

Simulación del fisuramiento en mezclas asfálticas por el método de elementos discretos

López J.M.M., Romanel, C., Valverde, N.N.
Pontificia Universidad Católica del Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Motta, L.M.G.
COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil



ABSTRACT

The cracking of the asphalt mixture layer is the main cause of deterioration of the Brazilian roads. In this study the discrete element method is used to simulate the crack propagation through asphalt mixtures observed in the DCT (Disk-shaped Compact Tension) laboratory test. Crack propagation is represented using an elastoplastic constitutive model known as the cohesive zone model. The numerical results indicate that the application of the discrete element method is an efficient tool for the simulation of DCT tests and the behavior of asphalt mixtures subject to cracking processes. The 2D numerical model was analyzed using the commercial software PFC2D based on the discrete element method.

PRESENTACIONES TECNICAS

El surgimiento y propagación de fisuras en la camada asfáltica es el principal factor de deterioración de las carreteras en el Brasil. En este trabajo el método de elementos discretos es utilizado para simular la propagación de fisuras en mezclas asfálticas, observadas en la ejecución del ensayo de tracción directa (DCT - Disk-shaped Compact Tension) en el laboratorio. La propagación de trincas es representada considerando un modelo de fraturamiento elasto-plástico, conocido como modelo de zona cohesiva. Los resultados numéricos permiten concluir que la aplicación del método de elementos discretos para la simulación del ensayo DCT es eficiente, sobre el punto de vista cualitativo, como herramienta para investigación del comportamiento de pavimentos asfálticos sometidos a procesos de fisuramiento. La simulación computacional por el método de los elementos discretos del presente trabajo fue realizada con el programa comercial PFC2D v. 3.1.

1 INTRODUCCIÓN

En el Brasil, como en muchos otros países del mundo, las carreteras tienen un papel fundamental en la economía del país. La importancia de las carreteras en los intercambios económicos entre las diversas regiones justifica plenamente la búsqueda de una mejor comprensión del comportamiento mecánico de los pavimentos. Dentro las principales causas de deterioración de pavimentos asfálticos se destaca el fisuramiento, la ocurrencia de deformaciones permanentes excesivas, envejecimiento del material y la fatiga por cargas repetidas, siendo que tales causas son consecuencia de diversos factores como: tráfico, condiciones climáticas, procesos constructivos, materiales empleados y programas de manutención de las carreteras, etc.

El fisuramiento de la carpeta asfáltica es el principal y el más común defecto de las carreteras brasileñas. Las fisuras se extienden a través de la espesura del pavimento, reduciendo su capacidad estructural, aumentando significativamente su permeabilidad y favoreciendo la infiltración del agua para la fundación del pavimento. El fisuramiento de la carpeta asfáltica puede ser clasificado entre tres tipos: trincas por fatiga, trincas por reflexión debido a la propagación de trincas pre-existentes antes del recapeamiento y trincas térmicas debido a bajas temperaturas (hielo). En virtud de las condiciones climáticas de Brasil, las trincas por fatiga y reflexión son las que ocurren con mayor frecuencia.

La simulación por un modelo numérico de materiales que experimentan fisuramiento puede ser realizado de

dos maneras, directamente relacionadas con la escala de observación: (a) un abordaje de la mecánica de los medios continuos, sobre el punto de vista en macro-escala (10^0m), donde un cuerpo de prueba o prototipo son simulados sin identificación de la composición interna del material, tratándose como homogéneo o con cierto grado de heterogeneidad; (b) un abordaje de la mecánica de las partículas, en meso-escala (10^{-3}m) donde los agregados y el mastic asfáltico pueden ser identificados y representados separadamente en el modelo de cálculo.

Para el uso eficiente de una herramienta numérica es necesario identificar para que tipos de problemas su aplicaciones son más conveniente. El método de los elementos discretos se muestra bastante adecuado para lidiar con problemas de naturaleza discontinua en materiales granulares y, al mismo tiempo, con grandes niveles de deformación. Debido a esas características particulares, el método ha sido aplicado con éxito en diversas áreas, especialmente en la ingeniería geotécnica, la mecánica de suelos, la mecánica de rocas y para soluciones de problemas de pavimentación

La característica principal del método de elementos discretos es su simplicidad de formulación y la generalidad de sus aplicaciones. En este trabajo, este método, implementado en el programa computacional PFC2D (Itasca), es utilizado en la investigación de la propagación de fisuras en pavimentos asfálticos, simulando la ejecución del ensayo de tracción directa DCT (Disk-shaped Compact Tension Test) en laboratorio.

2 MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

Existe una variedad de métodos numéricos disponibles para cálculo de soluciones aproximadas de problemas de ingeniería. El método de elementos finitos y método de elementos de contorno están actualmente en una etapa de desarrollo bastante avanzado, pudiendo ser considerados métodos tradicionales para solución de problemas de valor de contorno. El método de elementos discretos (DEM) se encuentra en una etapa de desarrollo comparativamente anterior. Su formulación está aún en desarrollo manteniéndose las características básicas propuestas por Cundall y Strack (1979), con frecuentes mejoramientos presentados y publicados en periódicos y congresos del área.

En la formulación del método, implementada en el programa computacional PFC2D, problemas estáticos son resueltos a través de una aproximación de relajación dinámica y el proceso de cálculo es realizado en pequeños incrementos de tiempo. El medio es discretizado en partículas rígidas (discos en simulaciones 2D, esferas en simulaciones 3D), las cuales se mueven para posiciones de equilibrio de acuerdo con la segunda ley de Newton. Las etapas básicas de un ciclo de cálculo del método de los elementos discretos son presentadas en la figura 1.

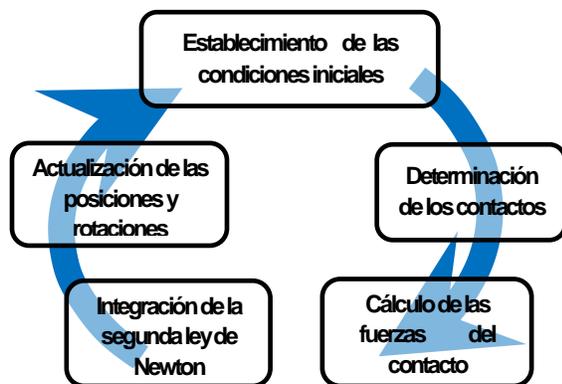


Figura 1. Etapas básicas del ciclo de cálculo del método de elementos discretos.

La naturaleza explícita de la resolución del sistema de ecuaciones optimiza el uso de la memoria computacional y evita la necesidad de procesos de cálculo iterativos, permitiendo así, la representación de interacciones no lineales entre un grande número de partículas. En la etapa de configuración del modelo, tres etapas son fundamentales:

- el tipo de arreglo de las partículas
- comportamiento en el contacto y propiedades del material
- condiciones de contorno y condiciones iniciales

El tipo de arreglo corresponde a un número de partículas posicionadas y distribuidas dentro de una región previamente establecida. Las propiedades de estas partículas y el comportamiento de sus contactos determinan el tipo de respuesta del modelo. Antes de efectuar cualquier simulaciones importante definir las condiciones iniciales y de contorno. Después de la aplicación de las cargas, el arreglo de las partículas alcanza una condición de equilibrio inicial. Cualquier

alteración de este estado (como un cambio en las condiciones de contorno) hace con que la respuesta del modelo sea recalculada. El equilibrio es alcanzada después de la ejecución de varios pasos de tiempo, automáticamente controlados por el programa PFC2D y que también pueden ser redefinidos por el usuario.

El programa PFC-2D tiene su propio lenguaje de programación llamada *FISH*, lo cual permite definir e introducir en el modelo nuevas variables, generar nuevas geometrías, relaciones constitutivas, utilización de servo-controladores, procesamiento en paralelo de modo compartido en "clúster" de computadores, dentro otras potencialidades. Para procesamiento en un computador aislado, el método de elementos discretos tiene como desventaja un tiempo de procesamiento relativamente alto, dependiendo del número de partículas y de sus contactos envueltos en la simulación. En esta investigación se trabajó desde 4 mil hasta 65 mil partículas.

Entre otras características del programa PFC2D pueden ser mencionadas las siguientes:

- las partículas son consideradas rígidas;
- el contacto entre partículas ocurre en una área muy pequeña (puntual)
- en el contacto hay una tolerancia de penetración entre partículas. La magnitud de esta tolerancia está directamente relacionada con la fuerza de contacto a través de la relación constitutiva fuerza-desplazamiento, siendo en general esta penetración muy pequeña comparada con el tamaño de las partículas;
- puede existir una ligación en el contacto entre las partículas;
- todas las partículas son consideradas como discos y otras geometrías pueden ser generadas agrupándose partículas;
- en la formulación pueden ser incluidos elementos rígidos o paredes, a los cuales pueden ser impuestos velocidades, desplazamientos o fuerzas. Estas paredes son los que delimitan los contornos del problema.

3 MODELOS CONSTITUTIVOS

El comportamiento general del material puede ser representado mediante la definición de un modelo constitutivo para los contactos entre partículas. Este modelo constitutivo en el programa PFC2D consiste, en la superposición de tres modelos básicos: el modelo de rigidez, el modelo de deslizamiento y el modelo de ligación. Además existen varios otros tipos de modelos que pueden ser utilizados, según sea el caso. Estos modelos son ilustrados en la figura 2.

3.1 Modelo de Rigidez

El modelo lineal es definido por la rigidez normal K_n y tangencial K_s , calculadas a partir de los valores de rigidez de las partículas en contacto de acuerdo con las ecuaciones [1] e [2].

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

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

El modelo de Hertz-Mindlin es de naturaleza no-lineal, definido por los parámetros G (módulo de corte) y ν (coeficiente de Poisson). La rigidez normal del contacto es dada por la expresión:

$$K^n = \frac{2\langle G \rangle \sqrt{2R}}{3\langle \nu \rangle} \sqrt{U^n} \quad [3]$$

Y la rigidez de la cortante en el contacto por

$$K^s = \frac{2(\langle G \rangle^2 3\langle \nu \rangle)^{1/3}}{2-\langle \nu \rangle} |F_i^n|^{1/3} \quad [4]$$

Donde U^n es el valor de la superposición de las partículas y $|F_i^n|$ el módulo de la fuerza normal en el contacto. Las demás variables de las ecuaciones [3] y [4] son definidas conforme las entidades en contacto. Para el contacto partícula- partícula, se tiene:

$$\bar{R} = \frac{2R^A R^B}{2R^A + R^B} \quad [5]$$

$$\langle G \rangle = \frac{1}{2} (G^A + G^B)$$

$$\langle \nu \rangle = \frac{1}{2} (\nu^A + \nu^B)$$

y en el caso del contacto partícula-pared,

$$\begin{aligned} \bar{R} &= R^{|partícula|} \\ \langle G \rangle &= G^{|partícula|} \\ \langle \nu \rangle &= \nu^{|partícula|} \end{aligned} \quad [6]$$

donde R es el radio de la partícula y los índices [A] y [B] denotan las dos partículas en contacto.

La rigidez normal tangente k_n es definida como

$$k_n = \frac{dF^n}{dU^n} = \frac{3}{2} K^n \quad [7]$$

La cual varía en función de los valores de las fuerzas normales y de superposición entre las partículas.

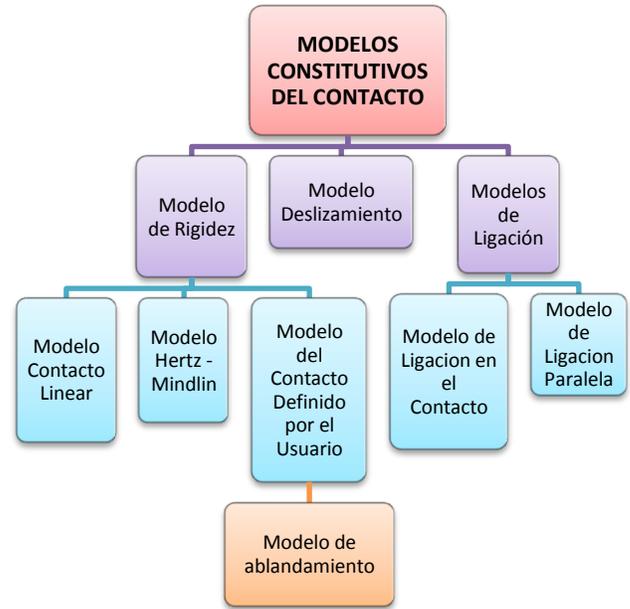


Figura2. Modelos constitutivos del contacto

3.2 Modelo de Deslizamiento

El modelo de deslizamiento es una propiedad de las entidades en contacto, pudiendo ser dar entre dos partículas o entre una partícula y la pared. Este modelo está siempre activo, excepto si hubiera algún tipo de ligación entre las entidades, cuando puede ser substituido por el modelo de ligación correspondiente. El principal parámetro del modelo de deslizamiento es el coeficiente de atrito μ . Con base en el criterio de Mohr-Coulomb es posible escribir,

$$F_{\max}^s = \mu |F_i^n| \quad [8]$$

Si $|F_i^s| > F_{\max}^s$, la fuerza cortante F_i^s es limitada por el valor de F_{\max}^s ,

$$F_i^s = F_{\max}^s \frac{F_i^s}{|F_i^s|} \quad [9]$$

3.3 Modelo de ligación

Dos partículas pueden estar ligadas mediante un tipo de contacto que puede ser definido, o imaginada, como una goma entre las partículas. En este contexto, dos tipos de contacto pueden ser utilizados en el programa PFC2D: (a) ligación de contacto (contact bond); (b) ligación paralela (parallel bond).

La ligación de contacto es un tipo de contacto puntual que solo transmite fuerzas, pudiendo ser representada por dos resortes actuando en las direcciones normal e transversal en el punto de contacto entre dos partículas. Si la fuerza normal de tracción fuera igual o superior que resistencia a la tracción del resorte en el punto del contacto, la ligación es rota en ambas direcciones (normal

e transversal) y las fuerzas de contacto convertidas iguales a cero. Se la fuerza transversal fuera mayor que la resistencia transversal del resorte en la ligación del contacto, la ligación en esta dirección es rota y el valor de la fuerza transversal es limitado por el modelo de deslizamiento.

La ligación paralela describe el comportamiento de un elemento no-puntual que une las dos partículas como un cementante. Este tipo de contacto establece una interacción elástica entre las partículas, pudiendo transmitir fuerzas y momentos. El contacto paralelo es representado como un disco con radio definido en función del menor de los radios de las partículas en contacto.

4 MODELO DE LIGACIÓN PARA LA SIMULACIÓN DE LAS FISURAS

Para la simulación de la propagación de fisuras es necesario adoptar un modelo de rigidez específico para describir el comportamiento de la región del material próxima a la punta de la trinca. Barenblatt (1962) y Dugdale (1960) propusieron el modelo de la zona cohesiva para representación del comportamiento de materiales frágiles y dúctiles (figura 3), respectivamente, incluyendo fuerzas de cohesión en la región del fisuramiento. Barenblatt asumió que tales fuerzas decrecen suavemente (figura 4) entretanto que, en el modelo de Dugdale estas fuerzas se mantiene constantes, representando el comportamiento del material elasto-perfectamente plástico.

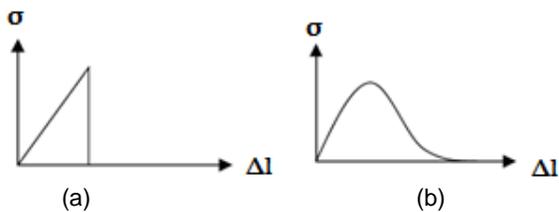


Figura 3. Comportamiento del material en ensayo de deformación controlada: (a) material frágil (b) material dúctil (Soares, 1997).

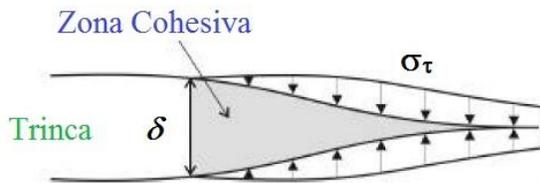
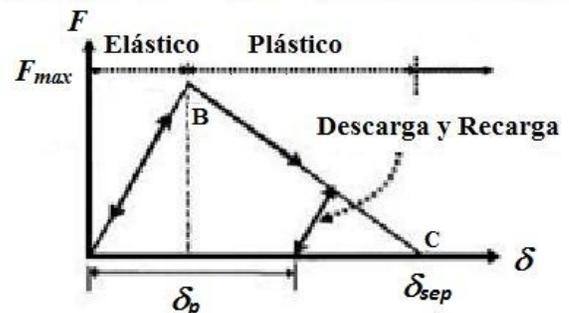
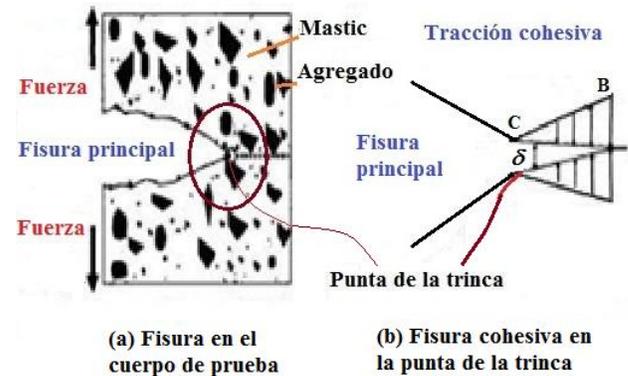


Figura4. Modelo de zona cohesiva (Barenblatt, 1962).

Actualmente modelos de la zona cohesiva (MCZ) han sido usados para simular procesos de fractura en varios materiales como polímeros, materiales metálicos, materiales cerámicos, rochas, compuestos de matriz metálica, concreto, materiales reforzados con fibras de plástico, considerándose una variedad de condiciones de

carga (estática, dinámica, cíclica, etc.). Varias versiones más recientes fueron propuestos por diversos autores en la literatura, con la principal diferencia entre ellas es la forma de la respuesta tracción versus desplazamiento y en las constantes que caracterizan el modelo. Los Modelos bilineales de zona cohesiva pueden ser descritos por dos parámetros independientes, como la energía cohesiva, la resistencia cohesiva F_{max} o la distancia de separación de las superficies de la trinca δ_{sep} . En general, la energía cohesiva es obtenida a partir de ensayos de laboratorio, siendo considerada equivalente a la energía de fractura G_f . En la figura 5 es ilustrado esquemáticamente el modelo de la zona cohesiva con ablandamiento.



(c) Modelo bilineal Cohesivo

Figure 5. Esquema del modelo bilineal de la zona cohesiva con ablandamiento (Kim et al., 2007).

Si el contacto está sobre tracción, la fuerza resistente en el contacto F_{max} es calculada a partir de los parámetros de resistencia (resistencia a la tracción y resistencia a la cortante) como una función de la orientación actual de la fuerza de contacto. Es asumido que la resistencia en el contacto varía linealmente con el ángulo α formado entre las direcciones de la fuerza de contacto y el segmento de la recta, conectando los centros de las partículas en contacto.

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

La fluencia plástica en el contacto que está a tracción, es determinada comparándose la fuerza de contacto F resultante con la fuerza resistente F_{max} disponible.

$$F = \sqrt{\left(\left(\epsilon^n \right)^2 + \left(\epsilon^s \right)^2 \right)} \quad [11]$$

El contacto presenta fluencia plástica si

$$F > F_{\max} \quad [12]$$

En el caso de fluencia plástica en los contactos, el incremento de desplazamiento en el contacto ΔU^k ($k=n,s$) puede ser descompuesto en incrementos de desplazamiento elástico y plástico,

$$\Delta U^K = \Delta U_e^k + \Delta U_p^k \quad [13]$$

El incremento de la fuerza ΔF es una función de incremento del desplazamiento elástica solamente

$$\Delta F^K = K^K \Delta U_e^k \quad [14]$$

donde

$$\Delta U_e^K = \Delta U^k - \Delta U_p^k \quad [15]$$

El incremento de desplazamiento plástico puede ser determinado usando la condición de consistencia $F - F_{\max} = 0$. El incremento de desplazamiento plástico satisface a ley de flujo y es considerado que, si la fuerza normal fuera de tracción, la dirección del incremento de desplazamiento plástico es siempre coincidente con la dirección de la fuerza del contacto resultante.

$$\Delta U_p^k = \Delta \lambda \frac{F^K}{F} \quad [16]$$

donde $\Delta \lambda$ es un escalar positivo.

Sila fuerza normal de contacto fuera compresión, la fuerza máxima del cortante en el contacto es definida por

$$F_{\max}^s = \mu \left| F^n \right| + F_c^s \quad [17]$$

Si el deslizamiento ocurrir, el desplazamiento plástico es asumido coincidente con la dirección de la fuerza cortante en el contacto.

El modelo de la zona cohesiva incorpora fluencia (figura 5), siendo las resistencias en los contactos expresadas en función de los desplazamientos plásticos acumulados,

$$F_c^k \left(\epsilon_p / U_{p \max} \right) \approx F_c^k \left(1 - \frac{U_p}{U_{p \max}} \right) \quad [18]$$

$$U_p = \sum \left| \Delta U_p \right| \quad [19]$$

5 SIMULACIÓN Y PROPAGACIÓN DE FISURAS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

En esta sección es presentada la simulación numérica de la propagación de fisuras en mezclas asfálticas a través de la simulación del ensayo de tracción directa en disco

circular con hendidura DCT (Disk-shaped Compact Tension Test). En la simulación, el material es considerado homogéneo, sujeto al modo de falla por abertura de Modo I.

Para determinación del valor de la energía de fractura (G_f) en mezclas asfálticas es posible emplear el ensayo de fatiga en cuerpos de prueba con forma de vigas, pero la grande cantidad de material necesaria para la confección de los mismos limita su utilización práctica. Asimismo, cuerpos de prueba de forma cilíndrica son más fáciles de ser obtenidos de carreteras y preparados en laboratorio.

El ensayo modelado fue ejecutado experimentalmente en el laboratorio de la universidad Coppe/UFRJ, de acuerdo con la norma D7313 (Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt - Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry) de la ASTM (2007).

La energía de fractura G_f puede ser calculada como el área debajo de la curva experimental fuerza versus abertura de la boca de trinca CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) en el ensayo de tracción directa. Numéricamente el área es fácilmente obtenida a través de un método de cuadratura basado en la regla de Simpson o de los trapecios.

5.1 Descripción del cuerpo de prueba (CP)

El CP tiene formato de un disco con diámetro $D=150$ mm, espesor $t = 50$ mm, con dos furos interiores (figura 6) de diámetro $\Phi=25$ mm. La longitud de la pre-trinca es $(a+c) = 62.5$ mm y del ligamento $(W - a) = 82.5$ mm. Las demás dimensiones están indicadas en la tabla 1

Tabla 1 - Dimensiones (mm) recomendadas por la ASTM D7313/07.

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

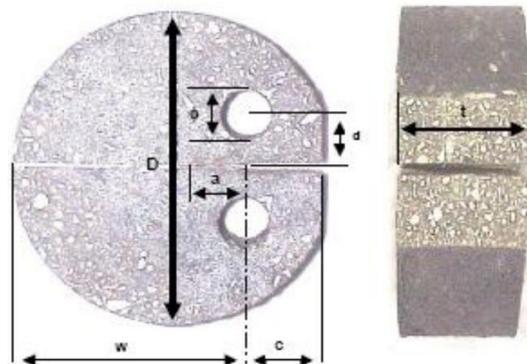


Figura 6. Nomenclatura y dimensiones del cuerpo de prueba (Wagoner et al., 2005).

5.2 Generación de las partículas

La generación de las partículas para la representación de la geometría del cuerpo de prueba fue realizada con dos tipos de arreglo, hexagonal y cuadrada como mostrado en la figura 7, y con tres tipos de tamaño de partícula (tabla 2), con radios de 0.25 mm, 0.50 mm y 1.00 mm, siguiendo recomendaciones de Kim & Buttlar (2005). Los modelos constitutivos adoptados fueron el modelo de rigidez lineal y el modelo de ligación paralela (para la simulación del mastic asfáltico entre las partículas) en todo el cuerpo de prueba, excepto en la parte central (ocurrirá la propagación de la trunca en el modo de fractura I) donde fue considerado el modelo de zona cohesiva con ablandamiento (figura 8). La densidad de las partículas es 2400 kg/m³

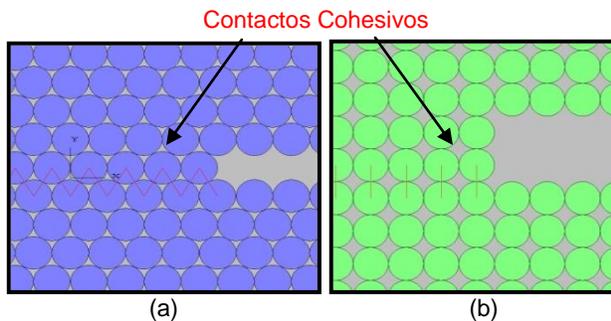


Figura 7. Contactos cohesivos en la vecindad de la punta de la trunca y tipos de arreglo de las partículas: (a) hexagonal (b) cuadrado.

Tabla 2 - Propiedades y arreglo de las partículas en las simulaciones computacionales.

Arreglo de las Partículas	Diámetro Partículas (mm)	Numero de Partículas	Numero de Contactos	Numero de Contactos Cohesivos
Cuadrado	0.25	65.762	130.609	165
Cuadrado	0.50	16.414	32.374	65
Cuadrado	1.00	4.041	7.050	35
Hexagonal	0.25	75.966	226.263	329
Hexagonal	0.50	18.914	55.925	154
Hexagonal	1.00	4.717	13.739	82

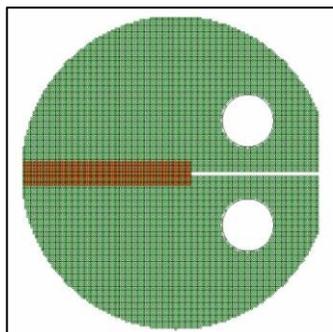


Figura 8. Contactos con modelo cohesivo de ablandamiento en la vecindad de la punta de la trunca.

5.3 Aplicación de las cargas

Cada furo circular del cuerpo de prueba donde son aplicadas las fuerzas de tracción P en el ensayo de laboratorio fue modelado como una circunferencia formada por 60 segmentos rectilíneos de pared con 0,0013mm de longitud (figura 9b).

Para la simulación de carga aplicada, las paredes de los furos fueron verticalmente desplazados, en sentidos opuestos, con una velocidad constante, provocando una reorganización del conjunto de las partículas con generación de campos de tensión (figura 9a) que, en la región de propagación de la fractura, son de tracción y provocan la activación del mecanismo cohesivo de simulación de propagación de la trunca pre-existente. Los desplazamientos en la abertura de la boca de la trunca (CMOD – Crack Mouth Opening Displacement) son continuamente registrados por el programa para la obtención de la curva fuerza vs. CMOD.

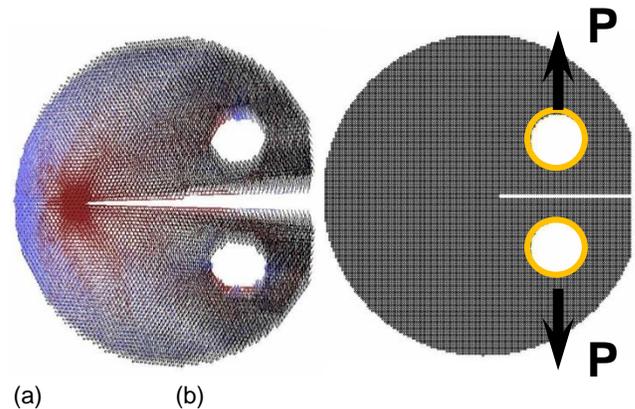


Figure 9. (a) Abertura de la boca de la trunca y vectores de desplazamiento obtenidos con una razón de velocidad constante de separación de los furos donde se aplican las cargas P; (b) Furos representados por segmentos de pared.

5.4 Propagación de la trunca

En las primeras simulaciones, observase que las fisuras se iniciaron junto a los furos donde los desplazamientos prescritos fueron aplicados (figura 10a), concluyéndose que las propiedades mecánicas (en meso-escala) que conforman el cuerpo de prueba corresponden a un material frágil. Una situación similar fue registrada en la investigación experimental de Wagoner et al. (2005), conforme ilustraciones de la figura 10b.

La propagación de la trunca en modo de **abertura I** fue aproximadamente horizontal, como se esperaba y como se muestra en la Figura 11, para las diferentes

simulaciones del ensayo DCT realizado con el software PFC2D.

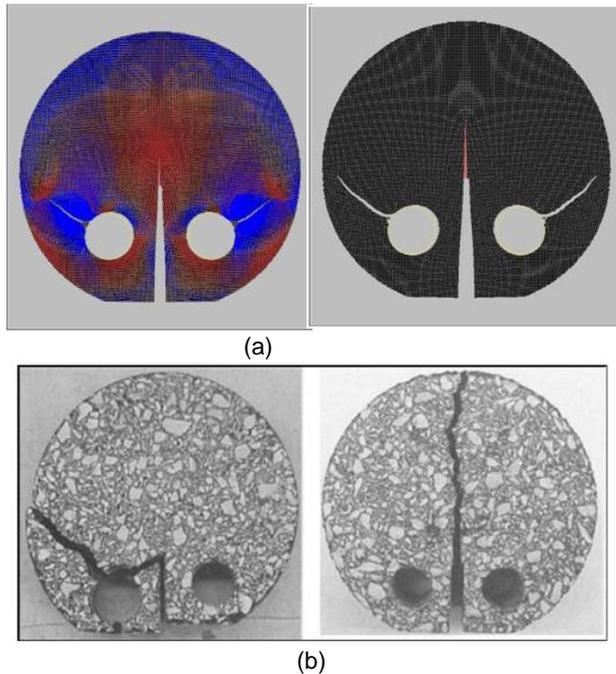


Figura 10. (a) Fisuras en la cercanía de la región de los furos en el modelamiento computacional; (b) Fisuras en la región de los furos en los primeros ensayos experimentales ejecutados por Wagoner (2005).

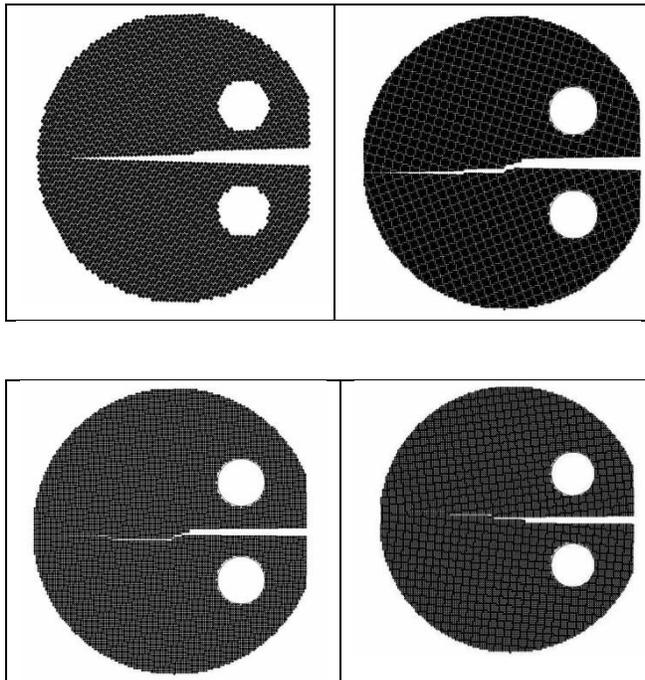


Figura 11. Trayectorias cuasi horizontales seguidas por la fisura en **modo de abertura I** en el modelamiento del cuerpo de prueba del ensayo DCT.

Desde el punto de vista cualitativo los resultados obtenidos no modelamiento por el método de elementos discretos puedan ser considerados satisfactorios ya que a curva numérica presenta a misma tendencia de comportamiento de la curva experimental. Entretanto desde el punto de vista cuantitativo los valores picos de la curva de tracción aplicada vs la abertura de la boca de la trinca (CMOD), difieren como mostrado en la Figura 12. Este cuerpo de prueba experimental es constituido por partículas con tamaño nominal máximo de 19,1mm, asfalto tipo PG 70-16 y temperatura de la muestra en 25°C.

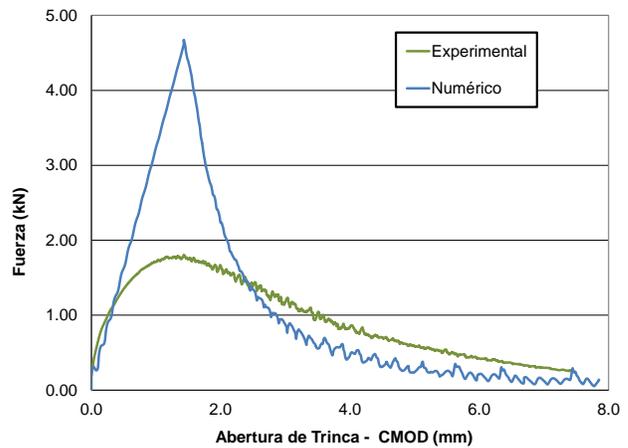


Figura 12 - Curvas fuerza de tracción versus abertura de boca de la trinca (CMOD) obtenidas experimental e numéricamente.

6 CONCLUSIONES

La presente investigación utilizó el método de elementos discretos, a través del programa computacional PFC2D, para la realización de una investigación de la propagación del fisuramiento en mezcla asfáltica a través de un abordaje micro-mecánico. Específicamente, procurase reproducir los resultados de ensayos de tracción DCT realizados en la Coppe/ UFRJ (Hirsch, 2009). La zona de propagación de la fractura fue modelada con base en el modelo constitutivo de la zona cohesiva con ablandamiento y el material fue considerado estadísticamente homogéneo.

A partir de los resultados del modelamiento numérico se puede concluir que:

- El método de los elementos discretos es una herramienta numérica eficiente para simular los procesos de propagación de trincas en mezclas asfálticas. Entretanto, aun se presentan como desventaja los grandes tiempos de procesamiento exigidos y, en el caso específico del programa computacional PFC2D, un difícil aprendizaje de su utilización envolviendo un grande

número de comandos, variables y opciones, mayores del que en los usuales programas de elementos finitos que los ingenieros están familiarizados.

- Cualitativamente la propagación de la fisura se produjo casi horizontal, como se prevé en el modo de abertura I, con pequeñas variaciones dependiendo de la de la disposición de las partículas en el modelo de elementos discretos.

- La relación fuerza de tracción versus abertura de la boca de la trinca (CMOD) obtenida numéricamente, aunque no concuerde plenamente con los resultados experimentales, exhibe cualitativamente de modo satisfactorio la tendencia del comportamiento del material asfáltico ensayado en laboratorio.

- El ensayo de tracción DCT representa una técnica con grande potencial de aplicación no solamente en el área de pavimentación más en otros campos de la ingeniería donde problemas de la mecánica de la fractura son importantes.

7. REFERENCIAS

- Barenblatt, G.I. 1962. Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics*, 36(1): 55 - 129.
- Cundall, P.A. and Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29: 47 - 65.
- Dugdale, D.1960. Yielding of steel sheets containing slits, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*v.8: 100-104
- Hirsch, F., 2009. Avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas através de ensaio de tração em disco circular com fenda, *Dissertação de Mestrado*, COPPE/UFRJ (in Portuguese).
- Kim, H. and Buttlar, W. 2005. Micromechanical fracture modeling of hot-mix asphalt concrete based on a disk-shaped compact tension test, *Proceedings GeoFrontiers*, ASCE.
- Kim, H.; Wagoner, M.P. and Buttlar, W.G. 2007. 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*.
- PFC2D. 2005. - ParticleFlowCode 2D, v.3.1, Itasca International Inc.
- Soares, J.B. 1997 .Concrete characterization through fracture mechanics and selected pavement applications. *Ph.D. Dissertation*, Texas A&M University, College Station, TX.
- Wagoner, M.P., Buttlar, W.G. e Paulino, G.H. 2005, Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture, *Society for Experimental Mechanics*, vol. 45, no. 3, pp. 270-277