

## A IMPORTÂNCIA DO FÍLER PARA O BOM DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

**Vivian Silveira dos Santos Bardini**

**Luis Miguel Gutiérrez Klinsky**

**José Leomar Fernandes Jr.**

Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP,  
Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos, SP,  
e-mails: vibardini@yahoo.com.br; chiligk@hotmail.com; leomar@sc.usp.br

### Resumo

Este trabalho tem por objetivo contribuir para o melhor entendimento dos efeitos do filer mineral sobre as propriedades de misturas asfálticas densas, embora há muito tempo já se tenha reconhecido que o filer tem papel importante no comportamento de misturas asfálticas, por preencher os vazios entre os agregados graúdos nas misturas e alterar as propriedades dos ligantes asfálticos ao atuar como parte ativa do mástique (combinação de ligante asfáltico, filer e ar). Na dosagem, o mástique influencia a lubrificação das partículas de agregados maiores e afeta os vazios do agregado mineral, as características de compactação e o teor ótimo de ligante asfáltico. A qualidade do mástique influencia todas as respostas mecânicas das misturas asfálticas, assim como sua trabalhabilidade. O processo de fadiga, fenômeno afetado pelo desenvolvimento e crescimento de microfissuras no mástique, está fortemente relacionado às características do ligante asfáltico, às propriedades do filer e à interação físico-química entre os dois, que é afetada, principalmente, pela finura e características de superfície do filer. A rigidez do mástique influencia as tensões desenvolvidas e a resistência à fadiga a temperaturas intermediárias, bem como afeta a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica a altas temperaturas e as tensões desenvolvidas e a resistência ao trincamento térmico.

*Palavras-chave:* filer mineral, ligante asfáltico, mástique, mistura asfáltica.

### Introdução

Os sistemas de transportes são elementos estruturantes da vida econômica e social dos países, proporcionando o deslocamento de cargas e de passageiros. Dentre os elementos que compõem os sistemas de transportes do Brasil, o modo rodoviário e a infraestrutura de estradas têm papel fundamental, pois representam 62% do transporte de cargas e 96% do transporte de passageiros (CNT, 2008). Assim, justifica-se o interesse pelo desenvolvimento de materiais mais resistentes para uso em pavimentos rodoviários.

Os principais defeitos estruturais dos pavimentos asfálticos são as deformações permanentes, encontradas nas trilhas de roda, e as trincas por fadiga, cada um associado a uma etapa da vida em serviço do pavimento. As deformações permanentes geralmente aparecem nos anos iniciais, antes do enrijecimento que acompanha o processo de envelhecimento dos pavimentos asfálticos, causadas por consolidação ou ruptura plástica por cisalhamento, podendo ser, também, decorrentes das solicitações de cargas elevadas associadas a altas temperaturas. Já as trincas por fadiga manifestam-se normalmente quando o pavimento asfáltico está mais envelhecido, após ter sido submetido às cargas cíclicas do tráfego, podendo ocorrer, também,

quando não se utilizam materiais adequados ou o projeto correto.

Com a finalidade de minimizar os efeitos do tráfego e do clima e o aparecimento dos defeitos no pavimento, muitas pesquisas têm procurado garantir o comportamento adequado dos materiais que compõem as misturas asfálticas, assim como sua interação, para que as propriedades especificadas sejam alcançadas.

Já há muito tempo se tem reconhecido o importante papel do filer no comportamento de misturas asfálticas. O filer preenche os vazios entre os agregados graúdos nas misturas e altera as propriedades dos ligantes asfálticos, pois age como parte ativa do mástique (combinação de ligante asfáltico, filer e ar). Na dosagem, o mástique influencia a lubrificação das partículas de agregados maiores e afeta os vazios do agregado mineral, as características de compactação e o teor ótimo do ligante asfáltico.

A qualidade do mástique influencia todas as respostas mecânicas das misturas asfálticas, assim como sua trabalhabilidade. O processo de fadiga, fenômeno afetado pelo desenvolvimento e crescimento de microfissuras no mástique, está fortemente relacionado às características do ligante asfáltico, às propriedades do filer e à interação físico-química entre os dois, que é afetada, principalmente,

pela finura e características de superfície do fíler. A rigidez do mástique influencia as tensões desenvolvidas e a resistência à fadiga a temperaturas intermediárias, bem como afeta a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica a altas temperaturas e as tensões desenvolvidas e a resistência ao trincamento a baixas temperaturas.

Esta revisão tem por objetivo contribuir para melhor entendimento dos efeitos do fíler mineral sobre as propriedades das misturas asfálticas densas, pois muito ainda há para ser estudado a respeito da contribuição do mástique resultante da mistura fíler e ligante asfáltico para o bom ou mau desempenho de um pavimento asfáltico em serviço.

### Papel do Fíler em Misturas Asfálticas

Fíler ou material de enchimento constitui um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura asfáltica, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada (DNER – EM 367/97). Santana (1995) define fíler de maneira mais geral, ou seja, como sendo um material constituído de partículas minerais provenientes dos agregados graúdos e/ou miúdos empregados na mistura asfáltica, ou de outras fontes, como, por exemplo, pó calcário, cal hidratada, cimento Portland, etc., que pode melhorar o comportamento reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, desde que obedecidos os limites para granulometria e plasticidade.

O fíler é utilizado como material de enchimento dos vazios entre agregados graúdos e miúdos, contribuindo para fechamento da mistura, modificando a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento. Em decorrência do pequeno tamanho das partículas e de suas características de superfície, o fíler age como material ativo, manifestado nas propriedades da interface fíler/ligante asfáltico, não sendo, portanto, apenas um material inerte, como é apresentado na definição geral do DNER EM 367/97.

Santana (1995) também discute dois pontos de vista sobre a influência do fíler:

- Mástique com fíler total: segundo Ruiz, em um mástique bem dosado todas as partículas do fíler ficam em suspensão no asfalto, ou seja, suas partículas não se tocam, formando um mástique homogêneo.
- Mástique com fíler ativo: segundo Puzinauskas, parte do fíler ainda se comporta como um agregado muito fino, com suas partículas se tocando, formando um esqueleto mineral, e a outra fica em suspensão no ligante, formando um mástique.

Craus *et al.* (1978), seguindo a linha defendida por Puzinauskas, também considera que o fíler tem dois caminhos de atuação nas misturas asfálticas densas:

- As partículas maiores do fíler são parte do agregado mineral e preencherão os vazios e interstícios dos

agregados graúdos, promovendo o contato pontual entre as partículas maiores e dando maior resistência às misturas.

- As partículas menores do fíler se misturam com o ligante asfáltico, aumentando sua consistência e cimentando as partículas maiores, ou seja, formando o mástique.

A densificação e a rigidez de uma mistura asfáltica são afetadas pela porcentagem de material passante na peneira nº 200 (0,075 mm de abertura), mas também são influenciadas pela forma, natureza e granulometria das partículas abaixo desse diâmetro (Motta & Leite, 2000). Se a maior parte do material de enchimento que passa na peneira nº 200 é relativamente grossa, vai cumprir a função de encher os vazios do esqueleto mineral, decrescendo o índice de vazios e alterando o teor ótimo de ligante asfáltico. No entanto, um fíler ultrafino, com porcentagem significativa de material menor que 20 µm, e até com alguma porção menor que 5 µm, tende a ser incorporado ao ligante asfáltico, compondo uma película (mástique) que envolve as partículas de agregados miúdos e graúdos (Aashto, 1991).

Craus *et al.* (1978) consideram, dentre os vários aspectos físico-químicos da interação fíler-ligante asfáltico, a intensidade de adsorção como o mais importante fator de caracterização do fíler. Kavussi & Hicks (1997), complementarmente, destacam os seguintes fatores:

- tipo de fíler: graduação, textura superficial, superfície específica, forma dos grãos, etc.;
- natureza do fíler: a composição mineralógica e a atividade físico-química, que afetam a afinidade com o ligante asfáltico;
- concentração do fíler na mistura.

O índice de vazios de Rigden, modificado por Anderson, é um método para analisar o efeito do fíler na mistura asfáltica. É determinado sob condições padronizadas, em que os vazios da mistura fíler-ligante asfáltico resultam em uma máxima densificação do fíler. Com isso é possível avaliar o teor de ligante asfáltico que preencherá os vazios e ainda avaliar o volume de ligante em relação ao teor determinado para a mistura (Harris & Stuart, 1995).

Motta & Leite (2000) comentam que, teoricamente, quando a quantidade de ligante aumenta além do índice de vazios Rigden, as partículas perdem o contato entre elas e a quantidade adicional de ligante promove lubrificação entre as partículas. Quando a quantidade livre de ligante asfáltico diminui, a rigidez da mistura aumenta. Quanto mais fino for o fíler, menor deve ser a relação fíler-ligante, pois o volume livre de ligante é que aumenta a espessura de recobrimento das partículas dos agregados. Em outras palavras, a razão do volume de ligante livre pelo volume total de ligante tem efeito significativo na rigidez do mástique.

A graduação do fíler afeta a trabalhabilidade, da mesma forma que a graduação do esqueleto mineral, sendo proporcional à relação entre a parte mais graúda e mais miúda do fíler (menor que 20  $\mu\text{m}$ ). Quanto mais pó estiver contido no fíler, maior seu efeito na trabalhabilidade e no comportamento da mistura. Atualmente, com a tendência cada vez maior de usar como fíler os finos da coleta de filtros instalados nas usinas, aumenta a importância da caracterização do fíler (Aashto, 1991).

Quando a porcentagem de material passante na peneira nº 200 aumenta, reduzem-se os vazios do esqueleto mineral, melhora-se a graduação e a trabalhabilidade da mistura asfáltica aumenta até certo ponto. Acima de um dado nível, quanto maior a porcentagem passante na peneira nº 200, os finos começam a prejudicar a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contatos entre as partículas grossas e alterando a capacidade de compactação (Motta & Leite, 2000).

De modo a evitar os danos causados pelo excesso ou pela ausência de fíler, McGennis *et al.* (1994) estabeleceram, como parte das especificações Superpave de dosagem de misturas asfálticas, a razão, em peso, entre o fíler mineral e o ligante asfáltico, denominada de *dust proportion*, recomendando valores de 0,6 a 1,8 para todo tipo de mistura. Estabeleceram, também, valores de relação betume-vazios (RBV) em função do volume de tráfego, sendo tais valores relativamente mais baixos do que os adotados no Brasil.

O uso de fíleres é importante para aumentar a uniformidade na consistência e na suscetibilidade térmica, que podem advir de eventuais irregularidades na produção de ligantes asfálticos e na confecção da massa asfáltica (Santana, 1995). O fíler, além de preencher os vazios, aumenta a viscosidade – diminuindo a penetração – do ligante asfáltico. O fíler atua no asfalto, espessando-o e incorporando-o, fazendo com que o mástique tenha maior viscosidade que o ligante asfáltico correspondente. Simultaneamente, têm-se aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento da resistência aos esforços de cisalhamento (estabilidade), do módulo de rigidez e da resistência à tração na flexão. Segundo Motta & Leite (2000), quanto menor o tamanho da partícula de fíler, maior a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura.

Pinilla (1965) propôs uma técnica de determinação da concentração crítica de fíler – denominada de  $C_s$  – a partir da qual o sistema fíler-ligante asfáltico deixa de ser viscoso, transformando seu escoamento em não-newtoniano ou plástico. Para dosar misturas asfálticas que se deformam sem ruptura, ou seja, sem comprometer a vida de fadiga, a concentração em volume de fíler deve ser igual ou menor que  $C_s$ . Quanto maior a concentração volumétrica do sistema fíler-ligante –  $C$  –, mais próxima estarão as partículas dos agregados na mistura e menor será o volume de poros e, conseqüentemente, mais rígida ficará a mistura.

No comportamento das misturas asfálticas, o índice de vazios assume particular importância. A influência da porcentagem de vazios quanto à fadiga pode ser explicada pelos seus efeitos na rigidez e nas tensões de tração que se desenvolvem no ligante ou na combinação fíler-ligante, perdendo características de flexibilidade e provocando, assim, diminuição na resistência à fadiga do material (Robert *et al.*, 1996).

Motta & Leite (2000) estudaram o efeito de três tipos de fíleres: calcário, cimento Portland e pó de pedra. Dos fíleres estudados, o calcário apresentou o menor tamanho de partícula e o cimento Portland teve o tamanho intermediário. Foi observado que os corpos de prova preparados com fíler calcário apresentaram módulos e valores de resistência à tração superiores aos obtidos com os demais fíleres, que apresentam granulometria mais grossa. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram o efeito da granulometria do fíler na rigidez da mistura betuminosa, pois, quanto menor o tamanho de partícula do fíler, maior a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura.

Souza *et al.* (1998) utilizaram resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como fíler em misturas asfálticas e compararam com misturas asfálticas que utilizaram cal e cimento Portland como fíler. Perceberam que as misturas que têm como fíler a cal apresentaram maiores valores de estabilidade e que o teor de ligante asfáltico de projeto foi maior para a cal (6%), depois para o resíduo da serragem de rochas graníticas (5,5%) e o mais baixo para o cimento Portland (5%). Contrastando com os resultados de Souza *et al.* (1998), Soares & Cavalcante (2001), que estudaram fíleres de areia de campo, pó de pedra, pó calcário, cal hidratada, carbonato de magnésio e cimento Portland, concluíram que o aumento do teor de fíler aumenta a resistência à tração, mas que, em relação ao teor de ligante asfáltico de projeto, só há mudança quando se altera o teor de fíler (maior o teor de fíler, menor o teor de ligante).

Farias (2005) estudou a influência da utilização de fíler proveniente da britagem de concreções lateríticas e da cal e concluiu que a origem da laterita e o tipo de fíler utilizado influenciaram decisivamente as propriedades mecânicas das misturas. As amostras com fíler laterítico apresentaram comportamento superior ao das misturas com cal, em relação à resistência à tração e à resistência à fadiga, embora o tipo de fíler não tenha influenciado a resistência à deformação permanente. O único ensaio para o qual o fíler cal resultou em melhor comportamento da mistura foi no ensaio de desgaste Cântabro.

### **Influência do Mástique nas Propriedades das Misturas Asfálticas**

O mástique sempre foi considerado como uma mistura de fíler e de ligante asfáltico que envolve e aglutina os agregados grossos das misturas asfálticas, além de preencher os vazios existentes no esqueleto mineral de modo a garantir

compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade às misturas asfálticas.

Habitualmente, nos estudos do mástique, caracterizam-se o fíler, a relação fíler-ligante asfáltico e o tipo de ligação entre o fíler e o ligante asfáltico para avaliar sua influência no comportamento do mástique e das misturas asfálticas. As conclusões desses estudos indicam que o mástique, assim como seus componentes (especialmente o fíler), tem influência significativa no comportamento das misturas asfálticas.

Neste contexto, a definição de mástique pode ser encontrada nos trabalhos de Harm & Hughes (1989), Mohamed & Nofal (1998), Sadd & Daí (2001), Buttlar & You (2001), Sadd *et al.* (2002) e You & Buttlar (2005). Esses autores consideram a heterogeneidade das misturas asfálticas, que são constituídas por dois materiais distintos, nomeadamente o mástique e os agregados mais grossos. O mástique, constituído pelos elementos mais finos da mistura asfáltica (ligante asfáltico e fíler), forma uma matriz com um comportamento viscoplástico que envolve e mantém ligados os agregados mais grossos, considerados elementos elásticos embebidos no mástique.

O aglutinante das misturas asfálticas é constituído por ligante asfáltico e fíler, ou seja, o mástique. As propriedades do mástique são determinadas pelo tipo e pela quantidade dos seus componentes, pelas propriedades reológicas do ligante asfáltico, pela forma e estrutura dos grãos de fíler. O mástique tem grande influência na estrutura da mistura asfáltica em um nível microestrutural. Assim, os ensaios sobre o mástique permitem a previsão das propriedades das misturas asfálticas em um nível microestrutural.

O efeito da interação físico-química entre o fíler e o ligante asfáltico relacionado com a finura e as características de superfície do fíler geralmente influenciam as características de ruptura por fadiga. De acordo com Craus *et al.* (1978), o aspecto físico-químico está relacionado com a intensidade de adsorção da interface fíler-ligante asfáltico, e maior atividade de superfície contribuem significativamente para ligações mais fortes na interface físico-química.

O motivo de utilizar fíler em misturas asfálticas baseia-se nos seguintes conceitos: reduzir os custos iniciais, obter misturas asfálticas mais rígidas e melhorar o desempenho do pavimento. O custo inicial é reduzido, pois o fíler fica embutido no mástique e a demanda por ligante asfáltico é reduzida pelo fíler, então, o custo diminui; misturas asfálticas rígidas resultantes da adição de fíler mineral têm sido observadas tanto em laboratório quanto em campo; também, o fíler mineral pode ser utilizado para melhorar o desempenho do pavimento, adicionando-se fíler mineral em misturas asfálticas aumenta-se a resistência à deformação permanente a altas temperaturas (Chen & Peng, 1998). Porém, mástiques muito rígidos resultam em misturas quebradiças, que afetam negativamente o desempenho

do pavimento sob baixas temperaturas. Preocupações têm sido levantadas pelo fato de o fíler mineral poder produzir mástiques que exibem comportamento excessivamente quebradiço e resultam em trincas térmicas a baixas temperaturas.

O conceito de asfalto livre é um fator importante que afeta as propriedades do mástique. Quando o fíler mineral e o ligante asfáltico são misturados, a quantidade de asfalto adicionada deve ser primeiramente suficiente para preencher os vazios entre as partículas do fíler. O volume de asfalto requerido para preencher esses vazios é chamado asfalto fixo. Qualquer quantidade de asfalto adicionada à mistura fíler-ligante asfáltico a mais que o asfalto fixo é chamada de asfalto livre. Esse asfalto é livre para lubrificar a mistura fíler-ligante asfáltico, sendo recomendado que o asfalto livre, em volume, seja maior que 30% (Anderson, 1987). Nos 30% o fíler mineral encontra-se flutuando no ligante asfáltico e o contato partícula-partícula entre o fíler mineral não existe (Chen & Peng, 1998).

O dano por fadiga está fortemente relacionado com as características do ligante asfáltico, as propriedades do fíler, a interação entre o ligante asfáltico e o fíler, e é um fenômeno que é afetado pelo desenvolvimento e pelo crescimento de fissuras no mástique que se propagam para a mistura asfáltica (Kim *et al.*, 2003).

Smith & Hesp (2000) estudaram os efeitos das dimensões das partículas de fíler na recuperação mecânica (*healing*) do mástique e na mistura asfáltica a baixas temperaturas. A recuperação mecânica foi avaliada pela medição da recuperação da rigidez em cada corpo de prova após um período de 2 horas de repouso em seguida a um ensaio de fadiga em um reômetro dinâmico. Os autores concluíram que os mástiques com fíler mais grosso apresentam recuperação mecânica maior do que os mástiques com fíler mais fino.

Pilat *et al.* (2000), ao investigarem a possibilidade de melhorar a resistência às deformações permanentes das misturas asfálticas, apresentaram vários resultados de ensaios, os quais procuraram conhecer e melhorar as propriedades viscoelásticas do mástique e o seu efeito nas propriedades reológicas das misturas asfálticas. Esse estudo permitiu obter especificações relativas ao mástique a utilizar em misturas asfálticas com resistência às deformações permanentes melhorada. A adição de cal hidratada, substituindo parte do fíler mineral, melhora a resistência das misturas asfálticas às deformações permanentes.

A cal hidratada é utilizada tradicionalmente como aditivo *anti-stripping* em misturas asfálticas, sendo incorporada como parte do fíler (1 a 3% do peso dos agregados). Por um lado, assume-se que a cal hidratada reage com os ácidos carboxílicos existentes no ligante asfáltico, permitindo que outros grupos funcionais do asfalto (como cetonas) reajam com os agregados, ligando-se à



superfície destes. A água não consegue remover esses componentes do asfalto (cetonas) com a mesma facilidade com que remove os ácidos carboxílicos, fazendo com que a mistura asfáltica se torne menos susceptível à descolagem na presença de água. Por outro lado, Whiteoak (1990) sugeriu que, quando existe água na interface entre os agregados e o ligante asfáltico, a cal hidráulica adicionada às misturas asfálticas reage com a água da interface, dando origem à cal hidratada. Os íons de cálcio da cal hidratada tornam a superfície dos agregados básica, e o balanço eletroquímico na interface entre os agregados e o ligante asfáltico afasta a água da superfície dos agregados para uma emulsão dentro do ligante asfáltico. Neste contexto, o ligante asfáltico consegue ligar-se melhor à superfície hidrófoba do agregado.

Algumas considerações podem ser feitas de uma análise de microscopia de finas seções de misturas asfálticas (Anderson *et al.*, 1992):

- Em termos de interação físico-química entre o ligante asfáltico e a superfície do mineral, as propriedades da fração fina provavelmente dominam, pois os finos estão embutidos no ligante asfáltico e, portanto, têm mais proximidade com o ligante asfáltico.
- A maior parte da superfície específica gerada pelos agregados vem dos finos. A superfície dos finos pode ser maior que  $1\text{m}^2/\text{g}$ , enquanto nos agregados maiores que da peneira nº 200 é da ordem de frações de  $\text{m}^2/\text{g}$ . Portanto, os finos são o maior contribuidor para qualquer interação físico-química entre a superfície do agregado mineral e o ligante asfáltico.
- Em termos de envelhecimento acelerado, o envelhecimento em filme fino não é representativo em misturas asfálticas, pois o ligante asfáltico não está na mistura asfáltica em filme fino. A distância média de uma molécula de asfalto para o ambiente (oxigênio) deve ser da ordem de vários milhares de  $\mu\text{m}$  e não de 10 a 20  $\mu\text{m}$ , muitas vezes assumido por muitos pesquisadores.
- As hipóteses anteriores não implicam que os agregados graúdos não têm importância determinante nas propriedades mecânicas e de envelhecimento das misturas asfálticas. Espera-se que a fração de agregados graúdos seja dominante nas características de absorção dos agregados, que tem grande importância no envelhecimento das misturas asfálticas.

### Importância das Propriedades Reológicas dos Mástiques

Os fileres, quando combinados com o ligante asfáltico, provocam alterações nas propriedades físicas e químicas dos ligantes, causadas pelas diferentes propriedades dos fileres, que dependem de fatores como tipo, natureza e concentração do filer na mistura (Kavussi *et al.*, 1997).

A adição de filer em ligantes asfálticos provoca modificações em seu comportamento reológico, através do aumento do módulo complexo e redução do ângulo

de fase, associado à natureza rígida do filer mineral. Essa modificação no comportamento do ligante asfáltico é distinta de alguns modificadores, como os polímeros e a borracha moída, que apresentam módulo menor que o dos ligantes asfálticos sob temperaturas baixas ou intermediárias (Bahia, 1995).

Os efeitos da incorporação do filer ao ligante asfáltico são mais significativos e favoráveis nas altas temperaturas, aumentando a rigidez do ligante, que tem módulo complexo menor nessa faixa de temperatura. Porém, a baixas temperaturas, o filer aumenta ainda mais a rigidez do ligante asfáltico, acarretando a redução da capacidade de relaxar tensões (Bahia 1995).

As propriedades reológicas do mástique é resultado da combinação das características elástica, viscoelástica ou viscosa do ligante asfáltico e da natureza elástica do filer mineral, o que afeta as propriedades mecânicas da mistura asfáltica composta por esses materiais. Com isso, o estudo das propriedades reológicas do mástique permite avaliar como esse componente pode afetar as propriedades da mistura asfáltica (Bechara *et al.*, 2008).

O surgimento dos ensaios que têm por princípio a avaliação das propriedades fundamentais dos materiais, como é o caso da Especificação Superpave, permite a simulação de solicitações de tráfego e intemperismo semelhantes àquelas em que os ligantes asfálticos e, conseqüentemente, os mástiques são submetidos em campo (Anderson *et al.*, 1994). Um dos ensaios mais utilizados é o de cisalhamento em regime oscilatório (DSR), que pode gerar a curva-mestre, uma representação do comportamento reológico do material em função da frequência (ou tempo) de carregamento.

A curva-mestre tem sido muito utilizada recentemente para avaliar uma propriedade reológica – ângulo de fase ou módulo complexo, por exemplo – para uma temperatura de referência, em um espectro de frequências, ou tempo, de carregamento.

Segundo uma pesquisa de Bahia (1995), a adição de filer mineral ao ligante asfáltico provoca aumento do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  da especificação Superpave, o que é favorável por aumentar a resistência do ligante à deformação permanente e também provocar aumento do parâmetro  $G^*\text{sen}\delta$ , sendo desfavorável em relação ao dano por fadiga, quando o fenômeno ocorre por deformação controlada. Nessa mesma pesquisa, foi constatado que os efeitos do filer adicionado ao ligante asfáltico são desfavoráveis para suas propriedades a temperaturas baixas e intermediárias, pois a rigidez do filer mineral é muitas vezes maior que a do ligante, proporcionando assim mástiques mais rígidos, e em baixas temperaturas ligantes asfálticos de baixa consistência são mais indicados.

Bechara *et al.* (2008) analisaram diferentes relações filer-ligante asfáltico e para todas elas o módulo complexo ( $G^*$ ) e o parâmetro de deformação permanente do Superpave ( $G^*/\text{sen}\delta$ ) aumentaram, ou seja, a adição de filer pode

refletir-se em aumento na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. Também ocorreu a redução do ângulo de fase ( $\delta$ ) com a adição de fíler, o que tornou o mástique mais elástico.

Anderson *et al.* (1992) analisaram as propriedades reológicas dos mástiques através de um conjunto de curvas-mestre para o módulo complexo e o ângulo de fase e observaram que, nas temperaturas de intermediárias a baixas, o efeito da adição do fíler é praticamente inexpressivo, já nas temperaturas mais altas o efeito mais expressivo no aumento da rigidez do ligante asfáltico provoca deslocamento vertical na escala de rigidez, praticamente uniforme ao longo da escala de frequência; a elasticidade também aumenta com a adição de fíler, o que é indicado pela redução dos valores de ângulo de fase. Os fatores de deslocamento são pouco sensíveis à adição de finos, o que indica que a dependência da temperatura do mástique e do ligante asfáltico é essencialmente a mesma. Para todos os mástiques, o aumento relativo no módulo é pequeno a baixas temperaturas, quando comparado ao aumento verificado nas temperaturas altas.

Para Anderson *et al.* (1992), embora o módulo dos mástiques seja alto sob temperaturas baixas, a resistência à tração também mostrou aumento significativo; para os vários ligantes asfálticos avaliados, a adição de fíler foi favorável e reduziu significativamente o acúmulo de deformação permanente, no entanto, a adição de fíleres minerais pode comprometer a trabalhabilidade da mistura asfáltica e tornar a mistura compactada excessivamente rígida. Segundo a experiência dos autores, os procedimentos para envelhecimento a curto prazo, tanto nas estufas TFO quanto nas RTFO, não são indicados para mástiques, em virtude da tendência de separação dos componentes, e indicam o envelhecimento a longo prazo, no PAV, como método satisfatório para simular o envelhecimento.

### Considerações Finais

São muitos os problemas a serem resolvidos em pavimentação asfáltica, com destaque para o aparecimento e a propagação das trincas por fadiga, o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda e o trincamento térmico provocado pela queda de temperatura do pavimento. Os dois primeiros, que são defeitos estruturais, têm como causa principal o aumento das solicitações do tráfego, decorrente do aumento do volume de tráfego, mas, também, do aumento das cargas por eixo, do aumento da pressão de enchimento dos pneus e do aumento do volume de tráfego de pneus extralargos. Conforme salientado neste trabalho, o combate à diminuição de vida útil dos pavimentos flexíveis passa pela ampliação do conhecimento dos efeitos dos ligantes asfálticos e dos fíleres minerais, com desenvolvimento de melhores critérios para o projeto de misturas asfálticas e o controle dos principais fatores durante a execução dos pavimentos.

Este trabalho teve por objetivo contribuir para melhor entendimento do comportamento das misturas asfálticas no que diz respeito à ação do fíler e, principalmente, do mástique, procurando compreender a atuação de seus componentes e definir a influência dos parâmetros de sua composição sobre as propriedades mecânicas. Porém, ainda há muito para se estudar a respeito dos mecanismos que governam a contribuição do fíler no desempenho global da mistura, particularmente a interação entre o ligante asfáltico e o fíler mineral, cuja contribuição para o desempenho dos pavimentos tem sido subestimada.

### Agradecimentos

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida aos dois primeiros autores deste trabalho.

### Referências Bibliográficas

- AASHTO. *Handbook of hot-mix asphalt paving*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1991.
- ANDERSON, D. A. *Guidelines for use of dust in hot mix asphalt concrete mixtures*. Association of Asphalt Paving Technologists, 1987. v. 56, p. 492-516.
- ANDERSON, D. A.; BAHIA, H. U.; DONGRE, R. *Rheological properties of mineral filler-asphalt mixtures*. Association of Asphalt Paving Technologists, 1992. v. 42, p. 37-66.
- ANDERSON, D. A.; CHRISTENSEN, D. W.; BAHIA, H. U.; DONGRÉ, R.; SHARMA, M. G.; ANTLE, C. E.; BUTTON, J. *Binder characterization and evaluation: volume 3 – physical characterization*. Washington: Strategic Highway Research Program, National Research Council. Report SHRP-A-369, 1994.
- BAHIA, H. U. *Critical evaluation of asphalt modification using strategic highway research program concepts*. Washington: Transportation Research Record, 1995. n. 1488, p. 82-88.
- BECHARA, M. F.; FAXINA, A. L.; FABBRI, G. T. P.; GIGANTE, A. C.; NASCIMENTO, D. R. Propriedades reológicas de mástiques asfálticos a altas temperaturas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 39., 2008, Recife. *Anais...* Recife, 2008.
- BUTTLAR, W. G.; YOU, Z. Discrete element modeling of asphalt concrete: a micro-fabric approach. Washington D.C.: In: ANNUAL MEETING TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 80., 2001. *Proceedings...* 2001. (CD-ROOM).
- CHEN, J. S.; PENG, C. H. Analyses of tensile failure properties of asphalt-mineral filler mastic. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.10, n. 4, p. 256-262, 1998.
- CRAUS, J.; ISHIAI, I.; SIDES A. Guidelines for use of dust in hot-mix asphalt concrete mixtures. *Proceedings*

- of Asphalt Association of Paving Technologists, v. 56, p. 492-516, 1978.
- DNER-EM 367/97 (1997). *Material de enchimento para misturas betuminosas*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.
- HARM, E.; HUGHES, C. Paving specifications and inspection related to pavement performance. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 58, 1989.
- HARRIS, B. M.; STUART, K. D. Analysis of mineral fillers and mastic used in stone matrix asphalt. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT*, Portland, Oregon, EUA, v. 64, p. 54-95, 1995.
- KAVUSSI, A.; HICKS, R. G. Properties of bituminous mixtures containing different fillers. In: ASPHALT ASSOCIATION OF PAVING TECHNOLOGISTS, 1997. *Proceedings...* 1997.
- KIM, Y. R.; LITTLE, D. N.; SONG, I. *Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics – mechanic evaluation*. Washington: Transportation Research Record, 2003. n. 1832, p. 1-8.
- McGENNIS, R. B.; ANDERSON, T. M.; KENNEDY, T. W.; SOLAIMANIAN, M. *Background of Superpave asphalt mixture design and analysis*. Asphalt Institute Report FHWA-SA-95-003, 1994.
- MOHAMED, A.; NOFAL, M. *Structural design of urban roads*. APWA International Publics Works Congress, 1998.
- MOTTA, L. M. G., LEITE, L. F. M. Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, 11., 2000, Gramado. *Anais...* Gramado, 1998. p. 1007-1017.
- PILAT, J.; RADZISZEWSKI, P.; KALABISKA, M. The analysis of visco-elastic properties of mineral-asphalt mixes with lime and rubber powder. In: EURASPHALT AND EUROBITUME CONGRESS, 2., 2000, Barcelona. *Proceedings...* Barcelona, 2000.
- PINILLA, A. *O sistema fíler-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas*. Conselho Nacional de Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1965.
- ROBERT, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R. *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*. 2. ed. Maryland: NAPA Educational Foundation Ingham, 1996.
- SADD, M. H.; DAI, Q. *Effects of microstructure on the static and dynamic behavior of recycled asphalt material*. University of Rhode Island Transportation Center Report on Project n° 536108, 2001.
- SADD, M. H.; DAI, Q.; PARAMESWARAN, V.; SHUKLA, A. *Microstructural simulation of asphalt materials: modeling and experimental verification*. New York: 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, 2002.
- SANTANA, H. Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de fíler em misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995.
- SMITH, B. J.; HESP, S. A. M. Crack pinning in asphalt mastic and concrete: effect of rest periods and polymer modifiers on the fatigue life. In: EURASPHALT AND EUROBITUME CONGRESS, 2., 2000, Barcelona. *Proceedings...* Barcelona, 2000.
- SOARES, J. B.; CAVALCANTE, V. T. F. O efeito do tipo e do teor de fíler nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis, SC. *Anais...* Florianópolis, 2001.
- SOUZA, J. N.; RODRIGUES, J. K. G.; SOUZA NETO, P. N. *Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente*. Federação das Indústrias do Estado do Ceará – IEL, 1998. Disponível em: <http://www.sfiac.org.br/>.
- WHITEOAK, D. *The shell bitumen handbook*. 1990.
- YOU, Z.; BUTTLAR, W. G. Development of a microfabric discrete element modeling techniques to predict complex modulus of asphalt-aggregate hollow cylinders subjected to internal pressure. In: ANNUAL MEETING TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 84., 2005, Washington D.C. *Proceeding...* Washington, 2005. (CD-ROM).

