

## AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA A SIMULAÇÃO DE ENVELHECIMENTO DE MÁSTIQUES ASFÁLTICOS EM LABORATÓRIO

### EVALUATION OF METHODOLOGIES FOR AGING SIMULATION OF ASPHALTIC MASTICS IN LABORATORY

**Vivian Silveira dos Santos Bardini<sup>1</sup>, Luis Miguel Gutiérrez Klinsky<sup>2</sup>, José Leomar Fernandes Júnior<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Doutora em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência e Tecnologia, Câmpus São José dos Campos, SP. E-mail: vibardini@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia Civil, Centro de Pesquisas Rodoviárias, Santa Isabel, SP. E-mail: luisgk@outlook.com

<sup>3</sup>Doutor em Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP. E-mail: leomar@sc.usp.br.

#### RESUMO

O envelhecimento em laboratório de mástiques asfálticos, que possuem carga mineral, deve ser analisado de forma diferente dos procedimentos já existentes para ligantes asfálticos. Para amostras com filer há a suspeita que no ensaio na Estufa de Vaso Pressurizado (PAV), de 100 °C por 20 horas, aconteça a decantação das partículas minerais, ocorrendo o envelhecimento apenas do ligante asfáltico e não na matriz ligante filer. Esse estudo avalia um procedimento modificado de envelhecimento, reduzindo a temperatura para 60 °C e incrementando o tempo para 100 horas, com a agitação da amostra a cada 20 horas. Foram avaliados três diferentes fileres: cal hidratada, cimento Portland e pó calcário; dois ligantes asfálticos: um CAP 50/70 e um 85/100; e realizados os ensaios no Reômetro de Flexão em Viga e o de Energia de Fratura nas duas condições de envelhecimento. Os resultados da rigidez indicam que o envelhecimento modificado produz valores superiores aos do convencional, provocando um maior enrijecimento dos ligante e mástique asfáltico. Os resultados da taxa de relaxação permitem concluir que o tipo de envelhecimento é um fator influente. Nos dados de energia de fratura notou-se o mesmo comportamento da rigidez, assim, as amostras submetidas ao PAV convencional podem levar a resistências por fadiga superestimada.

**Palavras-Chave:** filer mineral; mástique asfáltico; ligante asfáltico; envelhecimento; energia de fratura.

#### ABSTRACT

The aging in laboratory of asphalt mastics, which have mineral fillers, should be analyzed differently from existing procedures for asphalt binders. For samples with filler, it is suspected that the decantation of the mineral particles takes place in the pressurized vessel (PAV), 100 °C for 20 hours, with aging of the asphaltic binder only and not in the binder-filler matrix. This study evaluates a modified aging procedure, reducing the temperature to 60 °C and increasing the time to 100 hours, with the shaking of the sample every 20 hours. Three different fillers were evaluated: hydrated lime, Portland cement and limestone powder; two asphalt binders: one CAP 50/70 and one 85/100, and the tests were carried out on the Beam Flexural Rheometer and the Energy of Fracture in the two conditions of aging. The rigidity results show that the modified aging produces higher values than the conventional one, causing a greater stiffening of the binder and asphalt mastic. The relaxation rate results show that the type of aging is an influential factor. In the fracture energy data, the same behavior of the stiffness was noticed, so the samples subjected to conventional PAV can lead to overestimate fatigue strengths.

**Keywords:** mineral filler, asphalt mastic, asphalt binder, aging, fracture energy.

#### 1 – INTRODUÇÃO

Os sistemas de transportes são elementos estruturantes da vida econômica e social dos países, proporcionando os deslocamentos 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, assim, justifica-se o interesse pelo desenvolvimento de materiais de melhores desempenhos econômico e técnico 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. Já as trincas

por fadiga se manifestam 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 adequado ao tráfego projetado.

Assim, parte da deterioração de pavimentos asfálticos está relacionada com o envelhecimento do ligante asfáltico, que é basicamente um hidrocarboneto composto por moléculas de hidrogênio e carbono, oriundo do processo de refino do petróleo.

Um ligante asfáltico sofre o envelhecimento durante a fase construtiva e durante a sua vida útil de serviço. Esse envelhecimento é caracterizado pelo processo de oxidação, perda de voláteis, endurecimento físico e exsudativo (WHITEOAK, 1990). Esses processos são responsáveis pela alteração das características físicas, químicas e reológicas do ligante asfáltico.

As modificações da composição do ligante refletem no desempenho da mistura asfáltica e no tempo de vida do pavimento antes do aparecimento e agravamento dos defeitos. Por isso, há grande interesse no conhecimento do processo de envelhecimento e as formas de prever essas perdas ou alterações (AZEREDO, 2011).

A simulação do envelhecimento do ligante asfáltico que ocorre no campo pode ser realizada por meio de dois ensaios, segundo a metodologia de projeto SUPERPAVE: a Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT), que simula o envelhecimento no curto prazo, na fase construtiva; e a Estufa de Vaso Pressurizado (PAV), que visa reproduzir o envelhecimento no longo prazo, ao longo da vida útil de serviço.

Com a finalidade de atender satisfatoriamente as solicitações impostas pelo tráfego e pelo clima, muitas pesquisas focam selecionar adequadamente os materiais. Tais estudos são complementados por modelagens do comportamento dos materiais e sua interação com os fatores solicitantes, para que os defeitos sejam mínimos ao longo da vida útil projetada para o pavimento.

As misturas asfálticas são compostas por ligante asfáltico, agregados minerais e fíler, utilizadas no revestimento de pavimentos do tipo flexível ou semirrígidos. Com relação ao fíler mineral, é um material finamente dividido, que passa, pelo menos, 65% na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada. 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 (TUNNICLIFF, 1962).

Há muito tempo tem sido reconhecido que o fíler tem papel importante no comportamento de misturas asfálticas pois fornece pontos de contato adicionais entre os agregados minerais com diâmetros maiores e pode ser considerado como continuação da fração de agregados da mistura asfáltica, além de aumentar a estabilidade da mistura, aumentando a viscosidade do ligante e mudando suas propriedades (BARDINI, 2013).

O mástique asfáltico, que é a mistura de fíler mineral e de ligante asfáltico, tem influência significativa no comportamento das misturas asfálticas. A função do fíler mineral não é apenas de um material inerte no ligante asfáltico, pois as interações físico-químicas entre o ligante asfáltico e o fíler afetam o desempenho do pavimento (CRAUS e ISHAI, 1977; ISHAI e CRAUS, 1977; CRAUS; ISHAI; SIDES, 1978b; ISHAI e CRAUS, 1978; CRAUS; ISHAI; POR, 1979).

Com relação ao envelhecimento de mástiques asfálticos em laboratório, ainda não há um consenso entre os pesquisadores, devido a fatores como sedimentação do fíler nos equipamentos do ensaio, distribuição uniforme do fíler nas amostras, separação do fíler e o ligante asfáltico. O envelhecimento em laboratório de mástiques asfálticos, que possuem carga mineral, deve ser analisado de forma diferente dos procedimentos já existentes para ligantes asfálticos. Para amostras com fíler, há a suspeita que na temperatura convencional de ensaio na Estufa de Vaso Pressurizado, de 100 °C, aconteça a decantação das partículas minerais, ocorrendo o envelhecimento apenas no

ligante asfáltico e não na matriz ligante fíler (BARDINI, 2013).

Para Anderson e Dongre (1995) os ensaios convencionais de envelhecimento (Estufa de Película Fina Plana, TFOT, e RTFOT) não podem ser utilizados no sistema com fíler, pois os fileres se separam do ligante asfáltico em temperaturas altas, como a utilizada nesses ensaios, de 163 °C. Para esses pesquisadores o procedimento do PAV pode ser realizado em sistemas com fíler devido à utilização de temperaturas de ensaio mais baixas, que não reduzem a viscosidade do ligante asfáltico o suficiente para ocorrer a sedimentação do fíler. No PAV, o ligante ou mástique asfáltico é submetido a condições que simulam o envelhecimento que ocorre tipicamente no campo, em climas moderados – com temperaturas extremas por longos períodos de tempo, após 5 a 10 anos de serviço.

Molenaar, Hagos e Van De Ven (2010) utilizaram dois procedimentos para o envelhecimento de mástiques asfálticos: (1) envelhecimento a curto prazo por meio da realização do RTFOT convencional (163 °C por 75 minutos), seguido do ensaio de envelhecimento em cilindro rotativo (RCAT), por 235 minutos a 163 °C; (2) envelhecimento a longo prazo, realizado no RCAT, em períodos maiores (185 horas) e temperaturas menores (90 °C), após a amostra ser submetida ao envelhecimento a curto prazo). Esses pesquisadores concluíram, comparando os dados obtidos em laboratório com amostras retiradas do campo, que os procedimentos de envelhecimento de laboratório não foram capazes de simular adequadamente o envelhecimento no longo prazo, 7 anos, que ocorre no campo; apenas os resultados de envelhecimento no curto prazo, até 2 anos, puderam ser adequadamente simulados.

Gluber *et al.* (1999) realizaram uma pesquisa sobre os mástiques asfálticos por meio de medidas reológicas e para a simulação do envelhecimento, foi realizado, primeiramente, o RTFOT apenas nas amostras de ligante asfáltico e só depois misturaram o fíler, sendo o mástique submetido ao PAV. Os pesquisadores realizaram o ensaio do RTFOT com mástiques, porém, eram muito rígidos para cobrir os recipientes do RTFOT rapidamente quando colocados na estufa, sendo que a cobertura foi de apenas 80%, após sete rotações do equipamento, e mesmo após mais 10 rotações alguns recipientes ainda se apresentavam sem cobertura total. Além da distribuição do material no recipiente e seu contato com o ar ser muito diferente do que ocorre com os ligantes asfálticos e devido à dificuldade de se controlar o processo, os resultados não seriam confiáveis.

Cooley *et al.* (1998) caracterizaram mástiques asfálticos com a realização dos ensaios da metodologia SUPERPAVE e, para a simulação do envelhecimento, foram executados o ensaio de TFOT (curto prazo) e PAV (longo prazo). Os autores afirmam que durante os ensaios preliminares no RTFOT houve uma tendência do mástique de vazar dos recipientes, por isso, foi escolhido para simulação do envelhecimento no curto prazo o TFOT.

Huang e Zeng (2007) realizaram uma pesquisa sobre o efeito do envelhecimento em mástique asfálticos compostos por pó calcário e granito, submetendo amostras ao envelhecimento oxidativo no PAV a 60 °C, temperatura escolhida por simular realisticamente o efeito da exposição

ao meio ambiente a longo prazo, sendo que em temperaturas maiores – como 100 °C, utilizada convencionalmente no ensaio de PAV – as moléculas polares reativas são mobilizadas por dissociação da microestrutura, tornando-as mais disponíveis para oxidação. Os tempos de ensaio utilizados foram de 100, 400, 800 e 2.000 horas. Huang *et al.* (2002) também investigaram os efeitos da cal hidratada no envelhecimento de longo prazo e, para isso, realizaram o PAV a 60 °C em tempos de até 800 horas.

O envelhecimento do ligante asfáltico afeta diretamente o desempenho dos pavimentos asfálticos. Neste estudo avaliou-se o envelhecimento de ligantes e mástiques asfálticos, realizado o Ensaio de Vaso Pressurizado de duas formas: (1) convencional, em que se aplica 100 °C por 20 horas; (2) modificado, em que se aplica 60 °C por 100 horas, com a agitação a amostra a cada 20 horas.

Com isso, foram realizados os ensaios no Reômetro de Flexão em Viga, com a determinação da rigidez [S(t)] e com a taxa de relaxação [m(t)] e o Ensaio de Energia de Fratura de Ligantes (*Binder Fracture Energy – BFE*) nas duas condições de envelhecimento.

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliados três diferentes fileres: cal hidratada, cimento Portland e pó de calcário. A determinação da energia de fratura foi realizada em amostras de mástique sem envelhecimento e envelhecidas no PAV. Assim, o envelhecimento foi realizado de duas formas: (1) convencional, em que se aplica 100 °C por 20 horas; (2) modificado, em que se aplica 60 °C por 100 horas, com a agitação por mistura da amostra a cada 20 horas. Foram realizados os ensaios no Reômetro de Flexão em Viga (BBR), com a determinação da rigidez [S(t)] e a taxa de relaxação [m(t)] e o Ensaio de Energia de Fratura de Ligantes (*Binder Fracture Energy – BFE*).

Para a produção dos mástiques asfálticos foram utilizados dois tipos de ligante asfáltico: um Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70; e um CAP 85/100. Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentadas, respectivamente, as propriedades de ambos os CAP. Os resultados da determinação da massa específica real dos fileres, realizada conforme o procedimento ME 085 (DNER, 1994), estão apresentados na Tabela 3, assim como os valores médios de superfície específica obtidos segundo o procedimento proposto por Pinnila (1965).

Tabela 1 – Propriedades Físicas do CAP 50/70

Propriedade	Especificação	Resultado
Penetração (ASTM D 5)	50 a 70 (0,1 mm)	50 (0,1 mm)
Ponto de Amolecimento (ASTM D 36)	> 46,0 °C	48,6 °C
Viscosidade Brookfield a 135 °C (ASTM D 4402)	274,0 cP min	377,0 cP
Viscosidade Brookfield a 150 °C (ASTM D 4403)	112,0 cP min	187,0 cP
Viscosidade Brookfield a 177 °C (ASTM D 4404)	57,0 a 285,0 cP	69,0 cP

Tabela 2 – Propriedades Físicas do CAP 85/100

Propriedade	Especificação	Resultado
Penetração (ASTM D 5)	85 a 100 (0,1 mm)	102 (0,1 mm)
Ponto de Amolecimento (ASTM D 36)	> 43 °C	43,5 °C
Viscosidade Brookfield a 135 °C (ASTM D 4402)	214,0 cP min	252,5 cP
Viscosidade Brookfield a 150 °C (ASTM D 4403)	97,0 cP min	130,0 cP
Viscosidade Brookfield a 177 °C (ASTM D 4404)	28,0 a 114,0 cP	52,5 cP

Tabela 3 – Massa Específica Real, dos sólidos, e Superfície Específica (S<sub>e</sub>) dos Fileres

Material	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	S <sub>e</sub> (cm <sup>2</sup> /g)
Pó de Calcário	2,749	2.800 – 3.500
Cal Hidratada	2,350	5.000 – 15.000
Cimento Portland	3,030	2.200 – 2.750

Os fileres de cimento Portland e pó calcário foram utilizados na relação filer/asfalto (f/a) de 0,6 e 1,2, enquanto o filer de cal hidratada foi ensaiado com f/a de 0,3 e 0,6. Vale citar que neste trabalho filer é um material 100% passante na peneira de 0,075 mm de abertura (# 200).

A faixa granulométrica C do DNIT permite de 2% a 10% de material passante na peneira #200. Uma mistura asfáltica com 1,5% de cal, para um teor de projeto de ligante asfáltico de 5%, resulta na relação de 1,5/5, equivalente a f/a de 0,3. Raramente as misturas asfálticas empregam teores de cal superiores a 3%, isto é, relações de f/a superiores a 0,6, logo, não se justifica neste estudo avaliar relações superiores, como foi o caso dos fileres minerais.

### 2.1 Ensaio de Fluência em Viga

O equipamento do ensaio de fluência em viga a flexão é composto por uma estrutura para aplicação de carga, que, juntamente com a deflexão, são monitoradas ao longo do tempo, com suporte para o corpo de prova, um banho de álcool com temperatura controlada que mantém a amostra na temperatura de ensaio e proporciona um empuxo para contrabalançar o peso próprio da viga, um circulador para o fluido do banho e um sistema computadorizado de aquisição de dados.

O conjunto de aplicação de carga consiste em um equipamento capaz de aplicar o carregamento no meio do vão da viga, que deve ser capaz de aplicar uma carga de contato de 35 ± 10 mN ao corpo de prova e manter a carga de ensaio de 980 ± 50 mN com variação de ± 10 mN.

Antes da realização do ensaio, a temperatura deve ser selecionada e o banho deve ser ajustado na temperatura escolhida, permitindo que a temperatura do banho seja equilibrada com a temperatura de ensaio, o que leva geralmente de 60 a 90 minutos.

Para a preparação da amostra, primeiramente deve-se preparar os moldes de metal, de dimensões internas de 6,35 ± 0,05 mm por 12,70 ± 0,05 mm por 127 ± 5 mm, que consistem em colocar tiras de plástico, apropriadas para o ensaio, sob a superfície dos moldes já lubrificada.

Deve-se aquecer o ligante asfáltico até estar suficientemente fluido e despejar a amostra até encher completamente um extremo do molde e, então, preencher o molde até o outro extremo com excesso de material. O corpo de prova é deixado por, no mínimo, 45 a 60 minutos para resfriar. Após esse período deve-se aparar a face exposta do corpo de prova no nível do molde com uma espátula aquecida e, em seguida, colocar o conjunto em um banho a baixa temperatura por 5 minutos até que esteja suficientemente rígido para a desmoldagem. Imediatamente após a desmoldagem deve-se imergir o corpo de prova no banho na temperatura do ensaio durante  $60 \pm 5$  min.

Para a realização do ensaio, verifica-se inicialmente a carga de contato ( $35 \pm 10$  mN) e a carga de ensaio ( $980 \pm 50$  mN). Em seguida, o corpo de prova é posicionado e inicia-se o ensaio, com aplicação do pré-carregamento, de  $980 \pm 50$  mN, por  $1 \pm 0,1$  s e imediatamente em seguida reduz-se a carga para  $35 \pm 10$  mN por  $20 \pm 0,1$  s para, finalmente, aplicar a carga de ensaio por 240 s.

Os dados gerados no ensaio são a carga aplicada e a deflexão medida, em função do tempo de carregamento, em intervalos de 0,5 segundos. Com os dados pode-se determinar a rigidez do corpo de prova nos tempos de carregamento de 8,0; 15,0; 30,0; 60,0; 120,0 e 240 segundos, por meio da Equação 1.

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\xi(t)} \quad (1)$$

Em que:  $S(t)$  = rigidez à flexão em fluência, no tempo  $t$  (MPa);  $P$  = carga aplicada (N);  $L$  = largura da viga (mm)  $\xi(t)$  = deflexão da viga, no meio do vão, no tempo  $t$ ;  $b$  = base da viga (mm);  $h$  = altura da viga (mm).

## 2.2 Ensaio de Energia de Fratura de Ligantes (*Binder Fracture Energy – BFE*)

Os corpos de prova foram moldados para obtenção do formato “Dog Bone” de acordo com o procedimento T 314 (AASHTO, 2002), que prescreve a preparação de amostras de ligante asfáltico para o Ensaio de Tração Direta (*Direct Tension Test – DTT*). O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento proposto por Roque, Niu e Loop (2012).

A preparação da amostra consiste em aquecer o ligante ou o mástique asfáltico até que esteja líquido o suficiente para fluir adequadamente. Os moldes devem ser aquecidos aproximadamente na mesma temperatura do ligante asfáltico (Figura 1), por aproximadamente 3 minutos. Os moldes devem ser colocados em uma base para moldagem preparada com material antiaderente sendo que as paredes internas do molde também recebem o produto antiaderente, como glicerina, para que o desmolde seja realizado sem deformação do corpo de prova. A amostra deve ser colocada com excesso nos moldes, sendo deixada resfriar por, no mínimo 30 minutos. Ao final aparar-se a amostra com uma espátula aquecida, sendo que a configuração final deve ser de acordo com a Figura 2.

Figura 1 – Molde para o corpo de prova do ensaio de energia de fratura



Figura 2 – Configuração final do molde com o corpo de prova



Em seguida os corpos de prova, ainda nos moldes, devem ser colocados na estufa a temperatura controlada, dentro da prensa universal. Esse conjunto deve permanecer na temperatura de ensaio durante, no mínimo, 4 horas para estabilização da temperatura.

Para que o resultado de um ensaio seja aceitável há uma combinação ótima de uma faixa de temperatura e taxa de carregamento para obtenção da energia de fratura consistentemente; existem condições para que o tipo de ruptura seja satisfatório, ou seja, para cada tipo de ligante asfáltico há uma taxa de carregamento apropriada para diferentes temperaturas.

## 2.3 Envelhecimento de Ligantes e Mástiques Asfálticos

Foram utilizadas nesta pesquisa dois procedimentos para a simulação do envelhecimento dos mástiques asfálticos:

i. Ensaio de Vaso Pressurizado (PAV) Convencional: a amostra de mástique foi submetida ao PAV por 20 horas a  $100^\circ\text{C}$  em um vaso pressurizado, a  $2,10$  MPa. Nesse procedimento,  $50 \pm 0,5$  g de material foi colocado nos recipientes (pratos), formando uma película de aproximadamente 3,2 mm. A amostra foi colocada no equipamento (vaso) e, após a estabilização da temperatura ( $100 \pm 0,5^\circ\text{C}$ ), a pressão foi colocada ( $2,10 \pm 0,1$  Mpa), durante  $20\text{h} \pm 10$  min. No final do tempo de ensaio, a pressão interna do PAV foi liberada lentamente (10 minutos) e as amostras foram removidas do equipamento e colocadas em estufa a  $163^\circ\text{C}$  durante  $15 \pm 1$  min, em seguida foram retiradas dos pratos e colocadas em recipientes apropriados e levadas para a estufa de vácuo a  $170 \pm 5^\circ\text{C}$  por  $30 \pm 1$  min, para a retirada de bolhas;

ii. Ensaio de Vaso Pressurizado (PAV) Modificado: a amostra de mástique foi submetida ao PAV por 100 horas a  $60^\circ\text{C}$ , sendo que a cada 20 horas a pressão foi retirada e os mástiques são misturados novamente, no próprio recipiente de ensaio, para que a dispersão do mástique na amostra mantenha-se uniforme.

3 – RESULTADOS

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados da rigidez à fluência na flexão [S(60)] para os mástiques compostos pelos CAP 50/70 e 85/100, respectivamente, e com os fileres de pó calcário, cimento Portland e cal hidratada em função do teor de fíler para o envelhecimento no PAV convencional e no PAV modificado.

Figura 3 – Rigidez à fluência na flexão (S(60)) com o CAP 50/70

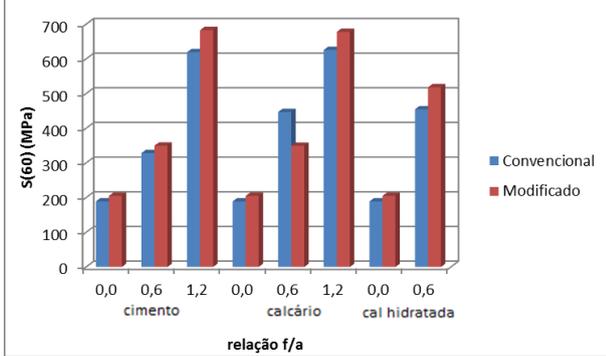
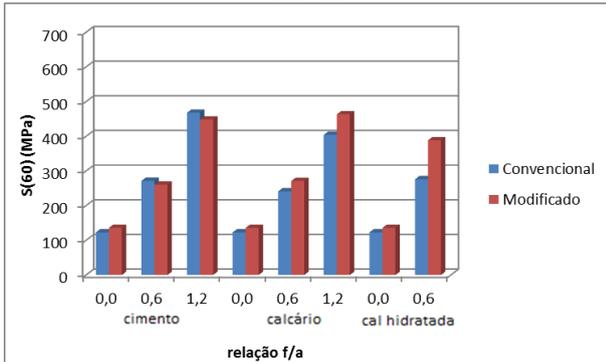


Figura 4 – Rigidez à fluência na flexão (S(60)) com o CAP 85/100



Para a análise da influência dos diferentes fatores sobre a rigidez à fluência na flexão [S(60)], primeiramente foram considerados os fatores tipo de fíler em três níveis: pó calcário, cimento Portland e cal hidratada; teor de fíler em dois níveis: f/a = 0,0 e 0,6; tipo de ligante asfáltico: CAP 50/70 e CAP 85/100; e tipo de envelhecimento: PAV convencional – 20 horas a 100 °C e PAV modificado – 100 horas a 60 °C. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.

Na segunda análise foram considerados os fatores tipo de fíler em dois níveis: pó calcário e cimento Portland; teor de fíler em três níveis: f/a = 0,0; 0,6 e 1,2; tipo de ligante asfáltico: CAP 50/70 e CAP 85/100; e tipo de envelhecimento: PAV convencional – 20 horas a 100 °C e PAV modificado – 100 horas a 60 °C. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 4 – Resumo da Análise de Variância da Rigidez à Fluência na Flexão (S(60)), valores de F<sub>0</sub> e influência dos fatores e suas interações para a primeira análise

Fator	F <sub>0</sub>	f <sub>0</sub>	Influência
A (tipo de fíler)	10,85	3,40	sim
B (teor de fíler)	348,72	4,26	sim
C (tipo de ligante asfáltico)	94,42	4,26	sim
D (tipo de envelhecimento)	3,05	4,26	não
AB	10,85	4,26	sim
AC	1,65	3,40	não
AD	3,34	3,40	não
BC	8,05	4,26	sim
BD	0,07	4,26	não
CD	1,30	4,26	não
ABC	1,65	3,40	não
ABD	3,34	3,40	não
ACD	1,39	3,40	não
BCD	1,67	4,26	não
ABCD	1,39	3,40	não

Tabela 5 – Resumo da Análise de Variância da Rigidez à Fluência na Flexão (S(60)), valores de F<sub>0</sub> e influência dos fatores e suas interações para a segunda análise

Fator	F <sub>0</sub>	f <sub>0</sub>	Influência
A (tipo de fíler)	0,50	4,26	não
B (teor de fíler)	1344,76	3,40	sim
C (tipo de ligante asfáltico)	430,76	4,26	sim
D (tipo de envelhecimento)	4,52	4,26	sim
AB	3,11	3,40	não
AC	6,55	4,26	não
AD	0,02	4,26	não
BC	45,06	3,40	sim
BD	6,29	3,40	sim
CD	0,03	4,26	não
ABC	2,70	3,40	não
ABD	2,94	3,40	não
ACD	11,63	4,26	sim
BCD	4,09	3,40	sim
ABCD	3,58	3,40	sim

Os fatores que mais influenciam na rigidez na fluência na flexão são o teor de fíler e o tipo de ligante asfáltico. O tipo de fíler e o tipo de envelhecimento são significativos apenas quando se considera a cal hidratada na análise, o que confirma o caráter ativo desse fíler.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os resultados da taxa de relaxação [m(60)] para os mástiques compostos pelo CAP 50/70 e 85/100, respectivamente, e com os fileres de pó calcário, cimento Portland e cal hidratada em função do teor de fíler para o envelhecimento no PAV convencional e no PAV modificado.

Figura 5 – Taxa de relaxação (m(60)) com o CAP 50/70

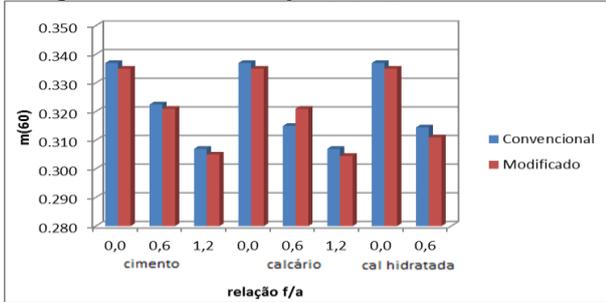
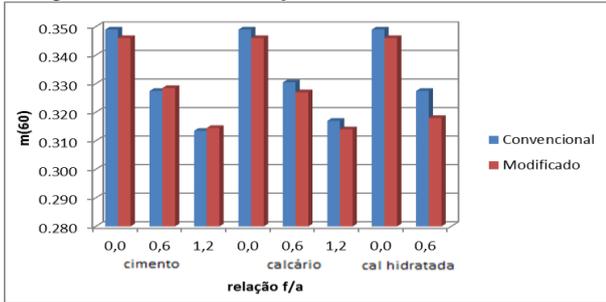


Figura 6 – Taxa de relaxação (m(60)) com o CAP 85/100



Para a análise da influência dos diferentes fatores sobre a taxa de relaxação [m(60)], primeiramente foram considerados os fatores tipo de fíler em três níveis: pó calcário, cimento Portland e cal hidratada; teor de fíler em dois níveis: f/a = 0,0 e 0,6; tipo de ligante asfáltico: CAP 50/70 e CAP 85/100; e tipo de envelhecimento: PAV convencional – 20 horas a 100 °C e PAV modificado – 100 horas a 60 °C. Os resultados podem ser observados na Tabela 6.

Na segunda análise foram considerados os fatores tipo de fíler em dois níveis: pó calcário e cimento Portland; teor de fíler em três níveis: f/a = 0,0; 0,6 e 1,2; tipo de ligante asfáltico: CAP 50/70 e CAP 85/100; e tipo de envelhecimento: PAV convencional – 20 horas a 100 °C e PAV modificado – 100 horas a 60 °C. Os resultados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 6 – Resumo da Análise de Variância da taxa de relaxação [m(60)], valores de f<sub>0</sub> e influência dos fatores e suas interações para a primeira análise

Fator	F <sub>0</sub>	f <sub>0</sub>	Influência
A (tipo de fíler)	5,86	3,40	sim
B (teor de fíler)	518,50	4,26	sim
C (tipo de ligante asfáltico)	140,93	4,26	sim
D (tipo de envelhecimento)	5,89	4,26	sim
AB	5,86	4,26	sim
AC	0,67	3,40	não
AD	1,91	3,40	não
BC	2,05	4,26	não
BD	0,29	4,26	não
CD	2,44	4,26	não
ABC	0,67	3,40	não
ABD	1,91	3,40	não
ACD	1,07	3,40	não
BCD	0,79	4,26	não
ABCD	1,07	3,40	não

Tabela 7 – Resumo da Análise de Variância da taxa de relaxação [m(60)], valores de f<sub>0</sub> e influência dos fatores e suas interações para a segunda análise

Fator	F <sub>0</sub>	f <sub>0</sub>	Influência
A (tipo de fíler)	0,23	4,26	não
B (teor de fíler)	1027,54	3,40	sim
C (tipo de ligante asfáltico)	294,07	4,26	sim
D (tipo de envelhecimento)	4,35	4,26	sim
AB	1,06	3,40	não
AC	3,47	4,26	não
AD	0,01	4,26	não
BC	2,64	3,40	não
BD	2,99	3,40	não
CD	0,97	4,26	não
ABC	1,45	3,40	não
ABD	1,01	3,40	não
ACD	5,73	4,26	sim
BCD	1,30	3,40	não
ABCD	2,41	3,40	não

Os fatores que mais influenciam na resposta do módulo de relaxação são o teor de fíler, o tipo de ligante asfáltico e o tipo de envelhecimento. O tipo de fíler é significativo apenas quando se considera a cal hidratada na análise, da mesma maneira que na análise da rigidez na fluência na flexão.

Nas Figuras 7 e 8 estão apresentados os resultados da Energia de Fratura (EF) para os mástiques compostos pelo CAP 50/70 e 85/100, respectivamente, e com os fileres de pó calcário, cimento Portland e cal hidratada em função do teor de fíler, sem envelhecimento, para o envelhecimento no PAV convencional e no PAV modificado.

Figura 7 – Energia de fratura com o CAP 50/70

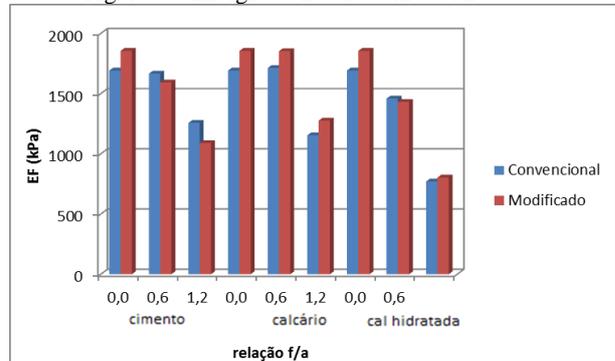
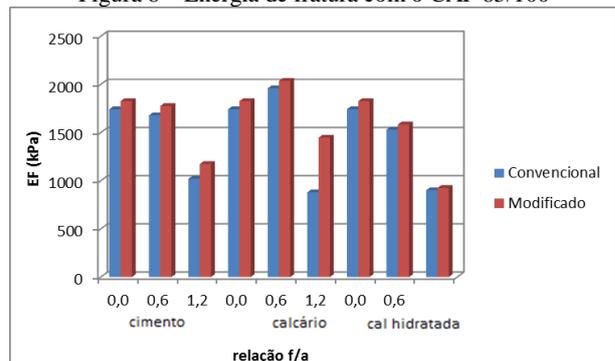


Figura 8 – Energia de fratura com o CAP 85/100



Para a análise da influência dos diferentes fatores sobre a energia de fratura, primeiramente consideraram-se os fatores tipo de fíler em três níveis: pó calcário, cimento Portland e cal hidratada; teor de fíler em dois níveis:  $f/a = 0,0$  e  $0,6$ ; tipo de ligante asfáltico: CAP 50/70 e CAP 85/100; e tipo de envelhecimento: PAV convencional – 20 horas a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  e PAV modificado – 100 horas a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os resultados podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo da Análise de Variância da Energia de Fratura, valores de  $f_0$  e influência dos fatores e suas interações para a primeira análise

Fator	$F_0$	$f_0$	influência
A (tipo de fíler)	324,64	9,00	sim
B (teor de fíler)	301,97	8,53	sim
C (tipo de ligante asfáltico)	19,66	8,53	sim
D (tipo de envelhecimento)	24,21	8,53	sim
AB	324,64	9,00	sim
AC	1,01	9,00	não
AD	0,73	8,53	não
BC	14,71	8,53	sim
BD	4,37	8,53	não
CD	0,40	8,53	não
ABC	1,01	9,00	não
ABD	0,73	9,00	não
ACD	1,00	9,00	não
BCD	2,48	8,53	não

Na segunda análise foram considerados os fatores tipo de fíler em dois níveis: pó calcário e cimento Portland; teor de fíler em três níveis:  $f/a = 0,0$ ;  $0,6$  e  $1,2$ ; tipo de ligante asfáltico: CAP 50/70 e CAP 85/100; e tipo de envelhecimento: PAV convencional – 20 horas a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  e PAV modificado – 100 horas a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os resultados podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo da Análise de Variância da Energia de Fratura, valores de  $f_0$  e influência dos fatores e suas interações para a segunda análise

Fator	$F_0$	$f_0$	influência
A (tipo de fíler)	11,54	8,53	sim
B (teor de fíler)	248,55	9,00	sim
C (tipo de ligante asfáltico)	1,68	8,53	não
D (tipo de envelhecimento)	20,08	8,53	sim
AB	5,92	9,00	não
AC	0,83	8,53	não
AD	8,16	8,53	não
BC	6,07	9,00	não
BD	1,42	9,00	não
CD	5,24	8,53	não
ABC	0,47	9,00	não
ABD	4,00	9,00	não
ACD	0,12	8,53	não
BCD	6,84	9,00	não

Os fatores que mais influenciam a energia de fratura são o teor e o tipo de fíler, embora os diferentes métodos de envelhecimento também influenciam a resposta dos mástiques.

## CONCLUSÕES

Este estudo visou avaliar diferentes procedimentos de envelhecimento de mástique asfáltico, a partir da análise da rigidez  $[S(t)]$ , taxa de relaxação  $[m(t)]$  e da energia de fratura. Para isso, foi realizado o procedimento usualmente recomendado para o ligante asfáltico puro e se propõe outro procedimento. Neste procedimento alternativo a ser avaliado reduziu-se a temperatura e incrementou-se o tempo de envelhecimento, com intervalos nos quais o mástique asfáltico foi homogeneizando novamente para garantir a distribuição das partículas minerais na matriz asfáltica.

Os resultados da  $S(60)$  permitem concluir que o envelhecimento modificado produz valores superiores aos do convencional para todos os tipos de fíler e ligante asfáltico, mostrando que um tempo maior de PAV em temperatura menor com revolvimento da amostra provoca um maior enrijecimento do ligante e mástique asfáltico. Analisando a propriedade de rigidez à fluência na flexão, quanto maior o seu valor, mais susceptível ao trincamento a baixas temperaturas, sendo assim, utilizar o mesmo procedimento de envelhecimento de ligante asfáltico puro para mástiques asfálticos, essas propriedades podem ser superestimadas.

Analisando os resultados da  $m(60)$ , o envelhecimento modificado produz valores inferiores aos do convencional, para todos os tipos de fíler e ligante asfáltico. Considerando que a taxa de relaxação está relacionada com a eficiência na dissipação das tensões formadas durante a contração do ligante asfáltico, quando a temperatura do pavimento cai abruptamente, quanto menor seu valor, maior a formação de trincas e fissuras. Portanto, os valores dessa propriedade obtidos por meio do procedimento modificado resultam em valores mais conservadores.

A energia de fratura é uma propriedade relacionada com a resistência à fadiga de ligantes asfálticos, com a previsão do desempenho do trincamento nas temperaturas intermediárias. Assim, quanto menor a energia de fratura, menor a habilidade da mistura em resistir ao trincamento por fadiga (BARDINI, 2013). Ambos os procedimentos de envelhecimento aumentam a energia de fratura dos mástiques, o que aumenta a resistência ao trincamento por fadiga. Esse aumento da energia de fratura dos mástiques envelhecidos no PAV modificado é ainda maior.

Os ensaios realizados no programa laboratorial deste estudo indicaram que o emprego do procedimento de envelhecimento de longo prazo empregado usualmente para ligantes asfálticos pode não ser adequado para os mástiques asfálticos. O procedimento aqui apresentado é uma alternativa que pode ser considerada para garantir a homogeneidade do envelhecimento do mástique asfáltico.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON, D. A.; DONGRE, R. The SHRP direct tension specification test – Its development and use. Physical properties of asphalt cement binders, J. C. Hardin ed. ASTM Special Technical Publication 1241. **American Society for Testing and Materials**, Philadelphia, PA, p. 51-66, 1995.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. T 314 – Standard method of test for

- determining the fracture properties of asphalt binder in Direct Tension (DT). 2002.
- AZEREDO, S. R. **Estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos usando a técnica de espalhamento coerente de raio-x**. Rio de Janeiro. UFRJ, COPPE. 2011.
- BARDINI, V. S. S. **Influência do filer mineral nas propriedades de misturas asfálticas densas**. 2013. 337 p. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2013.
- COOLEY JR., L. A.; STROUP-GARDINER, M.; BROWN, E. R.; HANSON, D. I.; FLETCHER, M. O. Characterization of asphalt-filler mortars with Superpave binder tests. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 67, p. 42-56, 1998.
- CRAUS, J.; ISHAI, I. A method for the determination of the surface area of fine aggregate in bituminous concrete. American Society for Testing and Materials, **Journal of Testing and Evaluation**, v. 5, n. 4, p. 284-291, July 1977. <https://doi.org/10.1520/JTE11665J>.
- CRAUS, J.; ISHAI 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, 1978a.
- CRAUS, J.; ISHAI I.; SIDES A. Some physic-chemical aspects on the effect of the filler on the properties and behavior of bituminous paving mixtures. **Asphalt Paving Technology**, v. 47, p. 558-588, 1978b.
- CRAUS, J.; ISHAI, I.; POR, N. Selective sorption in filler-bitumen systems. **Journal of Material Science**, v. 14, n. 9, p. 2195-2204, September 1979. <https://doi.org/10.1007/BF00688426>.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 085 – Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.
- GUBLER, R.; LIU, Y.; ANDERSON, D.; PARTL, M. Investigation of the system filler and asphalt binders by rheological means. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 68, p. 284-299, 1999.
- HUANG, S. C.; ZENG, M. Characterization of aging effect on rheological properties of asphalt-filler systems. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 8, n. 3, p. 213-223, 2007. <https://doi.org/10.1080/10298430601135477>.
- HUANG, S. C.; PETERSEN, J. C.; ROBERTSON, R. E.; BRANTHAVER, J. F. Effect of hydrated lime on long-term oxidative aging characteristics of asphalt. **Transportation Research Record**, n. 1810, p. 17-24, 2002.
- ISHAI, I.; CRAUS, J. Effects of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures. **Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 46, p. 228-258, 1977.
- ISHAI, I.; CRAUS, J. Effect of the filler in bituminous paving mixtures. **Proceedings RILEM International Symposium on Aggregates and Fillers**, Budapest, Hungary, October 1978.
- MOLENAAR, A. A. A.; HAGOS, E. T.; van de VEM, M. F. C. Effects of aging on the mechanical characteristics of bituminous binders in PAC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 8, August 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000021](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000021).
- PINILLA, A. **O sistema filer-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas**. Conselho Nacional de Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1965.
- ROQUE, R.; NIU, T.; LOOP, G. **Development of a binder fracture test to determine fracture energy**. Final report for FDOT BDK-75-977-27 Contract, University of Florida, Gainesville, FL, 2012.
- TUNNICLIFF, D. G. A review of mineral filler. **Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists**. v. 31, p. 118-150, 1962.
- WHITEOAK, D. **The shell bitumen handbook**, 1990.