



EXTRAÇÃO DOS FATORES DE INTENSIDADE DE TENSÃO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ESTENDIDO NOS MODELOS CDT E SEN (B)

Edel Rolando Martínez Concepción

Márcio Muniz De Farias

edel.rolando@gmail.com

muniz@unb.br

Universidade de Brasília

UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PPG Geotecnia, Asa Norte, Brasília, 70910-900, Distrito Federal, Brasil

Francisco Evangelista Jr.

fejr.unb@gmail.com

Universidade de Brasília

UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PECC Estruturas, Asa Norte, Brasília, 70910-900, Distrito Federal, Brasil

Resumo. *O Método dos Elementos Finitos Estendido (XFEM), promove uma simples simulação dos mecanismos de início e propagação de trincas. O fundamento do XFEM é o relevante Método de Elementos Finitos, adicionando a este graus de liberdade e funções de enriquecimento, que servem para descrever as descontinuidades locais do modelo. No XFEM, a geometria da fratura se torna independente da malha, permitindo a ela se movimentar livremente através do domínio, sem que haja a necessidade de um passo para adaptar a malha à descontinuidade. Utiliza-se o XFEM para realizar a discretização espacial de dois modelos numéricos tridimensionais da Mecânica da Fratura: a viga apoiada em três pontos com carregamento centrado (SEN(B)); e o disco compacto submetido à tração (CDT). O critério de propagação se baseia na taxa de energia liberada e nos fatores de intensidade de tensão. As soluções fornecidas pelo modelo numérico mostraram uma ótima concordância com os resultados obtidos a partir de dados experimentais.*

Palavras-chave: *XFEM, Enriquecimento, Fator de Intensidade de Tensões.*

1 INTRODUÇÃO

A implementação numérica do XFEM deve incluir a simulação da geometria da fratura, o controle do crescimento da fratura e o acoplamento de equações. O XFEM é considerado uma extensão do método convencional FEM e está fundamentado no conceito de partição da unidade (i.e. soma das funções de forma deve ser igual à unidade). O método foi desenvolvido por Belytschko e Black (1999).

2 SOLUÇÃO AO PROBLEMA DE FRATURA VIA XFEM

O XFEM incorpora funções de enriquecimento e graus de liberdade adicionais à aproximação convencional dos elementos finitos, na região em que a fratura está localizada, para simular as descontinuidades e singularidades. As funções de enriquecimento são de tipo assintóticas (captam a singularidade na ponta da fratura) e descontínuas (representam a abertura entre as superfícies da fratura). As zonas enriquecidas na ponta da fratura e ao longo desta são representadas na Fig. 1.

A formulação matemática para aproximar o campo de deslocamentos através de uma descrição implícita-explicita foi apresentada por Baydoun e Fries (2012) da forma seguinte:

$$u(x) = \sum_{i \in I} N_i(x)u_i + \sum_{i \in I^{desc.}} N_i^*(x)[H(x) - H(x_i)]a_i + \sum_{i \in I^{ponta}} N_i^*(x) \left[\sum_{m=1}^4 (B^m(x) - B^m(x_i))b_i^m \right]$$

O primeiro termo da expressão anterior representa a aproximação clássica do FEM, descrito por uma função de forma contínua $N_i(x)$ e as incógnitas u_i nos pontos nodais. A descontinuidade no campo de deslocamentos da fratura, assim como o comportamento especial na ponta da fratura são consideradas, respectivamente, pelos segundo e terceiro termos. Dois tipo de funções de enriquecimento estão implementadas na formulação, a função Heaviside, $H(x)$, e a função assintótica de ponta de fratura, $B(x)$, conforme apresentados na Fig. 1 (b) e (c).

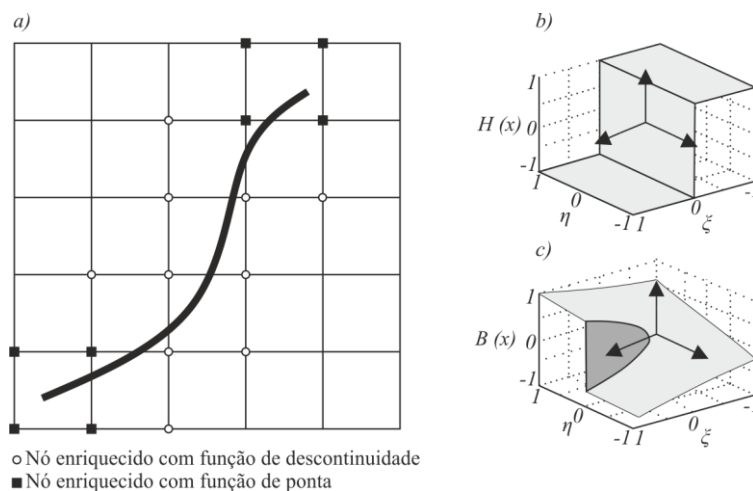


Figura 1. (a) Nós enriquecidos pelas funções especiais do XFEM nos elementos (b) Função de enriquecimento na descontinuidade (c) Função assintótica da ponta da fratura

3 CASOS DE REFERÊNCIA PARA VALIDAÇÃO DO XFEM

Para avaliar a eficiência do XFEM em problemas de fraturas foram aproveitados os dados de experimentos em discos sob tração compactos (Disk-Shaped Compact Tension Test ou CDT) publicados por Wagoner et al. (2005) e em vigas de concreto testadas a flexão (SEN(B)), explicado no trabalho de Evangelista et al. (2013). O primeiro modelo de validação é representado na Fig. 2 (a). Trata-se de uma amostra cilíndrica extraída de um pavimento e submetida à tração uniaxial seguindo a normativa ASTM D7313 (Wagoner et al., 2005; ASTM D7313, 2013). A amostra apresenta as seguintes dimensões $D=150$ mm, $\Phi=25$ mm, $d_d=25$ mm, $C=35$ mm e $W=110$ mm, o comprimento do entalhe induzido é $a+C=62,5$ mm, enquanto que, a espessura é $e=50$ mm. O segundo teste foi realizado por Evangelista et al. (2013) e seus resultados servirão para simular o ensaio pela via modelagem numérica com o XFEM. As dimensões da viga testada, a posição do entalhe, as condições de contorno, assim como a metodologia do ensaio SEN(B) estão representados conforme a Fig.2 (b). As propriedades do material utilizado em ambos modelos são apresentadas na Tabela 1.

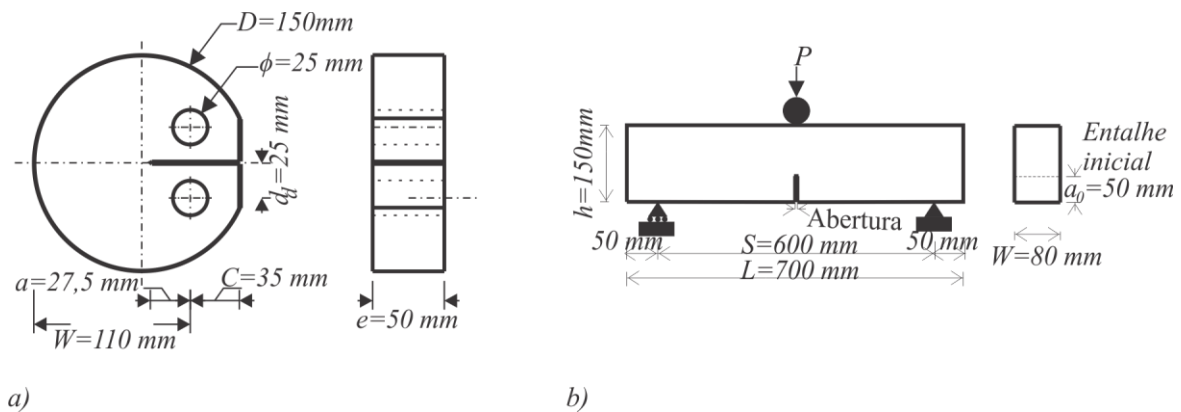


Figura 2. a) Dimensões do corpo de prova para ensaio CDT b) Viga com entalhe apoiada em três pontos e solicitada a flexão SEN(B)

Tabela 1. Parâmetros dos materiais do disco compacto para ensaio CDT e da viga para ensaio SEN(B) (Wagoner et al., 2005; Evangelista et al., 2013)

Parâmetros	Valores	
	CDT	SEN (B)
Energia de fratura (G_f)	328 N/m	99 N/m
Resistência à tração (f'_t)	3,56 MPa	5,04 MPa
Módulo de Young (E)	14,2 GPa	27 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,35	0,19
Densidade (ρ_{conc})	2400 kg/m	2080 kg/m

4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS MODELOS

4.1 Estudo da densidade da discretização

O estudo da convergência, em função da densidade da malha, foi realizado no modelo de fratura estacionária em 3D, utilizando elementos do tipo C3D8R em Abaqus (Dassault

Systèmes, 2013). O C3D8R é um elemento hexaédrico de primeira ordem, o qual possui integração reduzida. As simulações numéricas foram desenvolvidas em um cluster de computadores unidos numa rede de alta velocidade, o que aprimora a obtenção de resultados.

No modelo CDT, iniciou-se a análise com aproximadamente $5 \cdot 10^5$ de elementos e chegou-se até $75 \cdot 10^5$ elementos, ver Fig. 3.

À medida que se aumentava a densidade da malha nas simulações, ou seja, diminuía-se o tamanho dos elementos, se observava que o fator de intensidade de tensão no segundo modo (K_{II}) estava convergindo para um mínimo, conforme representado na Fig. 3.

Na primeira simulação obteve-se um K_{II} de $0,10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ e nas outras simulações o valor diminuiu até aproximadamente $K_{II} = 0,04 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ou seja, o aumento do número de elementos sugere uma melhor aproximação nas magnitudes dos fatores de intensidade de tensão. Essa afirmação se deve a que no ensaio CDT deverá predominar uma propagação de fraturas no modo de abertura puro (K_I).

A partir de aproximadamente $17 \cdot 10^5$ elementos finitos o valor do fator de intensidade no Modo II de propagação começa a diminuir em incrementos menores, conforme a Fig. 3, porquanto esta quantidade de elementos foi considerada apropriada para realizar todas as simulações seguintes de fratura estacionária.

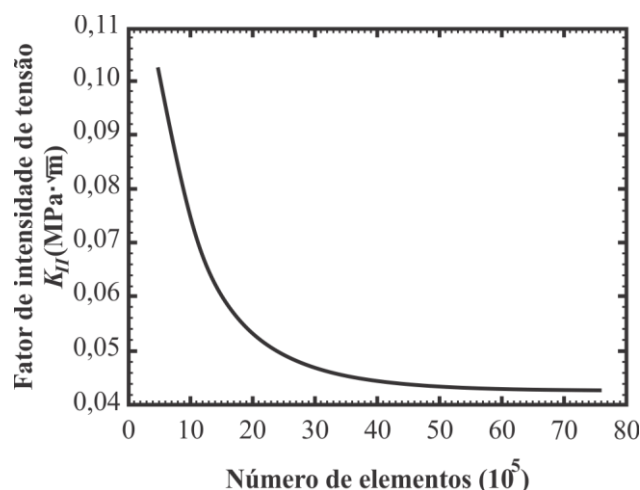


Figura 3. Linha de tendência durante a análises de sensibilidade da discretização no modelo CDT em 3D

O modelo SEN (B) em 3D foi discretizado com uma alta densidade de elementos finitos utilizados na simulação, obtiveram-se excelentes resultados com aproximadamente $1 \cdot 10^7$ nós.

4.2 Fatores de intensidade de tensão

Nos modelos CDT e SEN (B) teve-se especial atenção à presença do entalhe no elemento ensaiado, assim note-se que o desvio na trajetória da fratura adverte a presença do modo puro de abertura.

Na Fig. 4 apresenta-se a distribuição dos fatores de intensidade de tensão ao longo do comprimento da fratura, obtidos do Abaqus no pós-processamento a partir dos pontos de avaliação do domínio de contorno para todos os contornos incluídos nas integrais. Observe-se que a quantidade de pontos plotados corresponde ao número de círculos de avaliação utilizados no modelo numérico XFEM. É notável o predomínio do Modo I na propagação da fratura, o qual era um fenômeno esperado em ambos ensaios.

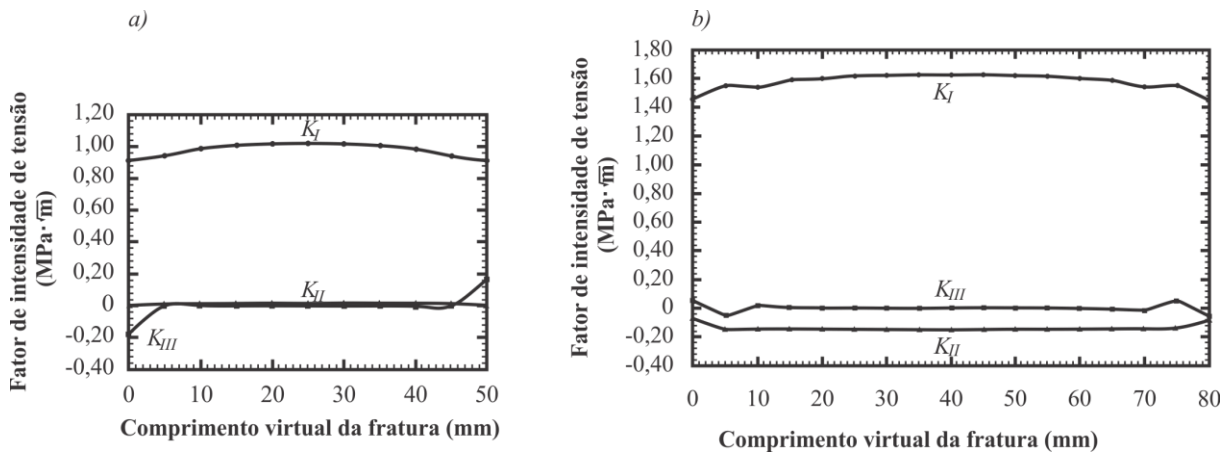


Figura 4. Fatores de intensidade de tensão para os pontos de avaliação distribuídos ao longo do comprimento da fratura a) modelo CDT b) modelo SEN (B)

Note-se que o chamado comprimento virtual da fratura é igual à espessura do disco no modelo CDT ou à largura da viga, igual a 80 mm, no modelo SEN (B). Observe-se que era esperado o predomínio da propagação no modo puro de abertura, devido à configuração do ensaio, o que está de acordo com os resultados obtidos nas simulações em 3D.

5 CONCLUSÕES

De forma similar, o início e a propagação da fratura indicaram que a direção seguida pelo modelo é semelhante à obtida no laboratório. O método XFEM mostrou-se preciso para prever o início e crescimento de fraturas arbitrárias e estáticas nos modelos de validação. A investigação da convergência através do refinamento na malha permitiu obter resultados com a maior precisão possível. Porém, os parâmetros fundamentais da discretização devem ser selecionadas com atenção, de modo a otimizar a velocidade do cálculo e reduzir o custo de monitoramento.

REFERÊNCIAS

- ASTM, 2013. *Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry*. D7313. West Conshohocken, United States, *ASTM Int.*, pp. 1-9.
- Belytschko, T. & Black, T., 1999. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, vol. 45, pp. 601-620.
- Baydoun, M. & Fries, T.P., 2012. Crack propagation criteria in three dimensions using the XFEM and an explicit–implicit crack description. *Int. J. Fracture*, vol. 178, pp. 1-20.
- Evangelista, F., Roesler, J. R. & Proença, S. P., 2013. Three-dimensional cohesive zone model for fracture of cementitious materials based on the thermodynamics of irreversible processes. *Eng. Fracture Mech.*, vol. 97, pp. 261–280.
- Systèmes, D., 2013. *Abaqus 6.13. Example Problems Manual*. D. Systèmes. Providence. Volume I-V.
- Wagoner, M. P., Buttlar, W.G. & Paulino, G.H., 2005. Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture. *Experimental Mechanics*, vol. 45, n. 3, pp. 1-8.