

4

Modelagem Numérica da Propagação de Trincas no Ensaio DC(T)

4.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada a simulação numérica da propagação de trinca em mistura asfáltica em ensaios de tração direta em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact Test*) através da modelagem pelo método dos elementos discretos, incorporando o modelo de zona coesiva com amolecimento, com auxílio do programa computacional PFC2D. Os corpos de prova são considerados homogêneos, sujeitos ao modo de faturamento I.

Para determinação do parâmetro energia de fraturamento (G_f) em misturas asfálticas é possível empregar o ensaio de fadiga em corpos de prova construídos em forma de vigotas, porém a grande quantidade de material necessária para confecção dos mesmos limita sua utilização prática. Corpos de prova de forma cilíndrica, por outro lado, são mais fáceis de serem moldados em laboratório ou extraídos de rodovias diretamente de campo.

Sob ponto de vista numérico, onde a modelagem dos corpos de prova é feita em mesoescala, também é interessante que o corpo de prova seja de pouco volume, tendo em vista o tempo de processamento exigido para simular iterações envolvendo dezenas de milhares de partículas.

4.2. Ensaio DC(T) ou de Tração em Disco Circular com Fenda

O ensaio **DC(T)**, de cujos resultados pode-se obter os parâmetros mecânicos de misturas asfálticas, foi primeiramente empregado por Wagoner (2006) nos Estados Unidos. Uma característica importante deste ensaio é que forças de tração são aplicadas diretamente, diferentemente do ensaio de compressão diametral (ensaio brasileiro) onde tensões de tração no corpo de prova são geradas de maneira indireta.

A utilização do ensaio **DC(T)** no Brasil foi introduzida por Hirsch (2009) mediante execução de ensaios em laboratórios da Coppe/UFRJ, como relatado mais adiante neste trabalho.

4.2.1. Geometria dos Corpos de Prova

O disco dos corpos de prova tem as seguintes características: diâmetro $D=150$ mm, espessura $t = 50$ mm, com dois furos interiores (figura 4.1) de diâmetro $\Phi=25$ mm. Comprimento de pré-trinca ($a+c$) = 62.5mm e de ligamento ($W - a$) = 82.5mm. Demais dimensões são listadas na tabela 4.1., com a nomenclatura adotada apresentada na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Dimensões em (mm) recomendadas pela ASTM D7313/07

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

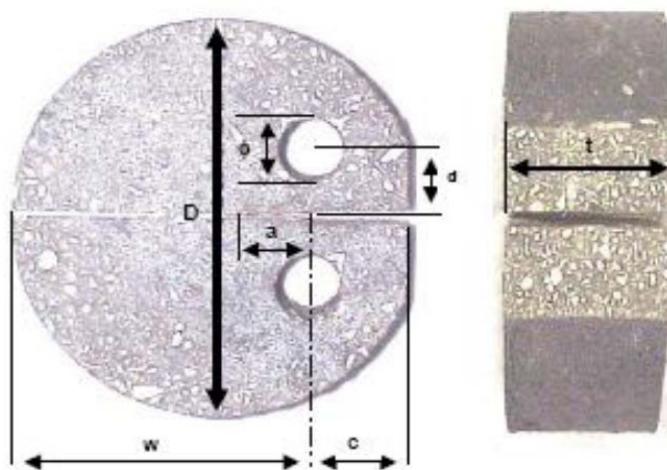


Figura 4.1 – Nomenclatura e dimensões dos corpos de prova (Wagoner, 2006)

4.2.2.

Preparação dos Corpos de Prova e Execução do Ensaio DC(T)

Os ensaios DC(T) foram executados por Hirsch (2009) 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).

Hirsch (2009) realizou ensaios obedecendo aos seguintes procedimentos:

1. Moldagem ou extração de corpos de prova de acordo com o teor de ligante de projeto, com número mínimo de 2 corpos de prova por mistura, com diâmetro de 150 mm e altura de 140 mm, utilizando um compactador giratório apresentado na Figura 4.2



Figura 4.2 - Compactador giratório utilizado na moldagem dos corpos de prova no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ (Hirsch,2009).

2. Concluída a moldagem, foi realizada a divisão de cada corpo de prova procedendo-se ao corte, conforme Figura 4.3. Cada corpo de prova tem altura de 50 ± 5 mm.

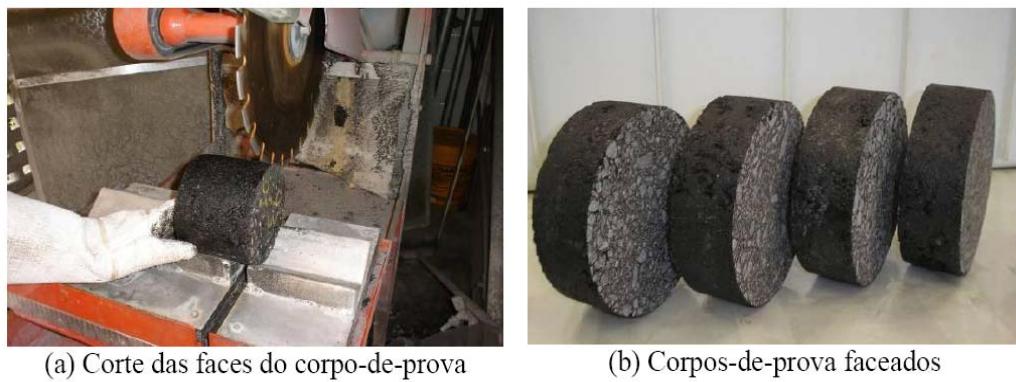


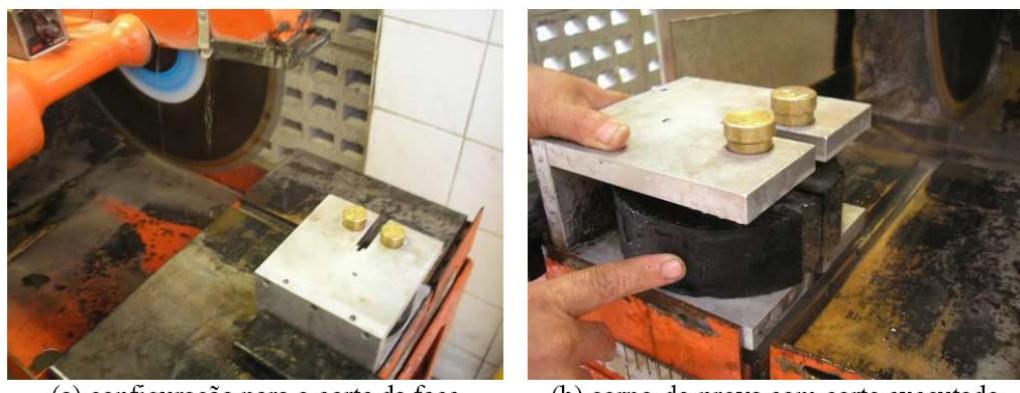
Figura 4.3 – Corte e faceamento dos corpos de prova (Hirsch,2009).

3. Execução dos furos de carregamento, a $90\pm 5^\circ$ em relação à face do corpo de prova, devendo suas posições não diferir em mais do que 5,0 mm das posições especificadas, conforme Figura 4.4



Figura 4.4 - Etapas de preparação dos furos de carregamento nos corpos de prova no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ – (Hirsch,2009).

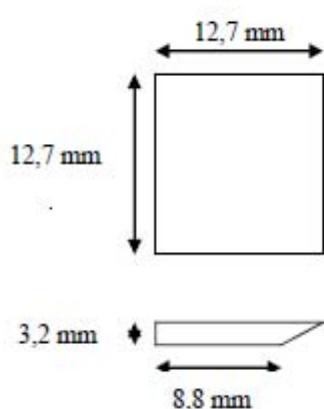
4. Fixação do corpo de prova no gabarito e execução de chanfros e da fenda (trinca inicial), empregando-se uma serra, de acordo com Figura 4.5.



(a) configuração para o corte da face (b) corpo-de-prova com corte executado

Figura 4.5 – Execução dos chanfros nos corpos de prova (Hirsch,2009).

5. Preparação da face chanfrada do corpo de prova para acoplamento ao clip-on-gage, com fixação de duas pequenas placas de alumínio na face do corpo de prova (Figura 4.6).



(a) Dimensões da placa



(b) Detalhe da placas coladas na amostra

Figura 4.6 – Fixação de duas placas de alumínio na amostra para conexão ao clip-on-gage

6. Condicionamento dos corpos de prova na temperatura desejada, durante um período mínimo de 16 horas.
7. Montagem do conjunto de garras na prensa de carregamento, fixando o corpo de prova às mesmas, conforme Figura 4.7.
8. Acoplamento do clip-on-gage nas placas de alumínio fixadas no corpo de prova.

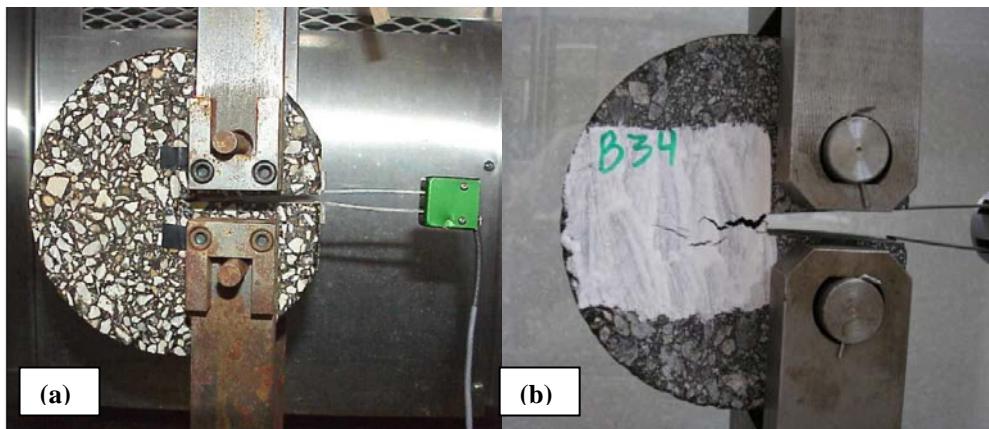


Figura 4.7 - -Corpo de prova na prensa de carregamento (Hirsch,2009)

9. Ajuste da prensa de carregamento, com aplicação de carga mínima de 0,20 kN.
10. Realização do ensaio de tração com o controle de velocidade da abertura da trinca através do clip-on-gage de 1,0 mm/min ou $1,7 \times 10^{-5}$ m/s (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Equipamento utilizado na realização do ensaio no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ (Hirsch, 2009).

11. O ensaio termina quando a carga atingir o valor mínimo de 0,1 kN;
12. Determinação da energia de faturamento pela equação 4.3.

Os ensaios de laboratório executados por Hirsch (2009) foram feitos com tamanhos máximos de agregado de 19,1mm e 12.7mm (correspondentes às faixas B e C do DNIT) da especificação SUPERPAVE, com ligantes convencionais de PG 70-16 e PG 64-16 e ligantes modificados de Flex 65/90 (PG 70-22) e asfalto-borracha (PG 64-22).

4.3.

Parâmetros Mecânicos do Ensaio DC(T)

Foram obtidos dos corpos de prova os seguintes parâmetros: resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de Young (ME) e Energia de Fratura (G_f). Cabe salientar que os parâmetros ME, RT e G_f do ensaio no laboratório foram necessários para o modelagem numérico do DC(T) tendo em vista a utilização do modelo de zona coesiva com amolecimento.

4.3.1.

Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que representa uma medida de proporcionalidade entre valores de tensões e de deformações em corpos elásticos lineares. O termo módulo de elasticidade tem sido usado de forma pouco rigorosa na área de pavimentação, pois misturas asfálticas não apresentam um comportamento elástico linear. O módulo de resiliência MR é análogo ao módulo de elasticidade ME (relação entre tensão σ e deformação ϵ), porém é determinado em ensaios de cargas repetidas sob compressão diametral.

O ensaio para obtenção de MR consiste na aplicação de pulsos de carga com duração de 0,1s e repousos de 0,9s, com a deformação sendo monitorada ao longo do ensaio. Os procedimentos para realização do ensaio estão descritos na ASTM (1982) e DNER (1994).

Para a análise de materiais isotrópicos é necessária apenas a determinação das propriedades do material em uma única direção (solicitação uniaxial), já que as propriedades, pela próprio conceito de isotropia, independem da direção (Allen et al, 1985). Ainda que o ensaio de compressão diametral gera um estado biaxial de tensões, adotou-se o ME (módulo de elasticidade) obtido em estado uniaxial de tensões no presente desenvolvimento.

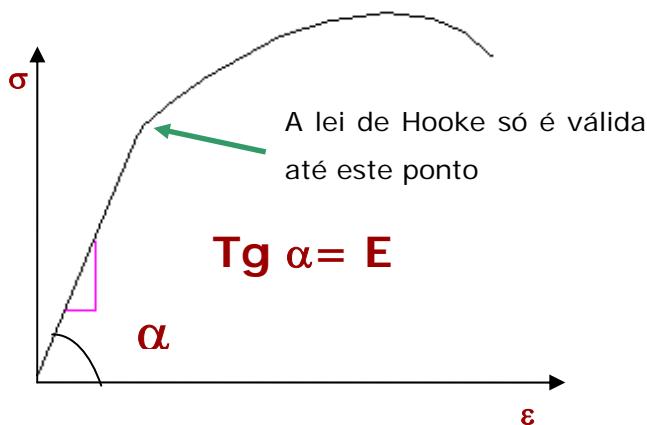


Figura 4.9 – Módulo de Elasticidade E

Lei de Hooke $\sigma = E\varepsilon$ (4.1)

4.3.2.

Resistência à Tração Estática (Ensaio Brasileiro)

O ensaio de compressão diametral (ou tração indireta) consiste na aplicação de duas forças de compressão, concentradas e diametralmente opostas em uma amostra cilíndrica, que geram ao longo do diâmetro tensões de tração uniformes e perpendiculares ao diâmetro, como apresentado na Figura 4.9. Este ensaio foi concebido em 1943 por Fernando Luiz Lobo Carneiro, quando da abertura da Avenida Presidente Vargas, na cidade do Rio de Janeiro, onde existia a igreja de São Pedro, situada bem ao centro da futura avenida. Como solução imaginada à época, pensou-se em deslocá-la por meio de rolos de concreto. Desta experiência o engenheiro Lobo Carneiro notou que os mesmos rompiam formando uma fissura vertical. Estudando este tipo de comportamento, propôs então um novo método para determinação da resistência à tração dos concretos.

Pinto (1991) relata que este ensaio de tração por compressão diametral, conhecido internacionalmente como ensaio brasileiro, originalmente proposto para determinação da resistência à tração de concretos, passou também a ser empregado de maneira similar em misturas asfálticas.



Figura 4.10 - Equipamento para ensaio de resistência à tração estática (Bastos, 2010).

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (4.2)$$

onde

σ_R = Resistência à tração estática;

F = Carga de ruptura (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm);

H = Espessura do corpo de prova (mm);

4.3.3. Energia de Fraturamento

A energia de fraturamento pode ser calculada através da área abaixo da curva experimental força versus abertura de trinca (CMOD), conforme observado na Figura 4.11, obtida no ensaio de tração direta (Disk-Shaped Compact Test), juntamente com a espessura do corpo de prova e o comprimento disponível para o início e propagação da trinca.

Na modelagem com o programa PFC2D é possível plotar a correspondente curva prevista força vs deslocamento, com cálculo posterior desta área, através de quadratura numérica pelo método dos trapézios com auxílio do aplicativo Excel, utilizando a equação (4.4) apresentada a seguir.

$$AREA = \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i) * (y_i) + 0.5 * (x_{i+1} - x_i) * (y_{i+1} - y_i) \quad (4.3)$$

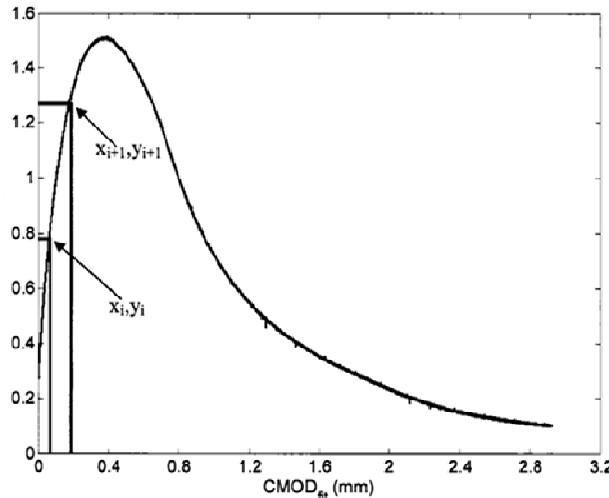


Figura 4.11 - Curva força vs abertura da boca da trinca (CMOD) (Wagoner, 2004).

A energia de fatura é dada pela seguinte equação

$$G_f = \frac{AREA}{B * (W - a)} \quad (4.4)$$

onde:

G_f = Energia de fratura (J/m²);

AREA = Área abaixo da curva força versus abertura de trinca;

B = Espessura do corpo de prova (m);

W-a = Comprimento do ligamento inicial (m)

4.4. Simulação Numérica do Ensaio DC(T)

A simulação do ensaio de tração em disco circular com fenda (DCF) foi feita com auxílio do programa computacional PFC2D v.3.1, considerando-se as dimensões da geometria do corpo de prova apresentadas na tabela 4.1. O material do corpo de prova foi admitido homogêneo, sob ponto de vista estatístico, isotrópico, sob modo de fraturamento I, considerando o modelo coesivo com amolecimento na trajetória de propagação da trinca. A formulação do modelo bilinear já está disponível dentre as possibilidades de modelos constitutivos de contato disponíveis no programa PFC2D.

Nos furos do corpo de prova são monitoradas as leituras das forças e deslocamentos correspondentes, através de rotinas designadas no programa PFC2D como *Histórias*, programadas em linguagem FISH, ilustradas na Figura 4.12. Tais *Histórias*, importadas para programas EXCEL, permitem o cálculo das áreas necessárias para determinação da energia de fratura, conforme mencionado no ítem anterior.

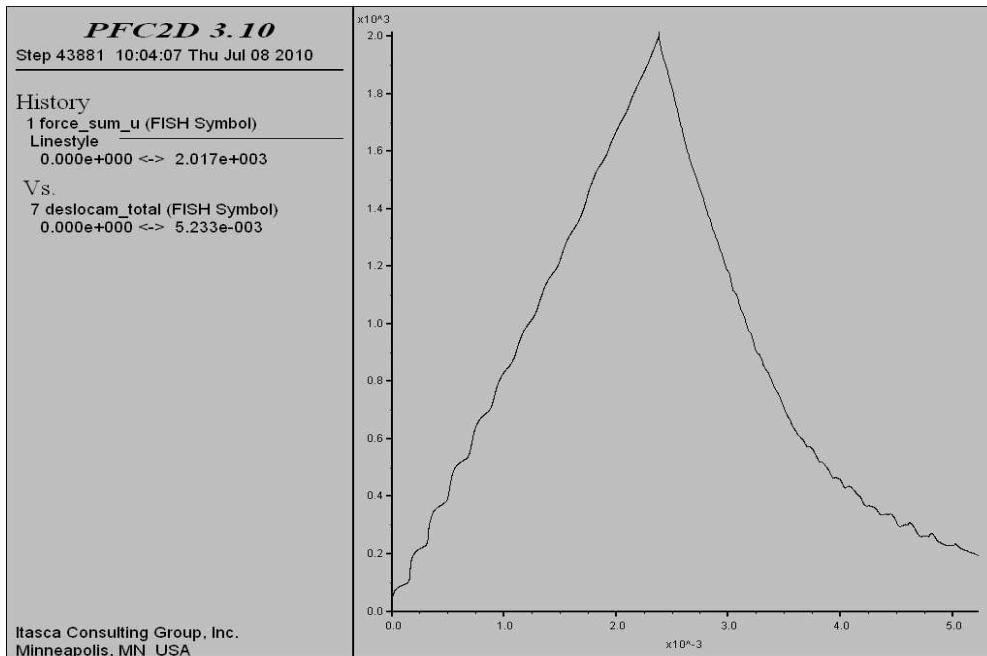


Figura 4.12 – Curva força vs abertura da trinca (CMOD) obtida nas Histórias do programa PFC-2D.

4.4.1. Geração e Arranjo de 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, com raios constantes de 0.25 mm, 0.50 mm e 1.00 mm, seguindo recomendações de Kim (2006).

Os modelos constitutivos entre partículas obedecem ao *Modelo Linear* em todo o corpo de prova, exceto na parte central onde foi adotado o modelo de zona coesiva com amolecimento.

Na tabela 4.2 é apresentado um resumo das propriedades das partículas utilizadas para cada arranjo, assim como o número de contatos entre elas. A figura 4.13 também informa o número de partículas para cada raio adotado nos dois

diferentes tipos de arranjos pesquisados. Para formar uma mesma geometria é preciso mais partículas no tipo de arranjo hexagonal do que no arranjo quadrado. Na geração do disco da Figura 4.14 foram necessárias 75.966 partículas de 0.25 mm de raio para o arranjo hexagonal e 65.762 partículas para o arranjo quadrado.

Tabela 4.2 - Propriedades e arranjo das partículas nas simulações computacionais.

Arranjo da Partícula	Diâmetro da Partícula (mm)	Massa Específica Kg/m³	Coeficiente de Poisson ν	Coeficiente de atrito	Número de Partículas	Número de Contatos	Número 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

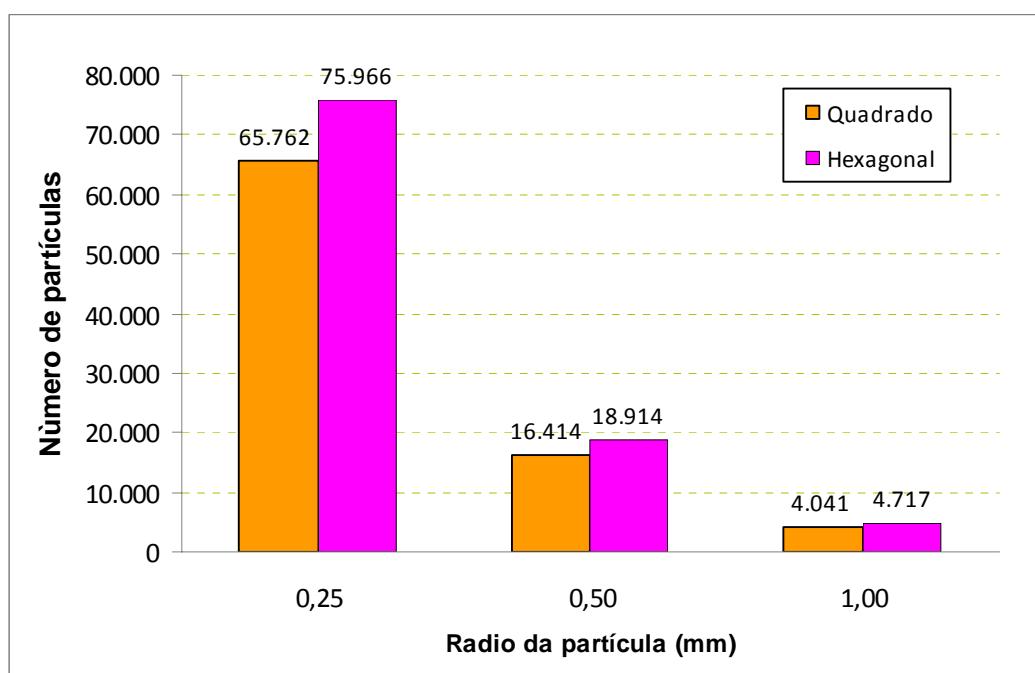


Figura 4.13 - Número de partículas necessárias para gerar a geometria do DC(T) considerando arranjos hexagonal e quadrado para três valores de diâmetros de partícula (0,25; 0,50 e 1,00 mm).

Na Figura 4.14 são apresentados, em escala majorada, os tipos de arranjos, hexagonal e quadrado, nas vizinhanças da ponta da trinca. É possível notar a ligação entre as partículas cujos contatos satisfazem ao modelo de zona coesiva com amolecimento. Contatos coesivos, bem como o modelo de ligação paralela (*parallel bond*) entre partículas, podem também ser observados na figura 4.15.

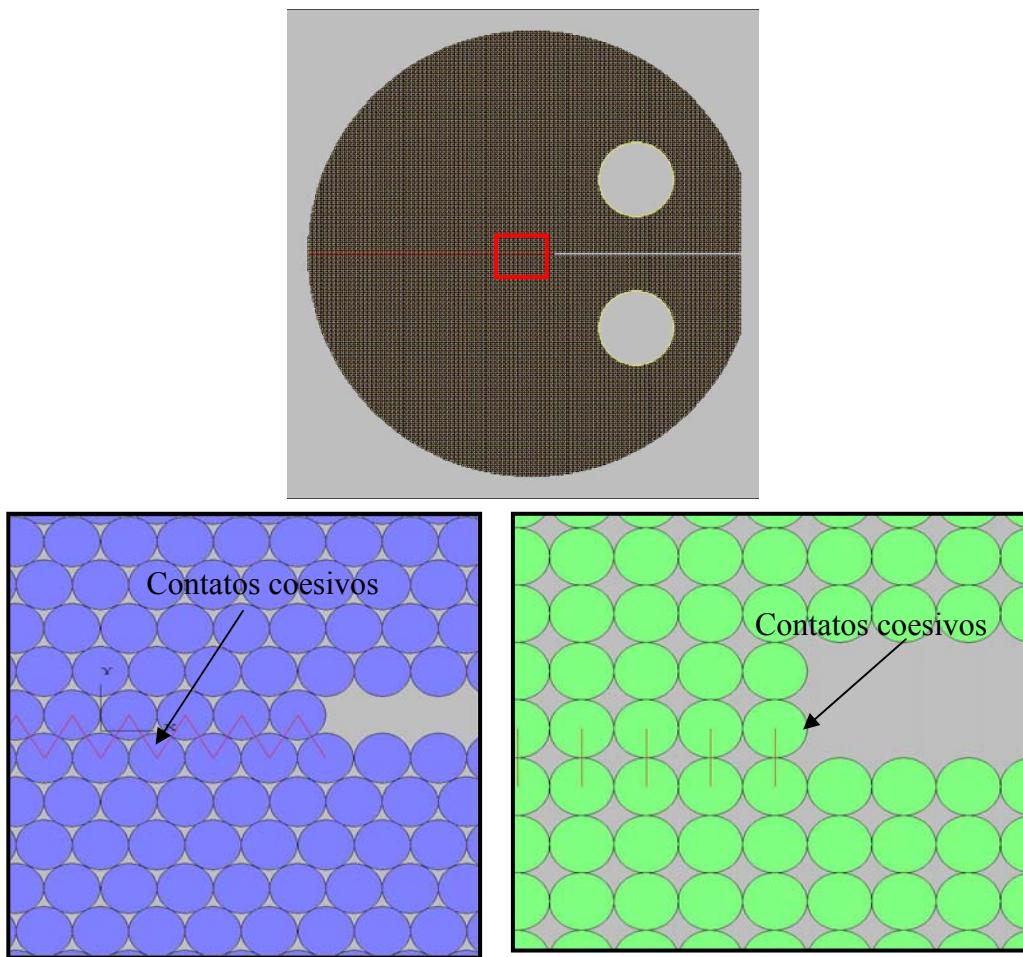


Figura 4.14 - Contatos coesivos e tipos de arranjo de partículas: (a) hexagonal (b) quadrado.

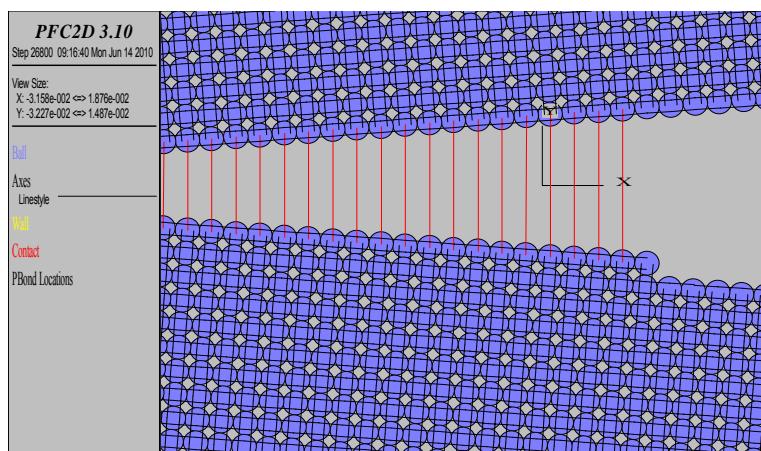


Figura 4.15 – Contato coesivo e ligação paralela entre contatos

4.4.2. Condições de Contorno

Foi restringida a deformação dos furos do disco com fenda (DC(T)), mediante funções de restrição escritas na linguagem de programação FISH do programa PFC2D. Cada furo circular foi modelado como uma circunferência composta por 60 segmentos de paredes retas de 0,0013 mm de comprimento, como ilustra a Figura 4.16.

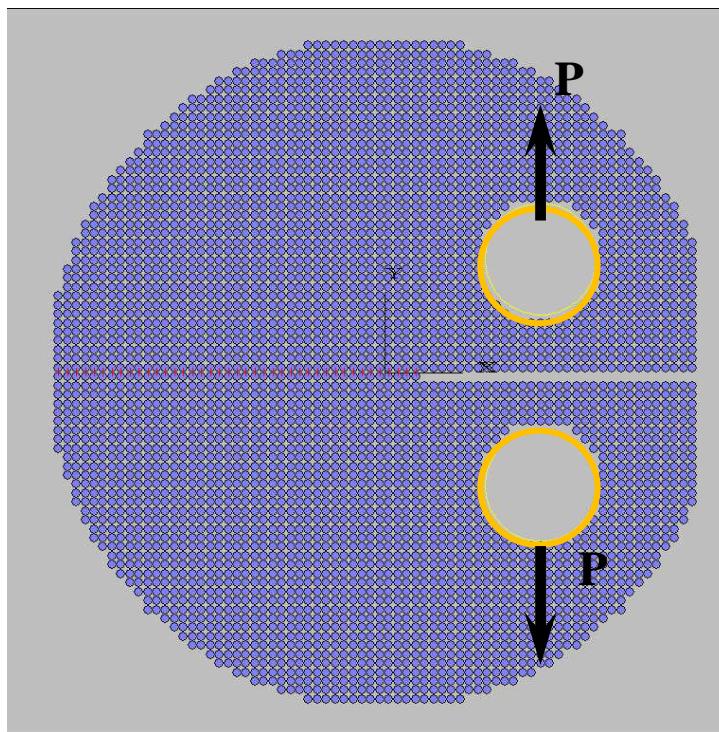


Figura 4.16 - Furos representados por segmentos de parede reta no DC(T)

4.4.3. Condições Iniciais e Aplicação dos Deslocamentos

Para simulação do carregamento, as paredes de ambos os furos circulares foram verticalmente deslocadas, em sentidos opostos, sob velocidade constante (Figura 4.16), provocando uma reorganização do conjunto das partículas com geração de campos de tensão que, na região de propagação da fratura, são de tração e provocam o início do mecanismo coesivo de simulação de trincamento. Os deslocamentos na abertura da boca da trinca (CMOD) são continuamente registrados pelo programa para obtenção da curva força vs. abertura da trinca CMOD, conforme Figura 4.17.

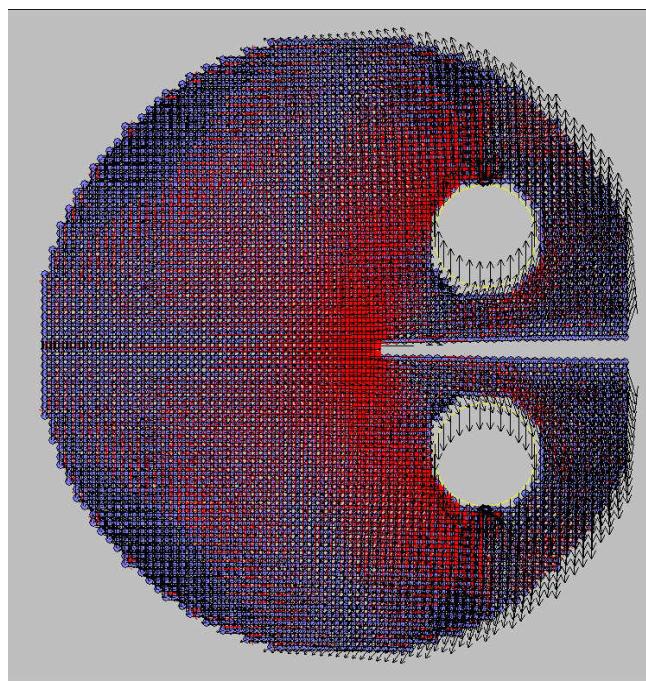


Figura 4.17 - Abertura da boca da trinca e vetores de deslocamentos sob taxa de velocidade constante de afastamento dos furos de carregamento do DC(T)

4.5. Propagação da Trinca na Modelagem do Ensaio DC(T)

Nas primeiras simulações, observou-se fraturamento junto aos próprios furos onde o carregamento (sob forma de deslocamentos prescritos) foi aplicado (Figura 4.18). Após várias tentativas, concluiu-se que as propriedades mecânicas adotadas (em mesoescala) modelavam um corpo de prova constituído por material frágil.

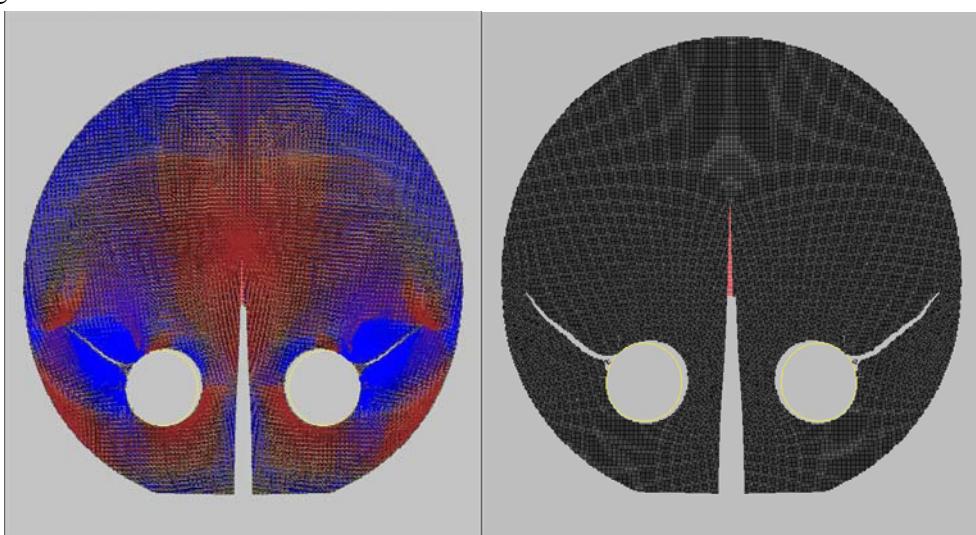


Figura 4.18 - Trincas na região dos furos na modelagem computacional obtidas na presente pesquisa.

Uma situação similar foi registrada na pesquisa experimental de Wagoner (2005), conforme ilustrações da figura 4.19. Também segundo Hirsch (2009) este tipo de trincamento pode ocorrer devido a uma rigidez insuficiente na região próxima aos furos.

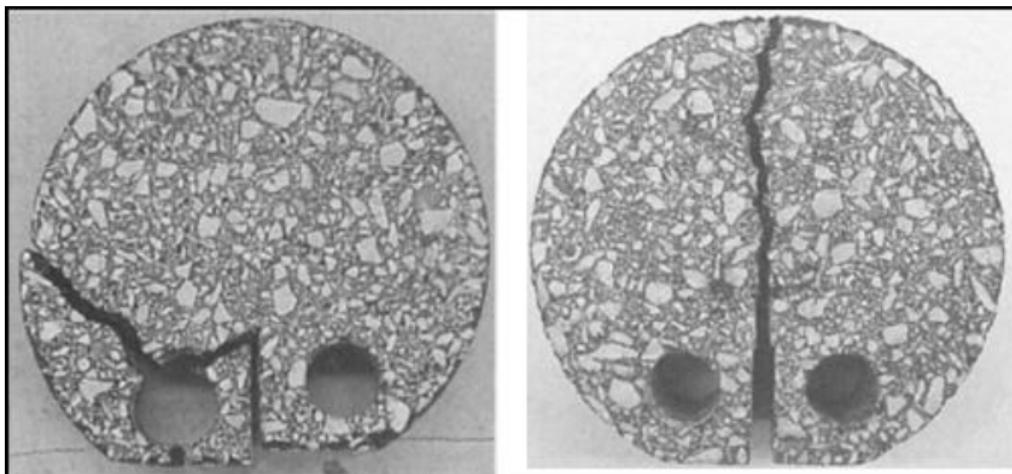


Figura 4.19 – Trinca na região dos furos (à esquerda) nos primeiros ensaios executados por Wagoner (2005).

As figuras 4.20 a 4.27 apresentam os resultados obtidos nesta pesquisa, com o desenvolvimento das forças de contato entre partículas arranjadas de forma hexagonal, podendo-se notar a concentração de tensões nas proximidades da ponta da trinca, bem como a propagação da trinca sob modo de fraturamento I. Resultados similares para arranjos quadrados de partículas são ilustrados nas figuras 4.29 a 4.33

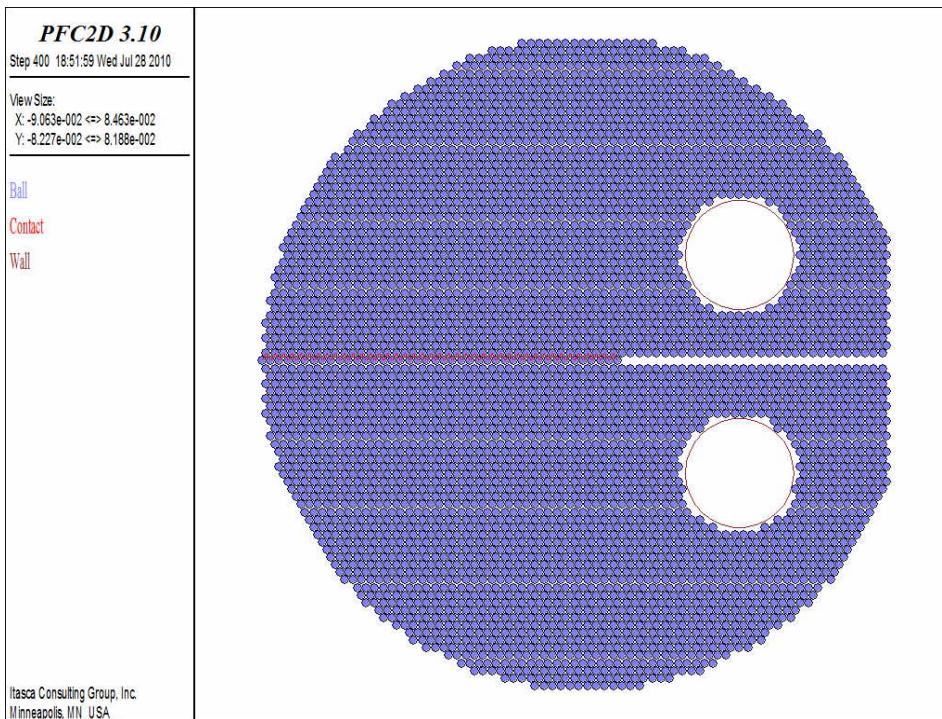


Figura 4.20 - DC(T) na condição inicial, antes do inicio dos deslocamentos dos furos de carregamento. Passo de tempo 400, onde não se aplicou ainda o carregamento no corpo de prova.

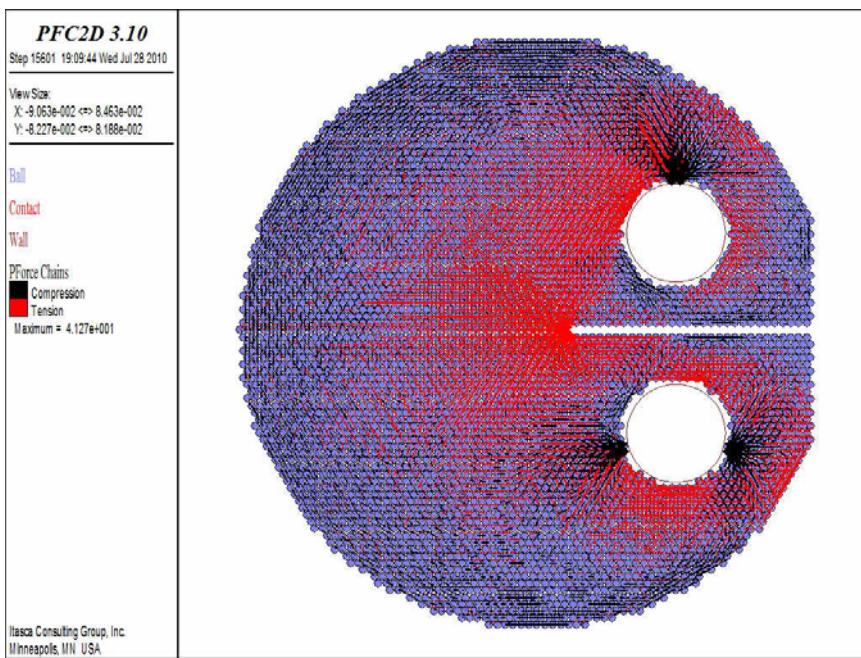


Figura 4.21 - DC(T) com arranjo hexagonal no passo de tempo 15601 com tração máxima de 41.27N.

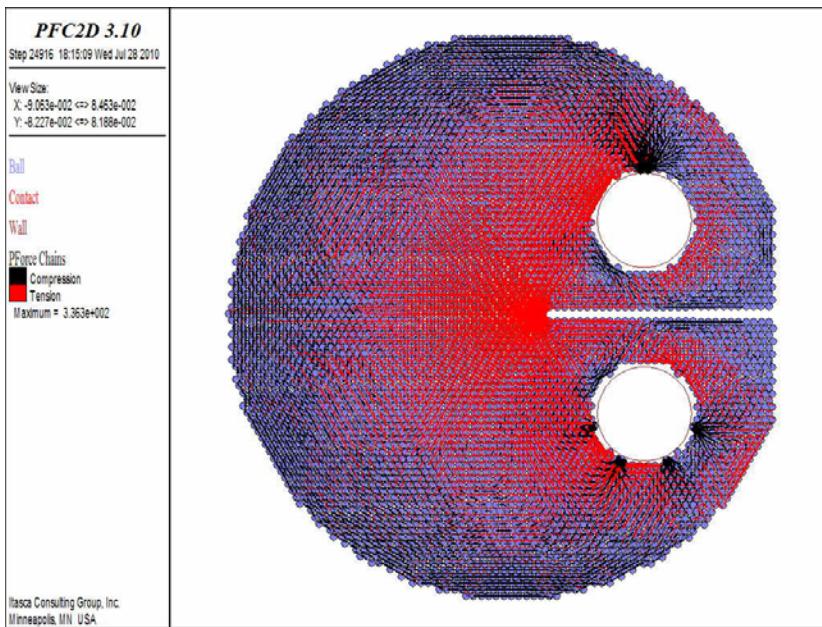


Figura 4.22 - DC(T) com arranjo hexagonal no passo de tempo 24916 com tração máxima 336.3 N.

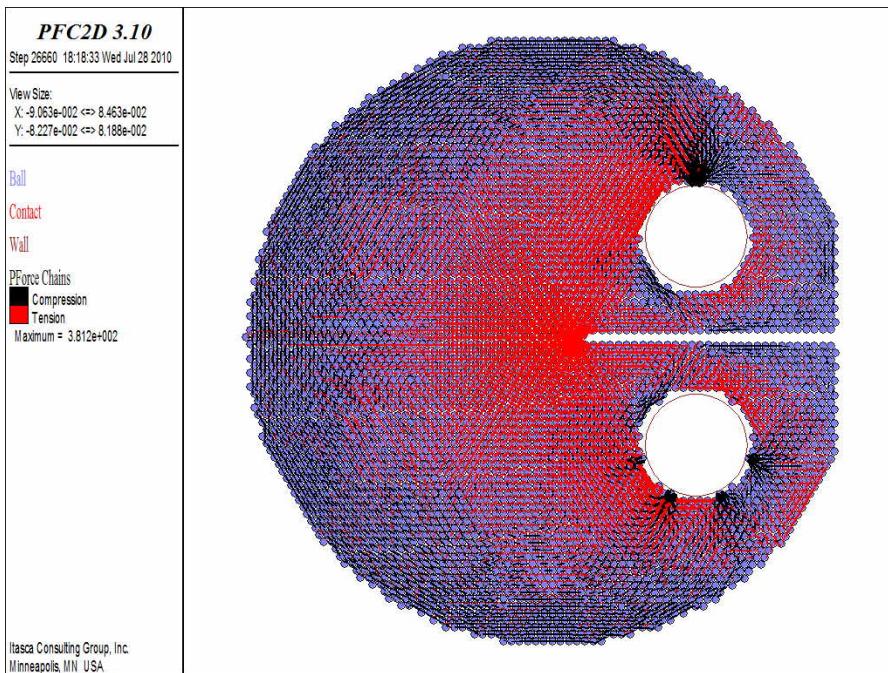


Figura 4.23 - DC(T) com arranjo hexagonal no passo de tempo 26660 com tração máxima 381.2 N.

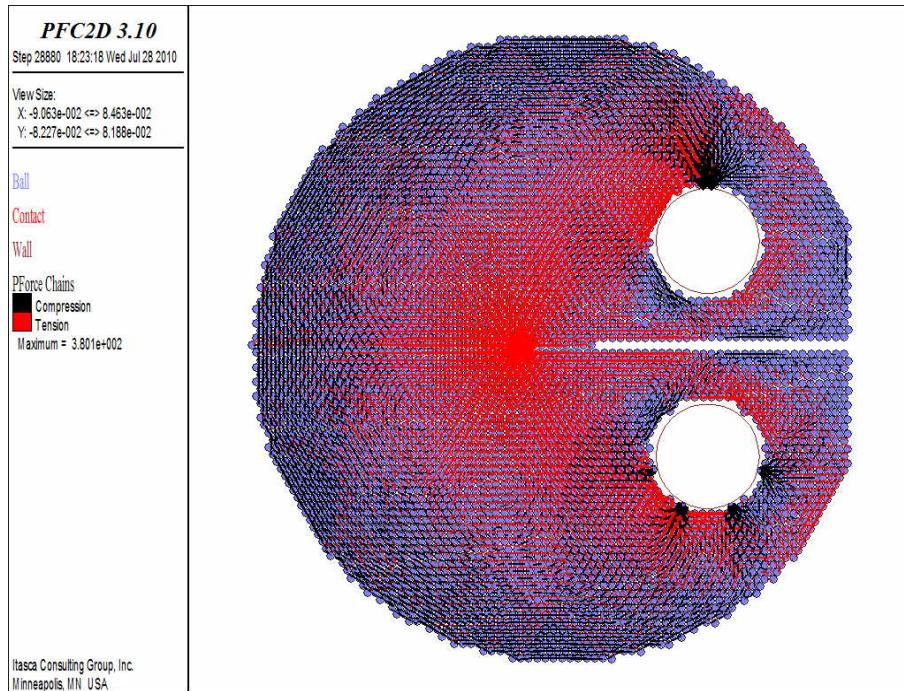


Figura 4.24 - DC(T) com arranjo hexagonal no passo de tempo 28880 com tração máxima 380.1 N.

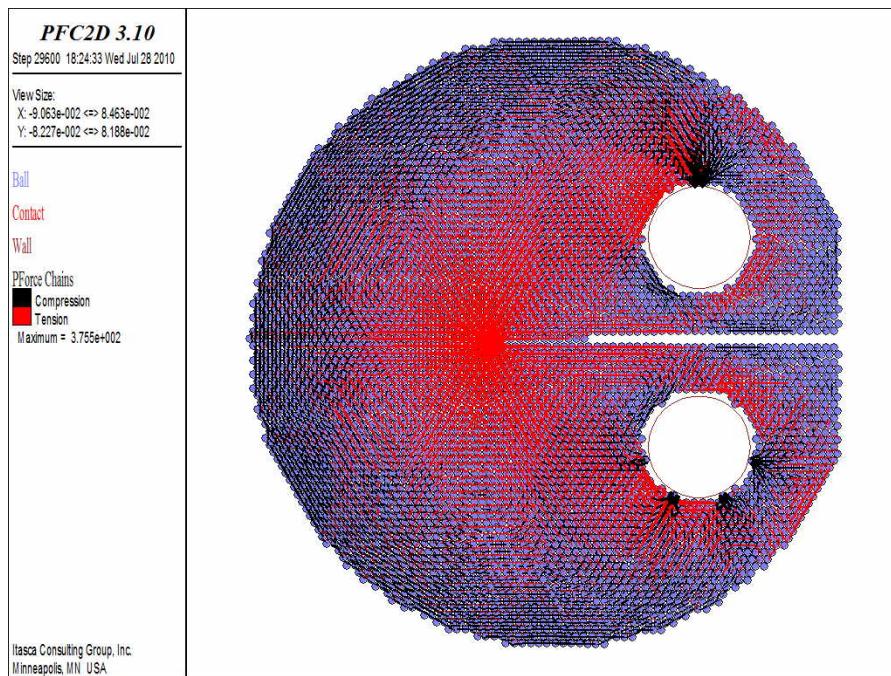


Figura 4.25 - DC(T) com arranjo hexagonal no passo de tempo 29600 com tração máxima 375.5 N.

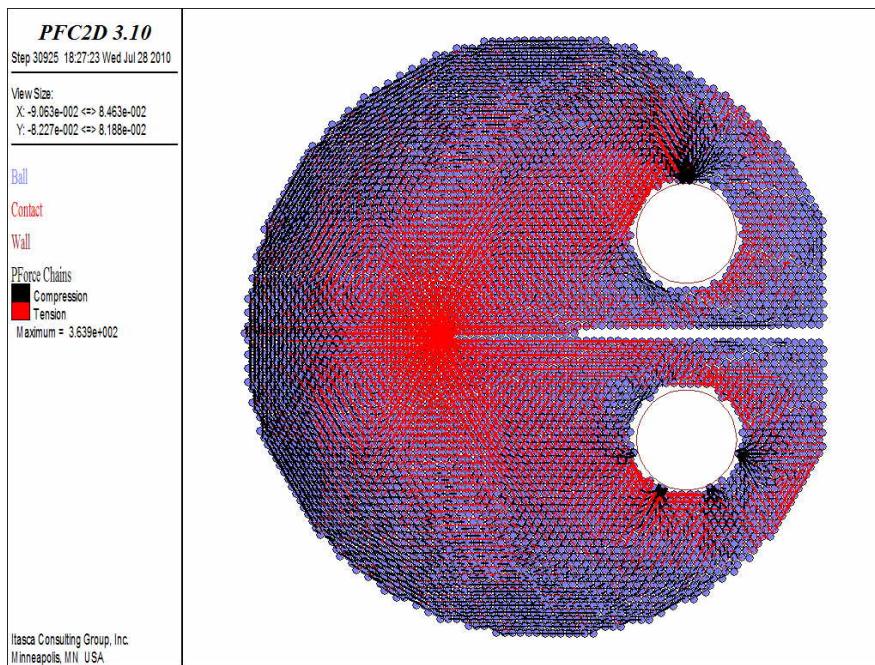


Figura 4.26 - DC(T) com arranjo hexagonal no passo de tempo 30925 com tração máxima 363.9 N.

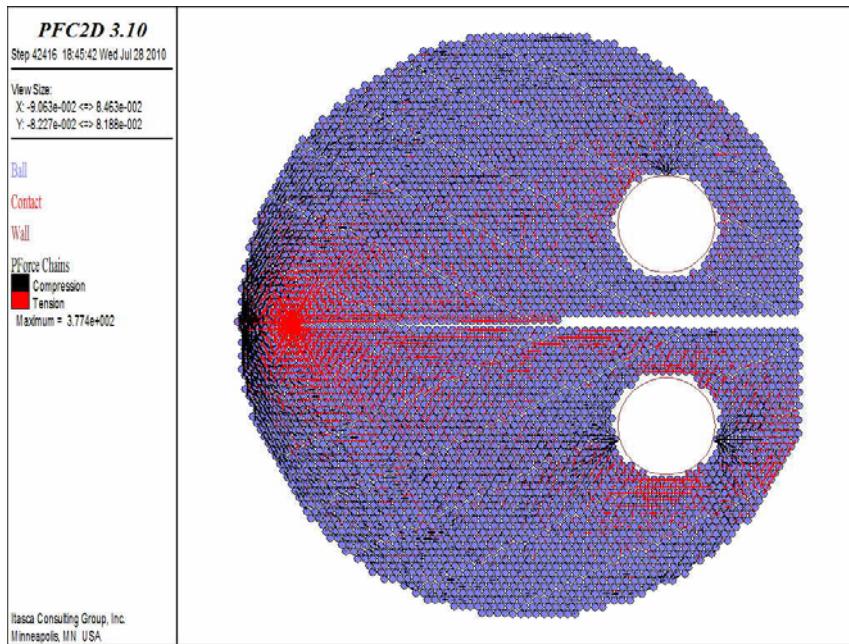


Figura 4.27 - DC(T) com arranjo hexagonal no passo de tempo 42416 com tração máxima 377.4 N.

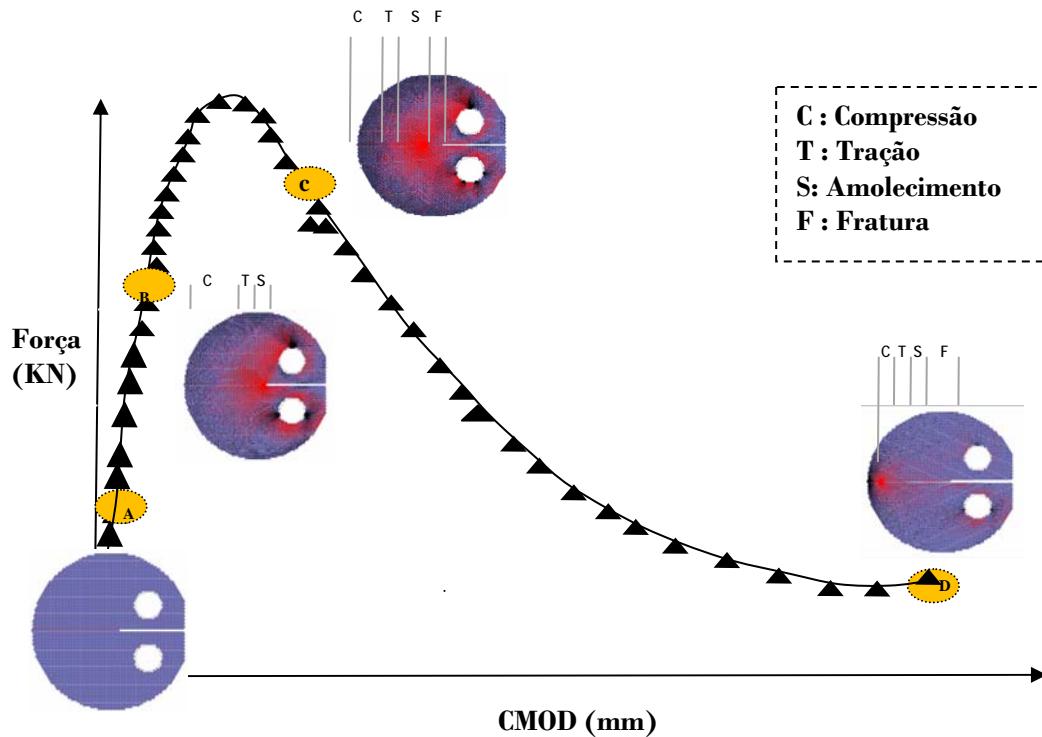


Figura 4.28 - Processo de faturamento progressivo na simulação do ensaio DC(T).

Na Figura 4.28 apresenta-se o processo de faturamento progressivo do corpo de prova, identificando-se o ponto A como início do ensaio DC(T), o ponto B considerando o material sob acréscimo do estado de tensão porém sem ocorrência da propagação da trinca ainda, o ponto C evidenciando o processo de aumento da trinca que atinge um comprimento final no ponto D.

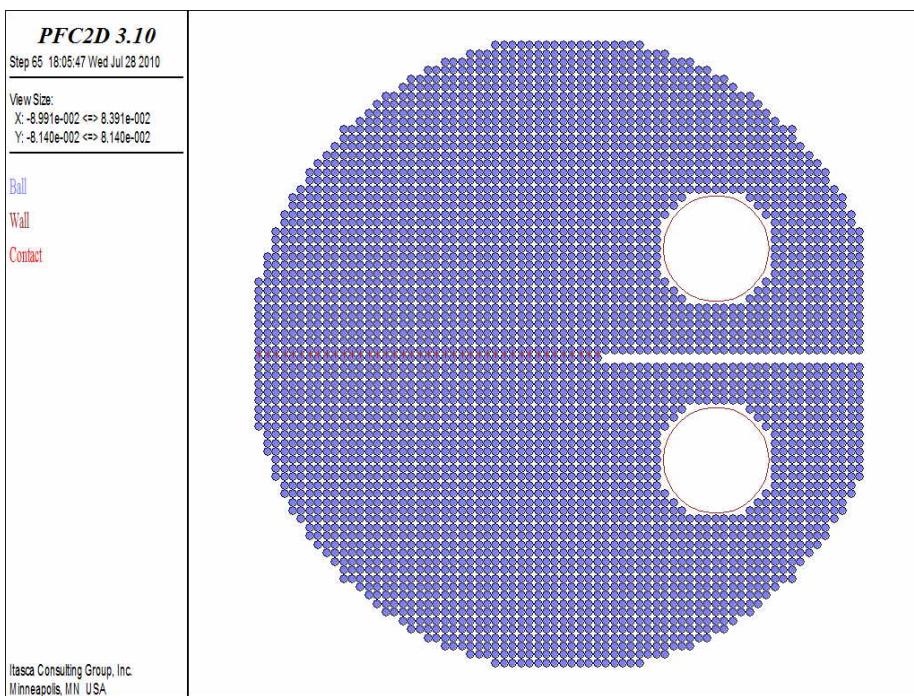


Figura 4.29 - DC(T) com arranjo quadrado no passo de tempo 65.

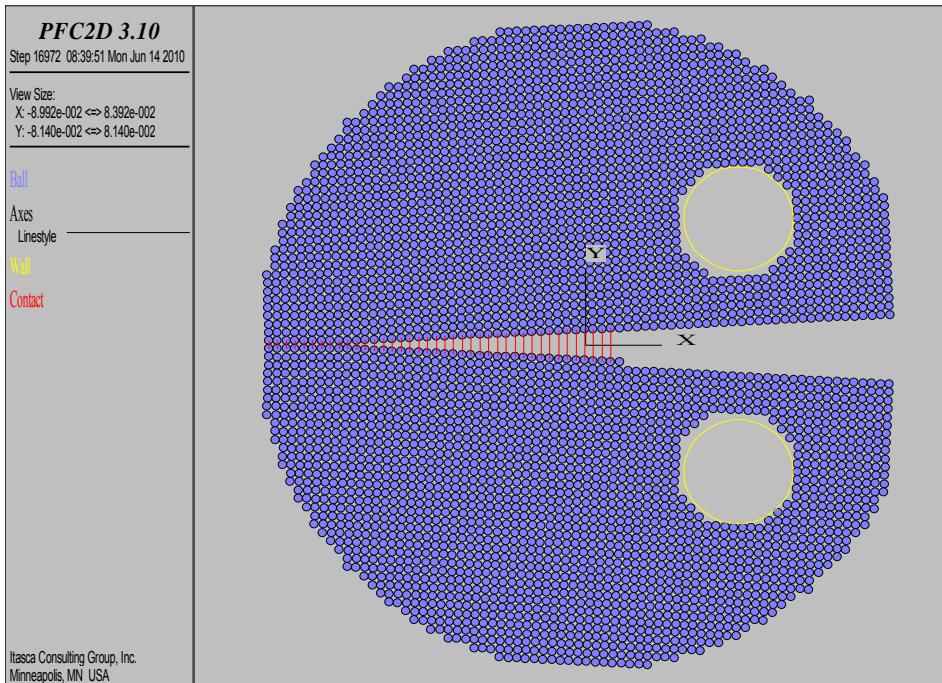


Figura 4.30 - DC(T) com arranjo quadrado no passo de tempo 16912.

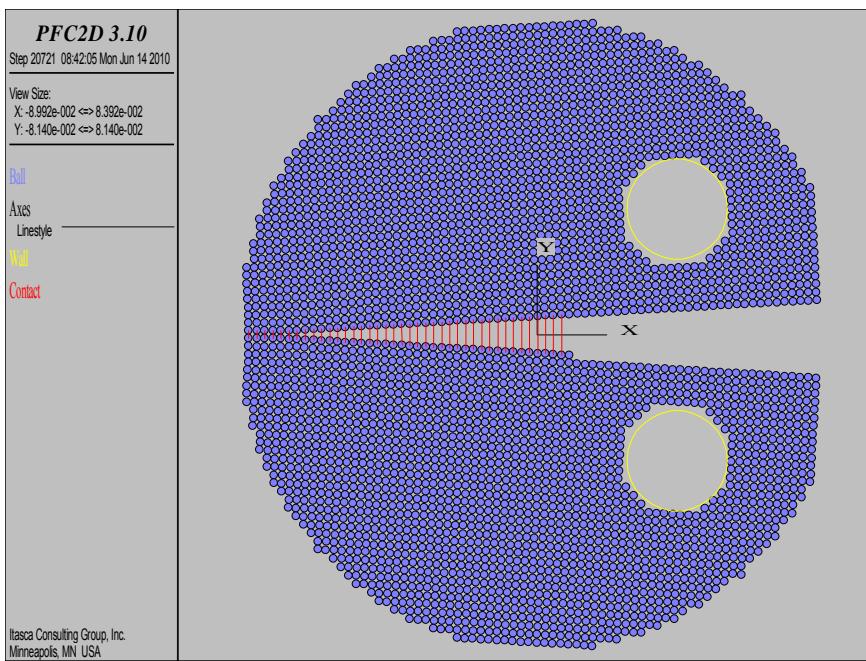


Figura 4.31 - DC(T) com arranjo quadrado no passo de tempo 20721.

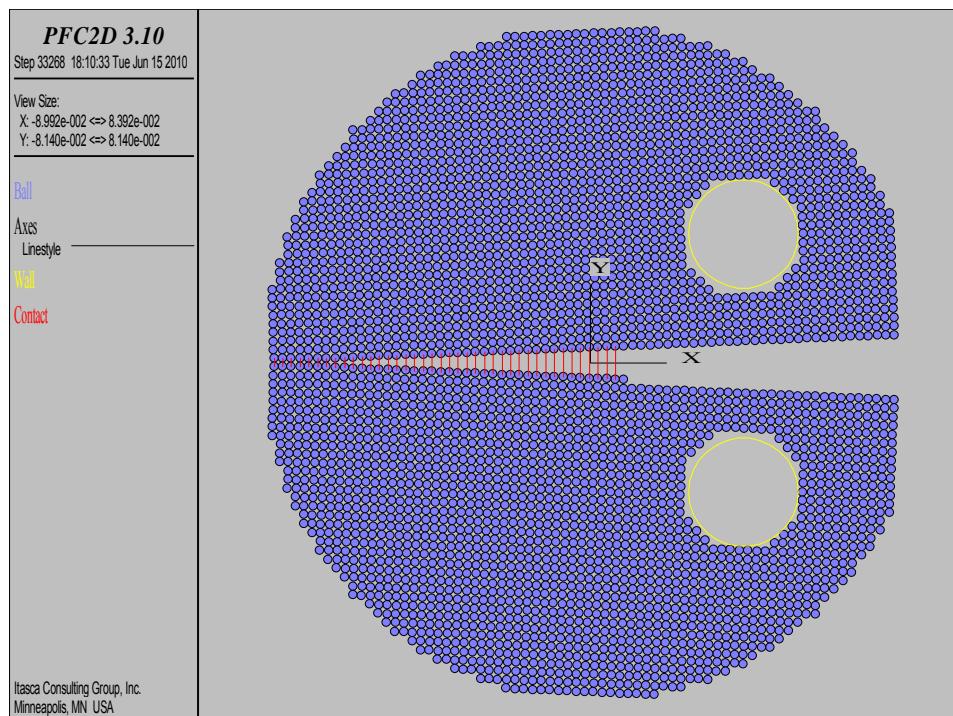


Figura 4.32 - DC(T) com arranjo quadrado no passo de tempo 33268.

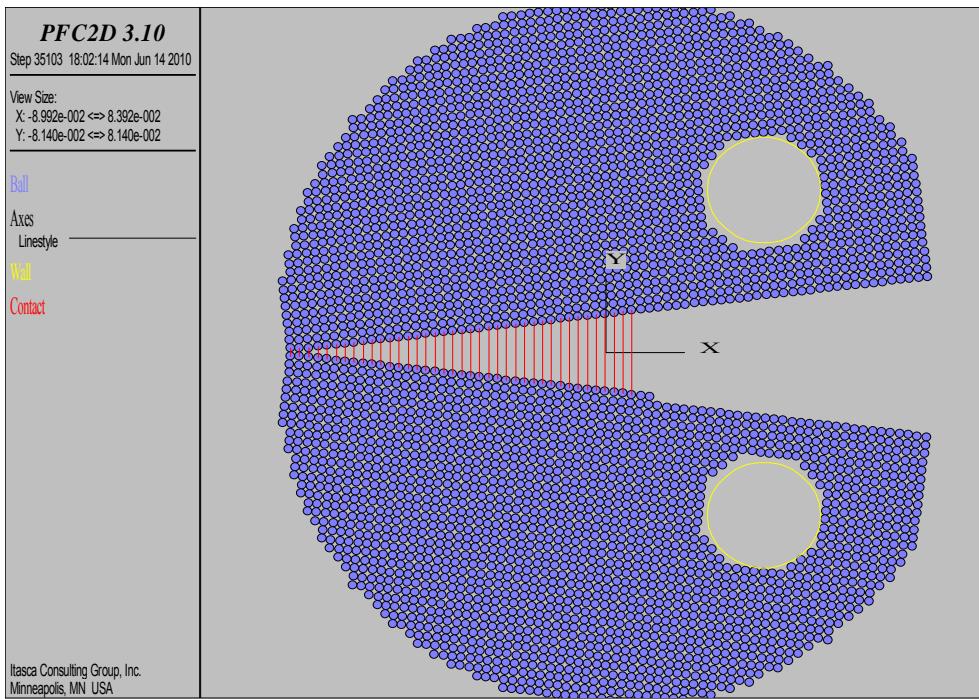


Figura 4.33 - DC(T) com arranjo quadrado no passo de tempo 35103.