados (STONE) envoltos pela argamassa (MASTIC), em comparação com os esqueletos das estruturas de concreto asfáltico (curva granulométrica contínua) e camada porosa de atrito (CPA), também denominada mistura asfáltica drenante.

O índice de vazios resultante na mistura asfáltica SMA deve girar em torno de 2 a 4 % em volume, no caso de ensaios laboratoriais e entre 1 e 6 % em volume, no caso de controle tecnológico da mistura asfáltica em obra, segundo as Especificações Técnicas Alemãs ZTV bit - Stb 84.

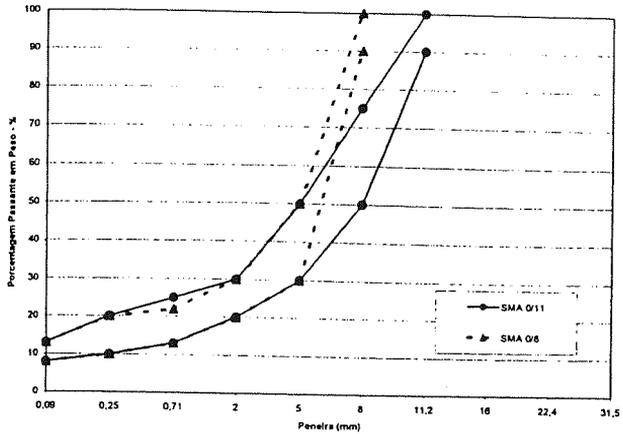


FIGURA 2: Curvas Granulométricas das Misturas Asfálticas SMA 0/8 e 0/11
 (Nota: 0/8 e 0/11 representam as granulometrias dos agregados minerais diâmetros variando de 0 até 8 mm e de 0 até 11 mm, respectivamente).

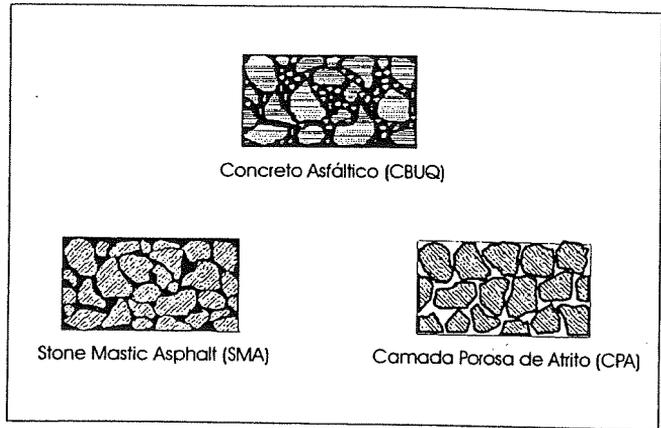


FIGURA 3: Esqueleto do SMA, do Concreto Asfáltico (CBUQ) e da Camada Porosa Atrito (CPA).

A porcentagem de finos, material passando na peneira de abertura 0,09 mm, d oscilar entre 8 e 13 % e a porcentagem de ligante betuminoso entre 6,5 e 8,0 % em peso.

A Tabela I apresenta as características dos agregados minerais, do ligante betuminoso dos aditivos estabilizadores, da mistura asfáltica e da camada executada, segundo da retirados das Especificações Técnicas Alemãs ZTV bit – Stb 84.

TABELA I: Características da Mistura Asfáltica SMA segundo as Especificações Técnicas Alemãs ZTV bit – Stb 84.

SMA		0 / 11	0 / 8
Stone Mastic Asphalt			
1. Agregados Minerais			
Porcentagem de Agregado em Peso (%)	< 0,09 mm	8 até 13	8 até 13
Porcentagem de Agregado em Peso (%)	> 2,0 mm	70 até 80	70 até 80
Porcentagem de Agregado em Peso (%)	> 5,0 mm	50 até 70	50 até 70
Porcentagem de Agregado em Peso (%)	> 8,0 mm	≤ 25	≤ 10
Porcentagem de Agregado em Peso (%)	> 11,2 mm	≤ 10	-
Relação Areia Natural / Areia de Britagem		≥ 1 : 1	≥ 1 : 1
2. Ligante Betuminoso			
Tipo de Ligante (Penetração - 1/10 mm)		B65 (50 - 70) PmB45 (asfalto modificado por polímeros)	B65 (50 - 70) PmB45 (asfalto modificado por polímeros)
Porcentagem de Ligante Betuminoso (%)		6,5 - 7,5	7,0 - 8,0
3. Aditivos Estabilizadores			
Teor na Mistura em Peso (%)		0,3 - 1,5	
4. Mistura Asfáltica			
Corpos de Prova Marshall			
Temperatura de Compactação (° C)		145 ± 5	
Índice de Vazios em Volume (%)		2,0 - 4,0	
5. Camada Acabada			
Espessura Recomendada (cm)		3,5 - 4,0	2,0 - 4,0
Taxa de Aplicação (kg / m ²)		60 - 125	45 - 100
Grau de Compactação (%)		≥ 97	≥ 97
Índice de Vazios em Volume (%)		≤ 6,0	≤ 6,0

4. PRODUÇÃO DA MISTURA, TRANSPORTE E APLICAÇÃO

4.1. Emprego da Mistura Asfáltica SMA

Alguns cuidados devem ser tomados na produção da mistura asfáltica SMA, em função do baixo teor de areia na composição da mistura de agregados, fazendo com que os agregados minerais, através do contato quase que direto com a chama do secador, acabem se aquecendo demasiadamente em um curto intervalo de tempo. O super aquecimento dos agregados prejudica a formação de um filme espesso e estável de ligante betuminoso em torno

dos agregados. Portanto é fundamental tomar determinadas precauções para evitar o superaquecimento.

Fixar a temperatura máxima de aquecimento da mistura de agregados na saída do secador não é uma medida eficaz, visto que a perda de energia térmica entre o secador e o misturador é variável para as diversas usinas disponíveis no mercado.

Recomenda-se um acréscimo de temperatura de usinagem de aproximadamente 3% para cada 1 % de polímeros incorporados ao cimento asfáltico de petróleo em relação ao cimento asfáltico de petróleo (CAP) convencional. A mistura asfáltica SMA deve apresentar temperaturas entre 180° C e 190° C após a usinagem.

O limite inferior da temperatura para a aplicação da mistura asfáltica é fixado com base na viscosidade necessária para a mistura ser lançada e rolada, afim de se atingir o grau de compactação mínimo fixado em projeto. O gráfico de Viscosidade – Temperatura da ASTM é utilizado para se fixar os limites inferior e superior de temperaturas de usinagem e rolagem. Logicamente estes limites variam com o tipo de ligante betuminoso utilizado, de maior ou menor penetração, convencional ou modificado por polímeros, etc.

O aditivo estabilizador (fibras naturais) deve ser armazenado em local apropriado, seja, seco e isento de impurezas. A incorporação das fibras deve ocorrer direto no misturador quando do emprego de usinas gravimétricas, antes da adição do ligante betuminoso. Em usinas do tipo DRUM-MIXER a adição das fibras deve se dar no segundo compartimento do tambor, também antes da injeção do ligante, sem contato direto com a chama do maçarico.

Recomenda-se a seguinte seqüência para a mistura dos diversos componentes:

- agregados minerais (incluindo Filler);
- aditivo estabilizador e
- ligante betuminoso.

Deve-se misturar os agregados minerais no secador de 10 a 15 segundos. A adição do ligante betuminoso deve ocorrer entre 5 e 10 segundos. Após a adição do ligante à mistura de agregados, deve-se proceder a mistura por aproximadamente 15 a 20 segundos, garantindo assim uma homogeneidade adequada de todos os componentes.

O tempo total de mistura deve ser de no mínimo 40 segundos.

A mistura não deve permanecer por muito tempo nos silos de descarga, no caso de utilização de usinas do tipo DRUM-MIXER, para que não ocorra uma alteração considerável em termos de viscosidade no ligante betuminoso. As etapas de mistura, transporte e aplicação da mistura asfáltica devem se suceder de forma contínua, sem que ocorram intervalos prolongados entre si, evitando assim uma perda acentuada de temperatura.

4.2. Transporte e Aplicação

Tanto no verão quanto no inverno os caminhões de transporte devem dispor de lonas impermeáveis, evitando resfriamento da mistura asfáltica e possível alteração prejudicial do ligante betuminoso por oxidação, através do contato direto do mesmo com o oxigênio presente no ar.

Não é recomendável o super aquecimento da mistura asfáltica, para o caso de grandes distâncias de transporte, podendo provavelmente ocorrer segregação da mistura, em função do escorrimiento do ligante betuminoso durante o transporte e a aplicação.

Uma alimentação contínua da vibroacabadora com mistura asfáltica é fundamental para uma homogeneidade adequada da camada de rolamento e obtenção de uma superfície regular tanto no sentido transversal quanto longitudinal.

As seguintes medidas e precauções devem ser tomadas no processo executivo:

- A temperatura da mistura asfáltica na vibroacabadora não deve ser inferior a 150° C para os ligantes betuminosos de menor penetração;

- A vibroacabadora deve dispor de dispositivos de pré-compactação (TAMPERS), principalmente no caso de camadas mais espessas, garantindo assim uma elevada pré-compactação em torno de 88 a 90%;
- Os rolos compactadores estáticos tipo Tandem devem iniciar a compactação logo após a aplicação da mistura asfáltica pela vibroacabadora. Para cada faixa de lançamento recomenda-se a utilização, de pelo menos, dois rolos compactadores;
- A utilização de rolos compactadores vibratórios somente é recomendada para temperaturas elevadas da mistura asfáltica e após uma compactação com rolo Tandem estático, para camadas com espessuras superiores a 3 cm. Para camadas com espessuras inferiores a 2 cm, não deve-se utilizar rolos vibratórios, pois poderá ocorrer desagregação e esmagamento dos agregados da mistura asfáltica ou mesmo exsudação do ligante betuminoso;
- Não é recomendável o emprego de compactadores pneumáticos de pressão variável, pois para elevadas temperaturas e número de passagens dos equipamentos, pode ocorrer exsudação do ligante betuminoso.

5. ALGUNS RESULTADOS DE PESQUISAS REALIZADAS COM A MISTURA ASFÁLTICA SMA NA ALEMANHA E NO BRASIL

5.1. Medidas de Viscosidade com o Viscosímetro Rotativo

Este ensaio visa um estudo mais aprofundado da função dos aditivos estabilizadores (fibras naturais) nos ligantes betuminosos, quanto as alterações das propriedades físicas do ligante quando da adição de tais aditivos.

Também é verificada a atuação do filler nos ligantes betuminosos, uma vez somente misturado ao ligante e outra com o ligante e as fibras naturais.

5.1.1. Viscosímetro Rotativo (Rotovisco)

O equipamento utilizado para a medida da viscosidade é um viscosímetro rotativo sob pressão de até 100 bar com ajustes de temperatura de até 300 ° C. O viscosímetro fabricado pela empresa HAAKE é constituído por um rotor e um estator, aonde o estator é a parte que mantém o ligante betuminoso aquecido à temperatura constante (pode-se fixar a temperatura desde 0 até 300 ° C) e o rotor confere uma certa velocidade de escoamento ao ligante betuminoso através de uma tensão cisalhante.

A velocidade de escoamento do ligante betuminoso depende dos seguintes parâmetros:

- propriedades físicas e químicas do ligante;
- temperatura do ligante;
- pressão;
- gradiente de cisalhamento (diferença de velocidades entre o cilindro estático e o rotor dividido por unidade de comprimento) e
- tempo de preparo (aquecimento) do ligante betuminoso para o ensaio.

5.1.2. Ensaio

Foram realizados no Laboratório de Misturas Asfálticas da Universidade Técnica de Berlim, em 1995, alguns ensaios com o viscosímetro rotativo.

Os ensaios consistem na medida de viscosidade em ligantes betuminosos do tipo:

- B65 e B80 (para o B65 a penetração varia de 50 a 70 1/10 mm e para o B80 de 70 a 100 1/10 mm, segundo a norma alemã DIN 52010);
- B65 e B80 mais filler e
- B65 e B80 mais filler e fibras de celulose (ARBOCEL).

Nos ensaios, em questão, a relação entre ligante e filler foi de 1:1,44 e entre ligante, fibra de celulose 1:1,43:0,077. A relação entre ligante, filler e fibra advém da composição da mistura asfáltica, onde 6,5% em peso do total da mistura é ligante betuminoso, 10% de agregados minerais é constituído por Filler e 0,5% fibras.

Os ensaios de viscosidade foram realizados num intervalo de temperatura entre 150° C e 70° C. O processo adotado foi o resfriamento do ligante betuminoso, pré-aquecido a uma temperatura de 150° C por aproximadamente 5 horas, até 60° C e medida da viscosidade em intervalos de 10 em 10° C.

Para a determinação da viscosidade dinâmica, fixa-se a temperatura e o gradiente de cisalhamento. A equação para a determinação da viscosidade é a seguinte:

$$\eta = \frac{\tau}{D}$$

onde:

η = viscosidade dinâmica em Pa . s;

τ = tensão de cisalhamento em Pa;

D = gradiente de cisalhamento (diferença de velocidades entre o cilindro estático e o rotatório dividido pela espessura da fenda aonde é inserido o ligante betuminoso) em s^{-1} .

$$D = \frac{\Delta V}{\Delta S}$$

$\Delta S \cong 1$ a 6 mm (espessura da fenda)

ΔV = diferença de velocidades (mm / s)

5.1.3. Resultados

A Figura 4 ilustra o desenvolvimento da viscosidade dinâmica com a diminuição da temperatura.

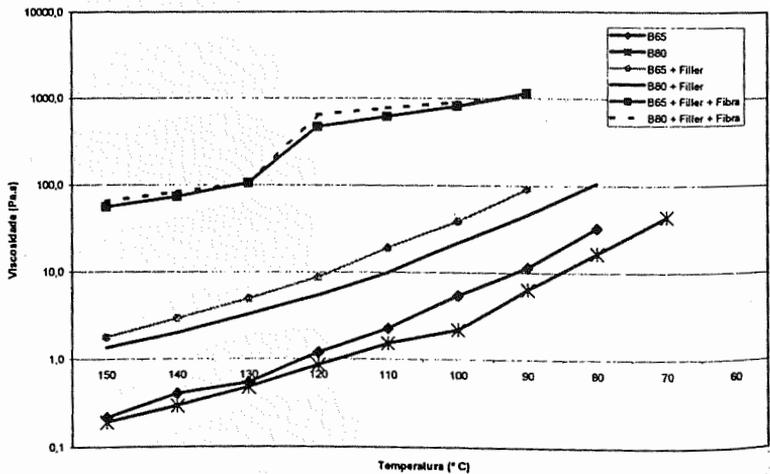


FIGURA 4: Viscosidade Dinâmica

5.1.4. Conclusões

Estes ensaios ilustram bem a função do filler e das fibras de celulose no ligante betuminoso, em termos de aumento da viscosidade para as diversas temperaturas ensaiadas.

Adicionando-se filler no ligante, observa-se para todas as temperaturas, nas quais a viscosidade foi medida, um aumento de 10 vezes nos valores da viscosidade e quando da adição de filler e fibras de celulose um aumento de até 100 vezes.

Na mistura asfáltica do tipo SMA a porcentagem de ligante betuminoso é bem elevada e as temperaturas de usinagem e aplicação superiores as do concreto asfáltico, reforçando portanto a necessidade de adição de fibras para reter o ligante betuminoso, evitando o escorrimto quando do transporte e aplicação. As fibras fazem com que o ligante betuminoso fique mais consistente a altas temperaturas diminuindo a formação dos afundamentos de trilha de roda.

Cabe ressaltar que um dos problemas encontrados, nestes ensaios, foi a dificuldade da adição das fibras de celulose na argamassa (ligante betuminoso mais filler) e homogeneização.

O problema de uma homogeneização inadequada das fibras deve ser contornado na usina através do emprego de dispositivos apropriados para a incorporação das fibras. Recomenda-se preferencialmente a utilização de fibras de celulose em forma granular (pellets), evitando assim a formação de grumos e / ou absorção das mesmas pelo sistema de fitos da usina.

5.2. Ensaio Dinâmico de Compressão Uniaxial

Estes ensaios foram realizados em 1995 no Laboratório de Misturas Asfálticas da Universidade Técnica de Berlim, objetivando analisar as deformações visco-plásticas de misturas asfálticas do tipo SMA com diferentes tipos de agregados minerais. Os ensaios foram realizados um dia, uma semana e dois meses após a moldagem dos corpos de prova.

Os ensaios dinâmicos de deformação por compressão uniaxial proporcionam uma análise comparativa em termos de resistência mecânica para diferentes misturas asfálticas.

5.2.1. Preparo dos Corpos de Prova

A composição das misturas asfálticas ensaiadas segue as Especificações Técnicas Alemãs ZTV Asphalt - Stb 94.

A granulometria do SMA empregada é a 0/11, ou seja, frações de agregados minerais, areia e filler variando entre 0 e 11 mm.

A compactação dos corpos de prova, para o ensaio em questão, foi realizada com o equipamento compactador Marshall, após a determinação da porcentagem ótima de betume para um índice de vazios variando entre 2 e 4% em volume.

5.2.2. Ensaio

O ensaio consiste na aplicação de uma tensão de compressão dinâmica na direção axial do corpo de prova, sob temperatura constante e durante aproximadamente 5 horas. Este ensaio é de tensão controlada e a aplicação da carga ocorre de forma senoidal, ou seja, durante 0,2 segundos o corpo de prova é solicitado por uma força de 1600 Newtons. A força mínima aplicada sobre o corpo de prova é de 200 Newtons e a pausa entre duas aplicações sucessivas é de 1,5 segundos. Portanto durante este ensaio o corpo de prova é solicitado 10.000 vezes pela força máxima de 1600 Newtons. A tensão aplicada é de aproximadamente $0,2 \text{ N} / \text{mm}^2$ e o ensaio foi realizado à temperatura de 50°C .

Nestes ensaios é determinada a taxa de deformação do corpo de prova em $\mu \text{m} / 1000$ repetições da carga.

Para cada tipo de agregado e data de ensaio foram moldados 10 corpos de prova. Foram ensaiadas resistências à deformações permanentes em misturas asfálticas do tipo SMA com agregados minerais de granito, basalto e calcáreo, um dia, uma semana e dois meses após a moldagem. Portanto foram moldados no total 90 corpos de prova. Dos 10 corpos de prova ensaiados para cada combinação, tipo de agregado e data de ensaio, foram calculados média, desvio-padrão e coeficiente de variação, porém somente considerando 7 corpos de prova.

5.2.3. Resultados

A Figura 5 ilustra as taxas de deformações para os diferentes tipos de agregados minerais (granito, basalto e calcáreo) e para as diversas datas de ensaio.

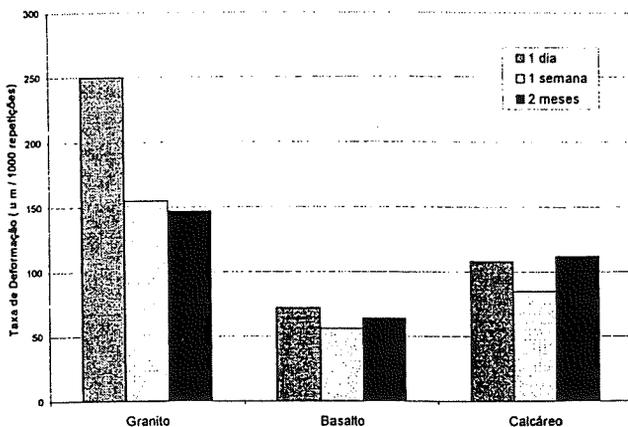


FIGURA 5: Taxas de Deformações para os Diferentes Tipos de Agregados Minerais

Conforme pode-se observar na figura anterior, as taxas de deformações um dia após a moldagem dos corpos de prova são bem superiores aos valores obtidos uma semana após o maior ganho de resistência ocorreu no caso dos corpos de prova constituídos por agregados minerais do tipo granito, onde a taxa de deformação média decresceu de 250 para 155, portanto um acréscimo de resistência de aproximadamente 61%. No caso dos corpos de prova de basalto e calcáreo o decréscimo da taxa de deformação entre um dia e uma semana foi de 29% e 27%, respectivamente.

As taxas de deformações dos corpos de prova, de basalto e calcáreo entre uma semana e dois meses após a moldagem dos corpos de prova aumentaram 14% e 23% respectivamente.

Os maiores valores de deformações, para todas as datas de ensaio, foram observados no caso dos corpos de prova de granito e os menores para o basalto. As densidades dos agregados minerais de basalto e das misturas asfálticas com agregados de basalto são superiores as densidades dos outros agregados minerais e das outras misturas asfálticas. Ressaltar que os índices de vazios encontrados para todas as misturas asfálticas variaram entre 1 e 3%.

5.2.4. Conclusões

Os resultados dos ensaios mostram o ganho de resistência mecânica nos primeiros dias após a compactação das misturas asfálticas do tipo SMA, principalmente para o caso da utilização de agregados minerais de granito. Portanto não é recomendável que a mistura asfáltica do tipo SMA seja liberada ao tráfego logo após a compactação. No caso das misturas

asfálticas com agregados minerais de basalto e calcáreo nota-se também um acréscimo de resistência mecânica na primeira semana, porém entre uma semana e dois meses estas misturas apresentam um decréscimo de resistência quando expostas as condições ambientais adversas.

A variação na resistência destas misturas ocorre devido as alterações físico-químicas no ligante betuminoso. O ganho de resistência nos primeiros dias após a compactação se deve também à destilação e absorção seletiva dos maltenos por parte dos agregados minerais.

5.3. Ensaios de Afundamento em Trilha de Roda (Tracking Test)

Os ensaios de afundamento em trilha de roda na mistura asfáltica do tipo SMA, utilizada para os serviços de recapeamento do Autódromo de Interlagos, foram realizados com o simulador de tráfego tipo LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées) do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP.

5.3.1. Preparo das Amostras

Os ensaios foram realizados com amostras de agregados minerais da Pedreira Embu - Itapeti e ligante betuminoso modificado por polímeros fornecido pela Petrobrás.

A curva granulométrica, porcentagem em peso do material píteo, pó e filler, a porcentagem de ligante betuminoso (CAPFLEX) e a massa específica real média se encontram na Tabela II. A densidade máxima da mistura asfáltica, densidade Marshall, o índice de vazios e a relação betume / vazios calculados a partir de corpos de prova Marshall, para a mistura asfáltica SMA utilizada no Autódromo de Interlagos, estão indicadas na Tabela III. Nesta Tabela se encontram também as temperaturas de usinagem e rolagem.

TABELA II: Tipos de Materiais e Porcentagem em Peso da Composição da Mistura Asfáltica

MATERIAL	% EM PESO
Pedrisco 1	62,5
Pedrisco 0	12,1
Pó	11,2
Filler Calcário	7,5
CAPFLEX com 0,5% de DOPPING	6,7
Fibras de Celulose	0,5
Massa Específica Real Média	2,642 g / cm ³

O ligante betuminoso modificado por polímeros (CAPFLEX) é composto por 6% em peso de polímeros do tipo SBS (estireno-butadieno-estireno).

TABELA III: Parâmetros da Mistura Asfáltica e Temperaturas Recomendadas para Usinagem e Rolagem.

PARÂMETROS	VALORES
Densidade Máxima da Mistura Asfáltica	2,391 g / cm ³
Densidade Marshall	2,307 g / cm ²
Índice de Vazios	3,5 % em volume
Relação Betume / Vazios	81,1 %
Temperatura de Usinagem	175° C - 190° C
Temperatura de Rolagem	140° C - 175° C

Os materiais foram colocados em estufa a 170° C para aquecimento e misturados no simulador do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação.

A compactação das duas placas de mistura asfáltica foi realizada a 160° C, em mesa compactadora tipo LPC, simulando a compactação de campo por rolagem.

As placas apresentam as seguintes dimensões:

- 50 cm de comprimento;
- 18 cm de largura e
- 5 cm de espessura.

Foram ensaiadas 4 misturas asfálticas do tipo SMA, onde 3 misturas foram dosadas com teores de fibras de celulose de 0,3%, 0,5% e 0,7% em peso e com asfalto modificado por polímeros do tipo SBS e 1 mistura sem fibras e com cimento asfáltico de petróleo convencional, ou seja, CAP-20.

5.3.2. Ensaio

As placas moldadas na mesa compactadora foram levadas ao Simulador de Tráfego tipo LPC, após expostas à temperatura ambiente, e foram solicitadas numa temperatura constante de 60° C por 30.000 ciclos de carga correspondente a um eixo de 100 kN, ou seja, 50 kN sobre cada placa. A pressão do pneu é de 6 psi.

O afundamento de trilha de roda é medido em quinze pontos pré-fixados por norma francesa. O valor final é a média das quinze leituras. As leituras são realizadas após um número pré-fixado de passadas da carga do ensaio.

5.3.3. Resultados

A Tabela IV ilustra os resultados dos ensaios de afundamento, em termos de porcentagem de afundamento de trilha de roda, para as misturas asfálticas do tipo SMA com diferentes porcentagens de fibras de celulose e sem adição de fibras. Para as misturas asfálticas com fibras de celulose, utilizou-se asfaltos modificados por polímeros (CAPFLEX) e para a mistura sem fibras, cimento asfáltico de petróleo (CAP-20) convencional.

TABELA IV: Resultados dos Ensaios de Afundamento de Trilha de Roda das Misturas Asfálticas SMA

MISTURAS ASFÁLTICAS SMA	PORCENTAGEM DE AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA
0,3% de fibras	5,5%
0,5% de fibras	5,5%
0,7% de fibras	8,5%
sem fibra	13,0%

5.3.4. Conclusões

Os resultados obtidos para teores de fibra de 0,3% e 0,5% são satisfatórios, pois encontram próximos do limite de 5% para a porcentagem de afundamento de trilha de roda estipulado pelo grupo europeu de especificações (COST 333) para misturas asfálticas submetidas a tráfego intenso e pesado e empregadas como camada de rolamento.

Estes ensaios mostram também que não é necessária a adição de um teor superior a 0,5% de fibras, visto que não há um acréscimo em termos de resistência mecânica. Pelo contrário, no caso do ensaio em questão, houve um aumento na deformação permanente.

Quando da não utilização de fibras e emprego de asfaltos convencionais, nota-se um desempenho insatisfatório da mistura asfáltica, superando inclusive o limite estipulado de 10% para a porcentagem de afundamento de trilha de roda, para misturas asfálticas utilizadas como camada de rolamento e submetidas a tráfego médio ou leve. Neste caso, observa-se o escorrimento do ligante betuminoso, com maior concentração de ligante na parte inferior da placa de concreto asfáltico. Portanto este ensaio mostra a importância das fibras, que têm

função de reter o ligante betuminoso, visto que o mesmo é empregado em porcentagens elevadas variando entre 6.5 e 8.0% em peso nas misturas asfálticas do tipo SMA, além de proporcionar uma diminuição considerável nos valores de afundamento de trilha de roda (deformações permanentes).

5.4. Ensaios para a Determinação do Módulo de Resiliência e da Resistência à Tração por Compressão Diametral

5.4.1. Preparo dos Corpos de Prova

Os corpos de prova Marshall foram moldados de acordo com os tipos de materiais e respectivas porcentagens em peso na mistura asfáltica, presentes na Tabela II.

5.4.2. Ensaios

O ensaio para a determinação do módulo de resiliência, ensaio de tração indireta com carregamento repetido, simula o comportamento mecânico da mistura asfáltica, na zona onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é um ensaio de ruptura, onde o corpo de prova Marshall é posicionado horizontalmente e a carga é aplicada progressivamente, com uma velocidade de deformação de 0.8 ± 0.1 mm /s.

5.4.3. Resultados

Os resultados da média dos 3 corpos de prova para os ensaios de determinação do módulo de resiliência da mistura asfáltica SMA e dos 5 corpos de prova para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral se encontram na Tabela V.

TABELA V: Resultados dos Ensaios de Determinação do Módulo de Resiliência e da Resistência à Tração por Compressão Diametral

MISTURAS ASFÁLTICAS SMA	MÉDIA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MPa)	MÉDIA DA RESISTÊNCIA À TRACÃO (MPa)
0,3% de fibras	4.345	1,04
0,5% de fibras	3.970	0,95
0,7% de fibras	3.826	0,78
sem fibra	3466	0,86

5.4.4. Conclusões

Os resultados mostram o excelente desempenho da mistura asfáltica SMA em termos de resistência mecânica. As resistências à tração variaram de $7,8 \text{ kgf / cm}^2$ à $10,4 \text{ kgf / cm}^2$. Cabe ressaltar que aumentando o teor de fibras de celulose não houve acréscimo de resistência, pelo contrário, houve uma sensível redução nos valores de resistência à tração.

Quanto aos valores do módulo de resiliência pode-se notar uma pequena diminuição com um aumento no teor de fibras de celulose. Com a utilização de cimento asfáltico de petróleo convencional e sem adicionar fibras, houve uma diminuição sensível no módulo de resiliência.

6. CONCLUSÃO

A mistura asfáltica SMA é empregada com sucesso na Europa pelo fato de apresentar uma elevada flexibilidade e elasticidade quando da atuação de baixas temperaturas, retardando o processo de trincamento do revestimento asfáltico. O motivo do sucesso está ligado à elevada porcentagem de ligante betuminoso e a utilização de asfaltos modificados por polímeros, que propiciam melhor adesividade, maior resistência ao envelhecimento, maior ductibilidade e elevada resistência à fadiga entre outras vantagens.

Apesar da elevada porcentagem de ligante betuminoso na mistura asfáltica era de se esperar quando da atuação de elevadas temperaturas e tráfego pesado, que a mistura asfáltica apresentasse elevada deformação visco-plástica. Porém em função da elevada porcentagem de agregados graúdos na composição granulométrica, obtém-se um excelente desempenho mecânico da mistura asfáltica, comprovados pelos elevados valores dos ensaios realizados em laboratório, tais como: estabilidade Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, ensaio de afundamento em trilha de roda, ensaios dinâmicos de compressão uniaxial, etc.

Outra vantagem da mistura asfáltica SMA é a elevada coesão do sistema, diminuindo sensivelmente o fenômeno de desagregação por fadiga ou por oxidação do ligante betuminoso. A coesão do sistema é proporcionada pelo MASTIC, que é composto por ligante betuminoso modificado ou não por polímeros, filler, finos minerais e fibras naturais. A elevada porcentagem de MASTIC faz com que a mistura asfáltica apresente baixo índice de vazios, retardando o processo de oxidação e aumentando também a resistência da mistura devido ao grande envolvimento e intertravamento dos agregados minerais.

Diante do exposto e acrescido da experiência internacional no uso de misturas asfálticas esbeltas (≤ 4.0 cm) para rodovias e vias urbanas de tráfego pesado a muito pesado, sugere-se o emprego desta mistura em substituição aos concretos betuminosos usinados a quente, comumente utilizados no Brasil. Esta sugestão pode ser reforçada ainda mais devido a experiência acumulada, em especial, do engenheiro Mauro Beligni, que atuou tanto no setor de pesquisas realizadas na Universidade Técnica de Berlim e na Escola Politécnica de Zurique, como na restauração da Rodovia Hamburgo / Berlim.

O bom desempenho das misturas asfálticas SMA tanto em laboratório como em campo vem sendo divulgado em vários organismos rodoviários, congressos e simpósios internacionais.

Dentre as principais obras com a utilização da mistura asfáltica SMA podemos citar:

- Aeroporto Internacional de Copenhagen / Dinamarca;
- Autódromos de Silverstone / Inglaterra, Interlagos / Brasil, etc;
- Ponte interligando as ilhas da Dinamarca;
- Diversas Rodovias em vários países tais como: Alemanha, França, Inglaterra, Espanha, Holanda, Suécia, Dinamarca, África do Sul, USA, Austrália, Japão, Coréia e China.

Estamos convictos que com a introdução de misturas asfálticas do tipo SMA no Brasil, estaremos contribuindo para um avanço tecnológico no setor rodoviário, devido a maior durabilidade do SMA, mesmo com um custo inicial ainda superior as misturas convencionais. Os custos mais elevados se devem a uma porcentagem superior de cimento asfáltico de petróleo na mistura asfáltica, emprego normalmente de ligantes modificados por polímeros e adição obrigatória de fibras de celulose. Os custos de produção de uma mistura asfáltica do tipo SMA serão reduzidos a partir do momento em que os asfaltos modificados por polímeros passarem a ser empregados e comercializados em grande escala, aumentando a competitividade neste setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beligni M.: Zur Frage der Verkehrsfreigabe Frisch Hergestellter Asphaltsschichten. Technische Universität Berlin. Berlin, 1997.
- Huscek S.: Strassenerhaltung. Technische Universität Berlin. Berlin, 1998.
- Huscek S.: Strassenoberbau. Technische Universität Berlin. Berlin, 1996.
- EAPA: European Asphalt Pavement Association. Heavy Duty Surfaces: The Arguments for SMA. The Netherlands, 1998.