

MODELAGEM DO TRINCAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Juliana M. M. López^a, Celso Romanel^b e Laura M. G. Motta^c

^a*Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, julianalopez@aluno.puc-rio.br*

^b*Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, romanel@puc-rio.br*

^c*Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Brasil, laura@coc.ufrj.br*

Palavras Chave: Mistura Asfáltica, Trincamento, Método dos Elementos Discretos, Mecânica da Fratura, Modelagem Numérica.

Resumo: O surgimento e propagação de trincas na camada de mistura asfáltica é o principal fator de deterioração das rodovias brasileiras. Neste trabalho o método dos elementos discretos é utilizado para simular a propagação de trincas em misturas asfálticas, observadas na execução de ensaios de tração direta em laboratório (disco circular com fenda). A propagação de trincas é representada considerando-se um modelo de fraturamento elasto-plástico, conhecido como modelo de zona coesiva. Os resultados numéricos permitem concluir que a técnica de ensaio (tração direta em disco com fenda) bem como a aplicação do método dos elementos discretos para modelagem do problema provaram-se eficientes, sob ponto de vista qualitativo, para a investigação do comportamento de pavimentos asfálticos submetidos a processos de trincamento. Do ponto de vista quantitativo, porém, as diferenças observadas nas curvas experimental e numérica relacionando forças de tração versus abertura da boca da trinca indicam que as correlações entre parâmetros em macroescala do material, determinados em ensaios de laboratório, e os parâmetros em mesoescala utilizados no método dos elementos discretos (das partículas representando o agregado e das ligações entre as mesmas representando o mastiche asfáltico) precisam ser melhor investigadas através da realização de extensas análises paramétricas. Outro fator que afeta também os resultados é a natureza intrinsecamente heterogênea da mistura asfáltica, mais difícil de ser representada. Na simulação computacional pelo método dos elementos discretos do presente trabalho foi utilizado o programa comercial PFC2D v. 3.1.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil as rodovias têm um papel fundamental na economia do país. A importância das rodovias nas trocas econômicas entre as diversas regiões brasileiras justifica plenamente a realização de investigações numéricas e experimentais de pavimentos para uma melhor compreensão do seu comportamento mecânico. Dentre as principais causas da degradação de pavimentos asfálticos destacam-se o trincamento, a ocorrência de deformações permanentes excessivas, o envelhecimento do material e a fadiga por carregamentos repetidos, sendo que tais causas são consequência de diversos fatores como as características do tráfego, das condições climáticas, dos processos construtivos e materiais empregados, dos planos de manutenção das rodovias, dentre outras.

Motta (1991) e Pinto (1991) indicam o trincamento da camada asfáltica como o principal e o mais comum defeito das rodovias brasileiras. Trincas estendem-se através da espessura do pavimento, reduzindo sua capacidade estrutural, aumentando significativamente sua permeabilidade e favorecendo a infiltração de água para a fundação do pavimento. O trincamento das camadas asfálticas pode ser classificado em três tipos: trincas por fadiga, trincas por reflexão devido à propagação de trincas pré-existentes antes de recapeamentos e trincas térmicas devido a baixas temperaturas (gelo). Em virtude das condições climáticas brasileiras, apenas as trincas por fadiga e reflexão ocorrem com frequência no país.

A modelagem por modelo numérico de materiais que experimentam trincamento pode ser feita de duas maneiras, diretamente relacionadas com a escala de observação: (a) abordagem da mecânica dos meios contínuos, sob ponto de vista da macroescala (10^0 m), onde um corpo de prova ou protótipo são modelados sem identificação da composição interna do material, tratando-o como homogêneo ou com certo grau de heterogeneidade; (b) abordagem da mecânica das partículas, em mesoescala (10^{-3} m) onde os agregados e o mástico asfáltico podem ser identificados e representados separadamente no modelo de cálculo.

Para o uso eficiente de uma ferramenta numérica é preciso identificar para que tipos de problema seu emprego é mais recomendado. O método dos elementos discretos mostra-se bastante adequado para lidar com problemas de natureza descontínua em materiais granulares e, ao mesmo tempo, sob grandes níveis de deformação. Devido a essas características particulares, o método tem sido aplicado com sucesso em diversas áreas, especialmente na engenharia geotécnica, para solução de problemas de pavimentação, da mecânica dos solos e da mecânica das rochas.

A característica principal do método dos elementos discretos é a sua simplicidade de formulação e a generalidade de suas aplicações. Neste trabalho, este método, implementado no programa computacional PFC2D (Itasca), é utilizado na modelagem da propagação de trincas em pavimentos asfálticos, simulando a execução do ensaio de tração direta (disco circular com fenda) em laboratório.

2 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Existe uma variedade de métodos numéricos disponíveis para cálculo de soluções aproximadas de problemas de engenharia. O método dos elementos finitos e o método dos elementos de contorno estão atualmente em um estágio de desenvolvimento bastante avançado, podendo serem considerados métodos tradicionais para solução de problemas de valor de contorno. O método dos elementos discretos (MED) encontra-se em um estágio de desenvolvimento comparativamente anterior. A sua formulação está ainda em desenvolvimento, mantendo-se as características básicas propostas por Cundall e Strack (1979), com aperfeiçoamentos freqüentemente apresentados e publicados em periódicos e congressos da área.

Na formulação do método implementada no programa computacional PFC2D, problemas estáticos são resolvidos através de uma aproximação de relaxação dinâmica e o processo de cálculo é feito em pequenos incrementos de tempo. O meio é discretizado em partículas rígidas (discos na modelagem 2D, esferas em simulações 3D), as quais se movem para posições de equilíbrio de acordo a segunda lei de Newton. As etapas básicas de um ciclo de cálculo do método dos elementos discretos são apresentadas na figura 1.

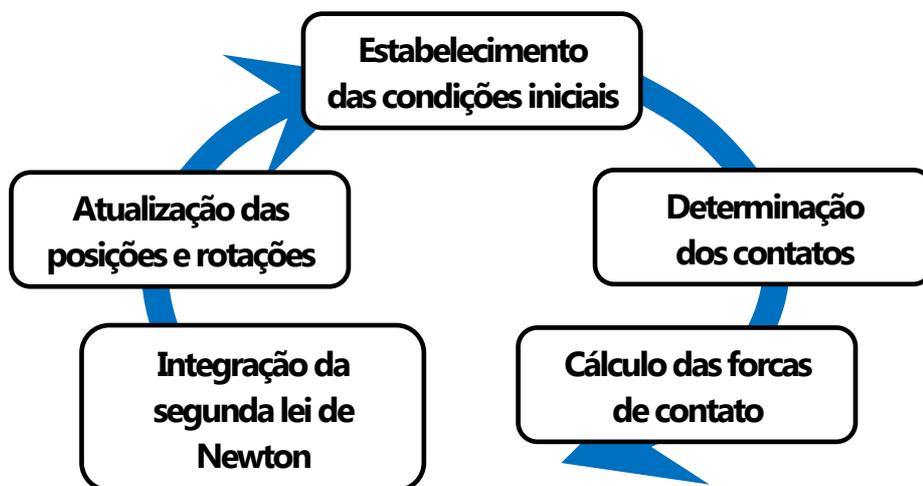


Figura. 1 - Etapas básicas do ciclo de cálculo do método dos elementos discretos

O intervalo de tempo é assumido suficientemente pequeno para que a perturbação, durante determinado incremento de tempo, não se propague além da vizinhança matemática de cada partícula. A natureza explícita da resolução do sistema de equações otimiza o uso da memória computacional e evita a necessidade de processos de cálculo iterativos, permitindo assim, a representação de interações não lineares entre um grande número de partículas.

O procedimento geral de solução é mostrado na figura 2, o qual é dividido em

diferentes estágios. Na etapa de configuração do modelo, três componentes são fundamentais:

- o arranjo de partículas;
- comportamento no contato e propriedades do material;
- condições de contorno e condições iniciais.

O arranjo corresponde a um número de partículas posicionadas e distribuídas dentro de uma região previamente estabelecida. As propriedades destas partículas e o comportamento dos seus contatos determina o tipo de resposta do modelo. Antes de efetuar qualquer simulação é importante definir as condições iniciais e de contorno. Após aplicação das cargas, o arranjo de partículas atinge uma condição de equilíbrio inicial. Qualquer alteração deste estado (como uma mudança nas condições de contorno) faz com que a resposta do modelo seja recalculada. A solução de equilíbrio é atingida depois da execução de vários passos de tempo, automaticamente controlados pelo programa PFC2D mas que também podem ser redefinidos pelo usuário.

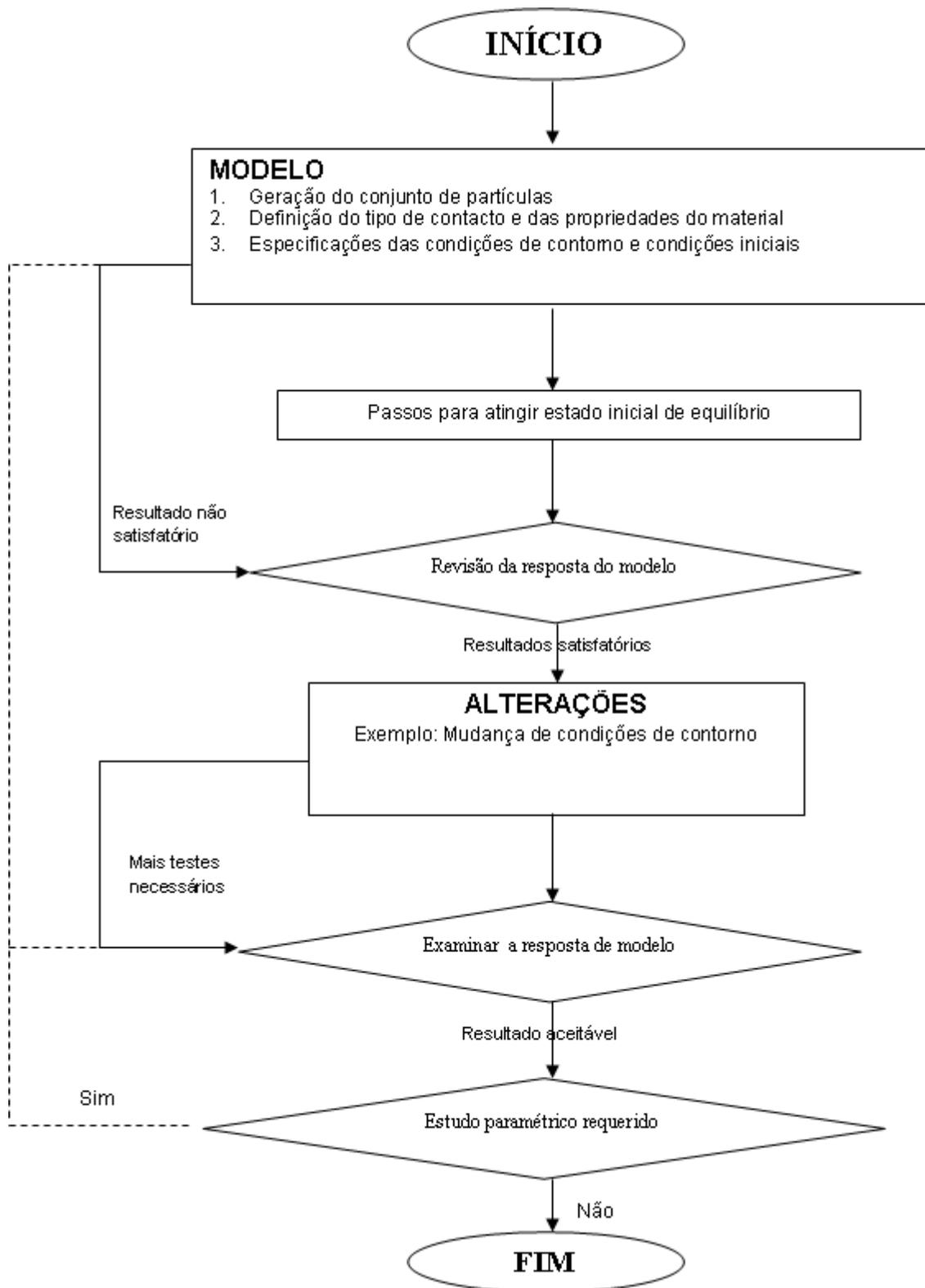


Figura 2: Procedimento geral de solução.

O programa tem a sua própria linguagem de programação chamada *FISH*. Ela permite definir e introduzir no modelo novas variáveis, gerar novas geometrias, relações constitutivas, utilização de servo-controladores, processamento em paralelo de modo compartilhado em "cluster" de computadores, dentre outras potencialidades, ampliando assim a possibilidade de sua utilização em muitos problemas da engenharia geotécnica.

Para processamento em um computador isolado, o método dos elementos discretos tem como desvantagem um tempo de processamento relativamente alto, dependendo do número de partículas e de contatos envolvidos na simulação. Nesta pesquisa trabalhou-se com 65 mil partículas.

Dentre outras características do programa PFC2D podem ser citadas as seguintes:

- as partículas são consideradas rígidas;
- o contato entre as partículas ocorre em uma área muito pequena (pontual);
- no contato há uma tolerância de penetração entre partículas. A magnitude desta tolerância está diretamente relacionada com a força do contato através da relação constitutiva força - deslocamento, sendo em geral esta penetração muito pequena comparada com o tamanho das partículas;
- pode existir uma ligação no contato entre as partículas;
- todas as partículas são consideradas como discos, mas outras geometrias podem ser geradas agrupando-se partículas;
- na formulação podem ser incluídos elementos rígidos ou paredes, aos quais podem ser impostos velocidades, deslocamentos ou forças. Estas paredes delimitam os contornos do problema, delimitando um determinado arranjo de partículas.

3. MODELOS CONSTITUTIVOS

O comportamento geral do material pode ser representado mediante a definição de um modelo constitutivo para os contatos entre partículas. Este modelo constitutivo consiste no programa PFC2D na superposição de três modelos básicos: o modelo de rigidez, o modelo de deslizamento e o modelo de ligação. Existem vários tipos de modelos que podem ser utilizados, como ilustrado na figura 3.

3.1) Modelos de rigidez

O modelo linear é definido pela rigidez normal K_n e tangencial K_s , calculadas a partir dos valores de rigidez das partículas em contato de acordo com as equações 1 e 2,

$$K^n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \quad (1)$$

$$K^s = \frac{k_s^{[A]}k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \tag{2}$$

O modelo de Hertz-Mindlin é de natureza não-linear, definido pelos parâmetros G (módulo de cisalhamento) e ν (coeficiente de Poisson). A rigidez normal do contato é dada pela seguinte expressão:

$$K^n = \frac{2\langle G \rangle \sqrt{2\bar{R}}}{3(1 - \langle \nu \rangle)} \sqrt{U^n} \tag{3}$$

e a rigidez de cisalhamento no contato por

$$k^s = \frac{2(\langle G \rangle^2 3(1 - \langle \nu \rangle) \bar{R})^{1/3}}{2 - \langle \nu \rangle} |F_i^n|^{1/3} \tag{4}$$

onde U^n é o valor da superposição das partículas e $|F_i^n|$ o módulo da força normal no contato. As demais variáveis das equações 3 e 4 são definidas conforme as entidades em contato. Para o contato partícula- partícula, tem-se

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{2R^{[A]}R^{[B]}}{R^{[A]} + R^{[B]}} \\ \langle G \rangle &= \frac{1}{2}(G^{[A]} + G^{[B]}) \\ \langle \nu \rangle &= \frac{1}{2}(\nu^{[A]} + \nu^{[B]}) \end{aligned} \tag{5}$$

e no caso de contato partícula-parede,

$$\begin{aligned} \bar{R} &= R^{particula} \\ \langle G \rangle &= G^{particula} \\ \langle \nu \rangle &= \nu^{particula} \end{aligned} \tag{6}$$

onde R é o raio da partícula e os índices $[A]$ e $[B]$ denotam as duas partículas em contato.

A rigidez normal tangente k^n é definida como

$$k^n = \frac{dF^n}{dU^n} = \frac{3}{2}K^n \tag{7}$$

a qual varia em função dos valores das forças normais e da superposição entre as partículas.

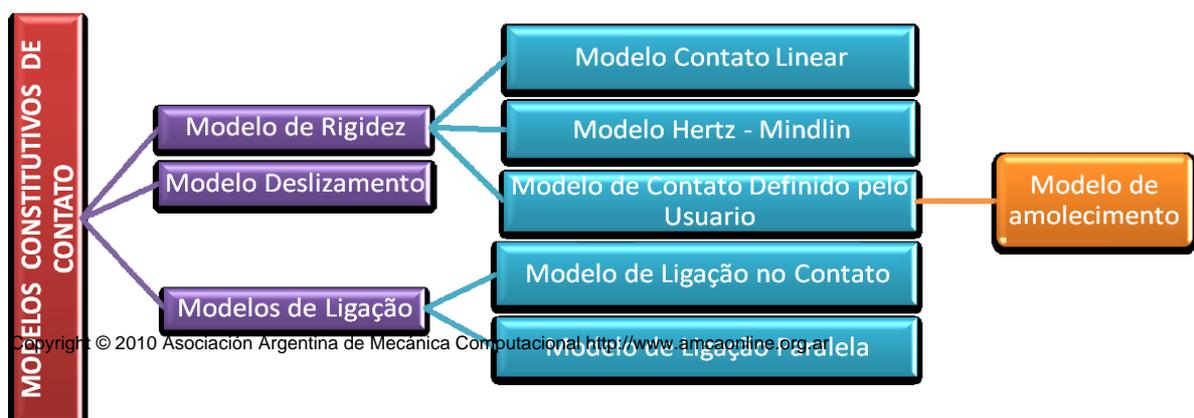


Figura 3 - Modelos constitutivos de contato.

3.2) Modelos de deslizamento

O modelo de deslizamento é uma propriedade das entidades em contato, podendo ser novamente entre duas partículas ou entre uma partícula e a parede. Este modelo está sempre ativo, exceto se houver algum tipo de ligação entre as entidades, quando pode ser substituído pelo modelo de ligação correspondente. O principal parâmetro do modelo de deslizamento é o coeficiente de atrito μ . Com base no critério de Mohr-Coulomb é possível escrever

$$F_{max}^S = \mu |F_i^n| \quad (8)$$

Se $|F_i^S| > F_{max}^S$, então a força cisalhante F_i^S é limitada pelo valor de F_{max}^S

$$F_i^S = F_{max}^S \frac{F_i^S}{|F_i^S|} \quad (9)$$

3.3) Modelos de ligação

Duas partículas podem estar ligadas mediante um tipo de contato que pode ser definido, ou imaginada, como uma cola entre as partículas. Neste contexto, dois tipos de contato podem ser utilizados no programa PFC2D: (a) ligação de contato (*contact bond*); (b) ligação paralela (*parallel bond*).

A ligação de contato é um tipo de contato pontual que só transmite forças, podendo ser representada por duas molas atuando nas direções normal e transversal no ponto de contato entre duas partículas. Se a força normal de tração for igual ou superior à resistência à tração da mola no ponto de contato, a ligação é rompida em ambas as direções (normal e transversal) e as forças de contato tornadas iguais a zero. Se a força transversal for maior do que a resistência transversal da mola na ligação do contato, a ligação nesta direção é rompida e o valor da força transversal é limitado pelo modelo de deslizamento.

A ligação paralela descreve o comportamento de um elemento não-pontual que une a duas partículas como uma cimentação. Este tipo de contato estabelece uma interação elástica entre as partículas, podendo transmitir forças e momentos. O contato paralelo é representado como um disco com raio definido em função do menor dos raios das partículas em contato.

4. MODELO DE RIGIDEZ PARA TRINCAS

Para simulação da propagação de trincas é necessário adotar-se um modelo de rigidez específico para descrever o comportamento da região do material próxima à ponta da trinca. Barenblatt (1962) e Dugdale (1960) propuseram o modelo de zona coesiva para representação do comportamento de materiais frágeis e dúteis (figura 4), respectivamente, incluindo forças de coesão na região do trincamento. Barenblatt (op.cit.) assumiu que tais forças decrescem suavemente (figura 5) enquanto que no modelo de Dugdale (op.cit.) estas forças se mantêm constantes, representando comportamento de material elasto-perfeitamente plástico.



Figura 4- Comportamento do material em ensaio de ruptura sob deformação controlada: (a) material frágil (b) material dútil (Soares, 1997).

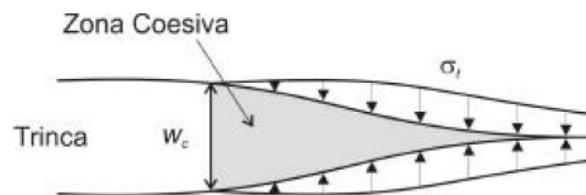


Figura 5 - Modelo de zona coesiva (Barenblatt, 1962).

Atualmente modelos de zona coesiva (MCZ) têm sido usados para simular processos de fratura em vários materiais como polímeros, materiais metálicos, materiais cerâmicos, rochas, compósitos de matriz metálica, concreto, materiais reforçado com fibras de plástico, considerando-se uma variedade de condições de carga (estática, dinâmica, cíclica, etc.). Várias versões mais recentes foram propostas por diversos autores na literatura, com a principal diferença dentre elas na forma da resposta tração versus deslocamento e nas constantes que caracterizam o modelo. Modelos bilinear de zona coesiva podem ser descritos por dois parâmetros independentes, como a energia coesiva Φ , a resistência coesiva $F_{máx}$ ou a distância de separação das superfícies da trinca δ_{sep} . Em geral, a energia coesiva é obtida a partir de ensaios de laboratório, sendo considerada equivalente à energia de fratura G_f . Na figura 6 é ilustrado esquematicamente o modelo da zona coesiva com amolecimento.

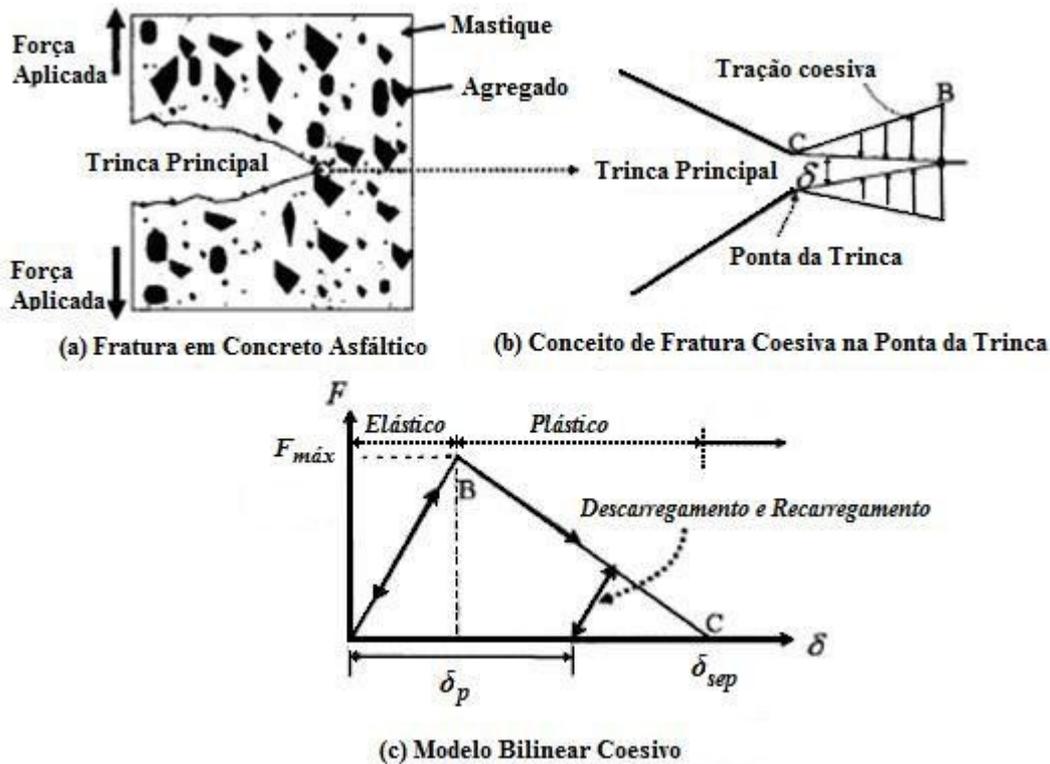


Figura 6 - Esquema do modelo bilinear de zona coesiva com amolecimento (Kim, 2007).

Se o contato está sob tração, a força resistente no contato F_{max} é calculada a partir dos parâmetros de resistência (resistência à tração F_c^n e resistência ao cisalhamento F_c^s) como uma função da orientação atual da força de contato. É assumido que a resistência no contato varia linearmente com o ângulo α formado entre as direções da força de contato e o segmento de reta conectando os centros das partículas em contato.

$$F_{max} = \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi}\right) x F_c^n + \frac{2\alpha}{\pi} x F_c^s \quad (10)$$

O escoamento plástico no contato sob tração é determinado comparando-se a força de contato F resultante com a força resistente F_{max} disponível.

$$F = \sqrt{((F^n)^2 + (F^s)^2)} \quad (11)$$

O contato apresentará escoamento plástico se

$$F > F_{max} \quad (12)$$

No caso de escoamento plástico nos contatos, o incremento de deslocamento no contato ΔU^k ($k=n,s$) pode ser decomposto em incrementos de deslocamento elástico e plástico,

$$\Delta U^k = \Delta U_e^k + \Delta U_p^k \quad (13)$$

O incremento de força ΔF^k é uma função do incremento do deslocamento elástico somente

$$\Delta F^k = K^k \Delta U_e^k \quad (14)$$

onde

$$\Delta U_e^K = \Delta U^K - \Delta U_p^K \quad (15)$$

O incremento de deslocamento plástico pode ser determinado usando a condição de consistência $F - F_{max} = 0$. O incremento de deslocamento plástico satisfaz uma lei de fluxo e é considerado que, se a força normal for de tração, a direção do incremento de deslocamento plástico é sempre coincidente com a direção da força de contato resultante.

$$\Delta U_p^K = \Delta \lambda \frac{F^K}{F} \quad (16)$$

onde $\Delta \lambda$ é um escalar positivo.

Se a força normal de contato for compressiva, a máxima força de cisalhamento no contato é definida por

$$F_{max}^s = \mu |F^n| + F_c^s \quad (17)$$

Se deslizamento ocorrer, o deslocamento plástico de cisalhamento é assumido coincidente com a direção da força cisalhante no contato.

O modelo de zona coesiva incorpora amolecimento (figura 6), sendo as resistências nos contatos expressas em função dos deslocamentos plásticos acumulados,

$$F_C^K(U_p/U_{pmax}) = F_C^K \left(1 - \frac{U_p}{U_{pmax}}\right) \quad (18)$$

$$U_p = \sum |\Delta U_p| \quad (19)$$

5. SIMULAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Nesta seção é apresentada a simulação numérica da propagação de trinca em mistura asfáltica através da modelagem do ensaio de tração direta em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact Test*). O corpo de prova é considerado homogêneo, sujeito ao modo de falha por abertura ou Modo I

Para determinação do parâmetro energia de fratura (G_f) em misturas asfálticas é possível empregar o ensaio de fadiga em corpos de prova com forma de vigotas, porém a grande quantidade de material necessária para confecção dos mesmos limita sua utilização prática. Assim, corpos de prova de forma cilíndrica são mais fáceis de serem obtidos de rodovias e preparados em ensaios de laboratório.

O ensaio aqui analisado foi executado nos laboratórios da Coppe/UFRJ, de acordo com a norma D7313 (*Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt – Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry*) da ASTM (2007).

A energia de fratura G_f pode ser calculada como a área abaixo da curva experimental força versus abertura da boca da trinca CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*) no ensaio de tração direta. Numericamente a área é facilmente obtida através de um método de quadratura baseado nas regras de Simpson ou dos trapézios.

5.1. Descrição do corpo de prova

O corpo de prova tem formato de um disco com diâmetro $D=150$ mm, espessura $t = 50$ mm, com dois furos interiores (figura 7) de diâmetro $\Phi=25$ mm. O comprimento da pré-trinca é $(a+c) = 62.5$ mm e o do ligamento $(W - a) = 82.5$ mm. As demais dimensões estão listadas na tabela

D	150
W	110
ϕ	25
a	27.5
d	25
c	35
t	50

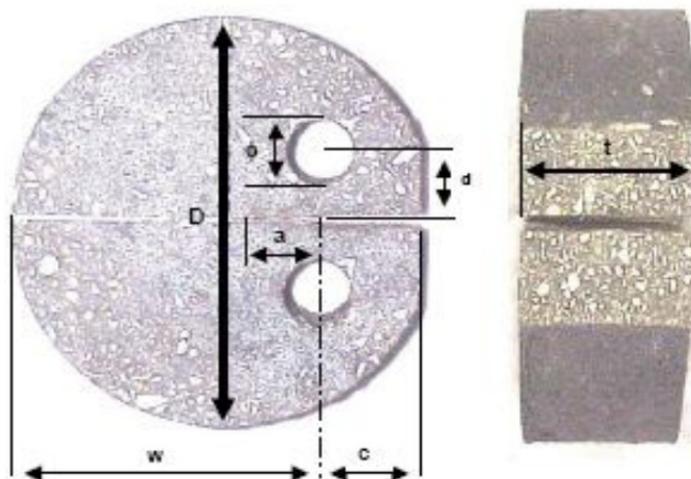


Tabela 1 - Dimensões (mm) recomendadas pela ASTM D7313/07.

Figura 7 - Nomenclatura e dimensões do corpo de prova (Wagoner, 2005)

5.2 Geração e arranjo das partículas

A geração das partículas para representação do disco foi feita com dois tipos de arranjo, hexagonal e quadrada, e com três tipos de tamanho de partícula (tabela 2), com raios de 0.25 mm, 0.50 mm e 1.00 mm, seguindo recomendações de Kim (2005). Os modelos constitutivos adotados para o arranjo de partículas foram o modelo de rigidez linear e o modelo de ligação paralela (para simulação do mastic asfáltico entre as partículas) em todo o corpo de prova, exceto na parte central onde ocorrerá a propagação da trinca no modo de abertura, onde foi considerado o modelo de zona coesiva com amolecimento (figura 8).

5.3 Aplicação do carregamento

Cada furo circular do disco com fenda onde são aplicados as forças de tração P no ensaio de laboratório foi modelado como uma circunferência formada por 60 segmentos retilíneos de parede com 0,0013mm de comprimento, conforme ilustra a figura 9a.

Para simulação do carregamento, as paredes de ambos os furos foram verticalmente deslocadas, em sentidos opostos, sob velocidade constante, provocando uma reorganização do conjunto das partículas com geração de campos de tensão (figura 9b) que, na região de propagação da fratura, são de tração e

provocam a ativação do mecanismo coesivo de simulação de propagação da trinca pré-existente. Os deslocamentos na abertura da boca da trinca (CMOD – *Crack Mouth Opening Displacement*) são continuamente registrados pelo programa para obtenção da curva força vs. CMOD.

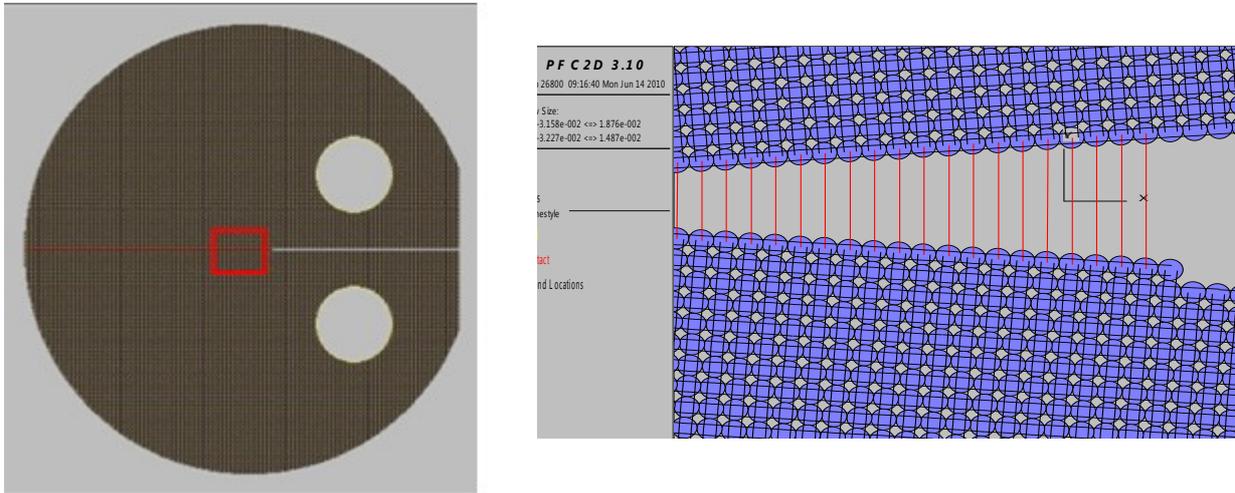


Figura 8 - Contatos coesivos e ligações paralelas entre as partículas nas vizinhanças da ponta da trinca.

Arranjo da Partícula	Diâmetro da Partícula (mm)	Densidade Kg/m ³	Coefficiente de Poisson ν	Coefficiente de fricção μ	Numero de Partículas	Numero de Contatos	Numero de Contatos Coesivos
quadrado	0.25	2400	0.25	0.5	65,762	130,609	165
quadrado	0.50	2400	0.25	0.5	16,414	32,374	65
quadrado	1.00	2400	0.25	0.5	4,041	7,050	35
Hexagonal	0.25	2400	0.25	0.5	75,966	226,263	329
Hexagonal	0.50	2400	0.25	0.5	18,914	55,925	154
Hexagonal	1.00	2400	0.25	0.5	4,717	13,739	82

Tabela 2 - Propriedades e arranjo das partículas nas simulações computacionais.

5.4 Propagação da trinca

Nas primeiras simulações, observou-se fratura junto aos próprios furos onde deslocamentos prescritos foram aplicados (figura 10), concluindo-se que as propriedades mecânicas (em mesoescala) modelavam o corpo de prova como constituído por material frágil. Uma situação similar foi registrada na pesquisa experimental de Wagoner (2005), conforme ilustrações da figura 11.

As figuras 12 a 15 apresentam o evolução, durante a simulação numérica do ensaio, das forças de contato entre partículas arranjadas de forma hexagonal, podendo-se notar propagação da trinca pela concentração de tensões nas proximidades de sua ponta, bem como a ocorrência de fratura sob modo de abertura (Modo I).

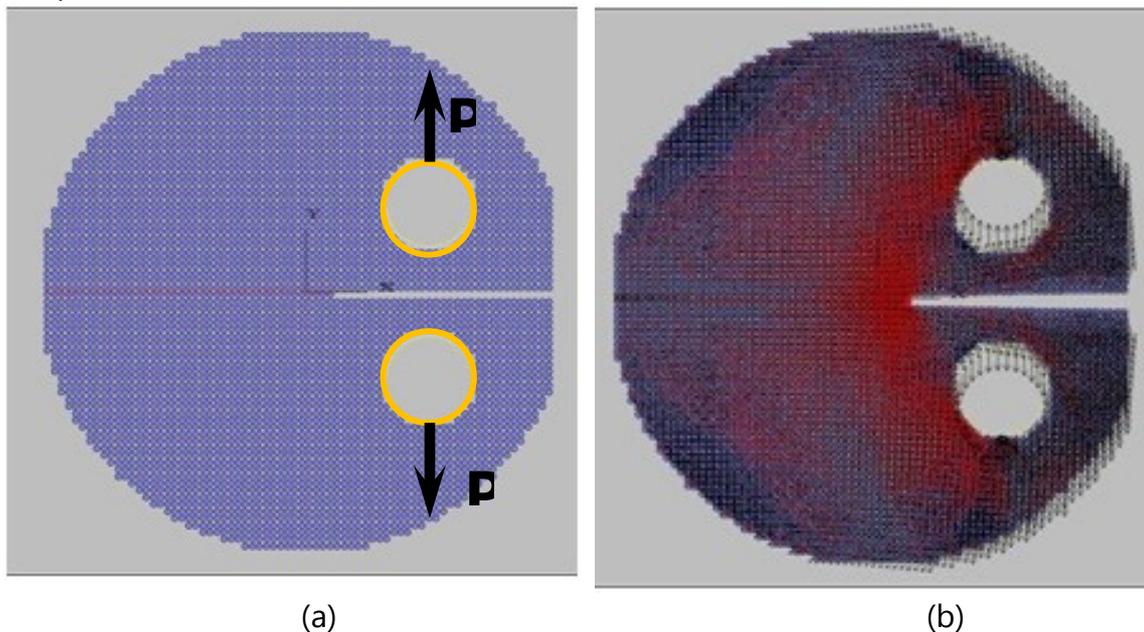


Figura 9 – (a) Furos representados por segmentos de parede; (b) Abertura da boca da trinca e vetores de deslocamentos sob taxa de velocidade constante de afastamento dos furos de carregamento.

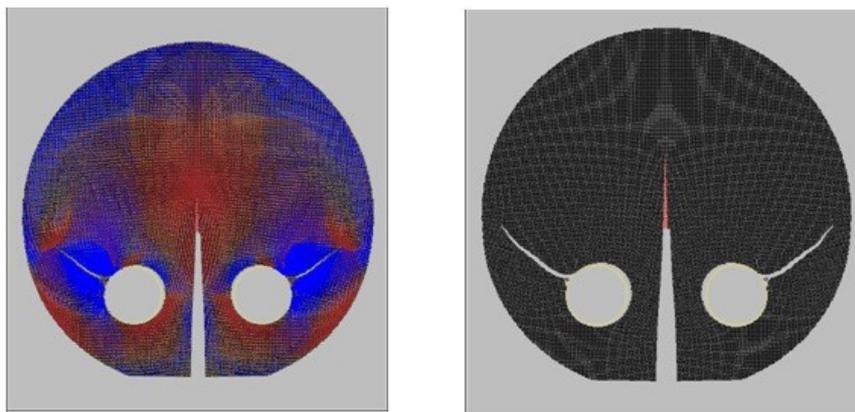


Figura 10 - Trincas na região dos furos na modelagem computacional.

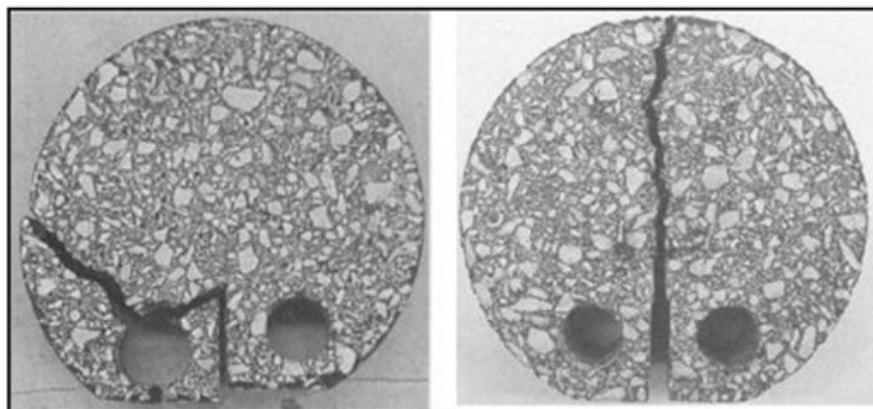


Figura 11 - Trincas na região dos furos (à esquerda) nos primeiros ensaios executados por Wagoner (2005).

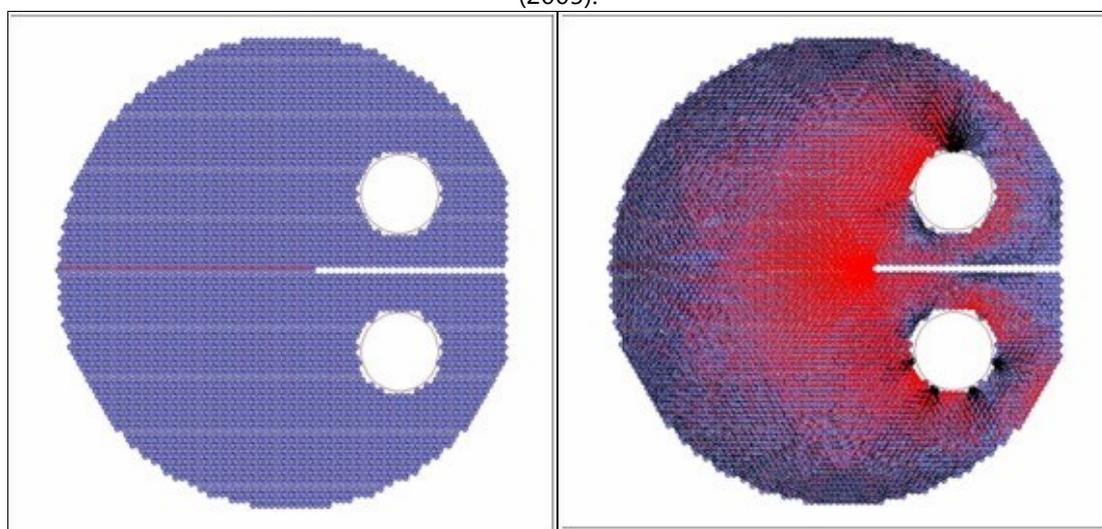


Figura 12 - Corpo de prova na condição inicial , antes da aplicação das forças de tração (simulada por deslocamentos prescritos dos furos).

Figura 13 - Corpo de prova com concentração de tensões (em vermelho) na ponta da trinca pré-existente

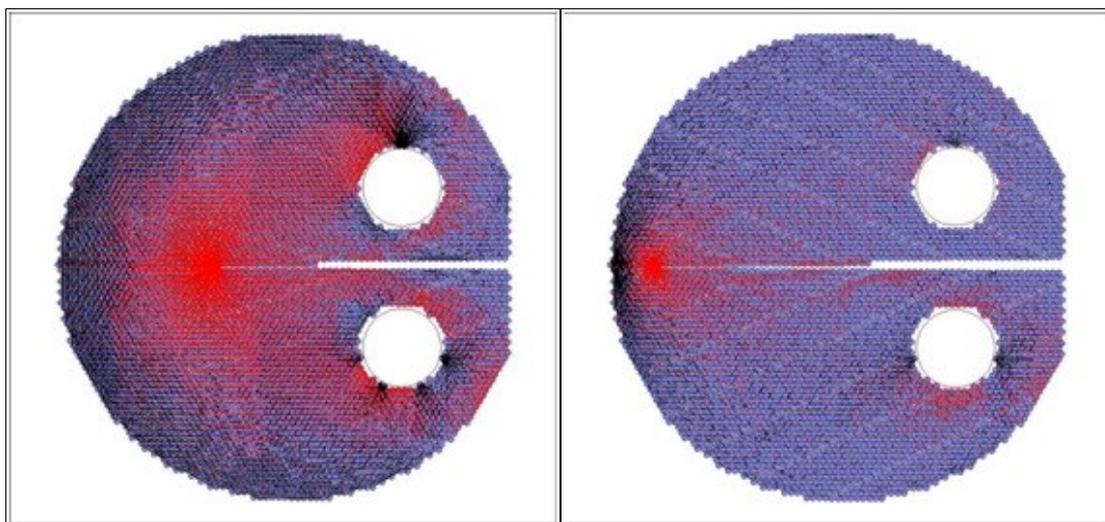


Figura 14 - Corpo de prova com propagação da trinca.

Figura 15 - Corpo de prova com propagação adicional da trinca.

Se qualitativamente as análises numéricas pelo método dos elementos discretos possam ser consideradas satisfatórias, do ponto de vista quantitativo a curva experimental de laboratório relacionando a força de tração aplicada no disco e a abertura da boca da trinca (CMOD) não pôde ser simulada com igual sucesso, conforme mostra a figura 16, para o corpo de prova CP_B34, constituído por partículas com tamanho nominal máximo de 19,1mm, asfalto tipo PG 70-16 e temperatura da amostra em 25° C, onde a força de tração máxima prevista foi 250% superior à medida no ensaio de laboratório. A tabela 3 lista as propriedades do corpo de prova em macro e meso escalas, com as últimas utilizadas para descrição no método dos elementos discretos dos agregados (partículas) e masticque (ligação) que formam a mistura asfáltica.

|

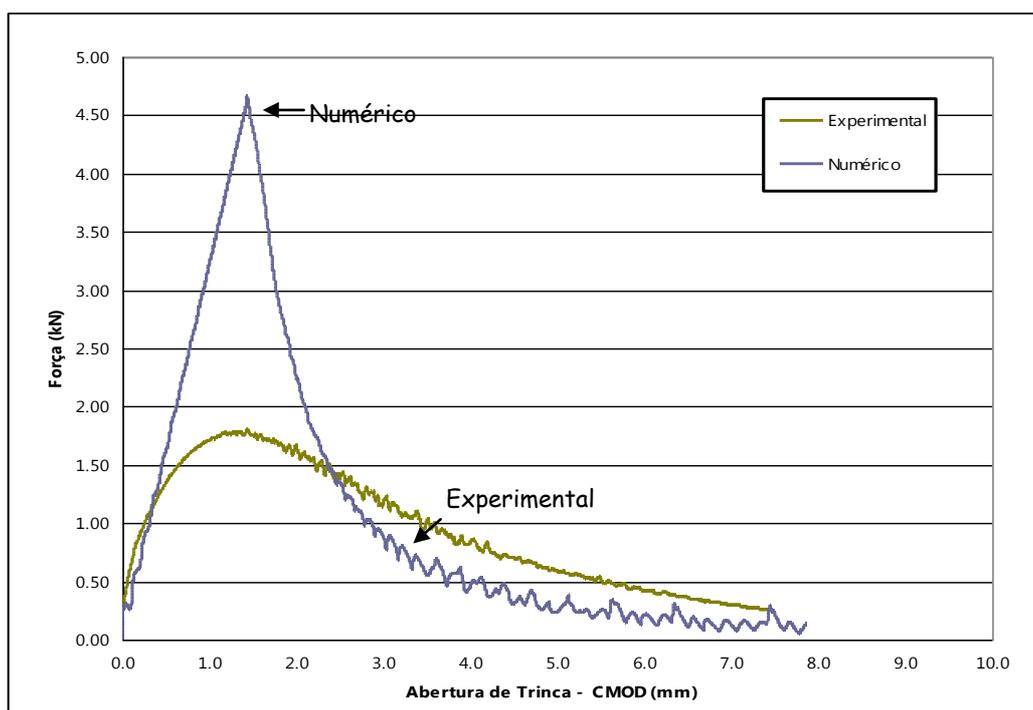


Figura 16 - Curvas força de tração versus abertura da boca da trinca (CMOD) obtidas experimental e numericamente.

Corpo de Prova		Propriedades em Macroescala			Propriedades em Mesoescala		
Temperatura (C)	Espessura (mm)	Energia de Fratura (J/m ²)	Módulo de Young, E (GPa)	Resistência à Tração, RT (MPa)	Rigidez da Partícula (GPa)	Resistência de Ligação (MPa)	Energia de Fratura (J/m ²)
25	50	2166.78	4.00	2.00	0.07	8.00	2166.78

Tabela 3 - Propriedades do corpo de prova em macro e meso escalas.

6. CONCLUSÕES

A presente pesquisa empregou o método dos elementos discretos, através do programa computacional PFC2D, para a realização de uma investigação da propagação de trincamento em mistura asfáltica sob uma abordagem micro-mecânica. Especificamente, procurou-se reproduzir os resultados de ensaios de tração em disco circular com fenda realizados na Coppe/ UFRJ (Hirsch, 2009). O material foi considerado estatisticamente homogêneo e a região de propagação da fratura foi modelada com base no modelo constitutivo da zona coesiva com amolecimento, também disponível no programa PFC2D.

A partir do resultados da modelagem numérica concluiu-se que:

- O método dos elementos discretos é uma ferramenta numérica eficiente para simular processos de propagação de trincas em misturas asfálticas.

Entretanto, ainda apresenta como desvantagem os grandes tempos de processamento exigidos e, no caso específico do programa computacional PFC2D, um difícil aprendizado de sua utilização envolvendo um grande número de comandos, variáveis e opções, muito maiores do que nos usuais programas de elementos finitos que os engenheiros estão mais familiarizados.

- A relação força de tração versus abertura da boca da trinca (CMOD) obtida numericamente, ainda que não concorde plenamente com os resultados experimentais, exhibe qualitativamente a tendência de comportamento do material asfáltico ensaiado em laboratório. Isto indica que o modelo de zona coesiva com amolecimento é adequado para simulação da propagação da trinca, porém análises paramétricas adicionais devem ser executadas para melhor estabelecer as correlações entre as propriedades determinadas em laboratório (macroescala) e as propriedades utilizadas no método dos elementos discretos (mesoescala), tendo em vista as diferenças entre os comportamentos previsto (numérico) e observado (experimental) mostrados na Figura 16.
- Investigações posteriores também devem ser executadas pelos autores, modelando-se o pavimento asfáltico como um material heterogêneo (composição do corpo de prova morfológicamente descrito através de técnicas de imagem de alta resolução, com representação de agregados e masticos sob forma de clusters de elementos discretos). Nesta nova situação, a trajetória da fratura no modo I não será antecipadamente conhecida, como no caso abordado no presente estudo, justificando portanto de maneira mais convincente a utilização do método dos elementos discretos em problemas mais complexos da mecânica da fratura.
- O ensaio de tração em disco circular com fenda representa uma técnica com grande potencial de aplicação não somente na área de pavimentação mas em outros campos da engenharia onde problemas da mecânica da fratura são importantes.

REFERÊNCIAS

- Barenblatt, G.I., Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics*, v.7, p. 55-129, Academic Press, New York, 1962.
- Cundall, P.A.; Strack, O.D.L., A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique* 29, pp. 47-65, 1979.
- Dugdale, D., Yielding of Steel Sheets Containing Slits. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, v.8, pp. 100-104, 1960.
- Hirsch, F., Avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas através de ensaio de tração em disco circular com fenda, *Dissertação de Mestrado*, COPPE/UFRJ, 2009.
- Kim, H. e Buttlar, W., Micromechanical fracture modeling of hot-mix asphalt concrete

- based on a disk-shaped compact tension test, Proceedings *GeoFrontiers* ASCE, Reston, Va., 2005.
- Kim, H., Wagoner, M.P.; Buttlar, W.G., Cohesive fracture modeling under different loading rates in asphalt concrete using the discrete element method, *International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials*, Junho 20-22, Atenas, Grécia, 2007.
- Motta, L.M.G. (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis - Parâmetro de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. *Tese de Doutorado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Pinto, S. (1991) Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. *Tese de Doutorado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- PFC2D - *Particle Flow Code 2D*, v.3.1, Itasca International Inc., 2005.
- Soares, J.B., Concrete Characterization Through Fracture Mechanics and Selected Pavement Applications. *Tese de Doutorado*, Texas A&M University, College Station, TX., 1997.
- Wagoner, M.P., Buttlar, W.G. e Paulino, G.H., Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture, *Society for Experimental Mechanics*, vol. 45, no. 3, pp. 270-277, 2005.