



COMPORTAMENTO À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS FINAS COM ADIÇÃO DE MISTURA ASFÁLTICA FRESADA E RESÍDUO DE ÓLEO DE XISTO

Andrise Buchweitz Klug
Adalberto Leandro Faxina

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

RESUMO

A incorporação de misturas asfálticas fresadas a camadas asfálticas novas ganhou espaço devido aos apelos econômico e ambiental. O grande desafio desta técnica é corrigir o asfalto envelhecido, cuja alta rigidez torna as misturas asfálticas mais propensas ao trincamento. Agentes rejuvenescedores são empregados para restaurar as características do asfalto, reduzindo sua rigidez. Estudos na escala da matriz de agregado fino (MAF) vêm sendo realizados para avaliar a incorporação de materiais fresados a misturas asfálticas. O objetivo deste estudo é avaliar os efeitos do material fresado e do agente rejuvenescedor sobre o desempenho à fadiga de MAFs, por meio de ensaios de fadiga à tensão controlada. Os resultados mostraram que a alta rigidez do material fresado reduz a vida de fadiga das MAFs, ao incrementar as taxas de acúmulo de dano. A MAF preparada com asfalto novo apresentou desempenho à fadiga superior ao da MAF preparada com asfalto novo e agente rejuvenescedor.

ABSTRACT

The incorporation of reclaimed asphalt pavements (RAP) into new asphalt layers gained notoriety because of its economic and environmental appeals. The main challenge of such technique is to correct the aged binder, whose high stiffness makes the asphalt mixtures more prone to cracking. Rejuvenating agents have been used to restore the binder characteristics and reduce its stiffness. Most recently, the studies in the scale of the fine aggregate matrix (FAM) started to be used also to evaluate the incorporation of RAP into new asphalt mixtures. The objective of this study is to evaluate the effects of RAP and rejuvenating agent on the fatigue performance of FAMs, by means of fatigue tests in stress control. The results indicated that the high stiffness of the RAP reduces the fatigue lives of the FAMs due to the increase of the damage accumulation rates. The FAM prepared with new asphalt presented fatigue performance greater than the FAM prepared with new asphalt and rejuvenating agent.

1. INTRODUÇÃO

A reutilização de misturas asfálticas fresadas é uma prática que vem gradativamente ganhando espaço na produção de misturas asfálticas novas no Brasil. Dentro do contexto de economia e sustentabilidade, a reciclagem de quantidades cada vez maiores de misturas asfálticas fresadas representa redução nos custos de produção e na utilização de recursos não-renováveis (agregados minerais e asfalto), já que parte dos insumos é substituída por material reciclado. A incorporação de proporções maiores de misturas asfálticas recicladas e os efeitos de tais adições sobre a durabilidade das misturas asfálticas são objetos de estudos que visam garantir o melhor desempenho das camadas asfálticas produzidas com material reciclado.

Devido à tendência em aumentar a proporção do percentual de material fresado incorporado, o desempenho das misturas asfálticas a longo prazo se tornou uma preocupação. O asfalto envelhecido presente no material fresado aumenta a rigidez da mistura asfáltica, podendo levar à uma maior susceptibilidade ao trincamento por fadiga, embora o desempenho à deformação permanente seja geralmente incrementado. Para contornar tal problema, um agente rejuvenescedor deve ser adicionado, já que o rejuvenescimento restaura as características do asfalto, aproximando-o das características de um asfalto novo. Uma das abordagens utilizadas na avaliação das características das misturas asfálticas preparadas com material fresado e na definição de uma combinação ótima dos materiais é a realização de ensaios de fadiga na matriz de agregado fino (MAF).

Os ensaios com a MAF vêm sendo adotados na caracterização de misturas asfálticas, pois engloba parte da influência do agregado mineral e a influência integral do ligante asfáltico no processo de



dano por fadiga da mistura asfáltica. As mudanças na microestrutura do material são o princípio do processo de dano e ocorrem por meio de microtrincas na interface agregados-ligante e de microtrincas no próprio ligante, na matriz fina da mistura asfáltica. A MAF é composta por agregados finos, filler e ligante asfáltico e representa uma escala intermediária entre o mástique e a mistura completa. A estrutura interna da MAF é mais homogênea que a estrutura interna da mistura completa, o que pode levar a uma menor variabilidade nos resultados, além de garantir resultados mais realistas do que os obtidos dos ensaios no mástique, uma vez que a MAF contém uma parcela de agregados minerais maior que a passada na peneira de malha 200. Os estudos na MAF permitem aquilatar, com certo grau de equivalência, o comportamento à fadiga da mistura asfáltica completa, fazendo uso de quantidades menores de material e dos mesmos equipamentos empregados na caracterização reológica de ligantes e mástiques asfálticos.

Os dados resultantes dos ensaios de dano na MAF podem ser analisados por meio da teoria da mecânica do contínuo. Esta teoria admite um dado material danificado com uma certa rigidez como um material não danificado com rigidez reduzida, no qual as microtrincas estão uniformemente distribuídas. Nesta teoria, a dependência do tempo na resposta do material é eliminada por meio de princípios de correspondência, transformando variáveis físicas, como tensão, deformação e rigidez, nas pseudovariáveis pseudotensão, pseudodeformação e pseudorrigidez. A evolução do dano no material é descrita por meio de uma função $C(S)$, cuja redução na pseudorrigidez, C , está associada ao estado interno do material, S .

Este estudo é parte da dissertação de mestrado do primeiro autor, na qual ensaios de dano por fadiga à tensão controlada foram realizados utilizando amostras cilíndricas de MAF (40 mm de altura e 12 mm de diâmetro), compostas por diferentes proporções de fresado (0, 20, 40 e 100%), dois CAPs (50/70 e 85/100) e resíduo de óleo de xisto como agente rejuvenescedor, adicionado à mistura em diferentes proporções (100/0, 50/50 e 0/100% – asfalto/agente rejuvenescedor). Neste artigo, serão apresentados os resultados referentes às MAFs que foram produzidas variando a porcentagem de fresado (0, 20 e 100%), utilizando o CAP 50/70 para correção do teor de asfalto e o resíduo de óleo de xisto. Os dados dos ensaios foram utilizados para prever o comportamento à fadiga das misturas asfálticas finas por meio do ajuste de um modelo mecanístico de previsão de vida de fadiga baseado na teoria do dano contínuo viscoelástico. O objetivo principal desta pesquisa é investigar o efeito da incorporação de proporções variadas de misturas asfálticas fresadas e do resíduo de óleo de xisto como agente de rejuvenescimento no desempenho à fadiga de misturas asfálticas finas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Reciclagem de misturas asfálticas

A incorporação de misturas asfálticas fresadas a misturas asfálticas novas surgiu como alternativa para contornar os altos custos dos insumos relacionados ao petróleo, durante a crise mundial do petróleo na década de 1970, e tem sido adotada pela indústria da pavimentação em diversos países. Atualmente, países como Alemanha e Espanha reutilizam praticamente 100% do volume anual de misturas asfálticas fresadas produzido, ao passo que a Holanda reutiliza cerca de 80%, a Itália 70% e a França cerca de 68% (EAPA, 2015). No Japão e nos Estados Unidos, a atual taxa de reciclagem é próxima a 100% (Kubo, 2014; Hansen e Copeland, 2015).

Teoricamente, uma mistura com material fresado deve ser produzida de maneira que apresente as mesmas propriedades uma mistura produzida com novos materiais (Newcomb *et al.*, 2007),



porém ainda há muitas incertezas relacionadas ao desempenho a longo prazo de misturas asfálticas com material fresado, especialmente aquelas produzidas com altos teores de material reciclado (Copeland, 2008). Alguns estudos recentes indicam que misturas asfálticas com material fresado, projetadas e produzidas adequadamente, podem apresentar desempenho similar a misturas contendo apenas materiais virgens, quando as proporções de material fresado variam entre 10 e 30% (McDaniel e Anderson, 2000; Mogawer *et al.*, 2011). Outros estudos mostram a viabilidade de produzir misturas asfálticas por meio da incorporação de teores de material fresado mais altos – da ordem de 50% (Kim *et al.*, 2009; Mogawer *et al.*, 2016) e 100% da massa total (Silva *et al.*, 2012; Zaumanis *et al.*, 2014).

O asfalto enrijecido presente nas misturas asfálticas fresadas provoca acréscimo na rigidez da mistura asfáltica, o que pode afetar o desempenho a longo prazo do pavimento. A ampla gama de estudos já realizados indica um efeito positivo na resistência à deformação permanente de misturas compostas com material fresado, com exceção àquelas com alto teor de RAP, cujo desempenho à deformação permanente ainda não se encontra bem estabelecido (Freire *et al.*, 2014). Em relação à resistência ao trincamento por fadiga, o panorama geral ainda é inconclusivo, visto que a adição de material fresado pode levar a resultados positivos em alguns casos e negativos em outros (Freire *et al.*, 2014).

Asfaltos de penetração alta são adicionados à mistura asfáltica contendo material reciclado, no intuito de compensar a rigidez excessiva oriunda do asfalto envelhecido. Para tanto, o asfalto novo deve ser selecionado com base no nível de rigidez do ligante envelhecido (Tavakol *et al.*, 2017). Agentes rejuvenescedores também podem ser adicionados à mistura asfáltica, pois atuam de forma a restaurar as propriedades físicas e químicas do asfalto envelhecido, de modo a aproximá-las das presentes em um asfalto virgem (Newcomb *et al.*, 2007). Tais produtos tem o papel de restaurar a estrutura coloidal e os componentes químicos do asfalto endurecido, reduzindo a viscosidade e a rigidez e aumentando a ductilidade (Ali *et al.*, 2015). Se o ligante envelhecido for corretamente rejuvenescido, maiores porcentagens de material fresado podem ser incorporadas, sem comprometer o desempenho do pavimento (Ali *et al.*, 2015). Pesquisadores confirmaram a eficácia do uso de rejuvenescedores, reportando principalmente o efeito positivo dos rejuvenescedores na resistência ao trincamento por fadiga e de origem térmica (Shen *et al.*, 2007, Yu *et al.*, 2014).

No Brasil, um dos agentes rejuvenescedores mais utilizados é o resíduo de óleo de xisto (AR-5) (Castro, 2003), fração pesada do óleo de xisto obtida por fracionamento a vácuo do óleo de xisto bruto (Faxina, 2006). Alguns estudos verificaram que uma fração destilada de óleo de xisto, quando utilizada como agente rejuvenecedor, resulta em desempenho comparável ao desempenho de outros agentes rejuvenescedores comerciais contendo derivados de petróleo (Plancher e Peterson, 1982), porém apresenta maior aromaticidade, acarretando maior poder de rejuvenescimento, e contém alto teor de nitrogênio básico, conferindo maior adesividade do ligante recuperado ao agregado, quando comparado a outros produtos derivados do petróleo diretamente (Leite *et al.*, 1990).

2.2. Matriz de agregado fino – MAF

A análise das propriedades das misturas asfálticas compostas com material fresado pode ser feita por meio de ensaios reológicos no asfalto extraído e recuperado da mistura asfáltica reciclada (Peterson *et al.*, 2000; Ma *et al.*, 2012). Porém, durante este processo, pode ocorrer alteração das propriedades do asfalto pela ação dos solventes (Ma *et al.*, 2012), incluindo o



aumento da rigidez do asfalto por conta da potencial reação entre componentes do asfalto e o solvente (Burr *et al.*, 1991). Uma alternativa para contornar estas limitações consiste na análise das propriedades mecânicas da mistura por meio de ensaios reológicos em amostras de MAF (He *et al.*, 2016; Nabizadeh, 2015).

Com base no entendimento de que o processo de dano nas misturas asfálticas começa nas descontinuidades do material, como vazios e microtrincas, sejam microtrincas na interface agregado-ligante (adesivas) ou microtrincamentos do próprio asfalto (coesivas), pesquisadores como Kim *et al.* (2003a,b) passaram a utilizar a MAF para estimar o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Kim e Little (2005) desenvolveram um método de ensaio que consiste em submeter as amostras cilíndricas de MAF a carregamento oscilatório, seguindo dois passos: 1) ensaios a baixas deformações, para identificar as propriedades viscoelásticas do material; e 2) ensaios a altas deformações, para avaliar a evolução do dano no material. Dados de ensaios realizados na MAF foram comparados aos resultados de ensaios realizados na mistura completa e as correlações indicaram que os ensaios na escala da MAF fornecem informações satisfatórias para prever o comportamento da mistura completa (Nabizedeh, 2015; Freire *et al.*, 2017).

2.3. Teoria do dano contínuo viscoelástico – VECD (*Viscoelastic continuum damage theory*)

Na termodinâmica, o comportamento de um corpo elástico que sofre mudanças em sua estrutura pode ser expresso por meio de tensões, σ , e deformações, ϵ , conforme a Equação 2.1, na qual W_T é o trabalho realizado. Além disso, a existência de uma função de energia de deformação $W=W(\epsilon, S_m)$ é admitida, na qual S_m ($m = 1, 2, 3, M$) se refere a um incremento na variável de estado interno, S . As mesmas relações utilizadas para descrever o comportamento de materiais elásticos podem ser utilizadas para materiais viscoelásticos, porém as variáveis tensão e deformação não são, necessariamente, quantidades físicas, mas pseudovariáveis: pseudotensão (σ^R) e pseudodeformação (ϵ^R). Por meio de princípios de correspondência, o comportamento de materiais viscoelásticos pode ser representado por uma relação de tensão e pseudodeformação (Equação 2.2), em que $W^R = W^R(\epsilon^R, S_m)$ é a função da energia de pseudodeformação. A lei da evolução do dano para materiais viscoelásticos é dada pela Equação 2.3, na qual \dot{S}_m é a taxa de evolução do dano e α_m é uma constante do material (Schapery, 1984; 1990).

$$W_T = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (2.1)$$

$$\sigma = \frac{\partial W^R}{\partial \epsilon^R} \quad (2.2)$$

$$\dot{S}_m = \left(- \frac{\partial W^R}{\partial S_m} \right)^{\alpha_m} \quad (2.3)$$

O comportamento mecânico de misturas asfálticas passou então a ser abordado pela mecânica do contínuo. Estudos verificaram que, utilizando esta teoria seria possível caracterizar o dano à fadiga da mistura asfáltica, independentemente do modo de aplicação do carregamento (uniaxial ou torsional), modo do carregamento (tensão ou deformação controlada), amplitude e frequência do carregamento (Lee e Kim, 1998; Daniel e Kim, 2002). Lee e Kim (1998) realizaram estudos sobre o comportamento mecânico do concreto asfáltico e propuseram uma solução para a lei da evolução do dano. Aqueles pesquisadores verificaram que a pseudorrigidez, C , é função do estado interno do material, S , e a equação constitutiva para materiais viscoelásticos com dano crescente pode ser reescrita de forma que $\sigma = IC(S)\epsilon^R$, na qual I é a pseudorrigidez inicial considerada para minimizar as variações entre amostras. Após ajustes matemáticos, a variável de estado interno do material, S , pode ser calculada por meio da Equação 2.4, na qual α é a taxa de evolução do dano. A função $C(S)$ é então obtida plotando a curva $C \times S$ e ajustando um modelo de regressão (Equação 2.5) à curva, em que C_0 , C_1 , e C_2 são coeficientes do modelo.



$$S \equiv \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} (\varepsilon^R)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\alpha/(1+\alpha)} (t_i - t_{i-1})^{\alpha/(1+\alpha)} \quad (2.4)$$

$$C(S) = C_0 - C_1 (S_1)^{C_2} \quad (2.5)$$

2.4. Modelo mecanístico de previsão de vida de fadiga

Um modelo mecanístico de previsão de vida de fadiga derivado da teoria do VECD é descrito nas Equações 2.6 a 2.8. O modelo estima o número de ciclos necessário para degradar o material, N_f , a um certo nível de pseudorrigidez, C , ou para acumular um certo nível de dano, S_f , a uma dada frequência, f , e a uma certa amplitude de pseudodeformação, ε^R . Os parâmetros C_1 e C_2 são obtidos da Equação 2.5 (Lee *et al.*, 2000; Kim e Little, 2005).

$$N_f \equiv A (\varepsilon^R)^{-B} \quad (2.6)$$

$$A = f \left\{ \frac{1}{2} C_1 C_2 \right\}^{\alpha} \{1 + \alpha(1 - C_2)\}^{-1} S_f^{[1 + \alpha(1 - C_2)]} \quad (2.7)$$

$$B = 2\alpha \quad (2.8)$$

2.5. Viscoelasticidade linear

Materiais viscoelástico-lineares apresentam comportamento intermediário entre o elástico e o viscoso e suas propriedades dependem da temperatura e da taxa de carregamento. A baixas temperaturas ou altas frequências, tais materiais se comportam como sólidos elásticos, ao passo que a altas temperaturas ou baixas taxas de carregamento, tendem a se comportar como fluidos viscosos. Embora não haja um material que seja perfeitamente linear, independentemente das condições às quais esteja sujeito, a caracterização viscoelástico-linear tem se mostrado adequada para descrever o comportamento reológico dos ligantes asfálticos (Bahia *et al.*, 1992).

Para caracterizar a resposta viscoelástica dos materiais asfálticos, três tipos de carregamento podem ser empregados: i) ensaio de fluência: o acúmulo de deformação é observado quando uma carga constante ao longo do tempo é aplicada ao material e a compliância na fluência, $D(t)$, é obtida pela relação entre deformação e tensão; ii) ensaio de relaxação: o material é submetido a uma deformação constante, enquanto a tensão é aliviada ao longo de tempo, e o módulo de relaxação, $G(t)$, é função da tensão ao longo do tempo necessária para manter a deformação constante; e iii) ensaio a taxa de deformação constante: o material é submetido a um carregamento que provoca uma taxa de deformação constante (Faxina, 2006).

Nos estudos com MAF, ensaios de fluência podem ser empregados na estimativa da taxa de relaxação dos materiais (Karki, 2014; Karki et al., 2015), porém a curta duração destes ensaios pode não ser indicada para a perfeita caracterização de alguns materiais. Uma alternativa é obter a taxa de relaxação dos materiais por meio da conversão de um conjunto de medidas de $G^* \cdot \cos \delta$ (G') obtido em diversas frequências na curva de relaxação do material, da qual, por meio do ajuste de uma função potencial, se obtém a taxa de relaxação. Em se procedendo desta forma, o material fica mais tempo sujeito a carregamento que em um ensaio de fluência e a estimativa da taxa de relaxação é mais precisa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Foram empregados o agregado mineral novo, de origem basáltica, proveniente da Pedreira Bandeirantes, localizada no município de São Carlos, SP, e o material fresado coletado em



rodovias da região do município de São Carlos. Em ambos os casos, foram utilizadas apenas as partículas passantes na peneira #10 (2,00 mm) na produção das MAFs. A distribuição granulométrica da fração fina do agregado novo foi ajustada para enquadrá-la ao centro da faixa C do DNIT. O teor de asfalto presente no material fresado foi determinado por meio de ensaio de extração e o resultado obtido foi 7,1%. O material fresado não foi enquadrado na mesma faixa granulométrica do agregado mineral novo, em função da dificuldade em se fazer o controle granulométrico do material fresado quando a sua incorporação é feita sem extração do asfalto. A densidade do agregado mineral novo foi utilizada na estimativa do teor de asfalto pelo método da superfície específica, tendo sido obtido um teor de 8,0%. A correção do teor de asfalto do material fresado foi feita por meio da adição de CAP 50/70 e agente rejuvenescedor (resíduo de óleo de xisto).

A Tabela 1 apresenta informações detalhadas da composição das MAFs e o cálculo para correção do teor de asfalto. Para a MAF 3, por exemplo, composta com 20% de fresado e 80% de agregados novos, 6,40% em massa de asfalto novo são necessários para recobrir os 80% de agregado novo, admitindo um teor de asfalto de 8,00% ($8,00 \times 0,80 = 6,40$), e 0,18% em massa de asfalto novo é necessário para recobrir os 20% de material fresado, admitindo um teor de asfalto residual de 7,10% ($[8,00 - 7,10] \times 0,20 = 0,18$). O mesmo raciocínio se aplica à MAF 4, sendo que, neste caso, o teor de 0,18% corresponde a 0,09% de asfalto novo e a 0,09% de agente de rejuvenescimento. Os corpos de prova foram moldados em compactador giratório com número de giros igual a 100. As extremidades dos corpos de prova foram serradas e uma serra copo acoplada a uma furadeira de bancada foi empregada na extração das amostras de MAF.

Tabela 1: Composição das MAFs

MAF	CAP 50/70 (%)	óleo de xisto 1 (%)	observação
MAF 1	-	-	somente material fresado
MAF 2	8,00	-	agregado mineral e asfalto novos
MAF 3	$0,18 + 6,40 = 6,58$	-	20/80* – 100/0**
MAF 4	$0,09 / 6,40$	0,09	20/80 – 50/50

*percentuais de material fresado e agregados minerais novos

**percentuais de asfalto novo e agente rejuvenescedor

3.2. Ensaios no DSR

3.2.1. Faixa de viscoelasticidade linear

Foi executada uma varredura de tensão, 5 a 450 kPa, na temperatura de 25°C e na frequência de 1 Hz, a fim de definir a faixa de viscoelasticidade linear dos materiais. A faixa de viscoelasticidade linear adotada nesta pesquisa é aquela em que a rigidez inicial sofre redução de até 10%. Tal tensão foi utilizada posteriormente no ensaio de *fingerprint*. O corpo de prova empregado nesta etapa foi descartado logo após a conclusão deste procedimento.

3.2.2. Propriedades viscoelástico-lineares

O ensaio de *fingerprint* foi realizado a fim de obter os valores de módulo complexo (G^*) e ângulo de fase (δ) dos materiais, em diferentes temperaturas, para cálculo do parâmetro m (taxa de relaxação do material e que corresponde à inclinação da curva do módulo de relaxação vs. tempo: $m = -\log G[t] / \log[t]$ [Schapery, 1975]). Foi adotada a tensão de 15 kPa, a fim de evitar a indução de dano no material. As frequências empregadas neste procedimento foram: 30; 26; 22; 18; 14; 10; 6; 4; 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05 e 0,01.



Os valores do módulo de armazenamento $G'(\omega) = |G^*(\omega)| \cos \delta(\omega)$ foram calculados e a curva $G'(\omega)$ vs. frequência angular, ω , foi traçada. A esta curva foi ajustado o modelo de Maxwell, por meio de Séries de Prony. Em seguida, a curva foi convertida do domínio de frequência para o domínio de tempo, utilizando uma Transformada de Laplace e os dados do módulo de cisalhamento, G , em função do tempo, foram obtidos. A curva $G(t)$ vs. tempo foi construída e a uma equação potencial ($G = G_0 + G_1 t^m$) foi ajustada aos dados, a fim de estimar o parâmetro m do material.

3.2.3. Ensaio de dano

Ensaio oscilatório sob tensão controlada foram realizados a fim de induzir dano aos materiais. As tensões empregadas estão na faixa de 50 a 250 kPa. O módulo complexo viscoelástico-linear (G^*_{LVE}) adotado corresponde à média dos valores de G^* obtidos no *fingerprint*, na frequência de 1 Hz. Os valores da pseudorrigidez (C) e do dano acumulado (S) foram calculados por meio das equações da teoria do dano contínuo viscoelástico.

4. RESULTADOS

4.1. Propriedades viscoelástico-lineares

Segundo Lee e Kim (1998), a taxa de evolução do dano, α , pode ser calculada como $\alpha = 1/m$, para ensaios sob tensão controlada, sendo o parâmetro m a taxa de relaxação do material. Amostras diferentes de uma mesma mistura podem apresentar variações no parâmetro m , bem como no valor de G^*_{LVE} , devido à heterogeneidade inerente aos materiais. A Tabela 2 apresenta os valores individuais e médios das propriedades viscoelásticas dos materiais.

Tabela 2: Propriedades viscoelástico-lineares das MAFs

MAF	CP	V _v (%)	m	m(médio)	α	α (médio)	G^*_{LVE}	G^*_{LVE} (médio)
MAF 1	03	3,90	0,141	0,141	7,10	7,10	$5,12 \times 10^9$	$5,12 \times 10^9$
MAF 2	02	1,20	0,547	0,546	1,83	1,84	$5,05 \times 10^8$	$5,08 \times 10^8$
MAF 2	04	1,30	0,544		1,84		$5,12 \times 10^8$	
MAF 3	07	1,20	0,351	0,354	2,85	2,83	$1,00 \times 10^9$	$8,54 \times 10^8$
MAF 3	09	1,20	0,356		2,81		$7,08 \times 10^8$	
MAF 4	01	4,10	0,351	0,379	2,85	2,65	$1,04 \times 10^9$	$9,84 \times 10^8$
MAF 4	04	3,30	0,406		2,46		$9,27 \times 10^8$	

4.2. Curvas características e curvas de fadiga

Foram testadas duas amostras de cada MAF, à exceção da MAF 1, dado que a rigidez elevada dificulta a replicação. As curvas características das MAFs foram construídas conforme o modelo proposto por Lee e Kim (1998). As amostras da MAF 2 apresentaram propriedades viscoelásticas similares e curvas características sobrepostas. A Figura 1 apresenta as curvas características das MAFs 1 e 2. As propriedades das MAFs 3 e 4 apresentaram certa diferença, resultando em curvas características diferentes. Para o ajuste das curvas CxS , foi considerada a média das propriedades de cada amostra. A Figura 2 apresenta as curvas CxS das duas amostras da MAF 3 e das duas amostras da MAF 4, obtidas com base nas propriedades obtidas nos ensaios, bem como as curvas obtidas com base na média das propriedades das duas amostras.

A vida de fadiga dos materiais, N_f , foi prevista considerando o modelo mecanístico de previsão de vida fadiga desenvolvido por Lee *et al.* (2000) e Kim e Little (2005). Os modelos de fadiga foram ajustados para uma redução de 50% na pseudorrigidez dos materiais. As curvas de fadiga



resultaram ligeiramente diferentes para amostras de um mesmo material, por conta da variabilidade constatada nas propriedades viscoelásticas das amostras. Esta diferença pode ser corrigida com a reconstrução das curvas características com base nas propriedades viscoelásticas médias. As curvas de fadiga para cada amostra, considerando as curvas características originais e as reconstruídas, são apresentadas nas Figuras 3 e 4.

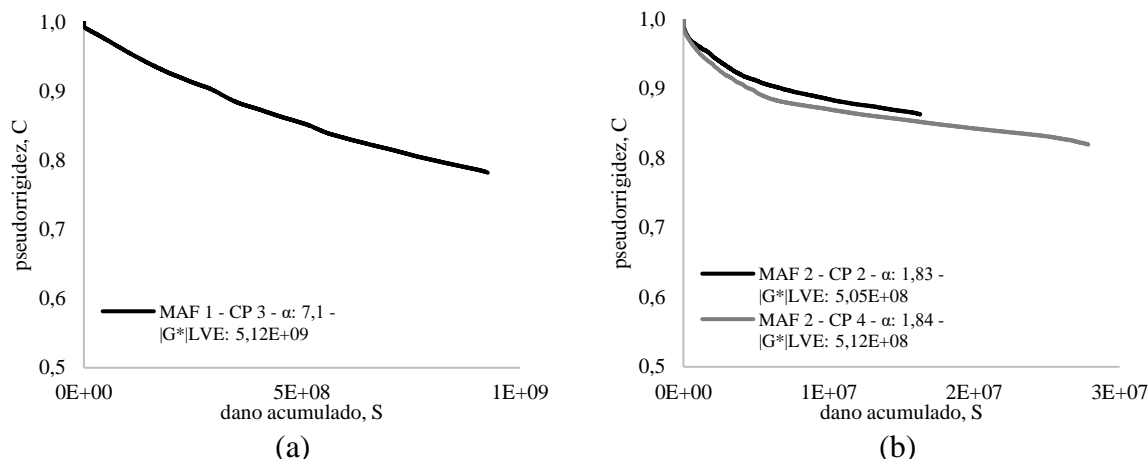


Figura 1: Curvas $C \times S$ para (a) MAF 1 (material fresado) e (b) MAF 2 (agregado e ligante novos)

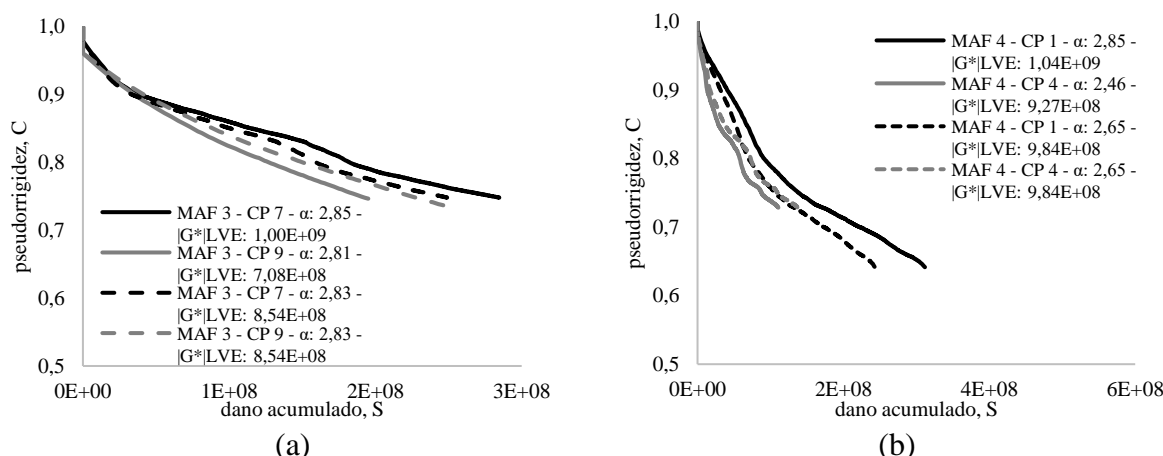


Figura 2: Curvas $C \times S$ obtidas com base nos dados dos ensaios e Curvas $C \times S$ obtidas com base na média das propriedades viscoelásticas para: (a) MAF 3 e (b) MAF 4

A Figura 5a apresenta as curvas características para as quatro MAFs analisadas. A Figura 5b apresenta as curvas de fadiga das MAFs, por meio das quais é possível comparar o efeito das diferentes proporções de material fresado (0%, 20% e 100%) e da adição de asfalto ou asfalto e agente sobre a vida de fadiga dos materiais. O parâmetro A do modelo de fadiga é dependente da variação da integridade do material em função do dano acumulado (curva $C \times S$) e do módulo complexo inicial (quando o material ainda não sofreu dano). Já o parâmetro B expressa diretamente a taxa de evolução do dano imposto ao material. A Tabela 3 contém os valores individuais e médios dos parâmetros A e B das amostras ensaiadas. As curvas de fadiga (Figura 5) são muito distintas e o comportamento relativo dos materiais difere para diferentes níveis de deformação. Por esta razão, dois níveis de deformação foram analisados (0,005% e 0,050%) e os valores da vida de fadiga para cada nível de deformação, bem como o ordenamento das MAFs quanto ao desempenho à fadiga, estão apresentados na Tabela 4.

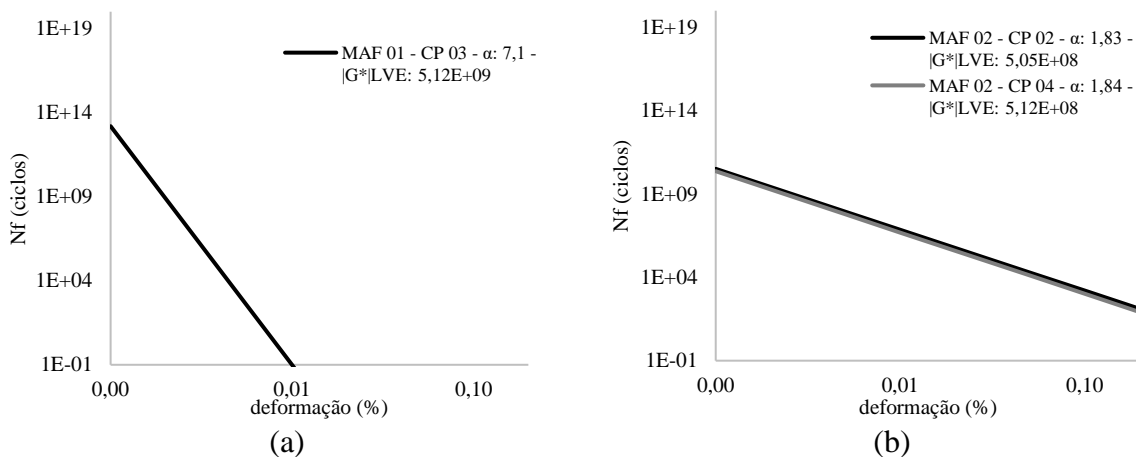


Figura 3: Curvas de fadiga: (a) MAF 1 e (b) MAF 2

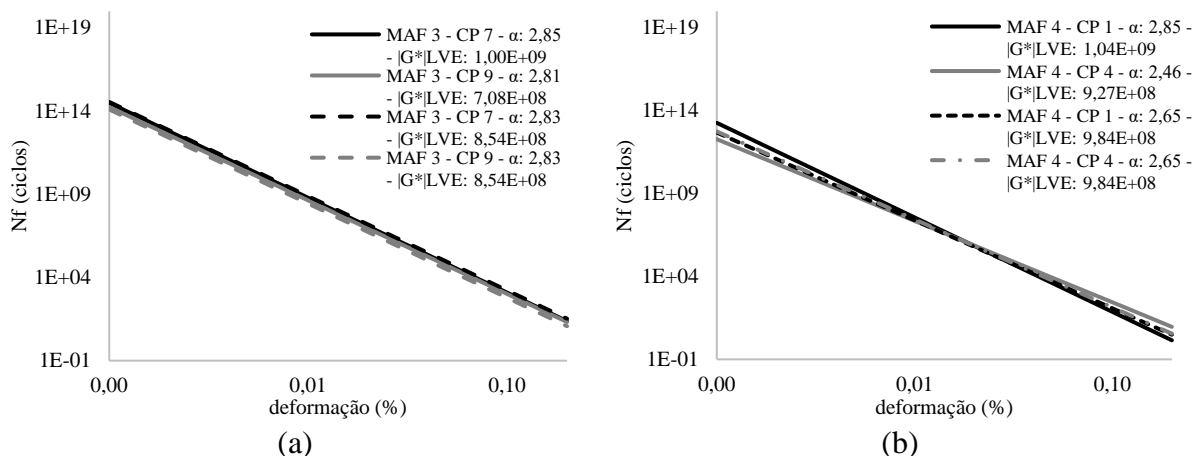


Figura 4: Curvas de fadiga obtidas com base nas curvas características originais e ajustadas (considerando a média das propriedades viscoelásticas): (a) MAF 3 e (b) MAF 4

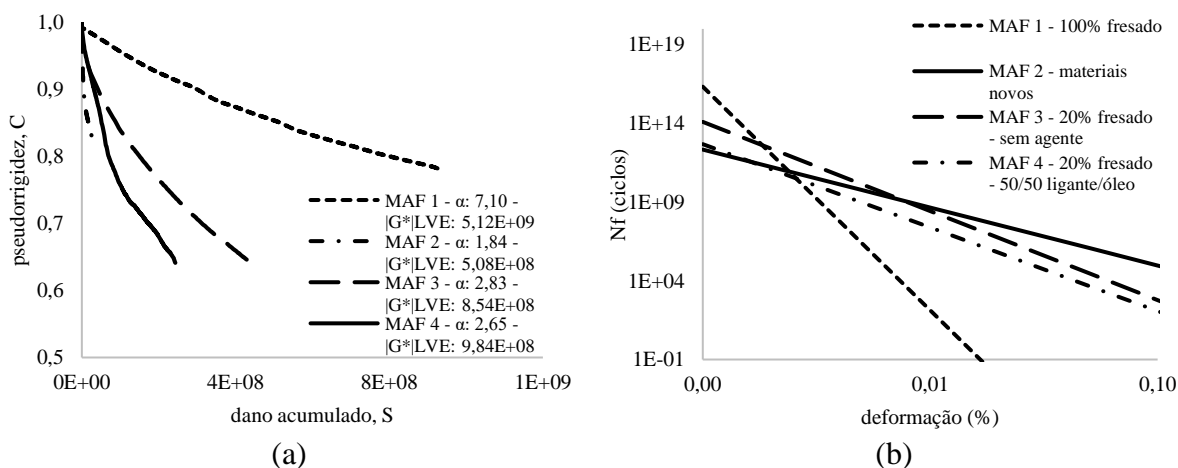


Figura 5: Curvas (a) curvas CxS e (b) curvas de fadiga das MAFs analisadas

A MAF 1 apresenta o valor mais alto do parâmetro A, por conta da sua maior rigidez, e apresenta o valor mais alto do parâmetro B, o que se reflete em uma maior taxa de acúmulo de dano. A MAF 2, por outro lado, por ser composta apenas por materiais novos, apresenta menor rigidez e, conseqüentemente, o menor valor de A, além de apresentar a menor taxa de acúmulo de dano e,



consequentemente, o menor valor para B. As outras duas MAFs, por conterem teores intermediários de material fresado e materiais novos, apresentaram valores intermediários para A e B. O ordenamento dos materiais quanto ao desempenho à fadiga (Tabela 4) na deformação baixa indicou que a MAF 3 apresenta o melhor desempenho à fadiga e que a MAF 1 apresenta o pior desempenho. Na deformação alta, a MAF 2 apresentou o melhor desempenho e a MAF 1 o pior. O ordenamento final mostrou que as MAFs 2 e 3 têm desempenho à fadiga equivalente e que estes materiais são os mais indicados na comparação. No ordenamento final, a MAF 1 apresentou o pior desempenho e a MAF 4 é o material com o terceiro melhor desempenho.

Tabela 3: Coeficientes A e B do modelo de fadiga para as MAFs avaliadas

Material	CP	A	A _(médio)	Cv (%)	B	B _(médio)	Cv(%)
MAF 1	3	1,26E+80	1,75E+83		14,21	14,21	
MAF 2	2	1,12E+24			3,66		
MAF 2	4	1,04E+24	5,08E+26	161	3,68	3,67	0,7
MAF 3	7	1,36E+35			5,70		
MAF 3	9	9,82E+33	1,01E+37	186	5,61	5,66	1,5
MAF 4	1	9,47E+33			5,70		
MAF 4	4	4,44E+29	7,39E+35	200	4,92	5,31	14,7

Tabela 4: Ordenamento das MAFs para dois níveis de deformação (0,005 e 0,05%)

Material	N _r (0,005%)	posição	N _r (0,050%)	posição	posição final
MAF 1	2,52E+06	4	1,56E-08	4	4
MAF 2	8,48E+10	1	1,82E+07	1	1
MAF 3	3,91E+10	2	8,55E+04	2	2
MAF 4	9,50E+08	3	4,76E+03	3	3

Tais constatações mostram que: (i) a incorporação de material fresado, em proporções da ordem de 20%, compromete o comportamento à fadiga, quando comparado ao desempenho de uma mistura preparada apenas com materiais novos; e (ii) a correção do teor de asfalto do material fresado apenas com CAP 50/70 se mostrou mais efetiva que a correção feita com 50% de CAP 50/70 e 50% de resíduo de óleo de xisto – isto se deve provavelmente à não difusão do óleo no asfalto envelhecido presente no material fresado. O fato constante aqui vai ao encontro do que é mencionado na literatura, acerca da ineficiência do agente, quando as condições de mistura não favorecem a perfeita difusão do agente rejuvenescedor na matriz do asfalto envelhecido (Carpenter e Wolosick, 1980).

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho à fadiga de matrizes de agregado fino preparadas com misturas asfálticas fresadas e agente de rejuvenescimento. As MAFs foram submetidas a ensaios para obtenção de parâmetros viscoelástico-lineares e de dano e suas curvas características foram levantadas. Tais curvas foram ajustadas a modelos potenciais, para estimativa dos parâmetros do modelo de fadiga. As seguintes conclusões merecem destaque:

- a adição de material fresado tende a tornar as matrizes de agregado fino mais rígidas, o que se reflete no aumento da integridade (parâmetro A do modelo de fadiga) e da taxa de acúmulo de dano (parâmetro B);
- o desempenho à fadiga se relaciona diretamente com a rigidez das amostras, estando as amostras mais rígidas mais suscetíveis ao dano; as altas rigidezes estão também



associadas a baixos valores de taxa de relaxação, o que se reflete em maiores taxas de acúmulo de dano; por conta disto, a MAF (de referência) produzida com 100% de material fresado apresenta desempenho significativamente inferior às demais e a MAF produzida apenas com materiais novos apresenta desempenho superior às demais;

- os materiais apresentam desempenho à fadiga fortemente dependente do nível de deformação atuante no pavimento: a deformações baixas, a MAF produzida com 20% de material fresado e com o teor de asfalto corrigido apenas com a adição de CAP 50/70 apresenta desempenho similar à MAF produzida apenas com materiais novos, ao passo que a deformações altas, a MAF produzida apenas com materiais novos é a que apresenta melhor desempenho;
- a correção do teor de asfalto do material fresado com CAP 50/70 se mostrou mais efetiva que a correção feita com 50% de CAP 50/70 e 50% de resíduo de óleo de xisto – isto se deve provavelmente à não difusão do óleo no asfalto envelhecido.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de mestrado (processo n.º. 132378/2015-9) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de Bolsa de Pesquisa no Exterior (processo n.º. 2015/24082-1).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, A. W.; Mehta, Y. A.; Nolan, A.; Bennert, T. (2015). *Investigation of Impact of Aging and Amount of Reclaimed Asphalt Pavement on Effectiveness of Rejuvenators*. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, DC.
- Bahia, H. U.; Anderson, D. A.; Christensen, D. W. (1992). The Bending Beam Rheometer: a Simple Device for Measuring Low-Temperature Rheology of Asphalt Binders (With Discussion). *Association of Asphalt Paving Technologists*. 61, 117–153.
- Burr, B.; Davison, R.; Jemison, H.; Glover, C.; Bullin, J. (1991). Asphalt hardening in extraction solvents. *Transportation Research Record*. 1323, 70–76.
- Carpenter, S. H.; Wolosick, J. R. (1980). Modifier influence in the characterization of hot-mix recycled material. *Transportation Research Record*, n. 777, Washington, D.C., p.15-22.
- Castro, L. N. (2003). *Reciclagem a Frio “In Situ” com Espuma de Asfalto*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 156p.
- Copeland, A. (2008). *Sustaining our Highways: A National Perspective on RAP Usage and Best Practices for Recycled Asphalt Pavements*. Presented at Pavement Performance Prediction Symposium. Laramie, Wyo.
- Daniel, J. S.; Kim, Y. R. (2002). Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic continuum damage model. *Association of Asphalt Paving Technologists*. 71, 619–650.
- European Asphalt Pavement Association – EAPA (2015). Disponível em: <http://www.eapa.org/asphalt.php>
- Faxina A. L. (2006). *Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- Freire, R. A.; Babadopulos, L. F. A. L.; Castelo Branco, V. T. F.; Bhasin, A. (2017). Aggregate Maximum Nominal Sizes' Influence on Fatigue Damage Performance Using Different Scales. *Journal of Materials in Civil Engineering*. -1--1.
- Freire, R. A.; Castelo Branco, V. T. F.; Vasconcelos, K. (2014). Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas compostas por agregados miúdos com diferentes tamanhos máximos nominais. *Revista Transportes*. 22(3). 117–127.
- Hansen, K. R.; Copeland, A. (2015). *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2014*. Report n.º: Information Series 138 (5th edition). National Asphalt Pavement Association. Federal Highway Administration. Washington, DC. 28 p.
- He, Y.; Alavi, M. Z.; Jones, D.; Harvey, J. (2016). Proposing a solvent-free approach to evaluate the properties of blended binders in asphalt mixes containing high quantities of reclaimed asphalt pavement and recycled asphalt shingles. *Construction and Building Materials*. 114, 172–180.
- Karki, P. (2014). *An Integrated Approach to Measure and Model Fatigue Damage and Healing in Asphalt Composites*. Ph.D. dissertation, Texas A&M University. Austin, TX.
- Karki, P. et al. (2015). Quantifying overall damage and healing behavior of asphalt materials using continuum damage approach. *International Journal of Pavement Engineering*, v.16, n.4, p.350-362.



- Kim, Y.-R.; Little, N. D. (2005). *Development of Specification-Type Tests to Assess the Impact of Fine Aggregate and Mineral Filler on Fatigue Damage*. Report No. FHWA/TX-05/0-1707-10. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation and Texas Transportation Institute, 116 p.
- Kim, Y. R.; Little, D. N.; Lytton, R. L. (2003a). Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 15(1), 75–83.
- Kim, Y. R.; Little, D. N.; Song, I. (2003b). Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics. *Transportation Research Record*. 1832, 03-3454.
- Kim, S.; Sholar, G.A.; Kim, J.; Byron, T. (2009). *Performance of Polymer Modified Asphalt Mixture with Reclaimed Asphalt Pavement*. Transportation Research Board. Annual Meeting. Washington, D.C.
- Kubo, K. (2014). *Recycling in Japan. Application of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Hot-Mix Asphalt*. Papers from a Workshop. Transportation Research Board. Washington, D.C.
- Lee, H.-J.; Kim, Y. R. (1998). Viscoelastic continuum damage model of asphalt concrete with healing. *Journal of Engineering Mechanics*, 124 (11), 1224–1232.
- Lee, H.-J.; Daniel, J. S.; Kim, Y. R. (2000). Continuum Damage Mechanics-Based Fatigue Model of Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12 (2), 105–112.
- Leite, L. F. M.; Capudi, G. G.; Junior, F. A.; Giampaglia, H. R. (1990). *Emprego do Resíduo Pesado de Óleo de Xisto como Agente de Reciclagem para Asfaltos*. Em: Encontro de Asfalto, 10°, IBP, Rio de Janeiro, 1990.
- Ma, T.; Huang, X.; Hussain, U.B. (2011). Evaluation of reclaimed asphalt pavement binder stiffness without extraction and recovery. *Journal of Central South University of Technology*. 18(4), 1316–1320.
- McDaniel, R. S.; Anderson, M. R. (2000). *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method. Technician's Manual*. NCHRP Report N°: 452. Washington, DC.
- Mogawer, W.S.; Austerman, A.J.; and Roussel, M. (2011). *Performance characteristics of asphalt rubber mixtures containing RAP and warm mix asphalt technology*. Second international conference on warm-mix asphalt. 11–13 October 2011 St. Louis, MO. Washington, DC: National Asphalt Pavement Association.
- Mogawer, W. S.; Fini, E. H.; Austerman, A. J.; Booshehrian, A.; Zada, B. (2016). Performance Characteristics of High Reclaimed Asphalt Pavement Containing Bio-modifier. *Road Materials and Pavement Design*. 17(3), 753–767.
- Nabizadeh, H. (2015). *Viscoelastic, Fatigue Damage, and Permanent Deformation Characterization of High Rap Bituminous Mixtures Using Fine Aggregate Matrix (FAM)*. Ph.D. Dissertation, University of Nebraska–Lincoln. Lincoln, NE.
- Newcomb, D.; Brown, E.R.; and Epps J.A. (2007). *Designing HMA Mixtures with High RAP Content: A Practical Guide*. Quality Improvement Series 124. National Asphalt Pavement Association. Lanham, MD.
- Peterson, R.L.; Soleymani, H.R.; Anderson, R.M.; McDaniel, R.S. (2000). Recovery and Testing of RAP Binders from Recycled Asphalt Pavements. *Association of Asphalt Paving Technologists*. 69, 72–91.
- Plancher, H., Petersen, J. C. (1982). U.S. Patent No. 4.325.738. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Schapery, R. A. (1975). A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media III. Analysis of continuous growth. *International Journal of Fracture*, 11, 549–562.
- Schapery, R. A. (1984). Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. *International Journal of Fracture*, 25, 195–223.
- Schapery, R. A. (1990). A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 38, 215–253.
- Shen, J.; Amirkhanian, S.; Lee, S.-J. (2005). Effects of rejuvenating agents on recycled aged rubber modified binders. *International Journal of Pavement Engineering*. 6(4), 273-279.
- Silva, H. M. R. D.; Oliveira, J. R. M.; Jesus, C. M. G. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resources, Conservation and Recycling*. 60, 38–48.
- Tavakol, M.; Hossain, M.; Heptig, B. (2017). *Minimum Required Virgin Binder Content for Recycled Superpave Mixtures*. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, DC.
- Yu X.; Zaumanis, M.; Santos, S.; Poulidakos L. D. (2014). Rheological, Microscopic, and Chemical Characterization of the Rejuvenating Effect on Asphalt Binders. *Fuel* 135, 162-71.
- Zaumanis, M.; Mallick, R. B.; Poulidakos, L.; Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 71, 538–550.

Andrise Buchweitz Klug e Adalberto Leandro Faxina

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, São Carlos, SP, Brasil, 13566-590, 0055 1633739613. andrise@usp.br e adalberto@usp.br