

Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas compostas por agregados miúdos com diferentes tamanhos máximos nominais

Reuber Arrais Freire¹, Verônica Teixeira Franco Castelo Branco², Kamilla Lima Vasconcelos³

Resumo: O trincamento por fadiga em misturas asfálticas pode estar relacionado a fenômenos de pequena escala (microtrincas). Autores têm utilizado a parte fina de misturas asfálticas, denominada Matriz de Agregados Finos (MAF), para estimar o comportamento das mesmas. O objetivo desse estudo é avaliar a influência do Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados miúdos na resistência ao trincamento de misturas asfálticas. A partir da dosagem de um Concreto Asfáltico (CA), foram dosadas três MAFs com diferentes TMNs. Para maiores TMNs, menores foram os teores de ligante asfáltico obtidos. As MAFs foram submetidas a ensaios de fratura em semicírculo, a fim de medir a energia dissipada durante o trincamento, em duas temperaturas: 15 e 25°C. Os resultados indicaram que, para 15°C, quanto menor o TMN, maior foi a resistência ao trincamento das misturas asfálticas. Para 25°C, acredita-se que outros mecanismos de dano ocorreram simultaneamente, dificultando a hierarquização das misturas asfálticas pelo TMN.

Palavras-chave: Trincamento. MAF. TMN.

Abstract: The fatigue cracking could be related to a small-scale phenomenon (microcracks). Authors have used the fine portion of the hot mix asphalt (HMA), known as fine aggregate matrix (FAM), to estimate the HMA behavior. This study aims to evaluate the influence of the nominal maximum size (NMS) of the fine aggregates in the HMA cracking resistance. As from the HMA design, three corresponding FAMs with different aggregates' NMS were designed. As higher is the NMS of FAM, the lower is the binder content. The FAMs were subjected to the semicircular bending fracture test in order to measure the dissipated energy during the crack propagation at two temperatures: 15 and 25°C. The results at 15°C indicated that as the NMS decreases, the HMA resistance to cracking increases. At 25°C, it is believed that other damage mechanisms occur simultaneously, making difficult the mixtures ranking based on the NMS.

Keywords: Cracking. FAM. NMS.

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos devem possuir uma qualidade mínima para que estejam adequados às suas necessidades de uso. Um problema comum nos pavimentos no Brasil e no mundo é o trincamento motivado por fadiga. Esse problema é caracterizado pela repetição de carga atuante no revestimento asfáltico, gerando, inicialmente, microfissuras. Com o passar dos anos, as microtrincas coalescem dando origem às macrotrincas que, ao final da vida útil, podem levar o material à completa ruptura.

Recentemente, autores têm utilizado a parte fina de misturas asfálticas, denominada Matriz de Agregados Finos (MAF), como passo intermediário para estimar o comportamento do Concreto Asfáltico (CA). Por definição, a MAF é composta por agregados miúdos, filer e ligante asfáltico (Castelo Branco, 2008). Segundo a

FHWA (2002), o agregado mineral é responsável por, aproximadamente, 80% da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, e os outros 20% são dados pelas propriedades do ligante asfáltico. Com relação à fadiga, 60% da resistência é atribuída às propriedades do ligante asfáltico e 40% às propriedades dos agregados minerais, seja pelas suas características individuais, ou pela distribuição granulométrica da combinação dos mesmos. Quando a MAF é utilizada como passo intermediário, parte da influência do agregado mineral e quase que a totalidade da influência do ligante asfáltico são contabilizadas, principalmente na tentativa de prever a resistência ao dano por fadiga.

Além do já citado, existem outras questões na literatura com relação ao uso da MAF para a avaliação da resistência ao trincamento por fadiga, como a determinação do tamanho máximo do agregado miúdo a ser utilizado nessa porção da mistura. Alguns trabalhos (Kim et al., 2003; Zollinger, 2005; Arambula, 2007; Masad et al., 2007; Caro et al., 2008; Castelo Branco, 2008; Vasconcelos et al., 2009; Aragão, 2011) adotaram a peneira #16 (1,18mm) como sendo o limite superior para moldagem das amostras de MAF. Aragão et al. (2010) e

¹ Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará (reuber_freire@yahoo.com.br).

² Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará (veronica@det.ufc.br).

³ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (kamilla.vasconcelos@gmail.com).

Dai e You (2007) utilizaram peneiras diferentes (#30, ou 0,60mm e #8, ou 2,36mm, respectivamente) para separar a parte graúda da parte miúda da mistura asfáltica. No Brasil, a maior parte das pesquisas desenvolvidas utilizando MAFs usa a peneira #10 (2,00mm) como peneira de corte, devido ao fato da peneira #16 (1,18mm) não pertencer à série de peneiras normatizadas no Brasil, e esta ser aquela com abertura de malha mais próxima da peneira americana normalmente utilizada para este propósito (Coutinho et al., 2010).

Estudos publicados na literatura relatam a importância das propriedades dos agregados minerais no comportamento mecânico de misturas asfálticas, tanto com relação à resistência à deformação permanente (Masad et al., 2003; Souza, 2009; Bessa, 2012), quanto com relação à resistência ao trincamento por fadiga (Mornismith, 1970; Sousa et al., 1998; Vasconcelos, 2004; Masad et al., 2005). Esse comportamento está diretamente relacionado a propriedades de forma dos agregados minerais (forma, angularidade e textura) e a distribuição granulométrica da mistura asfáltica.

Vasconcelos (2004) avaliou misturas asfálticas com diferentes granulometrias, contínuas e descontínuas, mantendo o Volume de vazios (Vv) das mesmas igual à 4%. Foram selecionadas granulometrias passando abaixo, acima e através da Zona de Restrição (ZR), preconizada antigamente na especificação Superpave para a dosagem das misturas asfálticas. Duas misturas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA), com diferentes TMNs (12,5 e 9,5mm), além de três misturas do tipo CA, com o mesmo TMN (12,5mm), foram avaliadas nesse citado estudo. A caracterização do dano por fadiga foi feita através do ensaio de compressão diametral a tensão e a temperatura controladas. Os resultados mostraram que a mistura do tipo SMA, com TMN de 12,5mm, apresentou maior vida de fadiga se comparada àquela com TMN igual a 9,5mm. Com relação aos CAs, a mistura com a curva granulométrica passando através da ZR apresentou menor vida de fadiga, quando comparada com as misturas asfálticas contendo as outras granulometrias avaliadas.

Nejad et al. (2010) utilizaram o ensaio de fadiga por compressão diametral conduzido a tensão controlada para a caracterização de misturas asfálticas convencionais e do tipo

SMA. Neste trabalho foram utilizadas duas misturas asfálticas convencionais com diferentes TMNs (12,5 e 9,5mm) e três misturas asfálticas do tipo SMA também com diferentes TMNs (19; 12,5 e 9,5mm). O citado ensaio foi realizado em três temperaturas (5, 25 e 40°C). Os autores concluíram que as misturas asfálticas com menores TMNs apresentaram desempenho superior com relação à resistência ao trincamento por fadiga. Concluíram ainda, ao contrário do reportado pela FHWA (2002), que o efeito da composição granulométrica dos agregados minerais foi mais relevante se comparado à variação do teor de ligante asfáltico com relação a este mecanismo de dano para as misturas asfálticas analisadas.

Sousa et al. (1998) utilizaram o ensaio de fadiga em flexão de quatro pontos (do inglês *Four-Point Bending Fatigue Test*) para a determinação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas com nove composições granulométricas com diferentes TMNs (25mm, 19mm e 12,5mm). Os resultados deste estudo indicaram que as misturas asfálticas com granulometrias mais finas apresentaram melhor desempenho com relação ao trincamento por fadiga, o que foi atribuído ao maior teor de ligante asfáltico para essas misturas asfálticas.

Com a intenção de avaliar a resistência ao trincamento por fadiga em misturas asfálticas, vários métodos e geometrias de amostras já foram propostos na literatura técnica. A mecânica da fratura tem sido uma das teorias utilizadas para entender os princípios de início e propagação de trincas em diversos materiais, inclusive em misturas asfálticas. Os primeiros métodos utilizados tentaram prever o trincamento em misturas asfálticas sem a utilização de uma pré-trinca nas amostras (ponto de concentração de tensão). Alguns pesquisadores, porém, encontraram limitações neste tipo de previsão (Marasteanu et al., 2002). A geometria dos Corpos de Prova (CPs) utilizada nos ensaios de fratura em misturas asfálticas é influenciada por dois fatores principais: dificuldade de preparação da amostra e compatibilidade com os atuais equipamentos utilizados para a moldagem e a realização dos ensaios mecânicos (Hirsh, 2009). Entre as geometrias mais utilizadas para a caracterização deste mecanismo de dano estão as amostras: prismáticas, semicirculares (SCB) e em forma de disco circular chanfrado. A geometria SCB apresenta

algumas vantagens com relação ao ensaio de flexão em três pontos de amostras prismáticas, pois as amostras utilizadas neste ensaio (SCB) podem ser extraídas em campo, além de apresentarem relativa facilidade com relação a moldagem das mesmas em laboratório. Hirsch (2009) citou como desvantagem do uso dessa geometria a complexidade do estado de tensão gerado e o tamanho reduzido do ligamento por onde a trinca deve propagar.

Hirsch et al. (2010) usaram o ensaio de tração em disco circular chanfrado para a avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas moldadas em laboratório e extraídas de campo, com a mesma granulometria, variando o tipo de ligante asfáltico (com ou sem adição de polímero), em duas temperaturas de ensaio (10 e 25°C). Para a temperatura de 10°C, a mistura com ligante asfáltico modificado com polímero apresentou maior energia necessária ao trincamento total da amostra quando comparada a mistura com ligante asfáltico convencional. Para a temperatura de 25°C, a tendência encontrada para a temperatura de 10°C se manteve para as misturas asfálticas moldadas em laboratório. Porém, quando as misturas asfálticas de campo foram avaliadas, aquela com ligante asfáltico convencional apresentou uma maior energia de fratura se comparada à mistura asfáltica com ligante asfáltico modificado por polímero. Os autores não recomendaram a realização deste ensaio em temperaturas acima de 10°C, a fim de observar primordialmente o comportamento elástico da mistura asfáltica. Para ensaios realizados em altas temperaturas, a parcela viscosa referente ao comportamento do material também afeta a energia medida durante o ensaio fazendo com que diferentes mecanismos de dano estejam associados juntamente à fratura do material.

Montestruque et al. (2010) usaram amostras semicirculares para avaliar o potencial de trincamento de amostras de misturas do tipo Areia Asfáltica Usinada a Quente (AAUQ), moldadas com dois ligantes asfálticos modificados, para serem utilizadas como ca-

madras antirreflexão de trincas. Para isso, os citados autores conduziram testes em geometria SCB a uma temperatura de 25°C. Os resultados desse estudo apontam para diferenças da ordem de 40% entre os valores de energia de fratura das misturas asfálticas com os dois ligantes asfálticos avaliados. Os autores salientaram, ainda, que esse ensaio, quando conduzido a temperaturas mais baixas, pode gerar uma inversão na hierarquização das misturas asfálticas, no que diz respeito aos parâmetros de fratura.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo aprofundar o conhecimento sobre a influência do TMN do agregado mineral na resistência ao trincamento de misturas asfálticas a partir da avaliação de MAFs.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram avaliadas três MAFs com diferentes TMNs de agregado mineral e uma mistura asfáltica do tipo CA. As misturas asfálticas foram dosadas a fim de obter o teor de projeto de ligante asfáltico para atender a um volume de vazios de aproximadamente 4%. As amostras foram serradas na geometria de semicírculo e submetidas ao ensaio de fratura em equipamento hidráulico. Quatro amostras serão ensaiadas para cada mistura asfáltica avaliada.

2.1 Materiais

Os agregados minerais utilizados nesse estudo são naturais, provenientes de diferentes pedreiras localizadas no estado do Ceará e com diferentes origens mineralógicas: (i) gnáissica e (ii) fonolítica. Foram usados como agregados graúdos, britas 1/2" e 3/8", como agregado miúdo, pó de pedra e areia de campo proveniente do sítio Maninho, localizado na cidade de Maracanaú – CE, e como material de enchimento, filer natural. Algumas características dos agregados minerais utilizados estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos agregados minerais utilizados no estudo

Agregado	Origem Mineralógica	Densidade Real	Densidade Aparente	Absorção (%)	Utilização no CA (%)
Brita 1/2"	Fonolítica	2,47	2,43	0,9	23
Brita 3/8"	Fonolítica	2,49	2,43	1,1	30
Pó de Pedra	Gnáissica	2,72	-	-	22
Areia de Campo	-	2,64	-	-	25

Foi utilizado um Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) caracterizado por penetração como CAP 50/70, de acordo com as especificações brasileiras regulamentadas pela Agência Nacional do Petróleo. O ligante asfáltico é um produto derivado do petróleo brasileiro proveniente do Campo Fazenda Alegre, no Espírito Santo, e processado na refinaria Lubnor da Petrobras. Este CAP foi também caracterizado pela especificação Superpave como PG 70-XX.

2.2 Dosagens

O projeto de mistura do CA foi realizado seguindo a metodologia Superpave. As amostras foram preparadas com 100mm de diâmetro e 65mm de altura. A compactação nesse tipo de dosagem é feita por amassamento, onde a quantidade de giros é fixa (100, para o caso desse estudo) e o teor de CAP é variado até que a mistura asfáltica atinja um Vv de 4%. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas do CA e das três MAFs avaliadas nesse trabalho.

O método de dosagem das MAFs foi desenvolvido por Coutinho et al. (2011), onde o teor de CAP utilizado nas amostras é definido com base nos ensaios de granulometria

(DNER-ME 083-98) e de extração de ligante asfáltico (DNER-ME 053-94). A amostra de MAF é obtida utilizando um misturador de escala laboratorial sendo em seguida resfriada. O procedimento de resfriamento é minucioso, a fim de evitar a formação de grumos de agregados miúdos com ligante asfáltico e de agregados graúdos envolvidos por agregados miúdos aderidos. Ao fim da preparação, têm-se agregados minerais, do CA, misturados ao ligante asfáltico na forma solta, sem a completa aglutinação entre as partículas. Em seguida, cada amostra é submetida ao fracionamento na peneira que delimitará o TMN das MAFs. Após o fracionamento, a amostra estará dividida em duas frações: graúda e miúda. A idéia central desse método de dosagem é obter o percentual de ligante asfáltico contido na parcela miúda. Esse percentual é obtido através de extração de ligante asfáltico e fracionamento dos agregados a fim de obter o percentual de agregado miúdo aderido ao agregado graúdo antes da extração. Esse percentual obtido é o teor de projeto de ligante asfáltico da MAF. Maiores detalhes sobre o procedimento descrito acima podem ser encontrados em Coutinho (2012). A Figura 2 ilustra este procedimento.

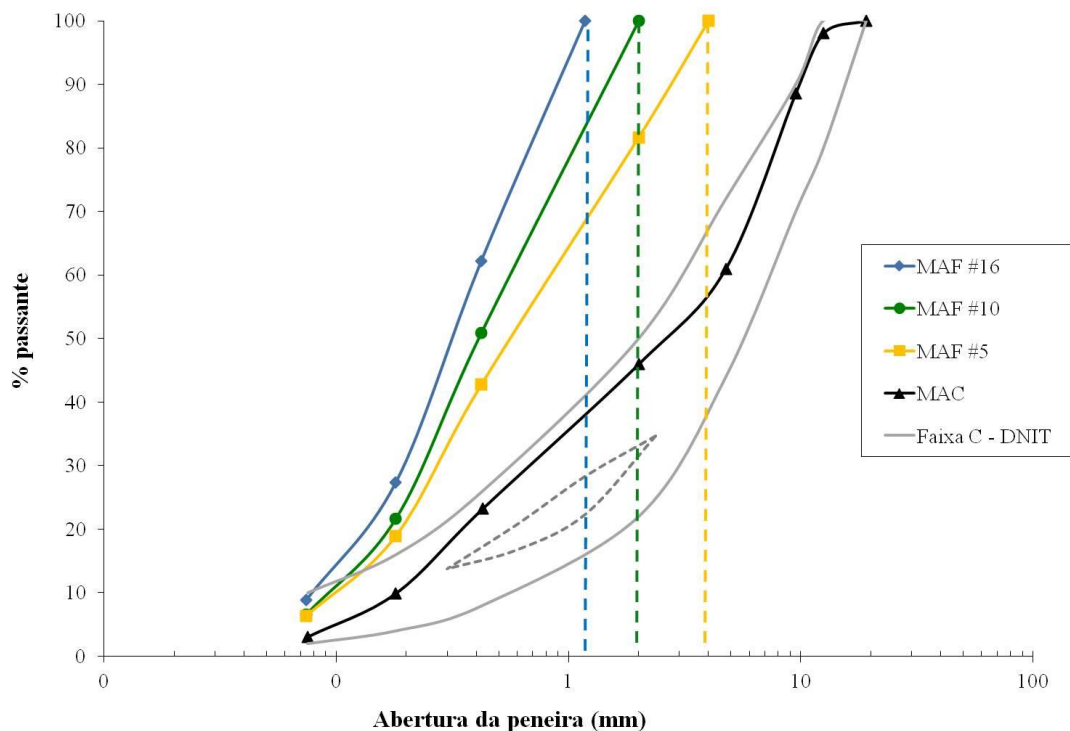


Figura 1 - Granulometrias do CA e das MAFs analisadas nesse estudo

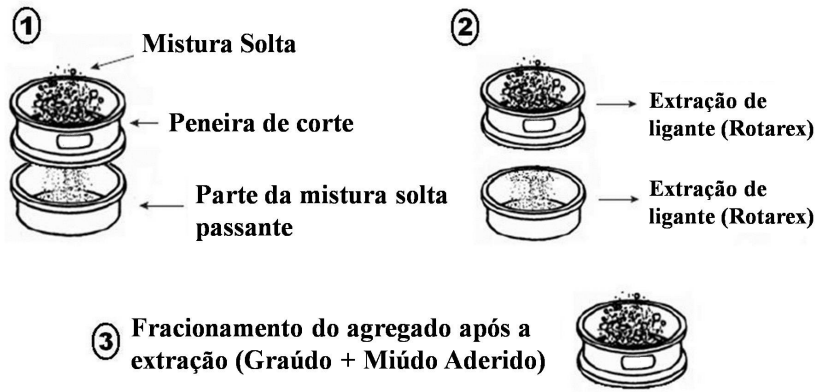


Figura 2 - Procedimento de dosagem MAF (Adaptado de Coutinho, 2012)

2.3 Preparação das Amostras (SCB)

As quatro misturas asfálticas, um CA e três MAFs, foram preparadas usando o Compactador Giratório Superpave (CGS) com geometria cilíndrica de 120mm de altura e 150mm de diâmetro. As amostras foram submetidas a um procedimento de serragem (Figura 3). Na Figura 3(a) é mostrado o primeiro corte, no sentido transversal, dividindo a amostra inicial ao meio. Em seguida, foi realizado outro corte no sentido transversal, removendo 10mm do

topo e 10mm da base da amostra obtida na Figura 3(a), a fim de evitar um possível efeito de borda devido à compactação (Figura 3b). As amostras, de 50mm de altura, foram então serradas no sentido longitudinal, para a obtenção da geometria de semicírculo, conforme ilustrado na Figura 3(c). Cada CP extraído do CGS originou quatro semicírculos. Um total de oito amostras semicirculares, para cada tipo de mistura asfáltica, foi confeccionado.

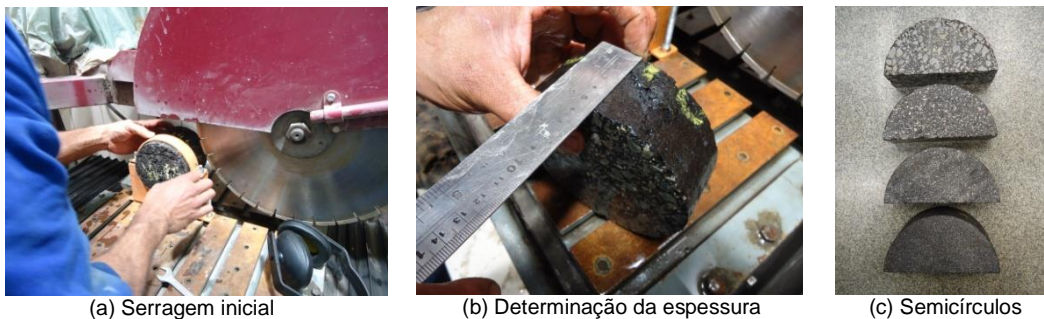


Figura 3 - Procedimento para a serragem das amostras na geometria de semicírculo

Em cada amostra semicircular foi realizado um entalhe de aproximadamente 10mm de comprimento, funcionando como uma pré-trinca. A ponta desta pré-trinca apresenta uma região com maior concentração de tensão na amostra e, conseqüentemente, facilita o delineamento do caminho de propagação do trincamento. Duas serras foram utilizadas para confecção deste entalhe nas amostras. A Figura 4a ilustra

a forma do corte realizado. A primeira metade do entalhe foi feita usando a serra convencional de 1mm de espessura e a segunda metade foi feita com uma serra de 0,4mm de espessura, e de serragem mais precisa. Por fim, a superfície do CP foi pintada de forma a possibilitar a melhor visualização da progressão do trincamento ao longo do ensaio. A Figura 4b mostra o aspecto final do CP preparado.

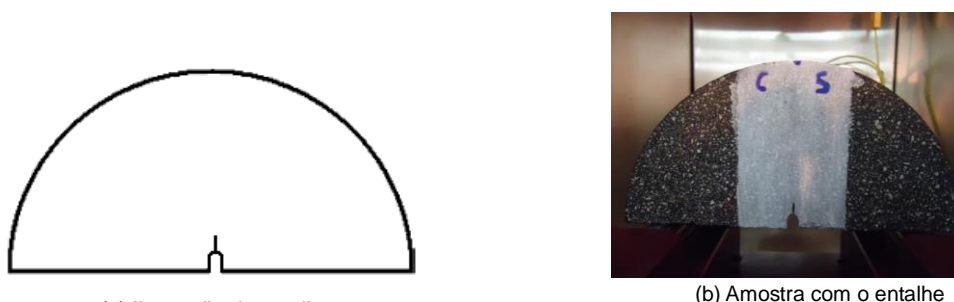
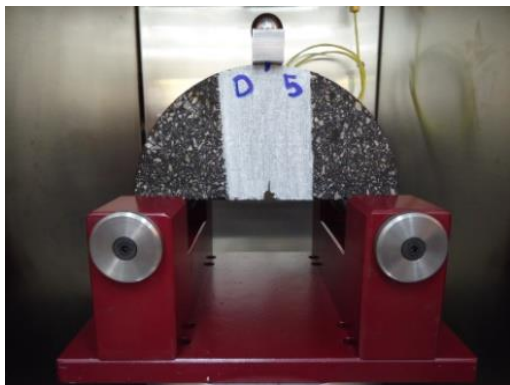


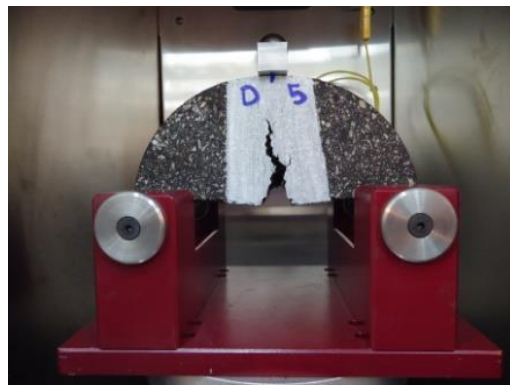
Figura 4 - Ilustração da geometria de semicírculo com entalhe

2.4 Procedimentos Experimentais

O ensaio de fratura foi realizado utilizando uma prensa hidráulica (MTS). Foi aplicado um carregamento monotônico com uma taxa de deslocamento constante de 0,03mm/s, com a carga aplicada sobre um friso metálico acoplado ao topo da amostra. A amostra foi condicionada e mantida nas temperaturas de



(a) Início do ensaio de fratura



(b) Fim do ensaio de fratura

Figura 5 - Ilustração do ensaio de trincamento para amostras com geometria SCB

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Dosagem das MAFs

Três misturas asfálticas do tipo MAF foram dosadas utilizando diferentes TMNs. Foram utilizados TMNs de até 1/3 do diâmetro das amostras de MAF (12mm). Este fator foi proposto por Kim et al. (2004) a fim de se obter uma amostra representativa. A Tabela 2 apresenta os resultados das dosagens realizadas para as três MAFs avaliadas nesse trabalho. O procedimento proposto por Coutinho et al. (2011) foi utilizado na dosagem, variando-se apenas a peneira de corte (TMN dos agregados

minerais) utilizada na preparação das misturas asfálticas. A Tabela 2 mostra, também, o teor de projeto de ligante asfáltico obtido para cada MAF. Através dos resultados, é possível perceber que à medida que se diminui o TMN dos agregados minerais, aumenta-se o teor de projeto de ligante asfáltico da MAF. Ao aumentar a quantidade de agregados miúdos, a área de superfície específica das partículas também aumenta e maiores teores de CAP são requeridos.

Tabela 2 - Parâmetros das dosagens das MAFs

MAF	Peneira (#)	TMN (mm)	%CAP	G _{mm}	Vv (%)
1	5	4,00	8,3	2,321	4,0
2	10	2,00	8,9	2,350	4,0
3	16	1,18	10,3	2,278	4,0

3.2 Ensaios de Flexão em Amostras Semicirculares

O ensaio de flexão de três pontos em amostras semicirculares foi realizado em quatro amostras para cada mistura asfáltica e temperatura de ensaio avaliadas (15 e 25°C). A curva de força × deslocamento do pistão foi monitorada ao longo de todo o ensaio. A Figura 6 mostra um exemplo da curva gerada durante o

ensaio. Para cada amostra determinou-se: i) a carga máxima ($P_{máx}$), ii) o deslocamento no ponto de carga máxima ($\delta_{máx}$), iii) a energia dissipada até o ponto de carga máxima ($E_{Pmáx}$) e iv) a energia total dissipada (E_{total}). O $E_{Pmáx}$ é obtido pela área abaixo da curva até o ponto de carga máxima (A_1), enquanto o E_{total} é obtido

pela área total abaixo da curva (soma de A_1 e A_2).

A Tabela 3 apresenta as médias dos parâmetros avaliados para cada mistura asfáltica (CA e MAFs) nas duas temperaturas de ensaio. A Figura 7 ilustra as médias das energias totais acrescidas ou diminuídas de um desvio padrão para estes resultados e a tendência de crescimento da energia dissipada nas misturas asfálticas com diferentes TMNs. Pela variabilidade encontrada nos resultados de energia total dissipada à temperatura de 25°C, para uma mesma

mistura asfáltica, torna-se difícil hierarquizar as misturas asfálticas utilizando-se o TMN dos agregados minerais. Outros mecanismos de dano ocorrem simultaneamente ao processo de progressão do trincamento dificultando a análise da influência da variação do TMN das misturas asfálticas com relação a esse mecanismo de dano específico (trincamento). Nas amostras ensaiadas a temperatura de 15°C, pode-se observar um menor coeficiente de variação entre as amostras de uma mesma mistura asfáltica.

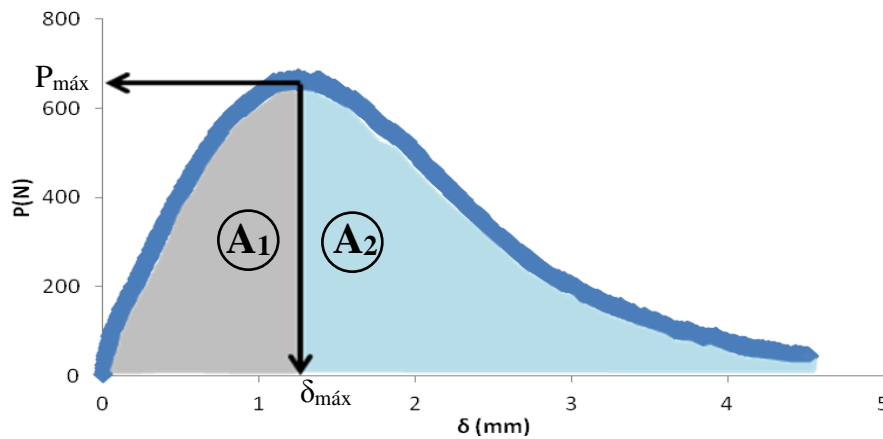


Figura 6 - Curva força (P) x deslocamento (δ) durante o ensaio de flexão em amostras SCB

Tabela 3 - Resumo dos resultados do ensaio de fratura

TMN (mm)	Tipo de Mistura	Temperatura (°C)	$P_{máx}$ (N)	$\delta_{máx}$ (mm)	E_{Total}		$E_{Pmáx}$	
					Média (N.mm)	Desvio Padrão	Média (N.mm)	Desvio Padrão
12,50	CA	25	641,2	1,31	1.422,2	212,9	550,5	70,8
4,00	MAF 1		492,6	2,45	1.850,3	294,1	776,7	174,0
2,00	MAF 2		649,3	2,94	2.456,6	162,8	1.141,7	97,9
1,18	MAF 3		422,3	3,87	2.296,2	362,2	1.027,6	159,1
12,50	CA	15	2.324,7	1,26	5.048,4	578,7	1.994,0	145,4
4,00	MAF 1		1.989,5	2,40	7.715,6	122,0	3.285,3	201,8
2,00	MAF 2		2.339,7	2,69	9.288,4	422,0	4.208,9	389,5
1,18	MAF 3		1.701,7	4,21	10.581,7	625,0	4.780,5	685,1

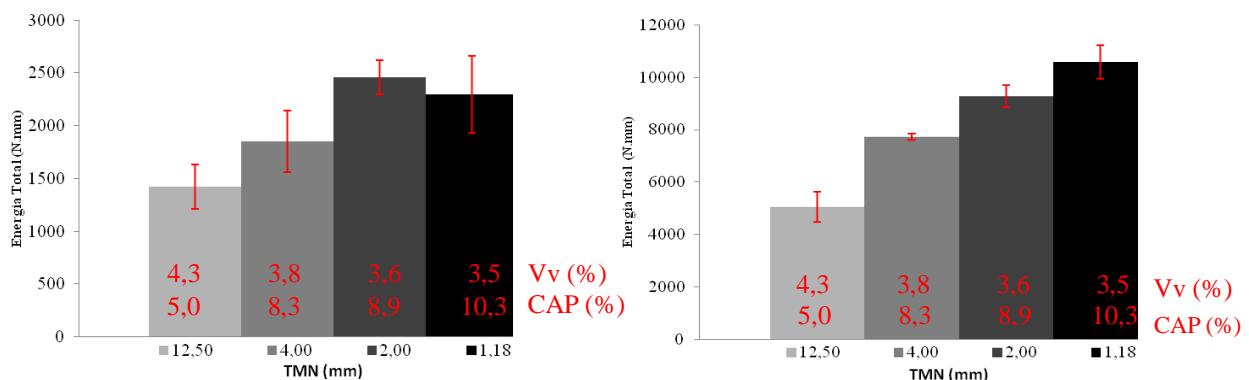


Figura 7 - Médias das energias totais (E_{total}) nas temperaturas: (a) 25°C e (b) 15°C

Na Figura 7, pode-se observar a tendência de aumento da energia desprendida durante o ensaio a medida que o TMN do agregado mineral diminui. Isso ocorre devido, também, ao aumento do teor de ligante asfáltico utilizado, de 8,3% para 10,3%. Na temperatura de 25°C, a diferença entre os valores de energia total para as amostras de MAF com relação à amostra de CA é superior. A resistência ao trincamento da MAF 1 é 35% maior quando comparada àquela encontrada para o CA. O mesmo ocorre para as MAFs 2 e 3, que possuem energias 45% e 52% superiores, respectivamente. Para a comparação das MAFs entre si foram realizadas testes de hipóteses para verificar diferenças estatísticas entre as misturas. De acordo com Roberts et al. (1996), a maioria das propriedades das misturas asfálticas apresenta distribuição normal. Portanto, mesmo com a pequena quantidade amostral, é assumido, neste trabalho, que as médias das energias seguem

esse tipo de distribuição. Foi aplicado um primeiro teste de hipóteses, onde $H_0: \mu_1(1,18\text{mm}) - \mu_2(2,00\text{mm}) = 0$ e $H_a: \mu_1(1,18\text{mm}) - \mu_2(2,00\text{mm}) \neq 0$. Como os parâmetros de dispersão são desconhecidos, é assumido que esta segue uma distribuição de *t-Student*, uma vez que a população segue normal. Outros testes de hipóteses foram realizados para diferentes combinações. Foram testadas as hipóteses: $H_0: \mu_2(2,00\text{mm}) - \mu_3(4,00\text{mm}) = 0$ e $H_a: \mu_2(2,00\text{mm}) - \mu_3(4,00\text{mm}) \neq 0$; e $H_0: \mu_3(4,00\text{mm}) - \mu_4(12,50\text{mm}) = 0$ e $H_a: \mu_3(4,00\text{mm}) - \mu_4(12,50\text{mm}) \neq 0$. Para a realização dos testes, foram utilizados os valores médios e os desvios padrões apresentados na Tabela 3. Para uma distribuição *t-Student* definida para $(n - 1) = 3$ graus de liberdade, *t* crítico equivale a 3,18 para um grau de confiança de 95%. A Tabela 4 apresenta os resultados do teste de hipótese em questão.

Tabela 4 - Resultados do teste de hipóteses para E_{total}

Teste	H_0	$t_{amostral}$	Resultado	$t_{amostral}$	Resultado
		25°C		15°C	
1	$\mu_1(1,18\text{mm}) - \mu_2(2,00\text{mm}) = 0$	0,81	SIM	3,45	NÃO
2	$\mu_2(2,00\text{mm}) - \mu_3(4,00\text{mm}) = 0$	3,61	NÃO	7,16	NÃO
3	$\mu_3(4,00\text{mm}) - \mu_4(12,50\text{mm}) = 0$	2,36	SIM	9,02	NÃO

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, é possível observar que as energias totais (E_{total}) das misturas asfálticas com TMNs equivalentes a 1,18mm e 2,00mm podem ser consideradas iguais, tendo o mesmo ocorrido para as misturas asfálticas com TMNs equivalentes a 4,00mm e 12,50mm, pois o escore *t* foi menor do que o crítico (ambos para ensaio a 25°C). Para as misturas asfálticas com TMNs equivalentes a 2,00mm e 4,00mm, o teste rejeitou a igualdade. Para os ensaios realizados à 15°C, houve uma diferenciação mais clara entre as misturas asfálticas avaliadas. A redução da temperatura de ensaio faz com que a reologia da mistura asfáltica se aproxime da reologia do ligante asfáltico (Goodrich, 1991), de forma que para os resultados apresentados a 15°C, continua-se observando o efeito dos teores de projeto de CAP distintos (juntamente ao TMN), porém com uma menor influência de outros

mecanismos de dano além do trincamento.

A Figura 8 ilustra os valores médios de energia dissipada até o ponto de carga máxima ($E_{Pm\acute{a}x}$). É possível perceber que as tendências encontradas para os valores de energia até a carga máxima foram as mesmas encontradas para os valores das energias totais (Figuras 7). Para os ensaios conduzidos à temperatura de 25°C outros mecanismos de dano, como a deformação plástica e a dissipação de energia viscosa, podem ter influenciado nos resultados encontrados. A energia quantificada durante o ensaio, não pode ser atribuída somente à energia desprendida para a abertura da trinca. Outros autores chegaram à mesma conclusão e desaconselharam à análise de fratura na temperatura de 25°C, devido à presença de outros mecanismos de dano durante o processo (Hirsch et al., 2010).

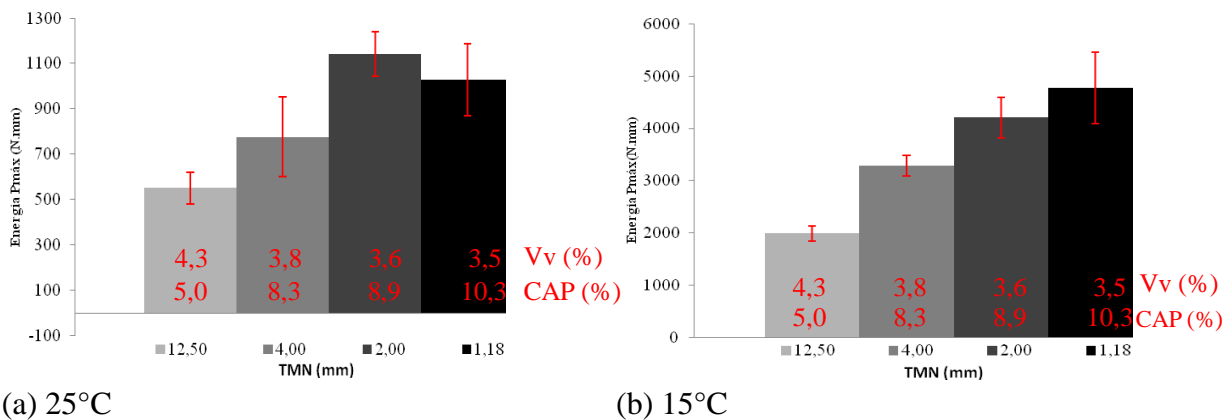


Figura 8 - Médias das energias até a carga máxima ($E_{P_{\max}}$) nas temperaturas: (a) 25°C e (b) 15°C

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho discutiu o efeito do TMN do agregado mineral em MAFs, a fim de aprofundar o conhecimento sobre a influência deste parâmetro na resistência ao trincamento de misturas asfálticas. Adotou-se uma metodologia para a dosagem de MAFs com diferentes TMNs e as análises foram feitas através dos resultados do ensaio de fratura em amostras semicirculares. A partir dos resultados de energia dissipada durante o processo de trincamento, foi percebida a influência mais clara do TMN com relação a esse mecanismo de dano, apenas para a temperatura de ensaio de 15°C. Maiores valores de energia dissipada foram encontrados para menores TMNs. Na temperatura de 25°C, provavelmente devido à existência de outros mecanismos de dano que ocorrem concomitantemente ao processo de trincamento, não foi observado o mesmo comportamento. A variação no teor de ligante asfáltico é um parâmetro importante a ser considerado no processo de trincamento. Pela análise estatística, foi percebido que a partir de 2,00mm, os resultados de energia de fratura, no sentido da energia necessária para o trincamento, tornam-se distintos, sendo assim um indicativo que esse TMN seria adequado para as análises de MAF. Sugere-se o aumento do número de amostras ensaiadas, pois um maior espaço amostral forneceria maior embasamento para esta conclusão.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

- A realização de ensaios de fratura para amostras com o mesmo teor de ligante asfáltico;
- Avaliação de diferentes ligantes asfálticos, incluindo aqueles modificados por

polímero;

- Análise de imagens gravadas durante a realização do ensaio de fratura, a fim de melhor entender a progressão do trincamento e a influência da mesma nos resultados deste ensaio;
- Verificação da influência da angularidade dos agregados minerais na resistência ao trincamento das MAFs e por fim;
- Análise das propriedades de forma dos agregados minerais utilizados no *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), a fim de verificar a influência de outras propriedades dos materiais na resistência ao trincamento da mistura asfáltica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FUNCAP pelo apoio financeiro dado durante a pesquisa. À Lubnor pelo fornecimento do CAP e a Insttate Engenharia Ltda. pelo fornecimento dos agregados minerais.

REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, F.T.S.; LEE, J., KIM, Y.R.; KARKI, P. (2010) Material - Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behavior of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavement, *Journal of Construction and Building Materials*, v. 24, pp. 538-544. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.005
- ARAGÃO, F.T.S. (2011) *Computational Microstructure Modeling of Asphalt Mixtures Subjected to Rate-Dependent Fracture*. Tese de Doutorado, University of Nebraska – Lincoln. Lincoln, NE.
- ARAMBULA, E. (2007) *Influence of Fundamental Material Properties and Air Voids Structure on Moisture Damage*

of Asphalt Mixes. Tese de Doutorado. Texas A&M University. College Station, TX.

BESSA, I.S. (2012) *Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

CARO, S.; MASAD E.; AIREY G.; BHASIN A.; LITTLE D.N. (2008) Probabilistic Analysis of Fracture in Asphalt Mixes Caused by Moisture Damage. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2057, 28-36.

CASTELO BRANCO, V.T.F. (2008) *An Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixes Using the Dynamic Mechanical Analyzer*. Tese de Doutorado, Texas A&M University. College Station, TX.

COUTINHO, R.P.; PAMPLONA, T.F.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B.; MATEOS, A. (2010) Multiscale Approach for Characterization of Asphaltic Materials Designed in Brazil and Spain. 11th International Conference on Asphalt Pavements – ISAP, Japão.

COUTINHO, R.P.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. (2011) Proposição de um Novo Método de Dosagem para Representação da Parte Fina de Misturas Asfálticas. XVI CILA, Rio de Janeiro, RJ.

COUTINHO, R.P. (2012) *Utilização da Parte Fina de Misturas Asfálticas para Avaliação do Dano por Fadiga*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

DAI, Q.; YOU, Z (2007) Prediction of Creep Stiffness of Asphalt Mixture and Micromechanics Finite-Element and Discrete Models. *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Volume 133, Number 2, 163–173.

DNER-ME 083/98. Agregados - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 053/94. Misturas Betuminosas: Percentagem de Betume. Rio de Janeiro, 1994.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2002) User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, Washington, D.C.

GOODRICH, J.L. (1991) Asphaltic Binder Rheology, and Asphalt Concrete Mix Properties. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 60, 1991, pp. 80-120.

HIRSCH, F. (2009) *Avaliação das Propriedades de Fratura de Misturas Asfálticas Através de Ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda*. Dissertação de Mestrado. COOPE/UFRJ.

HIRSCH, F.; MOTTA, L.M.; ODA, S. (2010) Ensaio de Torção em Disco Circular com Fenda para Análise de Fratura em Misturas Asfálticas. In: XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Salvador, BA.

KIM, Y.R.; LITTLE D.N.; SONG I.I. (2003) Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation. Transporta-

tion Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, 1832, 1-8.

KIM, Y.R.; SEO, Y.; KING, M.; MOMEN, M. (2004) Dynamic Modulus Testing of Asphalt Concrete in Indirect Tension Mode Transportation Research Board, Washington, D.C, pp. 163-173. DOI: 10.3141/1891-19.

MARASTEANU, M.; DAI, S.; LABUZ, J.F.; LI, X. (2002) Determining the Low-Temperature Fracture Toughness of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Board*, Washington, D.C, v. 1789, pp. 191-199. DOI: 10.3141/1789-21.

MASAD, E.; LITTLE, D.; TASHMAN, L.; SAADEH, S.; AL-ROUSAN, T.; SUKHWANI, R. (2003) Evaluation of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance. Report ICAR 203 - 1. The International Center for Aggregate Research. Arlington, Virginia.

MASAD, E.; AL-ROUSAN, T.; BUTTON, J.; LITTLE, D.; TUTUMLUER, E. (2005) Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity. Report NCHRP – 555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council, Washington, D.C.

MASAD, E.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; LITTLE, D.N.; LYTTON, R. (2007) A Unified Method for the Analysis of Controlled-Strain and Controlled-Stress Fatigue Testing. *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 9, 233-246.

MONISMITH, C.L. (1970) Influence of Shape, Size, and Surface Texture on the Stiffness and Fatigue Response of Asphalt Mixtures. Technical Report 109, *Transportation Research Record*, National Research Council. pp 4-11.

MONTESTRUQUE, G.; VASCONCELOS, K.L.; BERNUCCI, L.B. (2010) Ensaio de Flexão em Amostra Semicircular com Fenda e Análise de Imagens para Caracterização da Resistência à Fratura de Misturas tipo AAUQ. XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Salvador, BA.

NEJAD, F.M.; AFLAKI, E.; MOHAMMADI, M.A. (2010) Fatigue Behavior of SMA and HMA Mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 24(7), pp. 1158-1165.

ROBERTS, F.L.; P.S. KANDHAL R.E. BROWN D. LEE e T.W. KENNEDY (1996) Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA. Maryland.

SOUSA, J.B.; PAIS, J.C.; PRATES, M.; BARROS, R.; LANGLOIS, P.; LECLERC, A.M. (1998) Effect of Aggregate Gradation on Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixes. *Transportation Research Board*, Washington, D.C., pp. 62-68, DOI: 10.3141/1630-08.

SOUZA, L.T. (2009) *Investigation of Aggregate Angularity Effects on Asphalt Concrete Mixture Performance Using Experimental and Virtual Asphalt Samples*. Dissertação de Mestrado, UNL, Lincoln, NE.

VASCONCELOS, K.L. (2004) *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE

VASCONCELOS, K.L.; BHASIN, A.; LITTLE, D.N. (2009) Influence of Reduced Production Temperatures on the Adhesive Properties of Aggregates and Laboratory Performance of Fine Aggregate – Asphalt Mixtures. *Internation-*

tional Journal of Road Materials and Pavement Design,
Vol. 11, Issue 1, pp. 47-64, DOI:
10.1080/14680629.2010.9690259

ZOLLINGER, C. (2005) *Application of Surface Energy Measurements to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt and Aggregates*. Dissertação de Mestrado, Texas A&M University. College Station, TX.