

Utilização do ensaio de flexão sobre amostra semicircular para avaliação da propagação do trincamento em misturas com diferentes ligantes

Luiza Carburnck Godoi¹, Lélío Antônio Teixeira Brito², Natália Guterres Mensch³,
Jorge Augusto Pereira Ceratti⁴

¹Laboratório de Pavimentação (LAPAV/UFRGS), luizacgodoi@gmail.com

²Laboratório de Pavimentação (LAPAV/UFRGS), lelio.brito@ufrgs.br

³Laboratório de Pavimentação (LAPAV/UFRGS), nati_mensch1@hotmail.com

⁴Laboratório de Pavimentação (LAPAV/UFRGS), jorge.ceratti@ufrgs.br

Recebido:

06 de setembro de 2018

Aceito para publicação:

11 de março de 2019

Publicado:

31 de dezembro de 2019

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chaves:

Trincamento,
EEFAS,
EDFAS.

Keywords:

Cracking,
EEFAS,
EDFAS.

DOI:10.14295/transportes.v27i4.1832



RESUMO

Neste trabalho é estudada a propagação de fissuras e ruptura em misturas asfálticas através do ensaio de flexão semicircular. Trincamentos que surgem nos revestimentos asfálticos revelam-se como um dos principais danos que afetam diretamente a serventia e qualidade dos pavimentos flexíveis. Esta pesquisa busca contribuir para a análise da resistência ao trincamento, bem como propagação do trincamento até a ruptura de misturas asfálticas onde são utilizados três diferentes tipos de ligantes. Para este fim empregou-se o ensaio de flexão em amostra semicircular com fenda, estático (EEFAS) e dinâmico (EDFAS). Foram analisadas três composições, dosadas pelo método *Superpave*: uma com cimento asfáltico de petróleo (CAP), outra com asfalto modificado por polímero (AMP) e a terceira com asfalto borracha (AB), denominadas, respectivamente, como misturas A, B e C. Os resultados indicaram maior rigidez da mistura com AMP, que também apresentou maior vida de fadiga. Por outro lado, as amostras com CAP e AB apresentaram-se dúcteis e com menor velocidade de propagação das microtrincas.

ABSTRACT

This paper aims to investigate cracking propagation and asphalt mixtures failure. Cracking is considered one of the major distresses mechanisms affecting the serviceability and quality of flexible pavement structures. This study evaluated cracking resistance, as well as the principle of cracking propagation in hot mix asphalt with three different types of asphalt binders. The experiment was carried out by means of both static semi-circular bending test (EEFAS) and dynamic (EDFAS). Therefore, this research investigated three asphalt concrete mixes, designed by the Superpave method: one with conventional neat binder (CAP), one polymer modified (AMP) and a third asphalt-rubber binder mix (AB), namely mixes A, B and C. The results indicated higher stiffness of the AMP mixture, which also presented greater fatigue life. Conversely, the specimens with CAP and AB demonstrated more ductility, with less microcracks propagation speed.

1. INTRODUÇÃO

Visando evitar a ruptura prematura das estruturas de pavimentos em campo, revela-se essencial caracterizar as propriedades de fratura das misturas asfálticas por meio de ensaios laboratoriais. Vários métodos de ensaio já foram desenvolvidos para este fim, tais como o ensaio em disco circular com fenda, ensaio por compressão diametral, flexão em viga quatro pontos e, recentemente, o ensaio de flexão em amostras com formato semicircular com fenda, que antes de adaptado para análise de materiais asfálticos foi amplamente empregado para avaliação da fratura em rochas.

Assim como Li e Marasteanu (2010), Huang *et al.* (2013), Gao e Ling (2016), Vargas *et al.* (2018), e Nsengiyumva e Kim (2019) vários outros estudiosos o tem adotado buscando determinar propriedades de fratura das misturas asfálticas.

Dentre as diversas razões para sua utilização - tanto para a avaliação de resistência ao trincamento - em se tratando do ensaio com aplicação de carga constante (EEFAS) - quanto para evolução da propagação do trincamento até a ruptura através de aplicação de carga cíclica (EDFAS) - Molenaar *et al.* (2002), Montestruque *et al.* (2010), Elseifi *et al.* (2012), Aragão *et al.* (2014) e Al-Qadi *et al.* (2015) ressaltam a sua simplicidade, baixo custo, boa repetibilidade, bem como possibilidade de produzir corpos de prova (CP) a partir de amostras cilíndricas preparadas no compactador giratório *Superpave* (CGS), ou até mesmo amostras extraídas em campo. No entanto, como limitações no uso dessa geometria, há o efeito de arqueamento que resulta do estado de tensões de compressão no topo da amostra (MOLENAAR *et al.*, 2002; ARAGÃO *et al.*, 2014) e o tamanho reduzido do ligamento por onde a trinca deve propagar (ARAGÃO *et al.*, 2014; AL-QADI *et al.*, 2015).

Tanto a AASHTO TP105 (2013) quanto a EN 12697-44 (2010) fornecem especificações pertinentes para execução e análise do EEFAS. No entanto, em 2016, a AASHTO TP124 expandiu os parâmetros extraídos a partir da curva carga (P) x deslocamento (δ), propondo o índice de flexibilidade (IF). Al-Qadi *et al.* (2015) afirmam que os resultados apresentados pelo ensaio, na época em fase de estudo, garantiam boa repetibilidade, ao mesmo tempo que o IF demonstrou ser capaz de capturar algumas mudanças que não eram consideradas pela energia de fratura (G_f) apenas. No que se refere ao EDFAS, ainda não há especificação disponível para sua aplicação.

Por fim, embora este procedimento não seja de ampla utilização no Brasil, como outros ensaios já validados, a escolha pela sua utilização nesta pesquisa baseia-se em duas vertentes. A primeira delas relaciona-se a existência de procedimentos para análise de trincamento, que se mostram complexos e demorados para uso rotineiro em projetos rodoviários; e segundo, a variação dos resultados e a natureza empírica de alguns deles nem sempre permitem o desenvolvimento de conclusões confiáveis em torno do método, o que sinaliza a importância de aprimorar procedimentos ainda não tanto explorados. Neste sentido, esta pesquisa busca contribuir para a análise da propagação e resistência ao trincamento em misturas asfálticas por meio da análise de três composições, com diferentes tipos de ligantes, empregando o ensaio de flexão em amostra semicircular com fenda.

2. MATERIAIS E DOSAGEM DAS MISTURAS

Foram avaliadas três misturas com ligantes asfálticos diferentes, sendo o teor de projeto das composições determinado por meio do método *Superpave*. Após o término do processo de dosagem, os corpos de prova confeccionados no formato cilíndrico foram serrados na geometria semicircular com entalhe, não sendo submetidos ao processo de envelhecimento, e - posteriormente - direcionados ao ensaio de fratura em prensa hidráulica MTS, modelo 318.25.

2.1. Ligantes asfálticos e agregados minerais

Foram utilizados agregados de origem basáltica enquadrados na faixa granulométrica C (DNIT, 2006), apresentados na Figura 1, misturados com o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70 e asfalto modificado por polímero AMP 60/85. Ambas as composições são, respectivamente,

referenciadas nesta pesquisa como misturas “A” e “B” e tem sua proporção de agregados apresentada na Tabela 1. A terceira mistura corresponde a faixa *Gap-Graded* (DNIT, 2009), na qual se utiliza o asfalto borracha AB8, e é identificada pela letra “C”.

2.2. Dosagem das misturas

Após selecionados os ligantes asfálticos e as composições granulométricas a serem utilizadas, o método de dosagem *Superpave* seguiu as recomendações da AASHTO (2013). Para confirmação do teor estimado utilizou-se a análise de sensibilidade à umidade, realizada de acordo com a AASHTO T283 (2011).

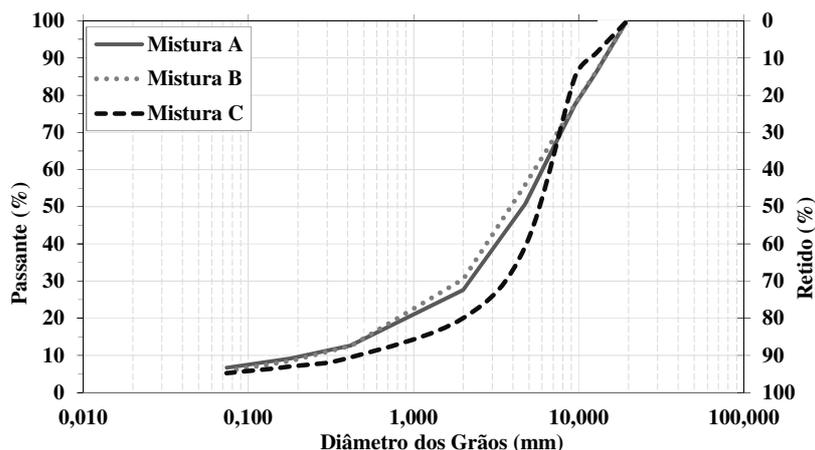


Figura 1: Composição granulométrica das misturas com CAP 50/70 (Faixa C), AMP 60/85 (Faixa C) e AB8 (*Gap-Graded*)

Tabela 1 - Porcentagem dos agregados em cada mistura

Fração	Mistura		
	A	B	C
	CAP 50/70	AMP 60/85	AB8
Brita 3/4"	24%	24%	14%
Brita 3/8"	24%	18%	47%
Pó de pedra	50%	58%	37%
Cal	2%	0%	2%

Tabela 2 - Quadro resumo das propriedades das misturas

Propriedade	Especificação Superpave	Mistura		
		A CAP 50/70	B AMP 60/85	C AB8
Teor de Projeto (%)	-	5,3	5,6	7,2
Volume de Vazios (%)	4	3,9	4,2	5,8
Relação Betume Vazios (%)	65-75	76,3	69,5	72,0
Vazios do Agregado Mineral (%)	mínimo 13	16,6	13,9	21,6
Massa Esp. Máx. Medida (kN/m ³)	-	2,506	2,521	2,448
Massa Esp. Aparente (kN/m ³)	-	2,408	2,414	2,317
Resistência à Tração (MPa)	-	0,76	1,11	0,81
Módulo de Resiliência (MPa)	-	3032	3420	2895
MR/RT	-	3989	3081	3574
Dano por Umidade Induzida (%)	mínimo 80	87	93	101
Relação filer/asfalto (%)	0,6 a 1,2	1,2	1,0	0,7

Adicionalmente, executou-se o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT), seguindo a NBR 15087/12, e o ensaio de módulo de resiliência (MR), conforme a NBR 16018/11.

A partir do projeto obteve-se para a mistura A (CAP 50/70) um teor de 5,3% com volume de vazios de 3,9%, enquanto para mistura B (AMP 60/85) estimou-se o teor de ligante em 5,6% e vazios de 4,2%. Identificou-se durante o processo que o teor da mistura C (AB8), correspondente a 4% de volume de vazios, seria de 7,8%. Por se tratar de um valor elevado, e considerando que a especificação DNIT 112/2009 permite que a proporção de vazios esteja entre 4 e 6%, optou-se por projetar a mistura para 5,8% de vazios resultando em um teor de projeto de 7,2%. Tal ação resultou num valor de relação betume vazios de 76,3, marginalmente superior ao limite. As variações volumétricas das três misturas foram selecionadas de forma a garantir a relação fíler/asfalto dentro do intervalo de 0,6 a 1,2, haja visto que o fenômeno da propagação de trincas está intimamente vinculado à quantidade de mástique (KIM *et al.*, 2003).

A Tabela 2 apresenta um resumo das propriedades das misturas incluindo resultados de MR, RT e análise de sensibilidade à umidade.

3. METODOLOGIA DE ENSAIO

3.1. Preparação das amostras

Os corpos de prova a serem analisados foram preparados utilizando o compactador giratório nos moldes de geometria cilíndrica com 150mm de diâmetro e, aproximadamente, 130mm de altura. Buscando atingir o volume de vazios de 4% para as amostras semicirculares das misturas A e B, e 5% para composição C, foi necessário que as mesmas fossem confeccionadas com um volume de vazios superior, tendo em vista a maior compactação próximo ao centro do CP em relação às bordas.

Inicialmente a amostra foi dividida ao meio no sentido transversal. Foi feito outro corte no mesmo sentido, visando remover 12mm do topo e 12mm da base da amostra, atenuando um possível efeito de borda decorrente da compactação. Desta forma, restaram dois cilindros menores com espessura de 50mm, que foram então serrados para obter o formato semicircular (Figura 2 (a)). Na base de cada amostra ainda é feito um entalhe com 10mm de comprimento e 1mm de espessura. As dimensões dos corpos de prova foram definidas conforme recomendações da especificação EN12697-44 (2010).

Por fim, após serradas, as amostras tiveram sua superfície pintada de forma a possibilitar melhor visualização da progressão da trinca durante o ensaio (Figura 2 (b)).

3.2. Protocolo de Ensaio Estático (EEFAS)

Conforme recomendado pela EN 12697-44 (2010), o primeiro passo consiste em condicionar os corpos de prova na câmara climática (20 ± 1) °C durante 4 horas. A temperatura de 20°C foi adotada em função de ensaios de fadiga serem comumente conduzidos no Brasil sob esta condição, conforme relatado por Balbo (2000; 2007), embora se tenha conhecimento de que muitos dos procedimentos que simulam este dano sejam também executados a 25°C. A amostra centralizada sobre o equipamento (Figura 3 (a)) é então submetida a uma carga de assentamento de, aproximadamente, 0,1kN ajustada manualmente (Figura 3 (b)).

Configura-se a deformação vertical em zero e então é aplicada carga suficiente para produzir uma taxa de deslocamento de $5,0 \pm 0,2$ mm/min, até que a carga atinja valor igual ou menor do que 0,1kN após o pico da curva.

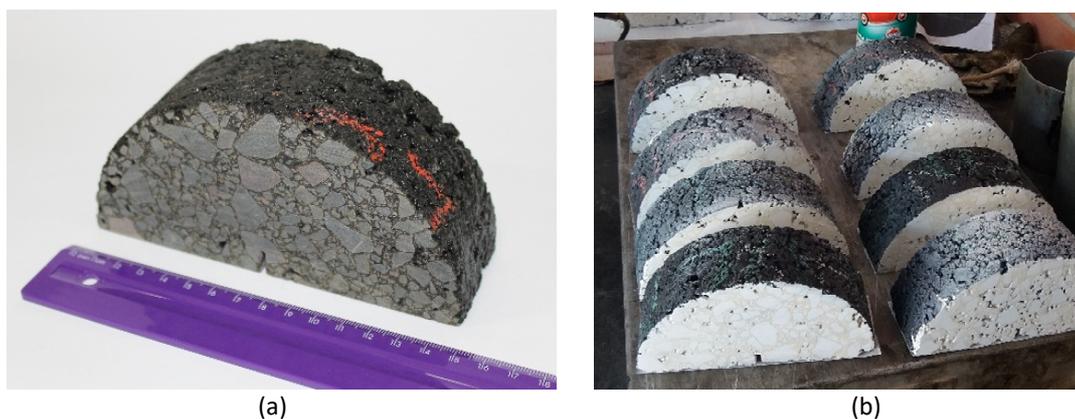


Figura 2. (a) Amostra serrada; (b) Preparação da superfície

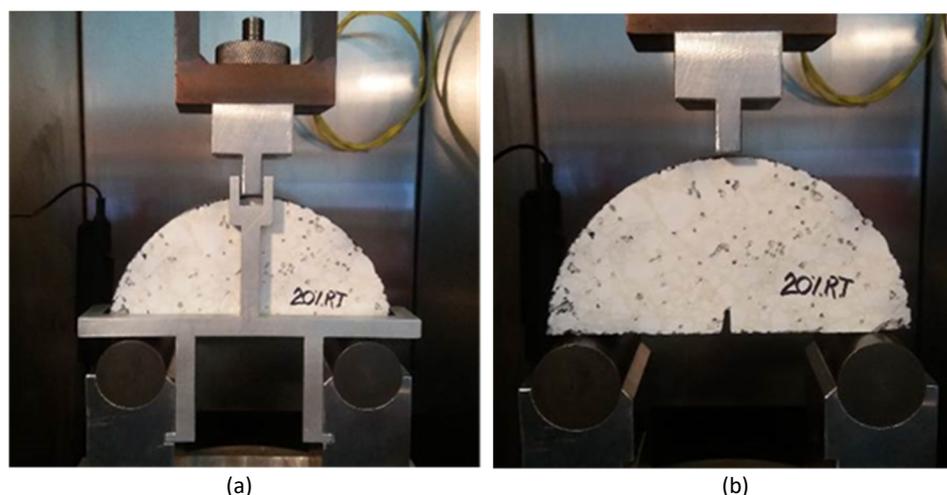


Figura 3. (a) Posicionamento e centralização da amostra; (b) Aplicação da carga de assentamento

3.3. Protocolo de Ensaio Dinâmico (EDFAS)

Tendo em vista que até então não há protocolo de padronização para desempenhar o ensaio com aplicação de carga cíclica, optou-se por desenvolvê-lo e avaliá-lo a partir do estudo conduzido por Gao e Ling (2016).

As primeiras etapas do processo correspondem as mesmas executadas no ensaio com aplicação de carga constante. Uma vez traçadas as curvas carga *versus* deslocamento, registradas durante o EDFAS, torna-se possível estimar a resistência à tração indireta das amostras, conforme a expressão (1) (EN12697-44, 2010).

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{4,263 \times P_{m\acute{a}x}}{D \times t} \quad (1)$$

Onde D é o diâmetro da amostra em mm; t a espessura da amostra em mm; $P_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima na amostra em N.

Após determinada a resistência máxima, amplitudes de tensão a serem aplicadas nas amostras foram selecionadas a partir de diferentes níveis de tensão (20%, 30%, 40% e 50% da resistência à tração). Foram ensaiadas sob carga controlada no mínimo três amostras a cada nível, carregadas senoidalmente, com frequência de aplicação de carga de 10Hz durante o ensaio. O critério para fim de ensaio foi a ruptura, determinado baseando-se no deslocamento máximo resultante do ensaio estático.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nos itens que seguem é apresentada a análise da resistência ao trincamento através do EEFAS e a evolução da propagação do trincamento por meio do EDFAS.

4.1. Ensaio de fratura em amostra semicircular

Seguindo a AASHTO TP124 (2016), os parâmetros abordados no EEFAS englobam a carga e deslocamento no ponto máximo da curva carga (P) x deslocamento (δ); resistência máxima à propagação da trinca ($\sigma_{\text{máx}}$); inclinação da curva pós-pico ($|\text{m}|$); índice de flexibilidade (IF); além de deslocamento crítico ($\delta_{\text{crítico}}$).

A Figura 4 (a) ilustra o andamento do procedimento estático por meio da curva carga *versus* deslocamento do atuador. Do ponto zero ao ponto 1, o corpo de prova suporta um rápido crescimento da carga aplicada sobre ele, sem ainda esboçar visualmente qualquer princípio de trincamento. Já o ponto 2 (Figura 4 (b)) corresponde ao instante no qual o material excede sua capacidade de resistir aos esforços a que está sendo submetido. Ou seja, neste momento tem-se a resistência máxima à propagação do trincamento que a mistura asfáltica em questão é capaz de suportar. Como resultado disto, neste instante, as primeiras trincas começam a surgir a partir do entalhe. Estas microtrincas interligam-se no decorrer dos pontos 3 e 4 formando as macrotrincas que prosseguem até a ruptura total da amostra, em torno dos pontos 5 e 6 (Figura 4 (c)), a partir do qual se extraiu o deslocamento máximo do atuador, posteriormente utilizado como dado de entrada na programação do EDFAS.

Em seguida, baseando-se em Gao e Ling (2016), os resultados do EDFAS passam a ser analisados por meio do número de ciclos no qual ocorre o início da propagação das trincas, enquanto a análise da ruptura em decorrência da sollicitação cíclica sofrida pelas composições corresponde ao número de ciclos máximo necessário para o rompimento das amostras.

A Figura 5 (a) apresenta uma curva típica de fadiga em forma de “S” definida por três estágios (GAO E LING, 2016). No primeiro deles o deslocamento aumenta rapidamente até o momento em que a trinca começa a propagar, sendo a curva ajustada na forma de uma potência $y = a \times x^b$. Ou seja, entre os pontos 1 e 2, tem-se o ponto de início de propagação da trinca (N_{inicial}) (Figura 5 (b)). No segundo estágio (entre os pontos 2 e 5) a curva passa a apresentar um comportamento linear, no qual as microtrincas expandem-se para macrotrincas a uma taxa relativamente constante. Por fim, o último estágio caracteriza-se novamente pelo rápido crescimento do deslocamento. Nesta mudança de comportamento há o ponto de ruptura por fadiga da amostra (em torno do ponto 5) ou também denominado neste estudo como (N_{ruptura}) (Figura 5 (c)).

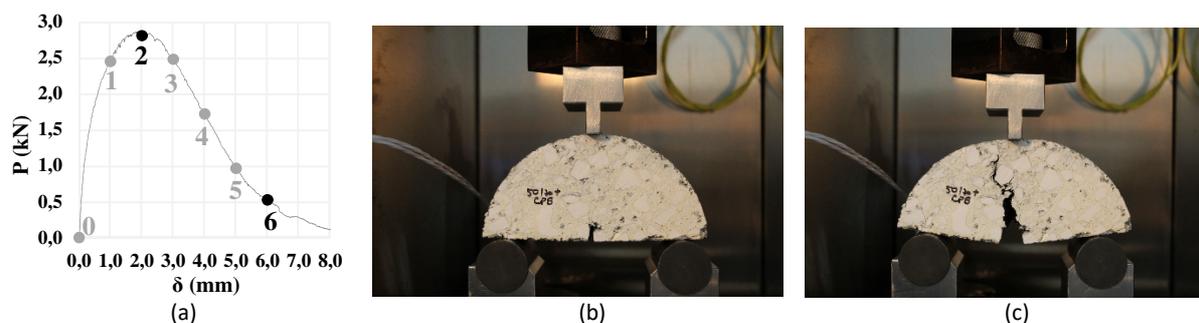


Figura 4. Andamento do ensaio de aplicação de carga constante

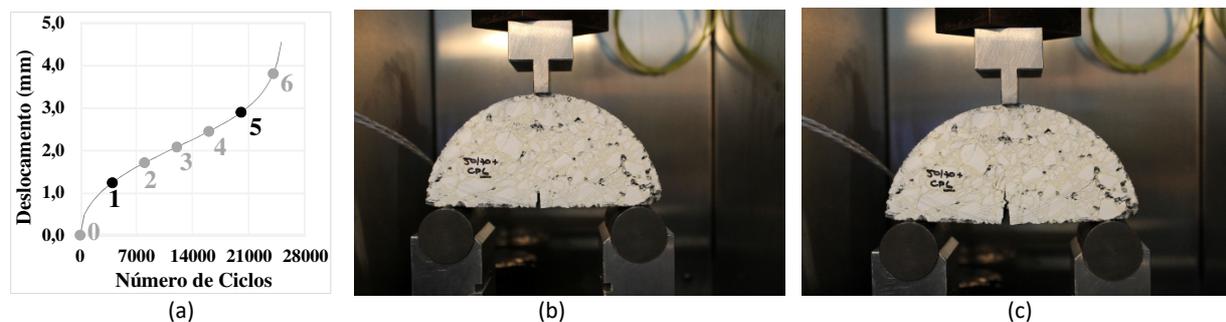


Figura 5. Andamento do ensaio de aplicação de carga cíclica

4.1.1. EEFA: Resistência máxima à propagação do trincamento

Tendo como referência a resistência máxima à progressão do trincamento, foi realizada a análise estatística de oito amostras ensaiadas por mistura. Apenas quatro amostras - com resistência mais próxima da média - foram utilizadas. Os resultados de pico de carga ($P_{m\acute{a}x}$), deslocamento do atuador ($\delta_{m\acute{a}x}$) correspondente a ele, e resistência ao trincamento ($\sigma_{m\acute{a}x}$), constam na Tabela 3. Al-Qadi *et al.* (2015) consideram que o principal mecanismo que causa a mudança no formato das curvas de uma mistura para outra (Figura 6 (a) a (c)) pode ser atribuído ao tamanho da zona de processo de fratura. O tamanho desta zona, na qual a formação de microtrincas ocorre, é uma característica do material e está relacionado a heterogeneidade na sua microestrutura (tamanho máximo, forma e distribuição dos agregados, propriedades do ligante, dentre outras variáveis).

Em geral, o tamanho da zona de processo é correlacionado à fragilidade da composição e fortemente governa o comportamento de fratura. Conforme a zona cresce, a curva se expande, refletindo-se no aumento da energia de fratura (AL-QADI *et al.*, 2015).

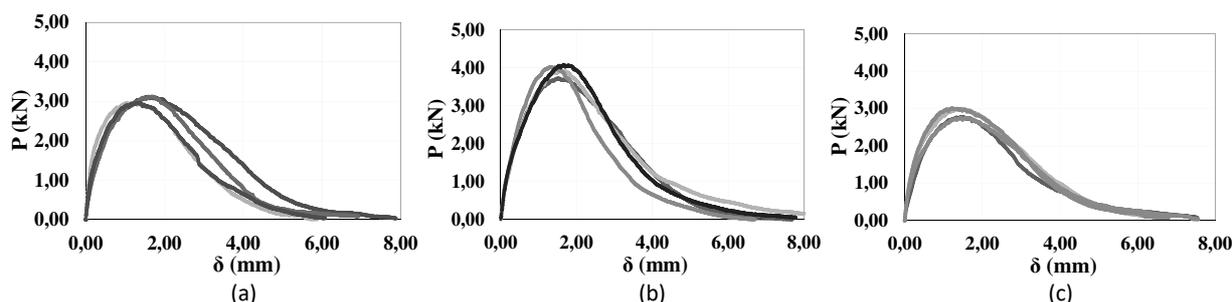
Visualmente o formato das relações da mistura B (Figura 6 (b)), na qual se utilizou ligante modificado por polímero, atentam para o comportamento mais frágil e rígido desta composição, que anteriormente já havia apresentado módulo de resiliência superior ao das outras misturas. Percebe-se que as amostras rapidamente atingem o seu pico de carga (3,94kN em 1,53mm de deslocamento médio do atuador) e, da mesma forma, descrevem uma queda brusca entre este pico e a ruptura dos CP, quando comparada aos concretos asfálticos A e C. Em composições com este tipo de comportamento a localização do dano apresenta-se mais concentrada e a trinca propaga-se de forma abrupta entre o instante que o corpo de prova atinge sua capacidade máxima de resistir às solicitações (valor médio de 2,18MPa) e a ruptura.

A mistura C (Figura 6 (c)), composta por asfalto borracha, obteve desempenho inferior no que se refere a resistir ao desenvolvimento do trincamento, sendo capaz de suportar uma tensão máxima média de 1,59MPa. Diferente das demais, esta possui composição granulométrica enquadrada na faixa *gap-graded*, com quantidade inferior de pó de pedra e teor de projeto de 7,2%. Sabe-se que a resistência ao trincamento é atribuída em grande parte às propriedades do ligante, porém esta possível desproporcionalidade dos componentes na matriz de agregados finos - porção da mistura asfáltica na qual o trincamento ou fratura geralmente ocorre (AL-QADI *et al.*, 2015) - pode ter influência sobre a redução na sua capacidade de suporte.

O delineamento das curvas do concreto asfáltico C apresenta-se muito próximo ao da mistura A (Figura 6 (a)), na qual se utilizou asfalto convencional, cuja $\sigma_{m\acute{a}x}$ atingiu 1,73MPa. Ambas descrevem um comportamento mais dúctil, com picos de carga menores e caimento suave do trecho pós-pico quando comparadas à composição B (AMP 60/85).

Tabela 3 – Resultados da resistência máxima à propagação do trincamento para as três misturas moldadas no teor de projeto

	Mistura								
	A CAP 50/70			B AMP 60/85			C AB8		
	P _{máx} (kN)	δ _{máx} (mm)	σ _{máx} (MPa)	P _{máx} (kN)	δ _{máx} (mm)	σ _{máx} (MPa)	P _{máx} (kN)	δ _{máx} (mm)	σ _{máx} (MPa)
	2,95	1,05	1,70	3,72	1,52	2,17	2,77	1,47	1,53
	3,11	1,58	1,73	3,92	1,57	2,13	2,99	1,48	1,69
	3,12	1,70	1,78	4,02	1,34	2,21	3,01	1,23	1,66
	2,96	1,32	1,70	4,08	1,67	2,19	2,75	1,47	1,47
Média	3,04	1,41	1,73	3,94	1,53	2,18	2,88	1,41	1,59
Desvio Padrão	0,08	0,25	0,03	0,14	0,12	0,03	0,12	0,11	0,09
COV	3%	17%	2%	3%	8%	1%	4%	7%	6%

**Figura 6.** Relações de carga *versus* deslocamento obtidas pelo EEFAS na mistura A (CAP 50/70) (a), mistura B (AMP 60/85) (b) e mistura C (AB8) (c)

4.1.2. EEFAS: Energia de Fratura, inclinação da curva pós-pico, índice de flexibilidade e deslocamento crítico

Na Figura 7 apresentam-se os demais parâmetros obtidos a partir da curva carga *versus* deslocamento. A energia de fratura (G_f) contempla o trabalho dispendido no decorrer da sollicitação (W_f), necessário a propagação do trincamento a partir do entalhe, relacionado com a área da seção transversal do corpo de prova acima da pré-trinca (A_{lig}). Já a inclinação da curva pós-pico ($|m|$) demonstra a maior ou menor resistência à propagação do trincamento, sendo calculado a partir do ponto de inflexão da curva após a $P_{máx}$. Ou seja, quanto menor a inclinação desta reta, menor a velocidade de propagação da trinca (AL-QADI et al., 2015). O mesmo se reflete no deslocamento crítico ($\delta_{crítico}$), que consiste no prolongamento deste ponto de inflexão até o eixo dos deslocamentos.

Ainda em se tratando de energia, sabe-se que parte dela - quando calculada a partir da área da curva - corresponde à energia dissipada pelas deformações viscoelásticas do material e não são exclusivamente energia de fratura. Sendo assim, é recomendado que os parâmetros de fratura de misturas asfálticas sejam caracterizados localmente (na zona de processo de fratura) e não a partir de resultados globais de $P \times \delta$ (ARAGÃO et al., 2014). Outro aspecto importante, com maiores detalhes em Al-Qadi et al. (2015) e Godoi et al. (2017), é de que muitas vezes curvas com características nitidamente diferentes, e que obviamente demonstram respostas ao trincamento distintas, resultam em valores de energia de fratura muito próximos. Neste sentido, o índice de flexibilidade propõe, não só através da G_f mas também considerando $|m|$, identificar a suscetibilidade das misturas ao trincamento.

Observa-se por meio da Tabela 4 que os coeficientes de variação para os resultados de IF são mais elevados do que aqueles de energia de fratura. Na literatura isso vem sendo considerado esperado, visto que o IF está associado a forma do segmento pós-pico da curva P x δ, enquanto G_f representa um valor médio derivado da área sob esta curva. Sendo assim, o índice de flexibilidade mostra-se muito mais sensível as mudanças de densidade da amostra, variabilidade do material, do equipamento e do operador (AL-QADI et al., 2015).

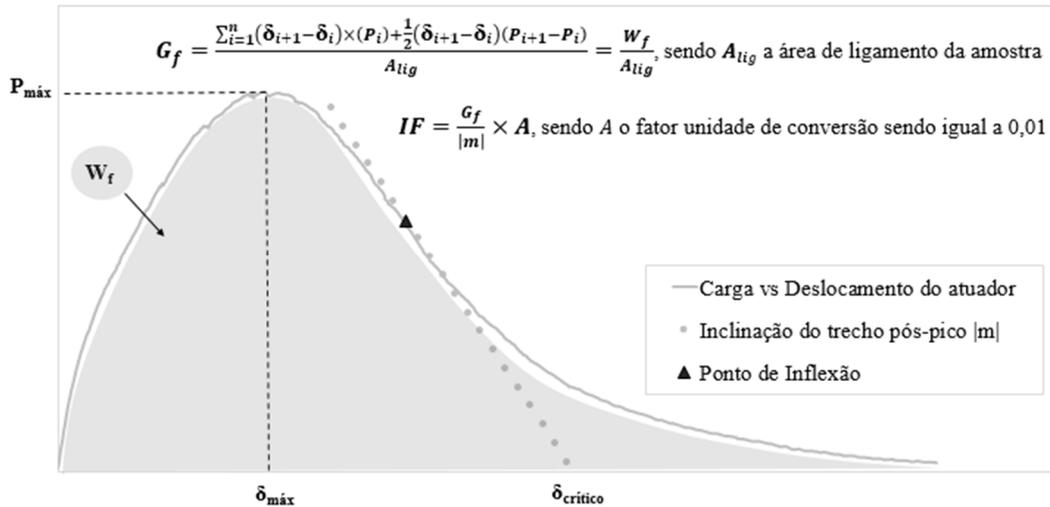


Figura 7. Gráfico resumo ilustrando os dados de saída do EEFAS e os respectivos parâmetros derivados da curva carga vs deslocamento, sendo eles energia de fratura (G_f), inclinação da curva pós pico (|m|) e índice de flexibilidade (IF)

Tabela 4 – Resultados de energia de fratura, inclinação da curva pós-pico e índice de flexibilidade

	Mistura								
	A CAP 50/70			B AMP 60/85			C AB8		
	G _f (J/m ²)	m	IF	G _f (J/m ²)	m	IF	G _f (J/m ²)	m	IF
	3.768	1,34	28,12	3.806	1,27	29,97	2.627	1,25	21,02
	3.444	0,95	36,26	3.897	1,40	27,83	3.126	0,97	32,22
	3.012	1,18	25,52	3.111	2,05	15,17	2.915	1,24	23,50
	2.746	1,33	20,65	3.513	1,88	18,69	2.721	0,97	28,05
Média	3.244	1,20	27,64	3.582	1,65	22,92	2.847	1,11	26,20
Desvio Padrão	392,53	0,16	5,65	306,71	0,32	6,16	191,07	0,14	4,29
COV	12%	13%	21%	8%	20%	26%	7%	12%	17%

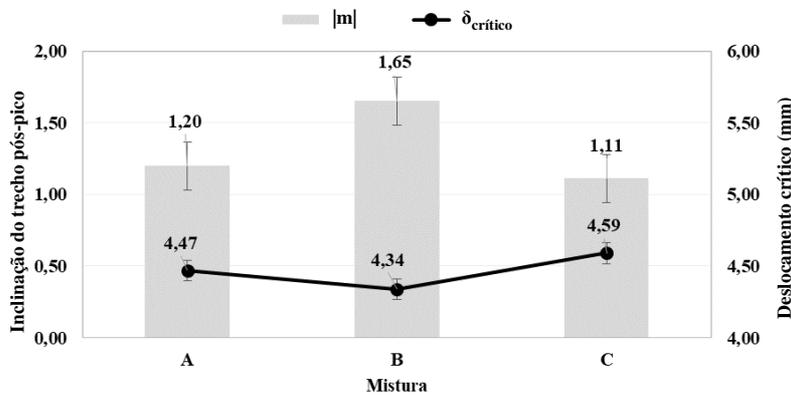


Figura 8. Comparação entre a inclinação da curva pós-pico e deslocamento crítico das misturas (A CAP 50/70; B AMP 60/85; C AB8)

Confirmando o que foi constatado apenas analisando visualmente as curvas carga *versus* deslocamento provenientes do ensaio estático, os resultados apresentados na Figura 8 reafirmam a maior ductilidade da composição C (AB8) em relação as demais misturas, cujo $|m|$ é igual a 1,11 e deslocamento crítico médio corresponde a 4,59mm. Identifica-se que o percurso das curvas entre o pico de carga e a ruptura apresenta um caminho suave em função do baixo valor da inclinação pós-pico e – consequentemente - menos veloz. Em outras palavras, esta composição impõe dificuldade à propagação das microtrincas após o pico de carga, fazendo necessário maiores deslocamentos para mobilizá-las.

O concreto asfáltico A (CAP 50/70) demonstrou comportamento intermediário, com $|m|$ de 1,20 e $\delta_{\text{crítico}}$ de 4,47mm. Além disso, mais uma vez a composição B (AMP 60/85) mostrou-se a mais frágil e com maior velocidade de propagação do trincamento, sendo $|m|$ 1,65 e $\delta_{\text{crítico}}$ igual a 4,34mm.

Por fim, ainda vem sendo discutida a capacidade do índice de flexibilidade capturar as mudanças de um concreto asfáltico para outro, em detrimento a utilização da energia de fratura, conforme abordado por Al-Qadi *et al.* (2015), corroborado por Godoi *et al.* (2017) e novamente identificado neste estudo. Na Figura 9, novamente a mistura B mostrou-se menos flexível com IF de 22,92, indo ao encontro dos demais parâmetros supracitados. As composições A e C (AB8) já haviam apresentado comportamento semelhante por meio de outros índices e mantiveram índice de flexibilidade superior no valor de 27,64 e 26,20, respectivamente.

4.1.3. EDFAS: propagação do trincamento e ruptura

Os ensaios de fadiga em amostra semicircular foram realizados a 20°C, com frequência de 10Hz e modo de carregamento a carga controlada. O critério para fim de ensaio foi a ruptura, determinado baseando-se no deslocamento máximo do atuador registrado durante o ensaio estático. Foram ensaiadas cinco amostras por nível de tensão. Estimou-se o número médio de ciclos (para o início do desenvolvimento da trinca a partir do entalhe e também para ruptura) e o desvio padrão. Apenas os três CP com número de ciclos mais próximos da média, dentro do intervalo fixado pelo desvio padrão, eram mantidos na análise. Embora o coeficiente de variação máximo dos resultados tenha sido de 22% no EDFAS, foi realizado o controle volumétrico e de dimensão das amostras visando garantir aderência e boa repetibilidade de resultados.

Por meio dos dados obtidos estimou-se tanto o N_{inicial} (Figura 10), quanto o N_{ruptura} (Figura 11), a 20%, 30%, 40% e 50% da $\sigma_{\text{máx}}$. Utilizou-se nesta pesquisa modelos de regressão do tipo $N = a \cdot \sigma_t^b$ para que em função da amplitude de tensão o valor de N fosse estimado.

O número de ciclos correspondente a ruptura dos pavimentos flexíveis é usualmente o foco da maioria dos estudos de estimativa de vida de fadiga destas estruturas. Porém, neste estudo reconheceu-se importante também expor o início da propagação do trincamento como forma de alerta a necessidade de possível manutenção e/ou reparos na seção, buscando prolongar sua vida útil, em caso hipotético destas composições serem utilizadas em projetos reais.

Por meio dos gráficos é possível identificar que quando submetidas a mesma amplitude de tensão, a composição B (AMP 60/85) apresenta o melhor desempenho frente ao dano por fadiga, tanto no que se refere ao início de propagação da trinca (Figura 10), quanto no número de ciclos necessários para o rompimento da mistura asfáltica (Figura 11).

Sobre as composições A (CAP 50/70) e C (AB8), percebe-se que ao serem solicitadas por baixas amplitudes de tensão (aproximadamente entre 0,35 e 0,65MPa), a composição C

revela-se capaz de retardar o desenvolvimento do trincamento, assim como da ruptura, o que acaba se invertendo quando as tensões aplicadas passam a ser maiores (a partir de 0,65MPa).

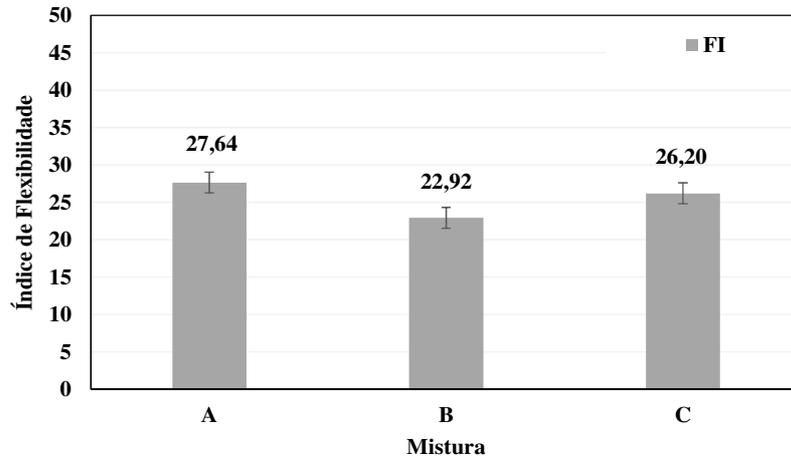


Figura 9. Relação entre os valores médios de índice de flexibilidade (misturas A CAP 50/70; B AMP 60/85; C AB8)

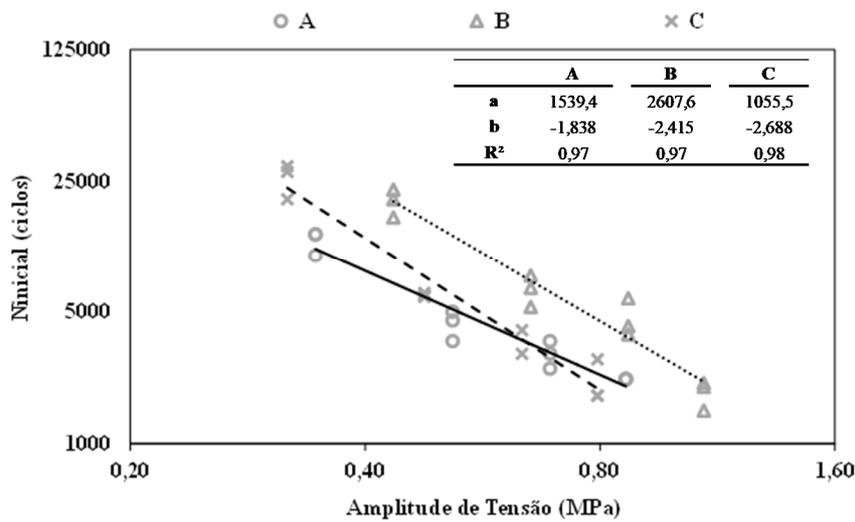


Figura 10. Curva de fadiga para estimativa do Ninicial (misturas A CAP 50/70, B AMP 60/85; C AB8)

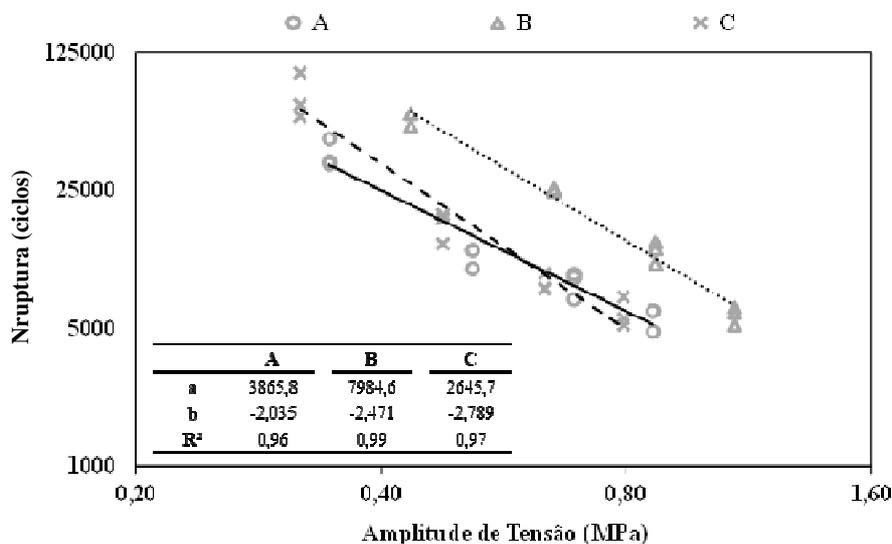


Figura 11. Curva de fadiga para estimativa do Nruptura (misturas A CAP 50/70, B AMP 60/85; C AB8)

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos identificou-se que as relações carga versus deslocamento da mistura B (AMP 60/85) ilustram o comportamento mais frágil e rígido desta composição, que também apresentou resistência máxima ao trincamento superior, com relação às demais. Por outro lado, a mistura C (AB8) apresentou desempenho inferior no que se refere à resistência ao desenvolvimento das trincas, possivelmente em decorrência de sua composição granulométrica, com quantidade reduzida de pó de pedra e teor de ligante elevado. Além disso, ao analisar numericamente os valores correspondentes à inclinação da curva pós-pico e deslocamento crítico, constatou-se maior ductilidade da composição C. Como reflexo da baixa inclinação da curva a partir do ponto de inflexão, a velocidade de propagação do trincamento é menor, fazendo com que sejam necessários maiores deslocamentos para mobilizá-la. O índice de flexibilidade de 22,92 apontou para maior rigidez da mistura B, enquanto as composições A (CAP 50/70) e C, que já haviam apresentado comportamento semelhante por meio de outros parâmetros, mantiveram-se mais flexíveis.

No que se refere à estimativa da vida de fadiga destas três misturas, identificou-se que a composição B apresentou melhor desempenho, tanto no que se refere ao início de propagação do trincamento, quanto no número de ciclos necessários para o rompimento das amostras. Ao serem solicitadas sob baixas amplitudes de tensão, a composição C mostrou-se mais eficiente em retardar o desenvolvimento do trincamento, assim como da ruptura, quando comparada ao concreto asfáltico A. Porém, este comportamento se inverte quando as tensões aplicadas aproximam-se de 0,65 MPa.

Ao final deste estudo, reforça-se a importância do mástique no que diz respeito ao desempenho a fratura, visto que não se identificou quebra dos agregados no desenvolvimento do dano, sendo os mesmos envolvidos pelo delineamento da trinca. Desta forma, também se mostra importante a consideração das propriedades viscoelásticas da matriz de agregados finos de cada mistura a fim de avaliar a influência que as mesmas têm no comportamento mecânico dos concretos asfálticos, estudo que hoje vem sendo avançado nas análises de modelos multi-escala.

REFERÊNCIAS

- Al-Qadi, I.; Ozer, H.; Lambros, J.; El Khatib, A.; Singhvi, P.; Khan, T.; Rivera, J. e Doll, B. (2015) Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS. Illinois Center for Transportation. Research Report, No. FHWA-ICT-15-017.
- AASHTO (2013) M 323: Standard specification for Superpave Volumetric Mix Design. Washington, DC.
- AASHTO (2013) TP 105: Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend Geometry (SCB). Washington, DC.
- AASHTO (2016) TP 124: Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using Semicircular Bend Geometry at Intermediate Temperature. Washington, DC.
- AASHTO (2011) T 283: Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC.
- Aragão, F.T.S.; Hartmann, D.A.; Kim, Y.R.; Motta, L.M.G. e Javaherian, M.H. (2014) A numerical-experimental approach to characterize fracture properties of asphalt mixtures at low in-service temperatures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C. 2447, 42-50. <https://doi.org/10.3141/2447-05>
- ABNT (2011) NBR 16018: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro.
- ABNT (2012) NBR 15087: Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Rio de Janeiro.
- Balbo, J.T. (2000) Fatos, Mitos e Falácias sobre os Modelos Experimentais de Fadiga. In: Reunião Anual de Pavimentação, v. 1, p. 391-404, Brasília.
- Balbo, J.T. (2007) Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, São Paulo.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006) DNIT 031: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro.

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009) DNIT 112: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro.
- Elseifi, M. A.; Mohammad, L.; Yang, H. e Cooper, S. (2012) Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road and materials and pavement design*, 13, 124-139. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657035>
- European Committee for Standardization (2010) EN 12697-44: Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt Part 44: Crack Propagation by Semi-Circular Bending Test. Brussels, Belgium.
- Gao, L. e Ling, C. (2016) Evaluation of fatigue behavior in cold recycled mixture using digital image correlation method. *Construction and Building Materials* 102, 393-402. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.014>
- Godoi, L.G.; Brito, L.A.T. e Ceratti, J.A.P. (2017) Ensaio semicircular de flexão para análise da resistência ao trincamento de misturas asfálticas: validação e interpretação do procedimento. Congresso Íbero-Latinoamericano del Asfalto, Medellín, Colômbia.
- Huang, B.; Shu, X. e Zuo, G. (2013) Using notched semi circular bending fatigue test to characterize fracture resistance of asphalt mixtures. In: *Engineering and fracture mechanics* 109, 78-88. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.07.003>
- Kim, Y.R.; Little, D.N. e Song, I. (2003) Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics – mechanistic evaluation. *Transportation Research Record*, Washington, DC, 1832, 1-8. <https://doi.org/10.3141/1832-01>
- Li, X. J. e Marasteanu, M.O. (2010) Using the Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete. *Experimental Mechanics*, 50(7), 867-876. <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9303-0>
- Molenaar, A.A.A.; Scarpas, A.; Liu, X. e Erkens, S.M.J.G. (2002) Semi-circular bending test; Simple but useful. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologies*, 71, 794-815.
- Montestruque, G.; Vasconcelos, K.L. e Bernucci, L.L.B. (2010) Ensaio de flexão em amostra semi-circular com fenda e análise de imagens para caracterização da resistência à fratura de misturas tipo AAUQ. XXIV Anpet Congresso de Pesquisas e Ensino em Transportes, Salvador, Bahia.
- Nsengiyumva, G. e Kim, Y.R. (2019) Effect of testing configuration in semi-circular bending fracture of asphalt mixtures: experiments and statistical analyses. *TRB Annual Meeting*, Washington, DC, 2673(5), 320-328. <https://doi.org/10.1177/0361198119839343>
- Vargas, G.A.B.; Oliveira, A.D e Aragão, F.T.S. (2018) Influência do modo de aplicação de carga nas propriedades de fratura de uma mistura asfáltica de agregados finos. *Transportes*, 26(3), 39 – 50. <https://doi.org/10.14295/transportes.v26i3.1609>