

IAG62-01-2013
INVESTIGAÇÃO SOBRE PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA A
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE FRATURA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS
LA INVESTIGACIÓN SOBRE LOS PROCEDIMIENTOS
EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS
PROPIEDADES DE FRACTURA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Francisco Thiago Sacramento Aragão
COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Brasil
fthiago@coc.ufrj.br

Diego Arthur Hartmann
COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Brasil
diego.hartmann@gmail.com

Laura Maria Goretti da Motta
COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, Brasil
laura@coc.ufrj.br

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil
veronica@det.ufc.br

Resumen

Este artículo investiga la adecuación del ensayo de flexión semi-circular (*semi-circular bending*, *SCB*) para la determinación de las propiedades de fractura en modo I (apertura) de las mezclas asfálticas. El *SCB* tiene un gran potencial para ser considerado como un ensayo rutinario para la obtención de propiedades de fractura debido a la facilidad y eficiencia de los procedimientos experimentales. Sin embargo, existen cuestionamientos sobre la validez de los resultados de estos ensayos por causa del tamaño reducido del ligamento en que el proceso de fractura ocurre. Para investigar la validez de las propiedades de fractura obtenidas a partir de las muestras *SCB*, ensayos con otras dos geometrías normalmente usadas en la literatura, es decir, flexión en vigas prismáticas con una ranura (*SE(B)*) y tracción en disco circular con ranura (*DC(T)*), se realizaron con la misma tasa de propagación de la fisura. Se adoptó un procedimiento numérico-experimental para identificar características locales de la zona de proceso de fractura a partir de simulaciones de los ensayos de laboratorio utilizando el método de los elementos finitos y el concepto de zona cohesiva de fractura. Los resultados encontrados demuestran que los protocolos experimentales simplificados, como por ejemplo el *SCB*, pueden ser utilizados en la

determinación de las características de fractura del material, siempre que se adopte una metodología adecuada de análisis de los resultados. Además, el procedimiento numérico-experimental desarrollado en el trabajo se mostró eficiente para la determinación de las diferentes propiedades de la fractura a partir de simulaciones de una misma prueba de laboratorio. Se realizaron pruebas adicionales considerando otras condiciones de temperatura y tasa de carga para demostrar la generalidad de la metodología numérico - experimental adoptada en el presente artículo. Se espera que esta investigación contribuya para el avance del conocimiento sobre el proceso de fractura de mezclas asfálticas y también para generar parámetros de entrada que sean representativos de los modelos computacionales de predicción de rendimiento, tal como el modelo micro-estructural que viene siendo desarrollado por los autores de este trabajo.

Resumo

Este artigo investiga a adequação do teste de flexão de semicírculos (*semi-circular bending, SCB*) para a determinação de propriedades de fratura em modo I (abertura) de misturas asfálticas. O *SCB* tem grande potencial para se tornar ensaio rotineiro de obtenção de propriedades de fratura devido à facilidade e à eficiência dos procedimentos experimentais. No entanto, questionamentos sobre a validade dos resultados destes testes existem por causa do tamanho reduzido do ligamento em que o processo de fratura ocorre. Para investigar a validade das propriedades de fratura obtidas a partir de amostras *SCB*, testes com outras duas geometrias tipicamente usadas na literatura, ou seja, flexão em vigotas prismáticas com uma fenda (*SE(B)*) e tração em disco circular com fenda (*DC(T)*), são conduzidos com a mesma taxa de propagação da fissura. Um procedimento numérico-experimental é adotado para identificar características locais da zona de processo de fratura a partir de simulações dos ensaios de laboratório usando o método dos elementos finitos e o conceito de zona coesiva de fratura. Os resultados encontrados demonstram que protocolos experimentais simplificados, como o *SCB*, por exemplo, podem ser usados na determinação das características de fratura do material, desde que uma metodologia adequada de análise dos resultados seja adotada. Além disso, o procedimento numérico-experimental explorado no trabalho mostrou-se eficiente para a determinação de diferentes propriedades de fratura a partir de simulações de um mesmo teste de laboratório. Testes adicionais serão conduzidos considerando outras condições de temperatura e taxa de carregamento para demonstrar a generalidade da metodologia numérico-experimental adotada no artigo. Espera-se que esta pesquisa contribua para o avanço do conhecimento sobre o processo de fratura de misturas asfálticas e para a geração de parâmetros de entrada representativos de modelos computacionais de previsão de desempenho, tal como o modelo microestrutural que vem sendo desenvolvido pelos autores deste trabalho.

INTRODUÇÃO

O trincamento é uma das principais fontes de deterioração de misturas asfálticas. A modelagem da formação e da coalescência de microfissuras e da propagação das macrofissuras resultantes é uma tarefa bastante complicada devido a características das misturas, tais como a heterogeneidade, o comportamento constitutivo inelástico, que é dependente da temperatura e da taxa de aplicação de carga, e as características geométricas complexas de forma e distribuição espacial das partículas de agregados na matriz asfáltica.

Na tentativa de modelar o processo de fratura em misturas asfálticas, diversos pesquisadores têm adotado a modelagem microestrutural como abordagem eficiente e

promissora. Diferente de outras metodologias, a modelagem microestrutural permite a caracterização do comportamento mecânico do compósito a partir de características dos constituintes, tais como comportamento constitutivo, geometria e proporção volumétrica destes nas misturas. Esta característica dos modelos microestruturais pode levar a significativas reduções no custo e tempo gasto em campanhas experimentais, já que a caracterização do comportamento dos constituintes em laboratório geralmente demanda menos material e é baseada em procedimentos mais rápidos do que a caracterização do comportamento do compósito em si.

O sucesso de modelos computacionais baseados na abordagem microestrutural está diretamente relacionado ao nível de entendimento sobre a física do problema que está sendo modelado e sobre como o modelo simula estas características físicas. Além disso, a caracterização adequada de propriedades dos constituintes é fundamental para a obtenção de parâmetros de entrada representativos nos modelos.

Diversos protocolos têm sido propostos para a caracterização do processo de fratura em misturas asfálticas a partir de procedimentos experimentais. Dentre estes protocolos, destacam-se: (a) flexão em vigotas prismáticas com uma fenda (*single-edge notched beam test*, $SE(B)$), (b) tração em disco circular com fenda (*disk-shaped compact tension test*, $DC(T)$), (c) compressão diametral em amostras cilíndricas (*indirect tension test*, IDT) e (d) flexão de semicírculos (*semi-circular bend test*, SCB).

Wagoner *et al.* (2005a) propuseram um protocolo de testes usando a geometria $SE(B)$ para a determinação de energia de fratura de misturas asfálticas. A metodologia proposta por Wagoner *et al.* (2005a) foi posteriormente adotada por vários pesquisadores para a calibração de parâmetros de fratura em suas modelagens microestruturais (Song *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2009). No entanto, apesar de amplamente usada na literatura, a geometria $SE(B)$ não é conveniente para ser adotada como metodologia corrente de testes de fratura por causa das dificuldades associadas à fabricação de amostras em laboratório, além da inviabilidade da extração destas vigotas de misturas no campo.

Para contornar as limitações relacionadas à fabricação de amostras $SE(B)$, pesquisadores da *University of Illinois at Urbana Champaign (UIUC)* propuseram um outro protocolo de teste de fratura usando uma versão modificada da geometria $DC(T)$ (Wagoner *et al.*, 2005b, c), que é padronizada na norma ASTM E399 para ensaios de fratura em metais. A nova geometria foi posteriormente padronizada na norma ASTM D 7313 e difere da usada em testes de metais na posição dos furos circulares onde o carregamento de tração é aplicado às amostras. Esta mudança foi necessária para evitar que o processo de fratura ocorresse em regiões próximas aos furos de carregamento e não na linha de simetria das amostras, como é esperado em testes de fratura em modo I (abertura).

Pesquisadores da *UIUC* têm usado a energia de fratura de testes com amostras $DC(T)$ e a resistência obtida a partir de testes IDT como parâmetros de entrada em simulações microestruturais do processo de fratura em misturas asfálticas (Song *et al.*, 2006). Como desvantagem dos testes $DC(T)$ em comparação a testes de flexão, Wagoner *et al.* (2005c) destacaram o possível desvio da linha de simetria das amostras que pode ser observado no caminho de propagação das fissuras, o que pode comprometer os resultados.

Outra geometria que vem sendo usada em testes de fratura de misturas asfálticas é a SCB . Diversos pesquisadores têm reconhecido o potencial dos testes com amostras SCB devido à simplicidade e eficiência do processo de fabricação de amostras a partir de corpos-de-prova cilíndricos compactados em laboratório ou extraídos de misturas no campo. Em comparação a amostras $DC(T)$, por exemplo, pode-se obter o dobro de amostras SCB com a mesma quantidade de material.

Apesar de limitações relacionadas ao tamanho reduzido da área de fratura e ao efeito de arqueamento, que dificulta a propagação das fissuras nas amostras devido ao estado compressivo de tensões no topo, Wagoner *et al.* (2005c) reconheceram que o acúmulo de conhecimento sobre as características do ensaio *SCB* pode de fato transformar este teste em uma metodologia promissora e eficiente para a obtenção de parâmetros de fratura de misturas asfálticas.

Neste sentido, o primeiro autor deste artigo e seus colegas recentemente propuseram uma metodologia numérico-experimental baseada no método dos elementos finitos e no conceito de zona coesiva de fratura para determinar características de dano a partir da simulação de testes com amostras *SCB*. Segundo Aragão e Kim (2011), a obtenção de parâmetros como energia de fratura a partir de áreas sob curvas força-deslocamento não é o procedimento mais apropriado porque outras fontes de dissipação de energia são erroneamente computadas no cálculo da energia de fratura. Este fato também foi observado por pesquisadores da própria *UIUC* (Song *et al.*, 2008).

Como pode ser observado, diversos ensaios têm sido propostos na tentativa de caracterizar o processo de dano por fratura em misturas asfálticas. No entanto, uma investigação sobre métodos de análise adequados, capazes de identificar características do comportamento do material localmente na chamada zona de processo de fratura, é necessária. Além da fundamentação científica apurada, é desejável que estes protocolos sejam eficientes e identifiquem propriedades de dano através da análise de um teste único de fratura que seja, preferencialmente, simples e cujas amostras sejam de fácil obtenção no laboratório e no campo.

Com esta finalidade, este trabalho investiga e compara características do processo de fratura em amostras *SCB*, *SE(B)* e *DC(T)* de uma mistura asfáltica de agregados finos. O procedimento numérico-experimental proposto por Aragão e Kim (2011, 2012) é adotado para caracterizar o processo de fratura em modo I de amostras das três geometrias avaliadas. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Explorar diferentes testes de fratura em modo I tipicamente usados na literatura para caracterizar o processo de dano por fissuramento;
- Comparar propriedades de fratura obtidos a partir de metodologias de análise tradicionais e usando uma metodologia numérico-experimental;
- Avaliar a validade das propriedades de fratura obtidas através de procedimentos experimentais eficientes e simplificados, como os testes com amostras *SCB*, por exemplo.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

A mistura asfáltica usada neste trabalho foi obtida a partir de um ligante asfáltico classificado pela metodologia *Superpave* em PG 70-28 e de agregados passando na peneira #10 (abertura de malha de 2 mm). Esta mistura será denominada de mistura de agregados finos (MAF) no artigo. A Figura 1 ilustra o processo de fabricação de amostras e os testes conduzidos em laboratório neste estudo.

Fabricação de Amostras

Amostras de MAF medindo 12 mm em diâmetro e 45 mm em altura foram extraídas de corpos-de-prova (150 mm em diâmetro e 50 mm em altura) compactados em um compactador

giratório da metodologia *Superpave* (CGS) e usadas na determinação das propriedades viscoelásticas lineares da matriz.

Amostras com maior altura (170 mm) foram fabricadas no CGS e destas foram extraídas amostras *SCB*, *SE(B)* e *DC(T)*. Para a fabricação de amostras *SCB* e *DC(T)*, amostras CGS foram cortadas em fatias de 25 mm de altura e 150 mm de diâmetro. Algumas destas fatias foram serradas ao meio para produzir amostras *SCB*. As outras fatias foram, então, transformadas em amostras *DC(T)* com o uso de uma sonda rotativa para produzir os furos usados posteriormente na aplicação do carregamento de tração através de roletes metálicos. Dois tamanhos de ligamento diferentes foram considerados para a geometria *DC(T)*: 82,5 mm e 50,0 mm. O primeiro é padronizado na norma ASTM D 7313 e o segundo foi escolhido com base nos ligamentos das amostras *SCB* e *SE(B)* avaliadas.

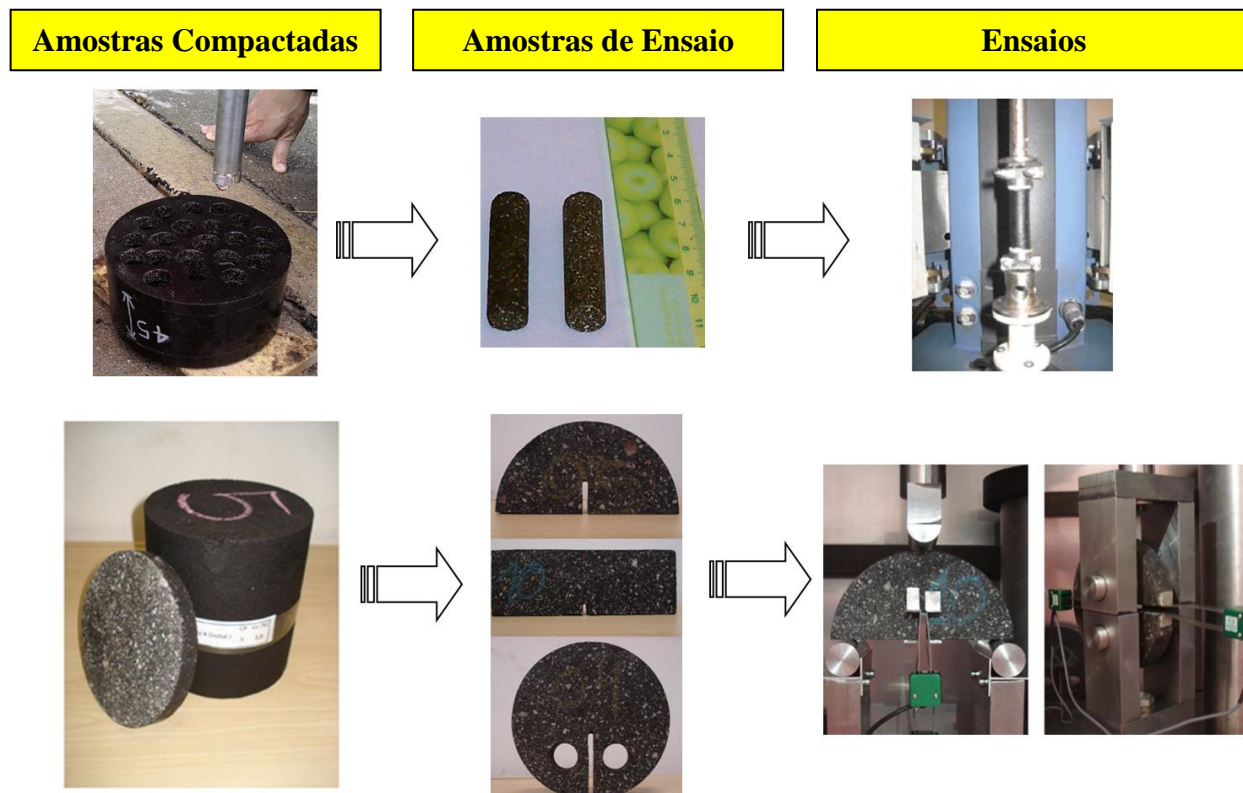


Figura 1: Fabricação de amostras e ensaios de laboratório

Amostras *SE(B)* medindo 150 mm x 60 mm x 25 mm também foram extraídas de amostras CGS, em um processo mais demorado, já que as seis faces de cada amostra tiveram que ser serradas cuidadosamente para garantir o paralelismo entre as faces opostas.

Testes de fratura em misturas asfálticas convencionais usando a geometria *SE(B)* geralmente adotam dimensões bem maiores do que as das vigotas fabricadas neste estudo. De acordo com Wagoner *et al.* (2005a), o conhecimento sobre o tamanho da zona de processo de fratura em misturas asfálticas ainda não é consolidado. É senso comum, no entanto, que o tamanho desta zona de dano é função de diversas variáveis de teste e características dos materiais, tais como temperatura, taxa de propagação da fissura, volume de vazios, teor e ductilidade do ligante e tamanho máximo de partículas de agregados. Uma hipótese que é

tipicamente adotada é a de que a amostra de concreto asfáltico deve ter dimensão mínima pelo menos três ou quatro vezes maior do que o tamanho máximo de agregados para garantir a validade estatística dos resultados. Como a maioria das misturas tem agregados de tamanho máximo 19 mm ou menor, um ligamento mínimo de 76 mm pode ser adequado. Neste trabalho, no entanto, somente agregados finos (< 2 mm) foram usados. Portanto, as amostras puderam ser fabricadas com área de ligamento menor.

Por fim, uma fenda foi cortada para induzir a formação da fissura próximo à linha de simetria das amostras. O tamanho das fendas foi ajustado para gerar ligamentos de 50 mm nas amostras *SCB*, *SE(B)* e *DC(T)*_50 e de 82,5 mm nas amostras *DC(T)*_82,5.

É importante notar que a escolha da espessura das amostras se baseou em diversos estudos anteriores com misturas convencionais e MAF que demonstraram que amostras com 25 mm de espessura não desenvolvem níveis de tensão significativos na direção da espessura das amostras (Aragão e Kim, 2011). Com isto, o custo computacional de simulações em três dimensões pode ser drasticamente reduzido, já que o problema tridimensional pode ser simulado assumindo a hipótese de estado plano bidimensional de tensões, caso a amostra seja fina o suficiente. Neste caso, as amostras estão sujeitas a um estado plano de tensões na ponta da fissura, enquanto que a triaxialidade do estado de tensões no interior da seção é significativa em amostras espessas.

Propriedades Viscoelásticas Lineares da Mistura MAF

Propriedades viscoelásticas foram obtidas dentro dos limites de linearidade através de testes de varredura de frequência em um reômetro de cisalhamento dinâmico usando um nível de deformação torsional senoidal pequeno o suficiente para não causar não linearidade (0,0065%). Os testes foram conduzidos em diversas temperaturas e frequências. Considerando a mistura MAF como termoreologicamente simples, o princípio de superposição frequência (ou tempo) - temperatura foi aplicado para a obtenção de uma curva mestra de módulo cisalhante de armazenamento no domínio da frequência para a temperatura de -10°C . O método da colocação foi, então, aplicado para ajustar os coeficientes da função analítica em forma de série (série de Prony) do módulo cisalhante de armazenamento, com base no modelo generalizado de Maxwell. Estes coeficientes foram usados adiante como parâmetros de entrada na modelagem computacional.

Testes de Fratura da Mistura MAF

Antes de testadas, todas as amostras foram condicionadas na câmara de temperatura de uma máquina universal de testes até que a temperatura interna se estabilizasse em -10°C . Uma amostra de sacrifício instalada dentro da câmara foi usada para o controle de temperatura.

Seguindo a etapa de condicionamento, uma taxa de abertura de 1 mm/min. na extremidade interna da fenda foi controlada através de um sensor do tipo *clip-on gage* instalado na face frontal das amostras. O deslocamento do atuador da máquina universal foi automaticamente ajustado para garantir a taxa de abertura de 1 mm/min. na fenda. A abertura da fenda foi monitorada nas suas extremidades interna e externa através de dois *clip-on gages* instalados nas amostras até que a força atingisse o valor de 100 N. O deslocamento da extremidade interna da fenda, também usado neste trabalho para controlar a taxa de propagação da fissura, é tipicamente denominado de *crack tip opening displacement (CTOD)* e o da extremidade externa, *crack mouth opening displacement (CMOD)*.

Nos testes de flexão (*SCB* e *SE(B)*), roletes metálicos de 25 mm de diâmetro foram usados como suporte. Os mesmos roletes foram inseridos nos furos de amostras *DC(T)* para a aplicação do carregamento de tração. Em todos os testes, a força de reação foi monitorada pelo sistema de aquisição de dados da máquina universal.

MODELAGEM DO PROCESSO DE FRATURA

Como mencionado anteriormente, o procedimento numérico-experimental recentemente proposto por Aragão e Kim (2011, 2012) foi adotado para a determinação de propriedades de fratura da mistura MAF. De acordo com os autores, a prática corrente de obtenção de propriedades como energia de fratura a partir de curvas experimentais força-deslocamento não é a opção mais adequada porque outras fontes de dissipação de energia, como a energia dissipada devido à viscoelasticidade da MAF, são erroneamente incluídas nos cálculos. Alternativamente, simulações numéricas dos testes de laboratório podem ser conduzidas para melhor caracterizar o comportamento na zona de processo de fratura, que se localiza ao redor da ponta da fissura.

Neste trabalho, simulações em duas dimensões foram conduzidas em um *software* comercial de elementos finitos considerando as hipóteses simplificadoras de estado plano de tensões, homogeneidade e isotropia da mistura MAF. Os coeficientes da série de Prony obtidos dos dados experimentais foram usados como propriedades viscoelásticas lineares da MAF. Um coeficiente de Poisson constante de 0,35 foi adotado. O processo de fratura em modo I foi simulado através da inserção de elementos de zona coesiva do tipo bilinear na linha de simetria das amostras.

Simulações preliminares foram conduzidas para identificar níveis de discretização adequados para as malhas de elementos finitos de cada geometria avaliada. Seguindo o estudo de convergência de malha, simulações dos testes de laboratório foram realizadas para calibrar as duas propriedades de fratura do modelo coesivo bilinear, ou seja, resistência e energia de fratura. A taxa de abertura de 1 mm/min. foi imposta na extremidade interna das fendas das amostras e as propriedades de fratura foram ajustadas até que a equivalência entre as curvas força-tempo numéricas e experimentais fosse observada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como mencionado anteriormente, metodologias tradicionais geralmente usam áreas sob curvas força-deslocamento normalizadas pela área potencial de fratura (comprimento do ligamento multiplicado pela espessura da amostra) para o cálculo da energia de fratura de misturas asfálticas. No entanto, outras fontes de dissipação de energia, como a energia dissipada pelo próprio comportamento viscoelástico da mistura asfáltica, são erroneamente incluídas nos cálculos, o que limita a precisão dos resultados obtidos por esta abordagem. Além disso, tem sido prática comum o uso de resultados de mais de um experimento para a obtenção das diferentes propriedades de fratura. Diversos pesquisadores têm, por exemplo, obtido energia de fratura a partir de testes com amostras *DC(T)* e resistência a partir de testes com amostras *IDT*. O maior entendimento sobre a física envolvida no processo de fratura pode levar a uma significativa economia de tempo e material se as duas propriedades de fratura puderem ser obtidas a partir de um único teste, que, de preferência, seja eficiente e de fácil execução.

Para demonstrar a necessidade de métodos mais adequados de análise do processo de fratura, comparações foram feitas entre propriedades obtidas a partir do procedimento numérico-experimental adotado neste estudo e a partir de curvas experimentais força-deslocamento obtidas dos testes de laboratório. No procedimento numérico-experimental, as propriedades da geometria $DC(T)_{82,5}$ foram usadas como referência e ajustadas para as outras geometrias até que os gráficos da Figura 2 pudessem ser gerados. A Figura 2 indica claramente que as propriedades de fratura do modelo numérico foram adequadamente definidas, já que não foram observadas discrepâncias significativas entre os resultados experimentais e numéricos.

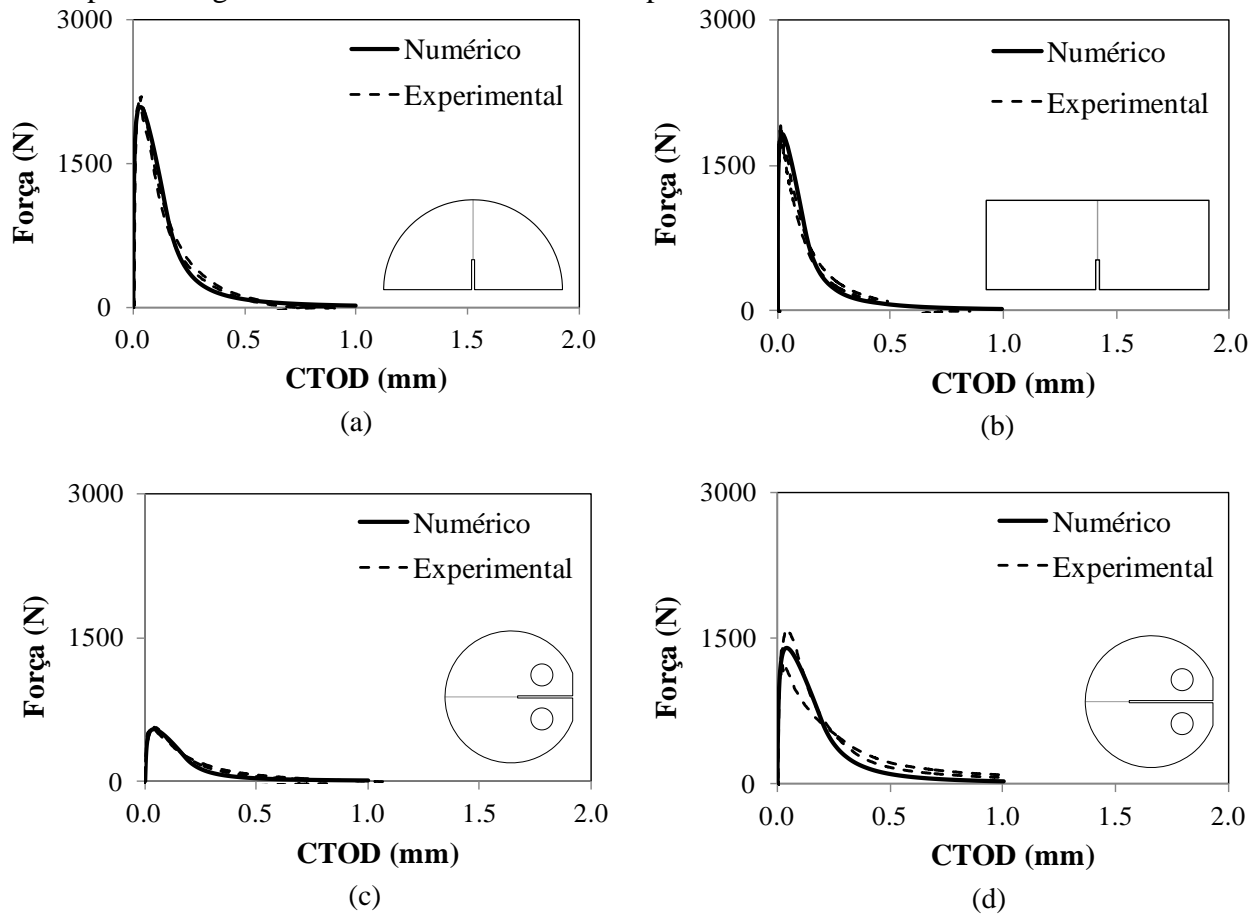


Figura 2: Resultados experimentais e numéricos para testes com amostras: (a) SCB, (b) SE(B), (c) $DC(T)_{50}$, (d) $DC(T)_{82,5}$

A Figura 3 mostra os fatores de calibração (propriedade de fratura/propriedade de fratura da geometria $DC(T)_{82,5}$) encontrados. Da análise da Figura 3a, observa-se que o procedimento numérico-experimental gerou resultados significativamente mais uniformes do que a abordagem tradicional. A média e o desvio padrão dos coeficientes de calibração foram, respectivamente, 0,90 e 0,13. Esta uniformidade é de fato desejada pois indica que propriedades de fratura intrínsecas ao material podem ser obtidas nas condições de teste adotadas neste trabalho para diversas configurações de geometria e carregamento das amostras. O maior desvio, de 29%, foi observado para a geometria $SE(B)$, quando um fator de calibração de 0,71 foi usado. Fatores de calibração de 0,95 foram obtidos para as outras duas geometrias, SCB e DCT_{50} .

A comparação entre os valores de resistência determinados a partir das simulações também revelou resultados consideravelmente uniformes (Figura 3b), com média e desvio padrão dos coeficientes de calibração de 1,08 e 0,10, respectivamente, e maior diferença entre os resultados de apenas 23%.

Uniformidade semelhante não foi observada quando a metodologia puramente experimental foi adotada. Desvios de até 45% foram obtidos entre os resultados quando dados de *CTOD* e *CMOD* foram usados nos cálculos de energia de fratura. Em ambos os casos, estes resultados mais discrepantes corresponderam à geometria *SCB*. Isto demonstra que o tamanho reduzido do ligamento em amostras *SCB* e o efeito do arqueamento e do estado compressivo de tensões no topo das amostras pode de fato levar a resultados discrepantes quando o procedimento tradicional de obtenção de propriedades de fratura é adotado. No entanto, a uniformidade das propriedades de fratura obtidas a partir do procedimento numérico-experimental indica que estes efeitos são consideravelmente menos significativos quando simulações do problema físico real são conduzidas adequadamente.

Ainda que estudos adicionais sejam necessários para a geração de resultados cada vez mais representativos, os dados preliminares apresentados na Figura 3 ilustram o potencial da metodologia numérico-experimental. Os resultados indicam que diferentes propriedades de fratura intrínsecas a misturas MAF submetidas a baixas temperaturas podem potencialmente ser obtidas a partir de testes com diferentes geometrias e configurações de carregamento, desde que estes sejam adequadamente simulados e analisados.

Ensaio adicionais serão conduzidos em outras condições de temperatura e taxa de carregamento para demonstrar a generalidade do procedimento explorado neste trabalho e sua aplicação a diferentes tipos de comportamento do processo de fratura, que varia de frágil a dúctil de acordo com as condições de teste.

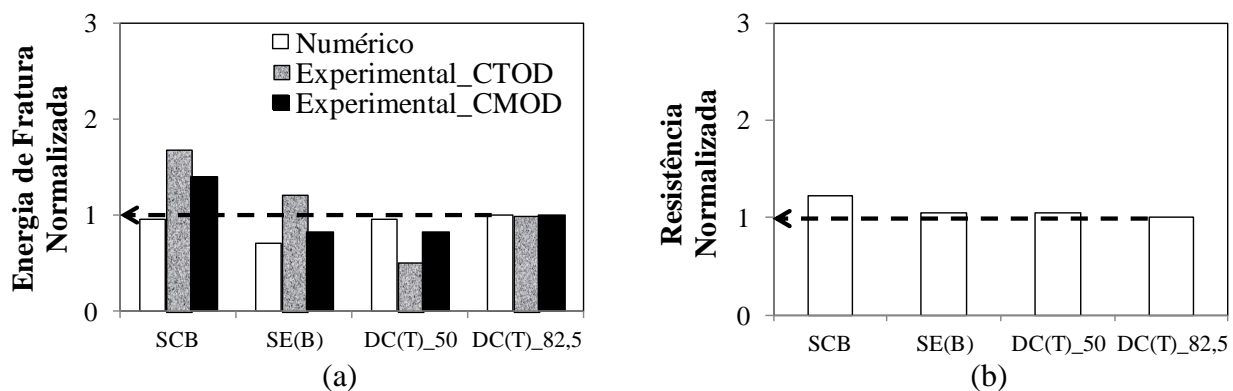


Figura 3: Propriedades de fratura obtidas para as quatro geometrias avaliadas: (a) energia, (b) resistência

CONCLUSÕES

Este artigo avaliou diversos protocolos tipicamente usados em testes de fratura em modo I de misturas asfálticas. No estudo, propriedades de fratura de misturas do tipo MAF foram obtidas a partir de medidas de força e abertura da fenda das amostras, que é o procedimento geralmente adotado na literatura. As propriedades de fratura também foram caracterizadas usando um procedimento numérico-experimental recentemente proposto pelo primeiro autor e seus colegas.

Este procedimento se baseia na simulação de testes de laboratório através do método dos elementos finitos e considera o comportamento viscoelástico da matriz asfáltica e o modelo de zona coesiva para modelar o processo de fratura.

Apesar da necessidade de testes adicionais para demonstrar a generalidade do procedimento explorado neste trabalho, os resultados preliminares apresentados no artigo indicam que a metodologia numérico-experimental é uma alternativa promissora à abordagem tradicional, já que caracteriza o dano na zona de processo de fratura das amostras. Além disso, diferente da prática atual, que usa testes distintos para a obtenção de propriedades de fratura, os resultados demonstraram que o procedimento numérico-experimental pode ser usado para determinar as diferentes propriedades de fratura a partir da análise de um único teste de laboratório. Isto pode resultar em significativa economia de tempo e material, já que protocolos mais simplificados e eficientes, como os testes com a geometria *SCB*, por exemplo, podem potencialmente ser usados como testes corriqueiros de caracterização do processo de fratura.

Espera-se que esta pesquisa contribua para o avanço do conhecimento sobre o processo de fratura em misturas asfálticas e para a geração de parâmetros de entrada mais representativos de modelos computacionais microestruturais de previsão de desempenho, como o que vem sendo desenvolvido pelos autores deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPq pelo apoio financeiro recebido para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Aragão, F. T. S. e Kim, Y. R. (2012). Mode I Fracture Characterization of Bituminous Paving Mixtures at Intermediate Service Temperatures. *Experimental Mechanics*, 52 (9), 1423-1434.
- Aragão, F. T. S. e Kim, Y. R. (2011). Characterization of Fracture Properties of Asphalt Mixtures Based on Cohesive Zone Modeling and Digital Image Correlation Technique. TRB.
- ASTM D7313 (2007). Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry, *ASTM International*.
- ASTM E399-90 (2002). Standard Test Method for Plane-strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standards, *ASTM International*.
- Kim, H., Wagoner, M. P., Buttlar, W. G. (2009). Micromechanical Fracture Modeling of Asphalt Concrete Using a Single-Edge Notched Beam Test. *Materials and Structures*, 42, 677- 689.
- Song, S. H., Wagoner, M. P., Paulino, G. H. (2008). δ_{25} Crack Opening Displacement Parameter in Cohesive Zone Models: Experiments and Simulations in Asphalt Concrete. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*, 31, 850-856.
- Song, S. H., Paulino, G. H., Buttlar, W. G. (2006). A Bilinear Cohesive Zone Model Tailored for Fracture of Asphalt Concrete Considering Viscoelastic Bulk Material. *J. of Engineering Fracture Mechanics*, 2829-2847.
- Wagoner, M.P., Buttlar, W.G., Paulino, G. H. (2005a). Development of a Single-Edge Notched Beam Test for Asphalt Concrete Mixtures. *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, 33(6), 452-460.

- Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., Paulino, G. H. (2005b). Disk-Shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture. *Society for Experimental Mechanics*, 45(3), 270-277.
- Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., Paulino, G. H., Blankenship, P. (2005c). Investigation of the Fracture Resistance of Hot-Mix Asphalt Concrete Using a Disk-Shaped Compact Tension Test. TRR, *No. 1929*, 183-192.