

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS SMA PRODUZIDAS COM LIGANTE ASFALTO-BORRACHA QUANTO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Cláudio Luiz Dubeux Neves Filho

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

Liédi Legi Bariani Bernucci

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica

José Leomar Fernandes Júnior

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

As misturas asfálticas do tipo SMA apresentam granulometria descontínua, composta por uma maior fração de agregados graúdos e uma rica massa de ligante/fíler (mastique). Possuem um esqueleto pétreo de alta estabilidade devido ao contato pedra-pedra, que proporciona uma maior resistência à deformação permanente. Geralmente, apresentam um teor de ligante asfáltico maior do que o das misturas de concreto asfáltico convencional, formando uma película asfáltica mais espessa. São utilizadas fibras para evitar o escorrimento do ligante durante as etapas de produção e lançamento e, geralmente, são usados asfaltos modificados por polímero. Esta pesquisa tem por objetivo comparar, por meio do ensaio de deformação permanente em simulador de tráfego, o comportamento de misturas SMA com diferentes tipos de ligante (asfalto convencional CAP 20, modificado por polímero e asfalto-borracha) com um concreto asfáltico convencional de granulometria contínua (Faixa C do DNER). Os resultados obtidos mostram que, em termos de deformação permanente, as misturas SMA apresentam melhor comportamento do que o concreto asfáltico convencional e que a mistura SMA com asfalto-borracha tem comportamento muito mais próximo do da mistura SMA produzida com um ligante modificado por polímero do que o da mistura SMA produzida com um asfalto convencional.

ABSTRACT

SMA is a gap-graded asphalt mixture with a large proportion of high quality coarse aggregate and a high content of mastic (binder/filler). The larger proportion of coarse aggregate provides a greater stone-to-stone contact, which results in a mixture more resistant to permanent deformation than the conventional Hot Mix Asphalt (HMA). The asphalt content is higher than the content typically used for a conventional HMA, which increases the film thickness. Fibers are used to prevent the drainage of the asphalt binder during the HMA production and placement, and polymer-modified asphalt cements are usually used. The behavior of SMA mixtures produced with different binders (conventional AC-20, polymer-modified, and asphalt-rubber), in terms of permanent deformation, is evaluated in a laboratory traffic simulator and compared to the behavior of a conventional dense-graded HMA. The results show that, in terms of permanent deformation, SMA mixtures are better than HMA mixtures and SMA mixtures produced with asphalt-rubber are much closer to SMA mixtures produced with polymer-modified binder than SMA mixtures produced with conventional asphalts.

1. INTRODUÇÃO

O SMA (*Stone Mastic Asphalt*, terminologia mais utilizada na Europa, ou *Stone Matrix Asphalt*, terminologia mais utilizada nos EUA) é um tipo de mistura asfáltica usada como revestimento de pavimentos rodoviários e de aeroportos, desenvolvida na Alemanha no final da década de 60 (NAPA, 2002).

A mistura asfáltica SMA apresenta granulometria descontínua, composta por uma maior fração (entre 70% e 80%) de agregados graúdos britados de alta qualidade, uma rica massa de ligante/fíler (10% passando na peneira nº 200), chamada de argamassa ou mastique, e aproximadamente 4% de volume de vazios. Essas misturas formam um esqueleto de alta estabilidade devido ao contato pedra-pedra e, geralmente, consomem de 1 a 1,5% a mais de cimento asfáltico quando comparadas às misturas de concreto asfáltico convencional.

Estudos mostram a necessidade do uso de modificadores nos ligantes para misturas SMA. Devido a um teor asfáltico mais elevado nessas misturas, há uma tendência da ocorrência de escorrimento do ligante. A inibição do escorrimento tem sido conseguida com o uso de fibras. Entre vários tipos (celulose, minerais etc.), as de celulose vêm sendo utilizadas com frequência e têm apresentado bons resultados (Brown, 1993; Lanchas, 1999).

O uso do ligante asfalto-borracha, produzido com borracha de pneus descartados, tem crescido bastante, motivado não apenas pelo seu benefício ambiental, como também pela melhora proporcionada às propriedades mecânicas do concreto asfáltico (Oda, 2000). Portanto, por se tratar de um tipo de ligante já em uso comercial, torna-se bastante clara a necessidade de se avaliar o seu comportamento quando utilizado em misturas SMA.

Deste modo, esta pesquisa tem por objetivo avaliar se o ligante asfalto-borracha possibilita misturas asfálticas SMA capazes de atender aos valores limites de aceitação. E, através de ensaios de laboratório, avaliar o comportamento das misturas SMA com diferentes tipos de ligante, comparando-as com um concreto asfáltico convencional de granulometria contínua (Faixa C do DNER), utilizado frequentemente no Brasil.

2. MISTURAS ASFÁLTICAS SMA

2.1. Materiais

2.1.1. Agregados

As misturas asfálticas SMA possuem uma curva granulométrica descontínua, onde prevalecem os agregados graúdos, com uma porcentagem em torno de 70%. Há, portanto, um maior contato pedra-pedra, sendo recomendado o uso de agregados britados de alta qualidade, com uma boa microtextura e sempre virgens, ou seja, não podem ser provenientes de revestimentos reciclados. Na maioria dos países da Europa é exigido o uso de agregados 100% britados (EAPA, 1998).

Para garantir a estabilidade da mistura, tem-se uma argamassa (mastique) rica em fíler e asfalto. Nas misturas SMA, o teor de fíler (material passado na peneira #200, de 0,075 mm) situa-se entre 8% e 13%, um pouco superior ao de um concreto asfáltico convencional. A Figura 1 dá uma idéia do esqueleto pétreo de uma mistura SMA, com o mastique envolvendo os agregados e proporcionando estabilidade, comparado a um concreto asfáltico convencional de distribuição granulométrica contínua (CAUQ).

A granulometria de uma mistura SMA é, normalmente, determinada pelo diâmetro máximo nominal (uma abertura de peneira maior do que a primeira peneira que retém mais de 10%) e, às vezes, pela peneira de ponto de quebra, definida como o diâmetro da peneira que separa as proporções relativas dos agregados graúdos e finos (Lynn *et al.*, 1999).

Na Europa, os tipos de SMA mais utilizados são 0/5 (agregados com diâmetro inferior a 5 mm), 0/6, 0/8 e 0/11, sendo este último o mais comumente usado para vias de tráfego pesado. Nos EUA, as faixas granulométricas têm como diâmetro máximo nominal (DMN) do agregado: 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm e as porcentagens passadas são em volume (EAPA, 1998; Brown e Cooley Jr., 1999).

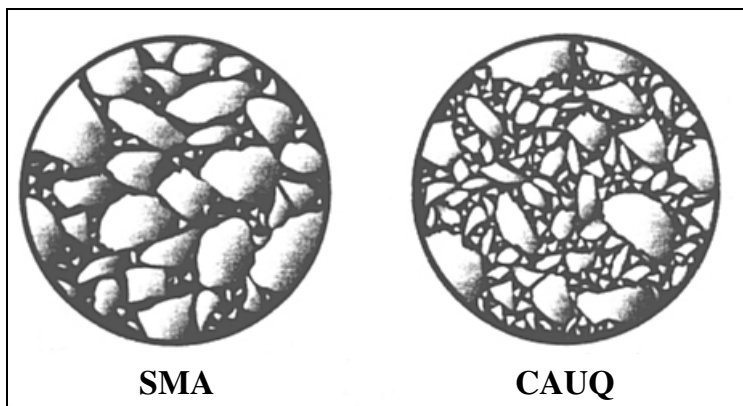


Figura 1: Esqueleto pétreo de uma mistura SMA e de um CAUQ (NAPA, 2002)

2.1.2. Ligante asfáltico

As misturas SMA possuem uma película de ligante asfáltico mais espessa, com teor entre 1% e 1,5% superior ao de concretos asfálticos convencionais, com o objetivo de evitar o desgaste dos agregados causado pelo contato pedra-pedra. O teor de ligante mais elevado faz com que seja necessário o uso de aditivos, geralmente polímeros e/ou fibras, buscando-se um aumento na consistência do ligante asfáltico.

O uso de ligantes modificados por polímeros é justificado por algumas razões: aumento da resistência à deformação permanente, em virtude da maior viscosidade sob elevadas temperaturas, aumento da vida útil do revestimento e redução da necessidade de inibidores de escorrimento, embora estes ainda sejam necessários para algumas misturas asfálticas.

2.1.3. Uso do ligante asfalto-borracha

Ao mesmo tempo em que ocorre o crescimento da frota de veículos, cresce também o número de pneus descartados. Este tipo de resíduo é bastante problemático do ponto de vista ambiental, o que justifica a busca de soluções para a sua disposição final. Os objetivos da adição de borracha de pneus em ligantes asfálticos são minimizar o problema da disposição de pneus usados e melhorar o desempenho dos pavimentos mediante aumento da rigidez a elevadas temperaturas (reduzindo a deformação permanente nas trilhas de roda), aumento da flexibilidade (retardando o aparecimento de trincas) e aumento da impermeabilização proporcionada pelos revestimentos asfálticos.

A borracha de pneus usados tem sido utilizada na pavimentação e, particularmente, nas misturas asfálticas. Nesse caso, o seu uso se dá de duas maneiras: o “processo seco”, quando as partículas de borracha triturada substituem parte dos agregados na mistura e, após a adição do ligante, formam o *concreto asfáltico modificado com adição de borracha*; e o “processo úmido”, onde a borracha de pneus moída é incorporada ao cimento asfáltico antes da adição do agregado, formando o *ligante asfalto-borracha*.

O obstáculo ao emprego dessa tecnologia tem sido, principalmente, de origem econômica, pois a trituração dos pneus ainda representa um custo relativamente alto. Porém, à medida que os trabalhos de pesquisa apresentarem resultados sobre a viabilidade técnica e a sociedade se

conscientizar do elevado custo ambiental da disposição de pneus inservíveis, certamente o uso do ligante asfalto-borracha se disseminará.

Pesquisa realizada por Oda (2000) concluiu que o ligante asfalto-borracha pode ser benéfico aos pavimentos, melhorando as propriedades de resistência ao acúmulo de deformação permanente (maior rigidez a elevadas temperaturas) e de resistência à formação de trincas por fadiga (maior elasticidade). Além disso, as amostras ensaiadas também apresentaram suficiente resistência à formação de trincas por contração térmica.

2.1.4. Fibras

Fibras são adicionadas às misturas SMA para se evitar o escorrimento do ligante durante o processo de construção (produção e aplicação da mistura), especialmente durante o transporte. As fibras, geralmente, não têm influência sobre o desempenho da mistura depois da compactação, embora possibilitem um maior teor de ligante, o que gera uma película mais espessa ao redor do agregado, retardando a oxidação, a penetração de umidade e a separação dos agregados. Essas vantagens servem para proteger o concreto asfáltico do desgaste.

As fibras podem ser de vidro ou celulose e são fornecidas soltas ou peletizadas. As fibras de celulose peletizadas podem ser facilmente adicionadas à mistura asfáltica e já são de uso freqüente em misturas SMA no Estado de São Paulo, com bons resultados, além de se ter registro de sucesso em pesquisas realizadas nos EUA (estados de Michigan, Wisconsin e Flórida) e no Canadá (província de Ontário). Segundo Lanchas (1999), as fibras de celulose são o melhor veículo para o asfalto, pois são quimicamente inertes, resistentes a ácidos diluídos e soluções alcalinas e totalmente inócuas do ponto de vista fisiológico e toxicológico. Além disso, são produzidas de fontes renováveis.

No processo de mistura de um concreto asfáltico, as fibras peletizadas são adicionadas à mistura seca, com os agregados já aquecidos. Com a colocação do ligante e início do processo de mistura, as fibras soltam-se e espalham-se por toda a mistura. O asfalto que as envolve mistura-se ao ligante sem qualquer problema.

Em muitos casos, a determinação do teor de fibras se baseia na experiência. Várias publicações sugerem o teor de 0,3% a 0,5%. Contudo, existem ensaios que verificam se as fibras são suficientes para inibir o escorrimento do ligante, como os utilizados, por exemplo, na Holanda e na Alemanha (*Schellenberg test*) e nos EUA (AASHTO T-305/97 - *Draindown Sensitivity*).

Pesquisa realizada por Brown (1993) mostra que a presença ou teor de fibras não altera as propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas SMA. Foram produzidas misturas asfálticas SMA com diferentes teores de fibras de celulose (0,0%, 0,2 %, 0,3% e 0,4%), avaliadas através de propriedades volumétricas e mecânicas [GSI (*gyratory shear index*), tensão de cisalhamento do GTM (*gyratory test machine*) e compressão axial confinada (*creep* confinado)]. A variação do teor de fibras não teve influência em nenhuma das propriedades avaliadas, contribuindo apenas para a inibição do escorrimento de ligante.

Beligni *et al.* (2000), no entanto, utilizaram um teor de fibras mais elevado e seus resultados mostraram que o excesso de fibras piorou as propriedades mecânicas da mistura (resistência à tração por compressão diametral e à deformação permanente no simulador de tráfego LCPC).

Tendo em vista que uma pequena variação no teor de fibras não traz grande conseqüência nas propriedades mecânicas, apenas no escorrimento, e que apenas quando se varia de forma exagerada (por excesso ou ausência) ocorre influência nas propriedades mecânicas, a dosagem do teor de fibras tem como objetivo a redução dos custos, buscando uma quantidade mínima para impedir o escorrimento.

2.2. Características funcionais

Além de ter uma finalidade estrutural, por suportar as cargas provenientes do tráfego, a camada de revestimento também deve atender às condições de segurança e conforto, com adequada resistência à derrapagem (coeficiente de atrito), baixo nível de irregularidade longitudinal, baixo nível de ruído e boa visibilidade sob qualquer condição climática.

As misturas SMA têm uma macrotextura mais rugosa, ocasionada pela ausência de agregados médios. Quanto à microtextura, um revestimento com mistura SMA, quando recém construído, tem um filme de ligante mais espesso na superfície, por isso é necessário um certo período de tráfego para desgastar o filme do ligante e desenvolver uma boa microtextura. Em muitos países da Europa há a prática de aplicação de areia proveniente de britagem (0 a 2 mm) para evitar uma espera pela ação do tráfego e trazer segurança ao usuário já no início da vida em serviço da camada (EAPA, 1998).

Nas misturas asfálticas SMA, devido à forte estrutura dos agregados, o acabamento inicial da pavimentadora tem maior influência sobre a qualidade do rolamento, limitando o efeito da compactação adicional pelo rolo. Conseqüentemente, uma mistura asfáltica SMA pode alcançar níveis maiores de conforto se comparada a um concreto asfáltico convencional.

Um dos ganhos apresentados pelas misturas SMA é a redução dos ruídos do tráfego, ocasionando maior conforto aos usuários e benefício ambiental (redução da poluição sonora). Isto se explica pelo fato de que a macrotextura mais rugosa tem maior número de faces e arestas e, conseqüentemente, uma maior superfície para absorção do som (EAPA, 1998; Schmiedlin, 1998).

Uma macrotextura mais rugosa significa mais faces não paralelas à superfície da camada de rolamento, resultando numa redução do reflexo da luz proveniente dos veículos e no borramento de água (*spray*) dos pneus, aumentando, assim, a visibilidade e trazendo mais segurança para os usuários (Lanchas, 1999; EAPA, 1998).

2.3. Características estruturais

2.3.1. Resistência à deformação permanente em trilha de roda

A ocorrência acentuada desse defeito tem duas razões principais: mau dimensionamento das camadas do pavimento, quando o acúmulo de deformações situa-se no subleito; deformações nas misturas asfálticas com baixa resistência ao cisalhamento, que depende da susceptibilidade térmica do ligante asfáltico e do esqueleto dos agregados minerais.

As misturas SMA têm apresentado uma maior resistência à deformação permanente quando comparadas aos concretos asfálticos convencionais, como mostram várias pesquisas no Brasil, na Europa e na América do Norte (Reis, 2002; Mourão, 2003; EAPA, 1998; NAPA, 2002).

2.3.2. Resistência ao aparecimento e propagação de trincas por fadiga

Por ter um maior teor de ligante e, conseqüentemente, uma película asfáltica mais espessa, as misturas SMA têm apresentado uma boa resistência ao aparecimento e propagação de trincas por fadiga, causadas pela repetição da ação do tráfego ao longo da vida em serviço do pavimento. Segundo Schmiedlin (1998), resultados de pesquisas em trechos construídos no estado de Wisconsin (EUA) indicaram, de uma maneira geral, que as misturas SMA tiveram desempenho melhor que o concreto asfáltico convencional.

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Programação laboratorial

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar, com base em resultados de ensaios de laboratório (deformação permanente no simulador de tráfego tipo LCPC), misturas asfálticas SMA com diferentes tipos de ligante: CAP 20, sem modificador; asfalto modificado por polímero SBS; e, particularmente, asfalto-borracha. É feita a comparação com uma mistura de referência, de granulometria contínua (Faixa C do DNER) e com ligante convencional (CAP 20, sem modificador). As quatro misturas asfálticas ensaiadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Nome e composição das misturas asfálticas avaliadas

Nome	Granulometria	Tipo de ligante
CAUQ-AC	Faixa C (DNER)	CAP 20
SMA-AC	SMA DMN = 12 mm (AASHTO)	CAP 20
SMA-AP	SMA DMN = 12 mm (AASHTO)	Asfalto modificado por polímero
SMA-AB	SMA DMN = 12 mm (AASHTO)	Asfalto-borracha

3.2. Materiais

3.2.1. Agregados

Os agregados utilizados são provenientes da pedreira Bandeirantes, localizada próxima à cidade de São Carlos. Trata-se de um agregado basáltico britado, cujo filer é proveniente do peneiramento do pó de pedra. Essa fonte de agregado foi escolhida por ter sido utilizada em diversas pesquisas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP (STT-EESC-USP) e em muitas obras rodoviárias da região de São Carlos-SP.

O material foi submetido ao ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles, tendo como resultado 28% de perda. Foi realizado também o ensaio de Massa Específica dos Sólidos, obtendo-se o resultado de 2,872 g/cm³, válido para todas as frações de agregado (gráudo, fino e filer). O material disponível foi peneirado nas peneiras de abertura de 19,1 mm (3/4"), 12,7 mm (1/2"), 9,52 mm (3/8"), 4,76 mm (# 4), 2,00 mm (# 10), 0,42 mm (# 40), 0,177 mm (# 80) e 0,074 mm (# 200). Todo o material retido na peneira de 2,00 mm foi lavado.

Os materiais separados nos intervalos dessas peneiras foram combinados para a obtenção da quantidade necessária para os corpos de prova e para as placas (ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego LCPC). Foram escolhidas duas curvas granulométricas (Figura 2):

- Centro da Faixa C do DNER: utilizado para a mistura de referência (CAUQ-AC), devido ao grande uso dessa graduação em misturas asfálticas densas;
- Centro da faixa de SMA (especificação AASHTO MP-8), com diâmetro máximo nominal de 12,5 mm: graduação utilizada para concreto asfáltico destinado a camadas de rolamento com espessura entre 4 e 8 centímetros.

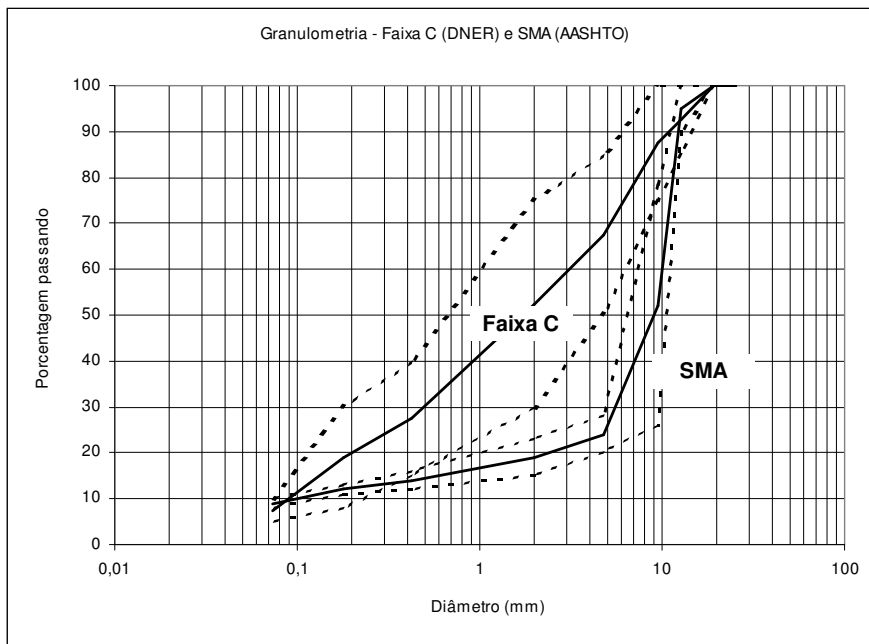


Figura 2: Curvas granulométricas do CAUQ (Faixa C – DNER, 1997) e do SMA (DMN = 12,5 mm – AASHTO, 2000)

3.2.2. Ligante asfáltico

Foram utilizados um cimento asfáltico convencional (CAP 20) e um asfalto modificado por polímero (5% a 6% de polímero SBS, nome comercial Betuflex B 80/60), além do asfalto-borracha, produzido com um teor de 18% de borracha de pneus moída (passada na peneira #80, de 0,175 mm), misturada com cimento asfáltico a uma temperatura acima de 200°C, durante uma hora. Para evitar a introdução de fatores não-controlados, procurou-se trabalhar com ligantes de uma mesma fonte, todos eles doados pela empresa Ipiranga Asfaltos.

No caso do cimento asfáltico convencional (CAP 20), as temperaturas de mistura e compactação foram determinadas a partir da norma DNER ME-043/95, que estabelece intervalos de viscosidade do ensaio Saybolt-Furol. Já para os ligantes modificados (asfalto com polímero e asfalto-borracha), foram utilizados resultados do ensaio de viscosidade aparente. Nesse caso, as viscosidades do ligante para mistura e compactação do concreto asfáltico no ensaio de dosagem Marshall foram, respectivamente, de 200 cP e 300 cP (ABNT - NBR 12891).

A partir dos resultados de caracterização dos ligantes asfálticos CAP 20, asfalto com polímero e asfalto-borracha são apresentados os intervalos de temperatura para mistura e compactação do concreto asfáltico (Tabela 2).

Tabela 2: Temperatura para mistura e compactação das misturas asfálticas

	CAP 20	Asfalto com polímero	Asfalto-borracha
Mistura	151°C a 156°C	170°C a 174°C	167°C a 171°C
Compactação	139°C a 144°C	165°C a 169°C	164°C a 168°C

3.2.3. Fibras

Foram utilizadas fibras de celulose, nome comercial VIATOP 66, com teor em peso de 0,3 % do total da mistura, doadas pela empresa Ecofibras. Trata-se de uma fibra de celulose envolta em asfalto e na forma peletizada (grãos). O número 66 indica que contém 66% de fibra e 34 % de asfalto.

3.3. Avaliação da resistência ao acúmulo de deformação permanente em trilha de roda

Uma grande preocupação ao se projetar um revestimento asfáltico é avaliar e garantir uma adequada resistência ao acúmulo de deformação permanente. Neste trabalho, utiliza-se um equipamento simulador de tráfego LCPC (*Laboratoire Central de Ponts e Chaussées*), do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP (LTP-EPUSP).

São moldadas placas de concreto asfáltico produzidas com o teor asfáltico de projeto, mediante amassamento em uma mesa compactadora tipo LCPC. As placas têm 18,0 cm de largura, 50,0 cm de comprimento, 5,0 cm de altura e pesam entre 11 e 12 kg, dependendo da densidade aparente da mistura asfáltica (AFNOR, 1991a).

O ensaio é realizado a uma temperatura de 60°C e faz-se leituras do afundamento em 15 pontos da superfície da placa após 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos. A deformação permanente é a razão entre a média aritmética dos afundamentos, em milímetros, e a espessura inicial da placa, também em milímetros (AFNOR, 1991b).

Traça-se, então, em um gráfico bi-logaritmo, a deformação permanente em função do número de ciclos. A norma francesa NF P 98-253-1 fixa em 5% o limite máximo de deformação permanente, após 30000 ciclos, para revestimento de pavimentos submetidos a tráfego muito pesado, e 10% para tráfego médio e leve.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Seleção do teor asfáltico de projeto

O teor asfáltico de projeto foi selecionado a partir de dosagem Marshall para as misturas de CAUQ convencional (mistura de referência), utilizando CAP 20, e de SMA. No caso das misturas SMA, primeiramente foi feita uma dosagem Marshall com CAP 20, porém os resultados não foram satisfatórios. O processo de usinagem e compactação dos corpos de prova foi revisto e foram realizadas novas dosagens Marshall, utilizando asfalto modificado por polímero e asfalto-borracha.

Os resultados da dosagem Marshall ficaram dentro do esperado. Para a mistura de referência, com graduação no centro da Faixa C (DNER), cimento asfáltico convencional e para um volume de vazios de 4%, o teor asfáltico correspondente foi de 5,3%, valor adotado por atender a todas as exigências da especificação DNER-ES 313/97.

O valor do teor asfáltico de projeto selecionado para as misturas SMA foi de 6,5 %, correspondente a um volume de vazios bem próximo de 4% nas duas dosagens realizadas, com asfalto-polímero e com asfalto-borracha. A proximidade dos resultados de volume de vazios motivou a escolha de um teor único para as três misturas de SMA avaliadas neste trabalho (6,5 %), que também atende a todas as exigências da especificação DNER-ES 313/97.

Pôde-se calcular, então, a espessura média da película de ligante, considerando-se os grãos esféricos e com mesmo diâmetro, igual ao valor médio do intervalo entre peneiras. No caso da mistura de referência, a espessura foi de 7,4 μm , enquanto que para as misturas SMA foi de 11,3 μm , aproximadamente 50 % maior que a do concreto asfáltico convencional.

4.2. Resistência a danos causados por umidade induzida

O ensaio AASHTO T-283/99 (*Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage*) foi realizado no LTP-EPUSP, com corpos de prova da mistura de referência (CAUQ-AC), com teor asfáltico de projeto (5,3%), porém com volume de vazios entre 6% e 8%. Para se conseguir isso, os corpos de prova foram compactados com menor energia, em torno de 18 golpes por face.

Os corpos de prova submetidos ao acondicionamento apresentaram resistência à tração média de 1,253 MPa, enquanto que o grupo sem acondicionamento apresentou média de 1,205 MPa. Conseqüentemente, a relação de resistência à tração foi de 103,9 %. Os valores das resistências à tração ficaram bastante próximos, seja dos corpos de prova que foram submetidos ou não ao condicionamento, indicando que não houve perda de adesividade nas amostras com a indução de água. Portanto, pode-se concluir que a adesividade entre o agregado usado neste trabalho e o CAP 20 é satisfatória. Como isso ocorreu para a mistura mais susceptível à perda de adesividade (CAUQ-AC), constatou-se de que não havia a necessidade de realizar o ensaio para as outras misturas, já que a avaliação da adesividade não é o enfoque deste trabalho.

4.3. Deformação permanente em trilha de roda

Todas as misturas asfálticas, após usinadas, foram colocadas na estufa, para que fosse feito o envelhecimento de curto prazo, preconizado pelo procedimento AASHTO PP-2 (*Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*). Deve-se destacar que as misturas SMA, principalmente a mistura com CAP convencional (SMA-AC), deixavam a impressão de excesso de ligante aderido ao recipiente do misturador.

Foram compactadas, na mesa compactadora LCPC, duas placas para cada mistura avaliada. O processo de compactação ocorreu de forma satisfatória, minimizando a impressão de excesso de ligante percebida durante a usinagem. Depois de compactadas, pôde-se observar a macrotextura das placas. As misturas SMA apresentavam uma macrotextura mais rugosa que a mistura de referência. Pôde-se notar, também, que os agregados graúdos ficaram recobertos com ligante, o que confirma a necessidade do tráfego inicial para desenvolver a microtextura.

As misturas asfálticas foram ensaiadas no simulador de tráfego LCPC, a uma temperatura de 60°C, sendo realizadas leituras dos afundamentos em 15 pontos da superfície das placas, a 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos, onde cada ciclo corresponde a duas passadas do pneu. A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios, bem como o coeficiente angular da curva de deformação permanente. Quanto menor for esse parâmetro, menor a potencialidade de um concreto asfáltico desenvolver altos valores de deformação permanente.

Tabela 3: Resultados do ensaio de deformação permanente em trilha de roda no simulador de tráfego LCPC

Misturas		CAUQ-AC	SMA-AC	SMA-AP	SMA-AB
Deformação	1.000 ciclos	2,25 %	4,76 %	3,85 %	3,95 %
	10.000 ciclos	5,57 %	7,03 %	4,94 %	5,53 %
	30.000 ciclos	8,85 %	9,85 %	5,39 %	5,98 %
Coeficiente Angular		0,4029	0,1999	0,1194	0,1529

Com base nos resultados obtidos, pode-se verificar o melhor desempenho das misturas asfálticas SMA quanto à resistência à deformação permanente em trilhas de roda. A mistura de referência (CAUQ-AC) teve um valor de deformação a 30.000 ciclos bastante próximo da mistura SMA-AC, porém o coeficiente angular foi bem mais elevado.

As misturas SMA com outros tipos de ligante (asfalto com polímero e asfalto-borracha) tiveram os menores valores de deformação permanente e os menores valores de coeficientes angulares. Constata-se que a grande diferença entre os coeficientes angulares das curvas de deformação permanente é função, principalmente, do tipo de mistura (CAUQ ou SMA), ou seja, pela estrutura de agregados minerais. Por outro lado, a influência do tipo de ligante é verificada pela posição relativa das curvas, que mantêm um certo paralelismo, com menores valores de deformação permanente para o asfalto com polímero e para o asfalto-borracha (Figura 3).

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento de misturas asfálticas SMA por meio de ensaios de laboratório, comparando com um concreto asfáltico convencional e dando maior destaque à mistura produzida com ligante asfalto-borracha.

No ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego LCPC, as três misturas SMA apresentaram coeficiente angular muito próximo, embora a mistura com asfalto modificado por polímero tenha tido menor deformação a 30.000 ciclos, resultado já esperado devido à ação dos modificadores no desempenho do concreto asfáltico. A mistura SMA com asfalto-borracha teve um desempenho igual ao da mistura com polímero até os 1.000 ciclos da simulação e, mesmo aos 30.000 ciclos, a diferença entre ambas foi de apenas 0,6 % de deformação (0,3 mm de afundamento). Diferença de desempenho tão pequena motiva o uso do ligante asfalto-borracha para misturas do tipo SMA, pois além do custo inferior ao do ligante modificado por polímero, a utilização desse tipo de ligante em obras de pavimentação é uma alternativa para a disposição ambientalmente adequada de pneus descartados.

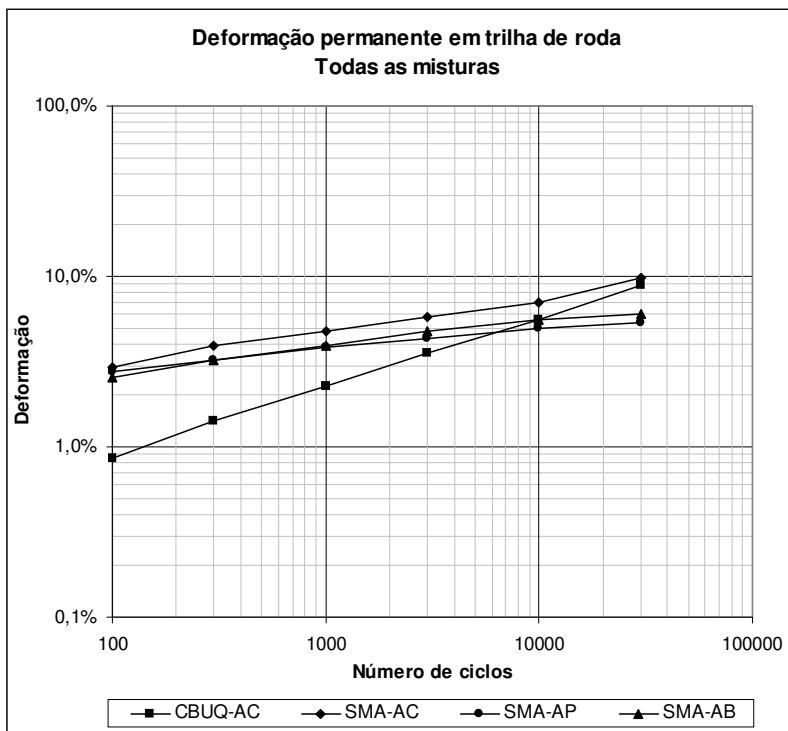


Figura 3: Deformação permanente em trilha de roda para todas as misturas ensaiadas

Conforme verificado neste trabalho, as misturas SMA possuem uma película asfáltica mais espessa, da ordem de 50% maior do que a de uma mistura com granulometria contínua, o que é uma vantagem quanto à inibição do desgaste. Por outro lado, têm uma maior susceptibilidade ao escorrimto do ligante, que é evitado com a utilização de fibras.

As misturas asfálticas SMA produzidas neste trabalho foram dosadas para um volume de vazios próximo de 4 %, determinado através do ensaio Marshall. Sugere-se a verificação do teor ótimo de ligante por meio de outros ensaios, como, por exemplo, o ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego LCPC e o compactador giratório da Especificação Superpave.

Para misturas asfálticas SMA com ligante asfalto-borracha, pode-se estudar seu comportamento com diferentes tipos de asfalto-borracha, variando-se, por exemplo, o teor e a graduação da borracha. Sugere-se, também, a investigação do teor de fibras necessário para evitar o escorrimto em função da viscosidade do ligante, pois o ligante asfalto-borracha é muito mais viscoso e poderia requerer um menor teor de fibras.

Agradecimento

À FAPESP pelo apoio financeiro concedido para a realização do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1999). *PP-2 – Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*. American Association of State Highways and Transportation Officials.
- AASHTO (1999). *T-283 – Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage*.
- AASHTO (1997). *T-305 – Draindown Sensitivity*.
- AASHTO (2000). *MP-8 – Specification for Designing SMA*.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1993). *NBR:12891: Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall: Procedimento*. Rio de Janeiro.
- AFNOR (1991a). *Preparation des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2: Compactage des plaques. NF P 98-250-2*. Association Française de Normalisation, Paris, França.
- AFNOR (1991b). *Deformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 1: Essai d'orniérage. NF P 98-253-1*. Association Française de Normalisation, Paris, França.
- Beligni, M.; Villibor, D. F.; Cincere, J. R. (2000). Mistura Asfáltica do Tipo SMA (Stone Matrix Asphalt): Solução para Revestimentos de Pavimentos de Rodovias e Vias Urbanas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32., 2000. *Anais...*, Brasília, DF.
- Brown, E. R. (1993). Evaluation of Stone Mastic Asphalt Used in Michigan in 1991. *Transportation Research Record*, Washington, D. C., n. 1427, p. 54-60.
- Brown, E. R. e Cooley Jr., L. A. (1999). Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements. NCHRP Report 425. *Transportation Research Board*, Washington, D. C., EUA.
- DNER (1995). *ME 043/95 – Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1997). *Especificação de serviço DNER-ES 313/97 Pavimentação - concreto betuminoso*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- EAPA – European Asphalt Paving Association (1998). *Heavy Duty Surfaces: The Arguments for SMA*. Holanda.
- Lanchas, S. (1999). *Características del Stone Mastic Asphalt SMA*. In: CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO, 10., 1999, Sevilla, Espanha.
- Lynn, T. A.; Brown, E. R. e Cooley JR., L. A. (1999). Evaluation of Aggregate Size Characteristics in Stone Matrix Asphalt and Superpave Mixtures. *Transportation Research Record*, Washington, D. C., n. 1681, p. 19-27.
- Mourão, F. A. L. (2003). *Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA*. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- NAPA – NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (2002). Designing and Constructing SMA Mixtures – State-of-the-Practice. Quality Improvement Series 122. Lanham, MD, EUA.
- Oda, S. (2000). *Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- Reis, R. M. M. (2002). *Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado*. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.
- Schimiedlin, R. B. (1998). Stone Matrix Asphalt – The Wisconsin Experience. *Transportation Research Record*, Washington, D. C., n. 1616, p. 34-41.

Endereço dos autores:

Departamento de Transportes
Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Av. Trabalhador Sãocarlense, 400
13566-590 – São Carlos – SP – Brasil
Tel.: (16) 3373-9598; Fax: (16) 3373-9602; e-mail: leomar@sc.usp.br

Departamento de Transportes
Escola Politécnica – USP
Tel.: (11) 3091-5485; (11) 3091-6090; e-mail: liedt@usp.br