

# **EFEITO DO ENVELHECIMENTO A CURTO PRAZO SOBRE O COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE MÁSTIQUES ASFÁLTICOS**

**Adalberto Leandro Faxina**

**Glauco Tulio Pessa Fabbri**

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

**Jorge Barbosa Soares**

Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do envelhecimento a curto prazo sobre o comportamento reológico de mástiques asfálticos, empregando como variáveis a consistência do ligante asfáltico, a relação fíler/asfalto, a velocidade do tráfego e a temperatura. Foram preparados oito mástiques asfálticos, empregando um CAP 50/70 e um CAP 30/45 e quatro relações fíler/asfalto (0,00, 0,15, 0,30 e 0,45). Os mástiques compostos com CAP 50/70 se mostraram mais sensíveis ao envelhecimento que os compostos com CAP 30/45. O envelhecimento afeta o enrijecimento provocado pela relação f/a, dependendo da temperatura e da velocidade do tráfego. A resistência à deformação permanente é favorecida pelo envelhecimento quando se combinam uma relação f/a alta com um ligante asfáltico menos consistente, independentemente da velocidade de tráfego. A resistência à fadiga por deformação controlada é prejudicada pelo envelhecimento, quando se combinam uma relação f/a alta, um ligante asfáltico menos consistente e velocidade baixa de tráfego.

## **ABSTRACT**

The objective of this research is to evaluate the effect of short-term aging on the rheological behavior of asphaltic mastics, taking into account asphalt consistency, filler/asphalt ratio, traffic speed and test temperature. Eight asphalt mastics were prepared, using two asphalt binders with different penetration grades (50/70 and 30/45) and four filler/asphalt ratios (0.00, 0.15, 0.30 and 0.45), in volume. The 50/70 asphalt mastics have shown more susceptibility to aging than the 30/45 asphalt mastics. The short-term aging affects the stiffening due to f/a ratio, depending on both temperature and traffic speed, and it is favorable to rutting resistance when a high f/a ratio is combined with a soft asphalt binder, independently of traffic speed. Fatigue resistance in strain-controlled is reduced by the short-term aging when a high f/a ratio is combined with a soft asphalt binder and low traffic speed.

## **1. INTRODUÇÃO**

O mástique asfáltico é o produto da mistura dos finos minerais e do ligante asfáltico e tem efeito significativo sobre as propriedades mecânicas das misturas asfálticas (Anderson, 1987; Anderson *et al.*, 1992a,b; Al-Suhaibani *et al.*, 1992; Harris e Stuart, 1995; Kavussi e Hicks, 1997; Cooley *et al.*, 1998; Shashidhar e Romero, 1998; Kim *et al.*, 2003; Kim e Little, 2004; Castelo Branco *et al.*, 2008), além de garantir compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade a elas (Cheng e Peng, 1998). A quantidade de finos na composição granulométrica da mistura asfáltica, em relação ao teor de ligante asfáltico efetivo, determina a relação f/a, que é a principal variável associada ao efeito do mástique sobre as propriedades mecânicas (Bechara *et al.*, 2008a,b).

O estudo dos mástiques asfálticos remonta à primeira metade do século 20 (Traxler, 1937) e a literatura sobre o assunto é vasta, destacando seu potencial de enrijecer (Dukatz e Anderson, 1980; Kandhal, 1981; Anderson *et al.*, 1982; Van de Vens e Jenkins, 2003), o que pode contribuir para o aumento da resistência da mistura asfáltica à deformação permanente e afetar, positiva ou negativamente, o seu desempenho em relação ao trincamento por fadiga e de origem térmica (Cheng e Peng, 1998). O tipo de fíler pode afetar, ainda, a resistência ao dano induzido pela água sobre as misturas asfálticas (Airey *et al.*, 2008; Kok e Yilmaz, 2009). Modernamente, os estudos reológicos em mástiques são realizados em reômetros de cisalhamento dinâmico, seja

com amostras semelhantes aquelas usadas em estudos de ligantes asfálticos puros ou modificados, como é o caso do estudo descrito no presente artigo, seja na forma de corpos-de-prova cilíndricos em miniatura, que podem ser moldados ou então extraídos de corpos-de-prova maiores (Castelo Branco, 2008).

O mástique asfáltico tem um efeito sobre as propriedades mecânicas da mistura asfáltica que pode não ser exatamente o resultado da soma dos efeitos isolados do comportamento reológico termossensível do ligante asfáltico e do comportamento predominantemente elástico do agregado mineral. O ligante asfáltico manifesta sua natureza elástica, viscoelástica ou viscosa em função da temperatura ou do tempo de carregamento, enquanto o agregado mineral preserva sua natureza elástica independentemente das condições de temperatura e de carregamento. A associação entre o ligante asfáltico e os finos minerais gera um ligante asfáltico modificado, que envolve as partículas de agregado mineral de maiores dimensões e que afeta o comportamento mecânico da mistura asfáltica de maneira distinta da do ligante asfáltico puro. O estudo do comportamento reológico do mástique asfáltico permite a avaliação de como e quanto as suas propriedades reológicas podem afetar o desempenho da mistura asfáltica.

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do envelhecimento a curto prazo sobre o comportamento reológico de mástiques asfálticos, empregando as seguintes variáveis: o tipo de ligante asfáltico, a relação fíler/asfalto, a frequência de carregamento e a temperatura de ensaio. Foram selecionados dois ligantes asfálticos, um CAP 50/70 e um CAP 30/45, e quatro relações fíler/asfalto (f/a), de 0,00, 0,15, 0,30 e 0,45, em volume. Estas oito amostras foram então envelhecidas a curto prazo na estufa de filme fino rotativo. As amostras virgens e envelhecidas foram submetidas a ensaios em regime oscilatório de cisalhamento, conforme procedimento descrito adiante. Na seqüência, curvas-mestre e curvas do fator de deslocamento horizontal,  $a[T]$ , foram geradas, empregando um programa computacional.

Neste trabalho, as relações fíler/asfalto são apresentadas em volume. Em massa, estas três relações são, respectivamente, 0,41, 0,82 e 1,23, para o CAP 50/70, e 0,41, 0,82 e 1,22, para o CAP 30/45. A título de comparação, tomando por referência a faixa de material passado na peneira de malha 200, da especificação de serviço DNIT 031/2006, que vai de 2 a 10%, uma relação f/a em massa de 1,09 seria obtida para uma mistura asfáltica típica com 6% de fíler e um teor ótimo de asfalto de 5,5%. As relações f/a em volume aqui empregadas englobam, portanto, as relações f/a em massa de misturas asfálticas típicas. O método de projeto de misturas Superpave especifica uma faixa de relações f/a, em massa, que vai de 0,6 a 1,2, que também está englobada nas três relações f/a selecionadas para este estudo.

## **2. MATERIAIS EMPREGADOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Na produção dos mástiques, foram utilizados um CAP 30/45 e um CAP 50/70, provenientes da Reduc-Petrobras, Duque de Caxias, RJ. As densidades do CAP 30/45 e do CAP 50/70 são 1,05 e 1,04, respectivamente. O fíler empregado é o material 100% passado na #200, de natureza basáltica, oriundo da Pedreira Bandeirantes, São Carlos, SP. A densidade aparente do fíler é 2,850. Os materiais foram misturados manualmente, a 145°C, nas quantidades indicadas na Tabela 1. Na falta de uma norma de ensaio específica para o envelhecimento a curto prazo de mástiques asfálticos, foi empregada a ASTM D 2872-97, que prescreve o procedimento de envelhecimento a curto prazo de ligantes asfálticos. Tal condicionamento se dá pela exposição de uma película fina de ligante asfáltico, com massa de  $35 \pm 0,5$  g, em frasco padronizado, a um jato de ar com vazão de  $4.000 \pm 200$  ml/min, por 85 min, a  $163 \pm 0,5$  °C.

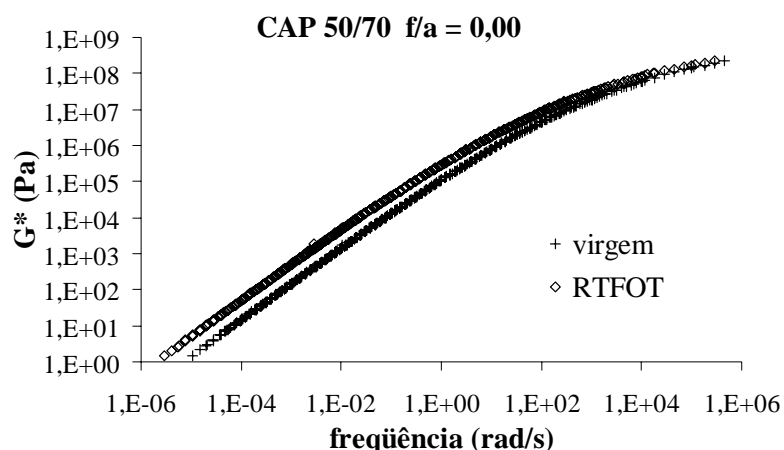
**Tabela 1:** Relações fíler/asfalto dos mástiques asfálticos (em volume)

| CAP               | 30/45  |        |        |        | 50/70  |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| relação f/a       | 0,00   | 0,15   | 0,30   | 0,45   | 0,00   | 0,15   | 0,30   | 0,45   |
| massa fíler (g)   | 0,00   | 115,82 | 179,63 | 220,04 | 0,00   | 116,61 | 180,58 | 220,99 |
| massa asfalto (g) | 400,00 | 284,18 | 220,37 | 179,96 | 400,00 | 283,39 | 219,42 | 179,01 |

O reômetro empregado na composição das curvas-mestre foi o AR-2000 da TA Instruments. As amostras foram testadas em regime oscilatório de cisalhamento empregando geometria de placas paralelas. O procedimento usado para a composição das curvas-mestre foi: (1) submeter uma amostra à varredura de tensão, nas temperaturas de 52, 64, 76 e 88°C, na frequência de 10 rad/s, a fim de determinar a tensão que solicita o material, em cada temperatura, na faixa de viscoelasticidade linear; (2) submeter outra amostra à varredura de tensão, a 40, 28, 16 e 4°C, a 10 rad/s; (3) submeter uma amostra à varredura de frequência, entre 0,1 e 100 rad/s, a 52, 64, 76 e 88°C, nas tensões obtidas anteriormente; (4) submeter outra amostra à varredura de frequência, entre 0,1 e 100 rad/s, a 40, 28, 16 e 4°C, nas tensões obtidas anteriormente; e (5) compor a curva-mestre, a 25°C, e a curva de fatores de deslocamento horizontal com a temperatura.

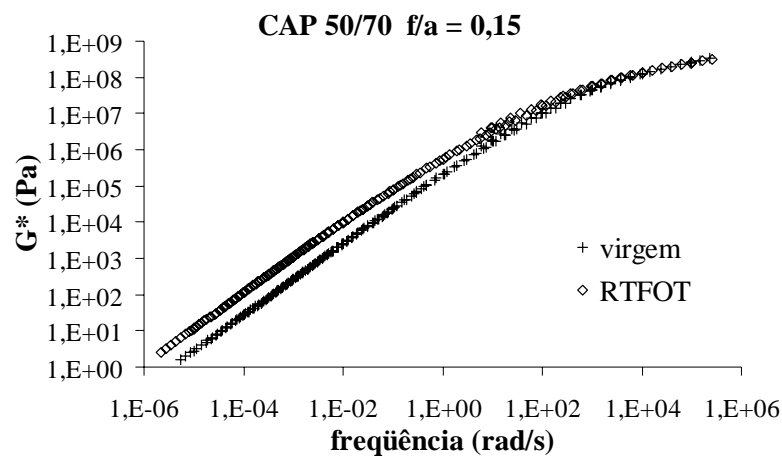
### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Figuras de 1 a 4 trazem as curvas-mestre do módulo complexo ( $G^*$ ) dos mástiques compostos com CAP 50/70, nas condições virgem e envelhecida a curto prazo, para as relações f/a de 0,00, 0,15, 0,30 e 0,45, respectivamente. As Figuras de 5 a 8 apresentam as curvas-mestre de  $G^*$  dos mástiques compostos com CAP 30/45, nas condições virgem e envelhecida a curto prazo, para as relações f/a de 0,00, 0,15, 0,30 e 0,45, respectivamente. O efeito do envelhecimento a curto prazo é notado na forma de um deslocamento vertical da curva-mestre do material envelhecido em relação ao virgem, que retrata o aumento de rigidez.

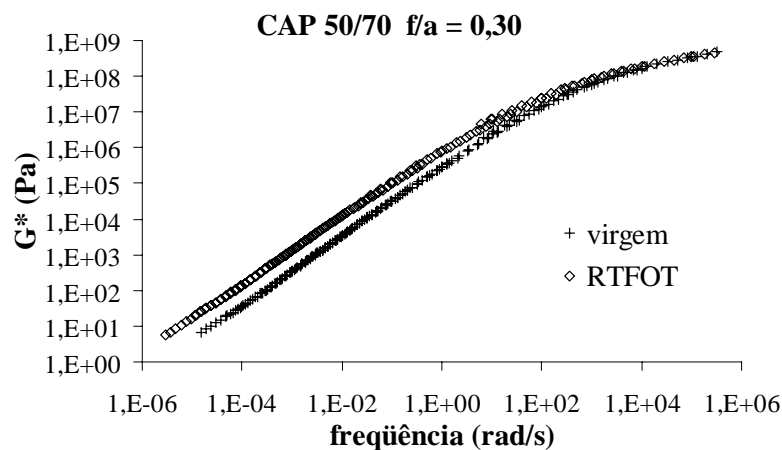
**Figura 1:** Curvas-mestre para a relação f/a 0,00 dos mástiques compostos com CAP 50/70

A magnitude do deslocamento vertical provocado pelo envelhecimento a curto prazo é maior para os mástiques compostos com o ligante asfáltico de menor consistência, indicando sua maior sensibilidade ao envelhecimento. Por outro lado, a magnitude deste deslocamento vertical é pouco afetada pela relação f/a, indicando que a presença do fíler mineral influencia pouco o fenômeno de envelhecimento do ligante asfáltico. A título de ilustração, a Figura 9, adiante, apresenta o aumento de rigidez devido ao envelhecimento a curto prazo e à relação

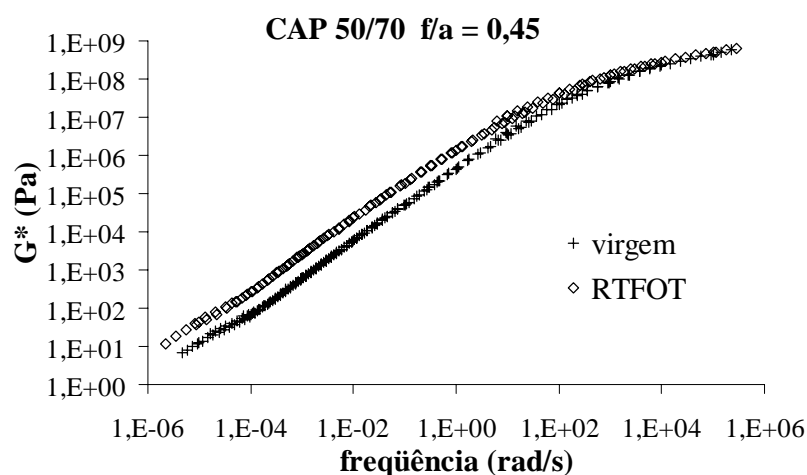
$f/a$ , dos mástiques compostos com CAP 50/70 e 30/45, a 25°C, em função da frequência de carregamento. Os dados indicados são provenientes das curvas-mestre geradas a 25°C.



**Figura 2:** Curvas-mestre para a relação  $f/a$  0,15 dos mástiques compostos com CAP 50/70



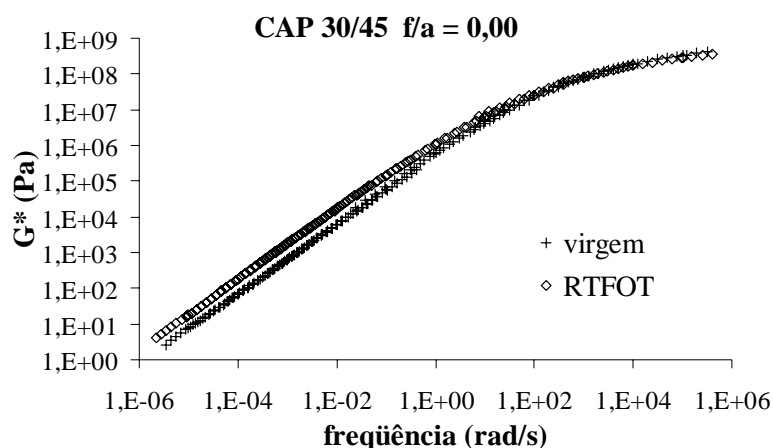
**Figura 3:** Curvas-mestre para a relação  $f/a$  0,30 dos mástiques compostos com CAP 50/70



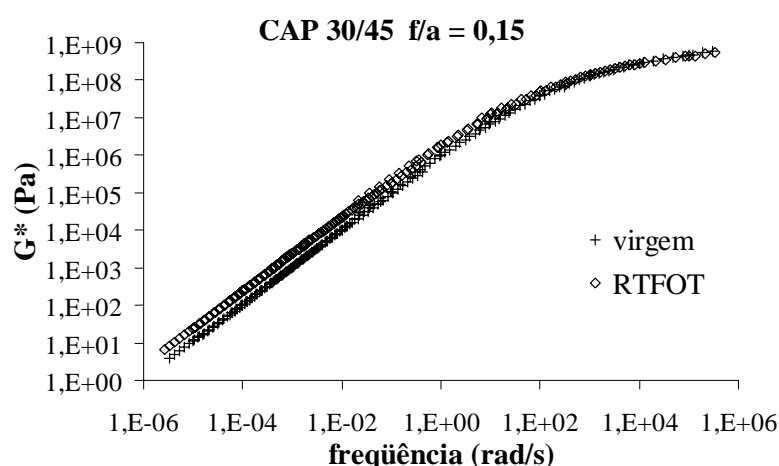
**Figura 4:** Curvas-mestre para a relação  $f/a$  0,45 dos mástiques compostos com CAP 50/70

A Figura 9 mostra que o aumento da rigidez, a 25°C, provocado pelo envelhecimento, é claramente dependente da consistência do ligante asfáltico e da frequência, no entanto, a

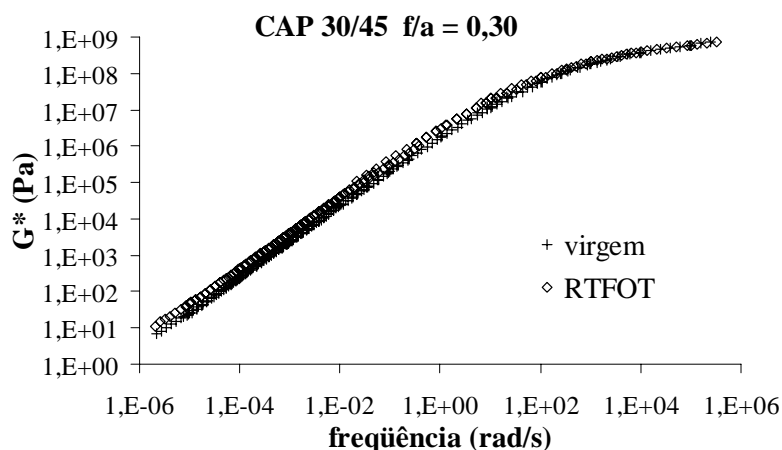
influência da relação  $f/a$  não é bem-definida. Nas frequências baixas, inferiores a  $10^{-1}$  rad/s, por exemplo, o envelhecimento proporciona um enrijecimento da ordem de 2 vezes, para os mástiques compostos com CAP 30/45, e da ordem de 3,5 vezes, para os mástiques compostos com CAP 50/70. Isto equivale a dizer que, para tráfego muito lento, o CAP de maior consistência é menos sensível ao envelhecimento, o que pode ser vantajoso em termos de resistência à fadiga por deformação controlada.



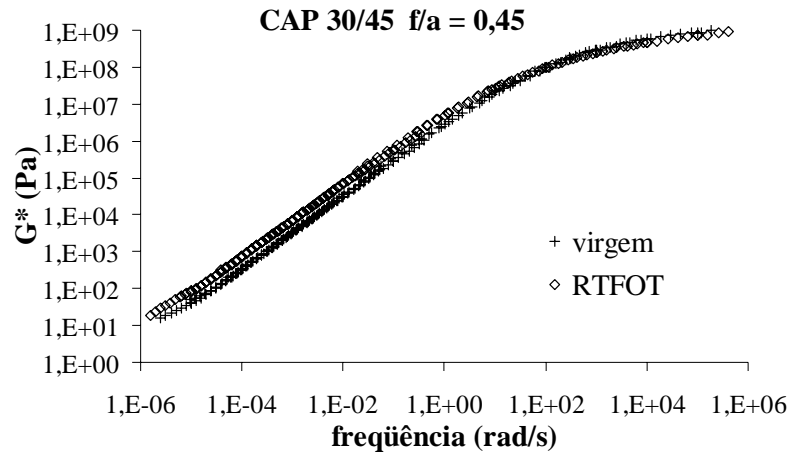
**Figura 5:** Curvas-mestre para a relação  $f/a$  0,00 dos mástiques compostos com CAP 30/45



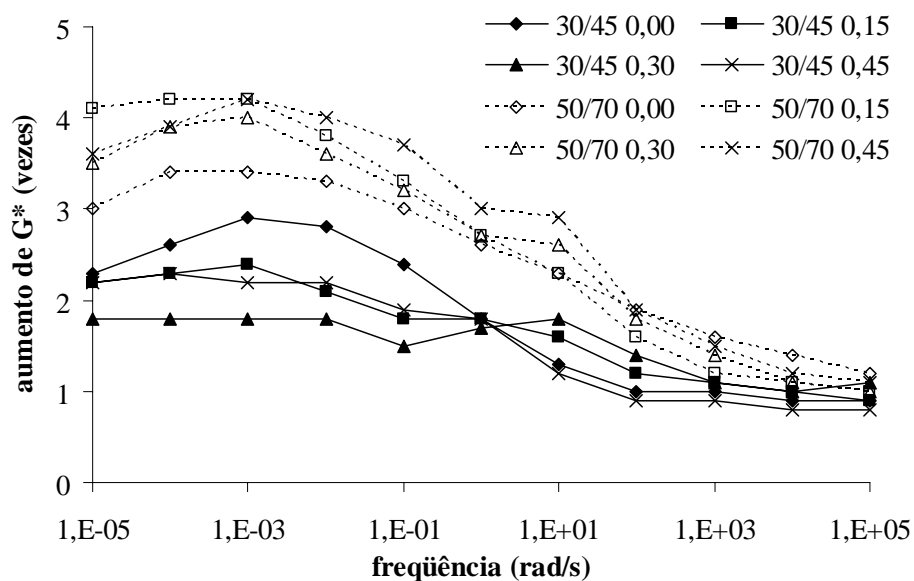
**Figura 6:** Curvas-mestre para a relação  $f/a$  0,15 dos mástiques compostos com CAP 30/45



**Figura 7:** Curvas-mestre para a relação  $f/a$  0,30 dos mástiques compostos com CAP 30/45



**Figura 8:** Curvas-mestre para a relação  $f/a$  0,45 dos mástiques compostos com CAP 30/45



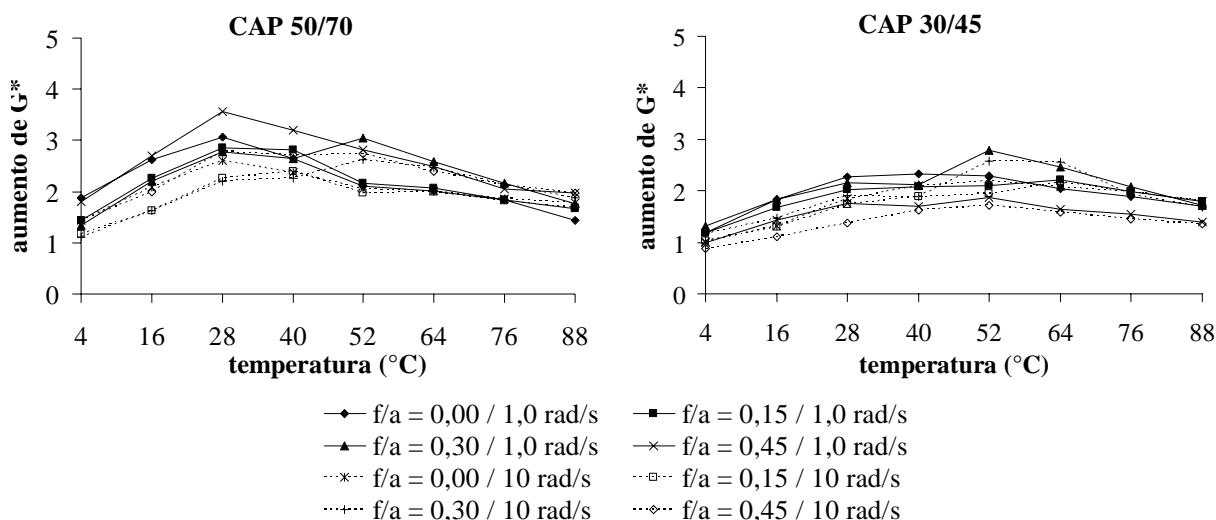
**Figura 9:** Enrijecimento devido ao envelhecimento a 25°C

Já com o aumento da frequência, o efeito enrijecedor do envelhecimento a curto prazo diminui. A 10 rad/s, por exemplo, o envelhecimento provoca aumento médio de 1,5 vezes da rigidez dos mástiques compostos com CAP 30/45 e de 2,5 vezes da rigidez dos mástiques compostos com CAP 50/70. Em frequências superiores a  $10^1$  rad/s, correspondentes a tráfego rápido, o efeito do envelhecimento é inexpressivo, indicando que o envelhecimento não afetaria o comportamento à fadiga da mistura asfáltica para tráfego rápido. Tais indicações, baseadas nos resultados de mástiques asfálticos, não consideram o volume de vazios, que é um fator relevante relativo ao envelhecimento das misturas asfálticas. São válidas, portanto, quando são consideradas condições semelhantes das misturas asfálticas que contêm os mástiques investigados.

Os resultados ilustrados na Figura 9, na temperatura de 25°C, chamam a atenção para o fato de que a influência do envelhecimento pode ajudar a distinguir ligantes asfálticos quanto a suas propriedades reológicas, no entanto, a frequência de carregamento nos ensaios de fadiga de misturas asfálticas, por ter efeito muito expressivo, precisa ser controlada. Já a relação  $f/a$ , que é claramente significativa sobre o enrijecimento dos mástiques, não afeta o fenômeno do envelhecimento, como já observado anteriormente. Tal constatação parece razoável se se

considerar a natureza inerte do fíler mineral investigado no presente trabalho. A análise da rigidez dos mástiques, a 25°C, permite concluir que a presença de fíler, em maior ou menor proporção, claramente não interfere sobre o efeito do envelhecimento, que se mostra dependente exclusivamente das características do ligante asfáltico e da frequência de carregamento.

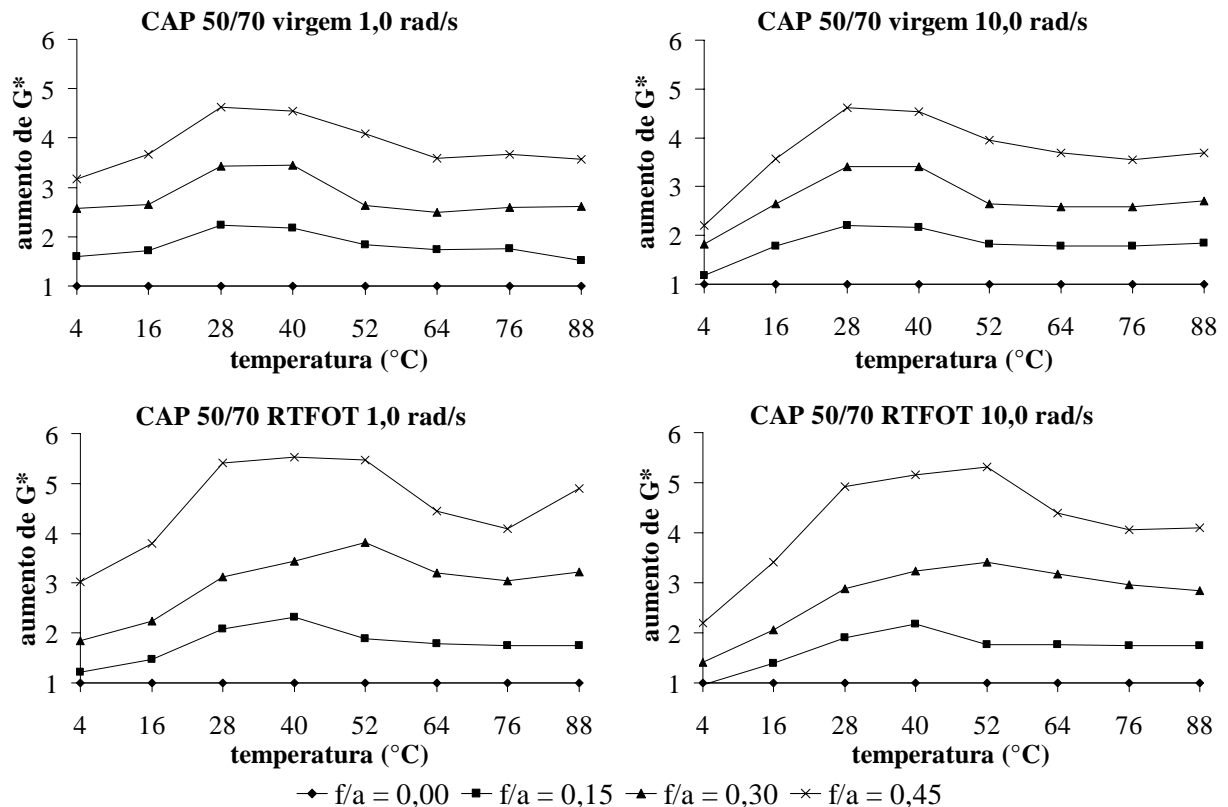
A fim de compreender como a consistência do ligante asfáltico de base pode influenciar o fenômeno de envelhecimento a curto prazo dos mástiques, a Figura 10 ilustra o aumento de rigidez provocado pelo envelhecimento, em função da relação  $f/a$ , da temperatura de ensaio e do aumento da velocidade do tráfego, de lento para rápido. Admitem-se as frequências de 1,0 e 10,0 rad/s como representativas deste aumento. O envelhecimento enrijece os mástiques, como seria de se esperar, porém, com padrões ligeiramente distintos dependendo da consistência do ligante asfáltico e da temperatura. A Figura 10 esclarece quanto aumenta a rigidez dos mástiques por conta do envelhecimento ao longo de uma ampla faixa de temperaturas. Ou seja, diferentemente do que se poderia obter de ensaios pontuais como ponto de amolecimento, penetração ou ductilidade, os resultados expostos na Figura 10 permitem perceber que o efeito do envelhecimento tem magnitudes diferentes ao longo do espectro de temperaturas.



**Figura 10:** Aumento de  $G^*$  dos mástiques compostos com CAP 50/70 e 30/45 devido ao envelhecimento a curto prazo

O aumento de módulo dos mástiques com CAP 30/45, em função do envelhecimento a curto prazo, varia em torno de 1 a 2 vezes, enquanto o aumento do módulo dos mástiques com CAP 50/70 varia em torno de 1 a 3 vezes, confirmando que o CAP menos consistente é mais sensível ao envelhecimento. O enrijecimento dos mástiques com CAP 50/70, devido ao envelhecimento, é destacado entre 16 e 64°C, o que é favorável à resistência à deformação permanente da camada asfáltica, porém pode ser prejudicial à resistência à fadiga por deformação controlada. Já os efeitos da velocidade do tráfego e da relação  $f/a$  não são suficientemente significativos, a ponto de se observar com clareza a influência deles sobre o envelhecimento dos mástiques. Devido à forma como os dados foram organizados nesta figura, os efeitos do envelhecimento, da relação  $f/a$  e da frequência estão confundidos. As análises seguintes pretendem separar estes efeitos.

Embora a análise das curvas-mestre (Figuras 1 a 8) e das Figuras 9 e 10 tenham indicado que a relação  $f/a$  não apresenta um efeito nítido sobre o enrijecimento dos mástiques devido ao envelhecimento, é válido avaliar o efeito da relação  $f/a$  ao longo do espectro de temperaturas típicas do pavimento, em separado do efeito do envelhecimento. As Figuras 11 e 12 auxiliam a interpretar o efeito da relação  $f/a$  sobre o enrijecimento dos mástiques e a esclarecer se o envelhecimento afeta o padrão de enrijecimento provocado pela relação  $f/a$ . A análise é baseada no aumento de  $G^*$  provocado pela adição de fíler em relação ao ligante asfáltico sem fíler, para duas frequências, 1,0 e 10,0 rad/s. As Figuras 11 e 12 revelam que o efeito da relação  $f/a$  é claro e expressivo, porém variável com a temperatura e a frequência.



**Figura 11:** Aumento de  $G^*$  dos mástiques compostos com CAP 50/70

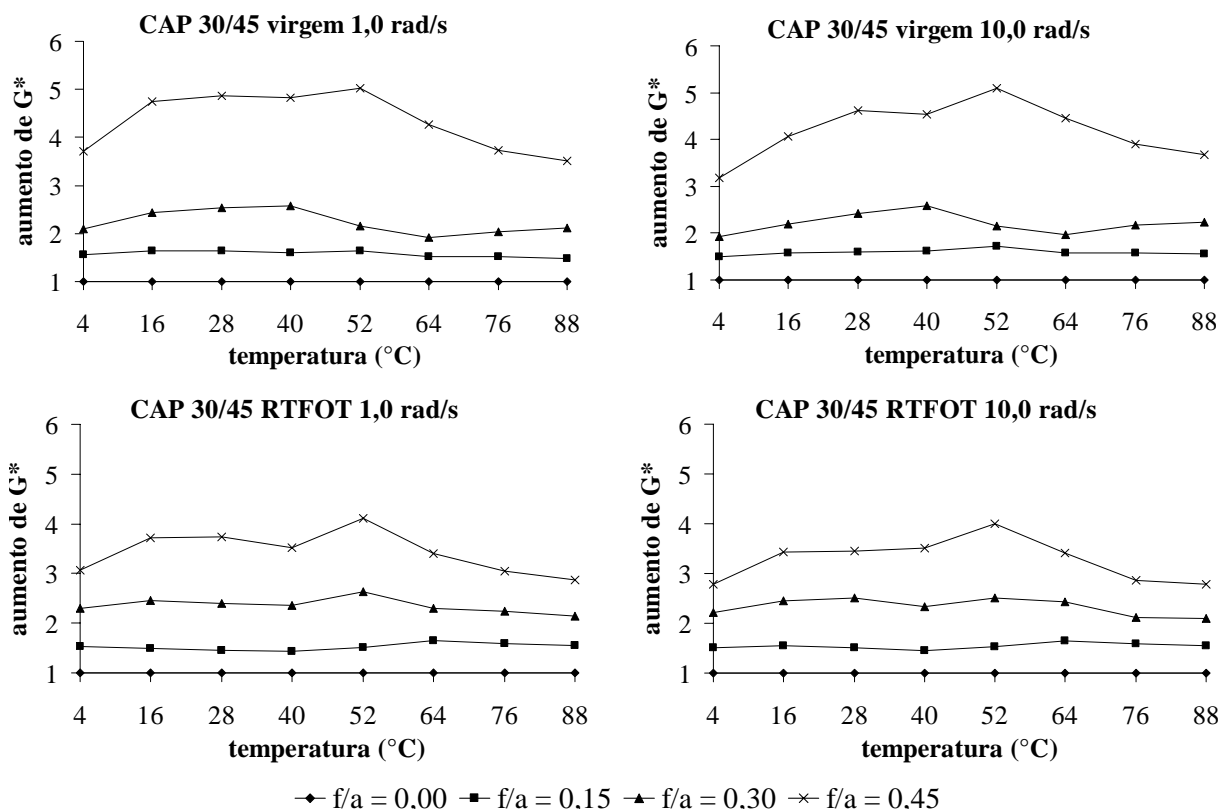
No caso do CAP 50/70, menos consistente, o enrijecimento proporcionado pela relação  $f/a$  é variável ao longo do espectro de temperaturas de ensaio. Os padrões de variação do enrijecimento com a temperatura, observados na Figura 11, dificultam o comparação por meio de valores médios. Por outro lado, é curioso observar um enrijecimento maior em torno das temperaturas de ocorrência de trincas por fadiga e um enrijecimento relativamente menor nas temperaturas de ocorrência de deformação permanente.

Se tomarmos por referência a temperatura de 28°C como representativa das temperaturas de ocorrência de fadiga, as relações  $f/a$  de 0,15, 0,30 e 0,45 aumentam o módulo do material virgem de 2,2, 3,4 e 4,6 vezes, respectivamente, tanto na frequência de 1,0 rad/s como na de 10,0 rad/s. Após envelhecimento a curto prazo, estas razões passam para 2,1, 3,1 e 5,4, na frequência de 1,0 rad/s, e para 1,9, 2,9 e 4,9, na frequência de 10,0 rad/s. O envelhecimento ameniza ligeiramente o enrijecimento provocado pela relação  $f/a$ , nas relações  $f/a$  baixas e intermediárias (0,15 e 0,30), porém acentua ligeiramente o enrijecimento quando a relação  $f/a$  é



alta (0,45). O envelhecimento a curto prazo torna os mástiques ligeiramente sensíveis à velocidade de tráfego: o enrijecimento provocado pela relação  $f/a$  é menor na frequência mais alta.

Tomando por referência a temperatura de 64°C como representativa das temperaturas de ocorrência de deformação permanente nas camadas asfálticas, as relações  $f/a$  de 0,15, 0,30 e 0,45 aumentam o módulo dos mástiques virgens de 1,7, 2,5 e 3,6 vezes, na frequência de 1,0 rad/s, com valores praticamente iguais na frequência de 10,0 rad/s. Após envelhecimento a curto prazo, estas razões passam para 1,8, 3,2 e 4,4, nas duas frequências. A frequência praticamente não interfere no enrijecimento provocado pela adição de fíler e o envelhecimento aumenta o efeito enrijecedor do fíler, especialmente nas relações  $f/a$  intermediárias e altas (0,30 e 0,45).



**Figura 12:** Aumento de  $G^*$  dos mástiques compostos com CAP 30/45

Já para o CAP 30/45, de maior consistência, o enrijecimento provocado pela relação  $f/a$  é pouco afetado pelo envelhecimento, pela temperatura e pela velocidade do tráfego. Quando se considera o enrijecimento médio do material virgem, ao longo do espectro de temperaturas, as relações  $f/a$  de 0,15, 0,30 e 0,45 aumentam o módulo complexo em 1,6, 2,2 e 4,3 vezes, para ambas as frequências. Para o material envelhecido, o aumento médio do módulo é de 1,5, 2,4 e 3,4 vezes, para ambas as frequências. O enrijecimento provocado pela relação  $f/a$  é favorável à resistência à deformação permanente, mas pode ser prejudicial para a fadiga por deformação controlada, independentemente da velocidade de tráfego, em especial para relações  $f/a$  altas como a de 0,45. Quando a relação  $f/a$  é alta (0,45), o envelhecimento ameniza o enrijecimento provocado pela adição de fíler (a razão de rigidez cai de 4,3 para 3,4 vezes). O envelhecimento influencia pouco o enrijecimento provocado pela relação  $f/a$ , para relações  $f/a$  baixas e intermediárias (0,15 e 0,30), e ameniza o efeito da relação  $f/a$  quando a relação  $f/a$  é alta (0,45).

Com base nas análises anteriores, é possível avaliar como o envelhecimento a curto prazo pode afetar os comportamentos à fadiga e à deformação permanente das misturas asfálticas quando da adição de fíler mineral ao ligante asfáltico, tomando por referência os efeitos da relação  $f/a$ , da consistência do ligante asfáltico de base e da velocidade de tráfego. A resistência à deformação permanente é favorecida pelo envelhecimento quando se combinam uma relação  $f/a$  alta com um ligante asfáltico menos consistente, já que o envelhecimento enrijece mais o CAP 50/70 que o 30/45, independentemente da velocidade de tráfego. No entanto, é importante lembrar que este enrijecimento pode se dar às custas de uma maior perda de massa durante a usinagem.

A resistência à fadiga por deformação controlada é prejudicada pelo envelhecimento a curto prazo, quando se combinam uma relação  $f/a$  alta, um ligante asfáltico menos consistente e velocidade baixa de tráfego. O ligante menos consistente enrijece mais com o envelhecimento nas temperaturas de ocorrência de trincas por fadiga, associado ao fato observado de que o envelhecimento acentua ligeiramente o enrijecimento do mástique composto com uma relação  $f/a$  alta (0,45). Buscando uma relação dos resultados de laboratório encontrados com a prática no Brasil, observa-se que a condição descrita anteriormente é comum em várias localidades, uma vez que a deformação controlada é compatível com revestimentos mais delgados (Huang, 2004). Ou seja, revestimentos delgados, CAP 50/70 com alta relação  $f/a$  e baixa velocidade dos veículos. Os resultados apresentados indicam como esta combinação é mais favorável ao trincamento por fadiga, um tipo de falha comum nos pavimentos do país.

A avaliação da influência do envelhecimento sobre a dependência da temperatura dos mástiques asfálticos não será ilustrada graficamente aqui por limitações de espaço. A comparação dos valores de  $\log a[T]$  aponta que o envelhecimento não afeta a dependência da temperatura dos mástiques compostos com CAP 30/45 e afeta ligeiramente os mástiques compostos com CAP 50/70. No caso do CAP 50/70, o envelhecimento a curto prazo promove uma pequena redução dos valores de  $\log a[T]$ , o que se reflete em uma ligeira mudança no padrão de variação da rigidez do mástique ao longo do espectro de temperaturas: os mástiques envelhecidos apresentam  $G^*$  superior aos virgens em frequências baixas. A relação  $f/a$ , para ambos os tipos de CAP, não afeta significativamente a dependência da temperatura dos mástiques.

#### **4. CONCLUSÕES**

Os mástiques compostos com o ligante asfáltico menos consistente (CAP 50/70) se mostraram mais sensíveis ao efeito do envelhecimento: para frequências de carregamento baixas, a 25°C, o envelhecimento aumenta em 3,5 vezes a rigidez dos mástiques compostos com CAP 50/70 e em 2,0 vezes a dos mástiques compostos com CAP 30/45. Entretanto, a frequência ameniza o enrijecimento provocado pelo envelhecimento: a 10 rad/s e 25°C, o enrijecimento é da ordem de 2,5 vezes para os mástiques compostos com CAP 50/70 e de 1,5 vezes para os compostos com CAP 30/45. Ao se observar o enrijecimento devido ao envelhecimento a curto prazo ao longo do espectro de temperaturas, o maior aumento de módulo se dá para os mástiques compostos com CAP 50/70, na faixa de 16 a 64°C, o que é favorável à resistência à deformação permanente da camada asfáltica, mas não à resistência à fadiga por deformação controlada.

A relação  $f/a$  proporciona enrijecimento substancial dos mástiques, porém tem pouca influência no fenômeno de envelhecimento a curto prazo. No caso dos mástiques compostos com CAP 30/45, o envelhecimento ameniza o efeito enrijecedor da relação  $f/a$  para relações  $f/a$  altas (0,45). No caso dos mástiques compostos com CAP 50/70, nas temperaturas intermediárias (próximas de 28°C), o envelhecimento ameniza ligeiramente o enrijecimento

provocado pela relação  $f/a$ , nas relações  $f/a$  baixas e intermediárias (0,15 e 0,30), porém acentua ligeiramente o enrijecimento quando a relação  $f/a$  é alta (0,45). Já nas temperaturas altas (em torno de 64°C), o envelhecimento aumenta o efeito enrijecedor do fíler, especialmente nas relações  $f/a$  intermediárias e altas (0,30 e 0,45). O envelhecimento não torna os mástiques compostos com CAP 30/45 mais sensíveis ao aumento da velocidade de tráfego de baixa para alta, já os mástiques compostos com CAP 50/70 se tornam ligeiramente sensíveis à frequência após o envelhecimento nas temperaturas intermediárias: o enrijecimento provocado pela relação  $f/a$  é menor para tráfego rápido.

Com base nas análises anteriores, é possível avaliar como o envelhecimento a curto prazo pode afetar os comportamentos à fadiga e à deformação permanente das misturas asfálticas quando da adição de fíler mineral ao ligante asfáltico. A resistência à deformação permanente é favorecida pelo envelhecimento quando se combinam uma relação  $f/a$  alta com um ligante asfáltico menos consistente, independentemente da velocidade de tráfego. A resistência à fadiga por deformação controlada é prejudicada pelo envelhecimento a curto prazo, quando se combinam uma relação  $f/a$  alta, um ligante asfáltico menos consistente e velocidade baixa de tráfego.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos do Departamento de Transportes da Universidade Federal do Ceará, pela disponibilização do laboratório para a realização de ensaios, à Capes, pelo programa Procad, e à Fapesp, pela concessão de Bolsa e Auxílio à Pesquisa na categoria de Jovem Pesquisador (processos no. 2006/55835-6 e 2006/61108-0) ao primeiro autor.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airey, G. D.; A. C. Collop; S. E. Zoorob; R. C. Elliot (2008) The Influence of Aggregate, Filler and Bitumen on Asphalt Mixture Moisture Damage. *Construction and Building Materials*, n.22, p.2015-2024.
- Al-Suhaibani, A.; J. Al-Mudaiheem e F. Al-Fozan (1992) Effect of filler type and content on properties of asphalt concrete mixes. In: MEININGER, R.C. (Ed.). *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance*. ASTM Special Technical Publication 1147, p.107-130.
- Anderson, D. A. (1987) Guidelines for Use of Dust in Hot Mix Asphalt Concrete Mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.56, p.492-516.
- Anderson, D. A.; H. U. Bahia e R. Dongre (1992a) Rheological Properties of Mineral Filler-asphalt Mastics and its Importance to Pavement Performance. In: MEININGER, R.C. (Ed.). *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance*. ASTM Special Technical Publication 1147, p.131-153.
- Anderson, D. A.; J. P. Tarris e D. Brock (1982) Dust Collector Fines and their Influence on Mixture Design. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.51, p.353-397.
- Anderson, D. A.; R. Dongre; D. W. Christensen e E. L. Dukatz (1992b) Effects of Minus no. 200-sized Aggregate on Fracture Behavior of Dense-graded Hot-mix Asphalt. In: MEININGER, R.C. (Ed.). *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance*. ASTM Special Technical Publication 1147, p.154-176.
- Castelo Branco, V. T. F. (2008) A Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixtures using the Dynamic Mechanical Analyzer. PhD dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, EUA.
- Castelo Branco, V. T. F.; E. Masad; A. Bhasin e D. N. Little (2008) Fatigue Analysis of Asphalt Mixtures Independent of Mode of Loading. *Transportation Research Record*, n.2057, p.28-36.
- Cheng, J.-S. e C.H. Peng (1998) Analyses of Tensile Failure Properties of Asphalt-mineral Filler Mastics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.10, n.4, p.256-262.
- Cooley Jr., L. A.; M. Stroup-Gardiner; E. R. Brown; D. Hanson e M. Fletcher (1998) Characterization of Asphalt-filler Mortars with Superpave Binder Tests. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.67, p.42-56.
- Dukatz, E. L. e D. A. Anderson, R. N. (1980) The Effect of Various Fillers on the Mechanical Behavior of Asphalt and Asphaltic Concrete. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.49, p.530-557.

- Bechara, M. F.; A. L. Faxina; G. T. P. Fabbri (2008a) Avaliação do Comportamento Reológico de Mástiques Asfálticos por meio de Curvas-mestre. In: XXII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Fortaleza, 2008.
- Bechara, M. F.; A. L. Faxina; G. T. P. Fabbri; A. C. Gigante; D. R. Nascimento (2008b) Propriedades Reológicas de Mástiques Asfálticos a Altas Temperaturas. In: 39ª. Reunião Anual de Pavimentação, Recife, 2008.
- Harris, B. M. e K. D. Stuart (1995) Analysis of Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.64, p.54-95.
- Huang, Y. H. (2004) *Pavement Analysis and Design*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Kandhal, P. S. (1981) Evaluation of Baghouse Fines in Bituminous Paving Mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.50, p.150-210.
- Kavussi, A. e R. G. Hicks (1997) Properties of Bituminous Mixtures Containing Different Fillers. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.66, p.153-186.
- Kim, Y-R. e D. N. Little (2004) Linear Viscoelastic Analysis of Asphalt Mastics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.16, n.2, p.122-132.
- Kim, Y-R.; D. N. Little e I. Song (2003) Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics – Mechanistic Evaluation. *Transportation Research Record*, n.1832, p.1-8.
- Kok, B. V.; M. Yilmaz (2009) The Effects of Using Lime and Styrene-butadiene-styrene on Moisture Sensitivity Resistance of Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, v.23, p.1999-2006.
- Shashidhar, N. e P. Romero (1998) Factors Affecting the Stiffening Potential of Mineral Fillers. *Transportation Research Record*, n.1638, p.94-100.
- Traxler, R. N. (1937) The Evaluation of Mineral Powders as Fillers for Asphalt. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v.8, p.60-67.
- Van de Ven, M. e K. Jenkins (2003) Rheological Characterisation of some (Polymer Modified) Bitumen and Bitumen-filler System at Compaction and In-service Temperatures. 6<sup>th</sup> RILEM Symposium, Zurich, p.88-94.

***Endereço dos autores:***

---

**Adalberto Leandro Faxina e Glauco Tulio Pessa Fabbri**

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13560-970, São Carlos, SP, 55 16 33739611, [alfaxina@sc.usp.br](mailto:alfaxina@sc.usp.br) e [glauco@sc.usp.br](mailto:glauco@sc.usp.br)

**Jorge Barbosa Soares**

Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 703, 60455-760, Fortaleza, CE, 55 85 33669488, [jsoares@det.ufc.br](mailto:jsoares@det.ufc.br)