



STUDY AND NUMERICAL SIMULATION OF THE BOUNDARY ELEMENT MESH IN THE CRACK GROWTH PATH

Stephanie Cristina Matos Pereira

Gilberto Gomes

stephaniecmatos@gmail.com

ggomes@unb.br

University of Brasilia, Department of Civil Engineering, 71910-900, Brasília-DF, Brasil

Abstract. A wide variety of structures, such as aircraft structures, ships and metal bridges, are constantly submitted to conditions that may generate fatigue cracks. Those cracks increase gradually due to the cyclic loads application. The presence of cracks in the structure makes it difficult to use the Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) related to the modeling process and the calculation of stress intensity factors (SIF) as well. In this sense, numerical techniques based on finite elements method (FEM) and boundary elements method (BEM) have been applied on this type of problem. Here, the aim is to study the interaction between cracks and holes and their influence on the boundary mesh and considered in the sense of the dual boundary element method (DBEM). The methodology consists in analyze the influence of boundary element meshes over the crack growth path using several models extracted from the open literature. In addition, the BEMLAB2D GUI for pre- and post-processing and BemCracker2D program based on DBEM analysis has been used to the verification of the methodology adopted, in which SIF results have shown the accuracy and validation of the study.

Keywords: crack growth, SIF, DBEM, boundary mesh, modelling.

1 INTRODUÇÃO

No dimensionamento de uma estrutura deve-se atentar para dois fatores: segurança estrutural e o seu apropriado funcionamento em serviço. O primeiro aspecto diz respeito à necessidade da redução do risco de colapso relativo a qualquer atividade humana e o segundo corresponde à necessidade de possibilitar conforto aos usuários devido o funcionamento adequado da estrutura, possibilitando também a redução dos custos de manutenção da mesma (Henriques, 1998).

No século passado, uma das etapas do dimensionamento, a análise estrutural, era feita considerando modelos matemáticos que utilizavam hipóteses simplificadoras e formulações empíricas provenientes de experimentos. Estes modelos matemáticos eram expressos por equações diferenciais (ordinárias e parciais) e suas soluções analíticas só resolviam problemas mais simples. No intuito de se resolver problemas mais complexos surgiram os modelos numéricos aproximados, denominados modelos discretos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Elementos de Contorno (MEC) (Gonçalves, 2004).

O Método dos Elementos de Contorno caracteriza-se por discretizar somente os pontos de contorno, realizando a integração das equações para cada ponto. Os deslocamentos e as trações de superfície (equivalentes à intensidade da carga aplicada) são as variáveis interpoladas e as tensões internas são obtidas a partir dos valores das variáveis (Brebbia e Dominguez, 1989). Este método caracteriza-se por trabalhar com um número inferior de dados, quando comparado com o MEF.

O MEC padrão, relacionado à equação identidade de Somigliana para deslocamentos, atende muito bem a problemas de elasticidade, ou onde o domínio é infinito ou semi-infinito, dentre outros. Entretanto, este método não é suficiente para solucionar problemas que envolvem trincas, pois as superfícies das mesmas são coincidentes e isso origina um sistema singular de equações algébricas (Gomes, 2016).

Blandford et. al. (1981) utilizou o método das sub-regiões para resolver um problema de trinca. Neste procedimento, um contorno artificial foi conectado ao contorno da trinca e o domínio dividido em duas novas sub-regiões sem trinca. Portela et. al. (1992) representou o contorno da trinca a partir da equação integral de contorno de deslocamento (vinda do MEC padrão) e da equação hipersingular (equação de tração), empregando-as separadamente em cada lado da trinca, criando assim o Método de Elementos de Contorno Dual (MECD), técnica utilizada neste trabalho.

Por outro lado, o uso das formulações da Mecânica da Fratura em projetos estruturais tem uma grande relevância no que se diz à segurança. A Mecânica da Fratura pode ser utilizada na análise, na explicação e na previsão do comportamento de trincas; além de poder antecipar sobre o restante da vida de alguma estrutura ou equipamento (Borges, 2010). Há casos em que os parâmetros usuais adotados num projeto estrutural, como resistência à tração, limite de escoamento e tensão de flambagem, não são suficientes para impedir o aparecimento de fissuras e, posteriormente, de trincas. Desta forma, dimensionar uma estrutura sob a ótica da Mecânica da Fratura é importante para evitar possíveis defeitos. Além disso, ela também é capaz de avaliar, esclarecer e antever o comportamento de trincas, fazendo ainda uma previsão da vida útil da estrutura (Borges, 2010).

Neste contexto, este trabalho propõe um estudo da malha de elementos de contorno em modelos bidimensionais de problemas envolvendo trincas e furos, objetivando compreender a influência dessa no caminho da propagação da trinca. Para tanto, modelos de placas com furos e trincas extraídos da literatura aberta serão simulados e analisados por meio dos programas BEMLAB2D - Interface Gráfica de pré- e pós-processamentos (Delgado Neto, 2017), e o BemCracker2D, para análise de modelos bidimensionais via MEC/MECD (Gomes, 2016), a fim de validar o estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) tem como objetivo representar a grandeza e a distribuição de tensões (campo linear elástico) aos arredores de uma trinca. Este campo de tensões pode ser quantificado em função do fator de intensidade de tensão K . Para verificar se uma estrutura trincada irá romper se sujeita a algum esforço (sob a condição de que o campo de tensões permaneça principalmente linear elástico no instante da fratura). Questionamentos em relação ao tamanho da trinca, tempo de crescimento da trinca, frequência de inspeção da estrutura e outros são objetos de estudo da Mecânica da Fratura (Miranda, 2003).

2.1 Fatores de Intensidade de Tensão (FITs)

O fator de intensidade de tensões foi apresentado por Irwin (1957) e Williams (1957), na MFLE, para mensurar o campo de tensões em volta de uma trinca numa peça predominantemente elástica. Cada tipo de deslocamento tem um fator de intensidade característico (K_I , K_{II} e K_{III}) e o valor crítico do fator de K_I , K_{IC} , é conhecido como tenacidade à fratura.

Basicamente, há três tipos de movimentos relativos (como mostra a Figura 1) das duas superfícies das trincas: abertura (modo I), cisalhamento no plano (modo II) e cisalhamento fora do plano (modo III).

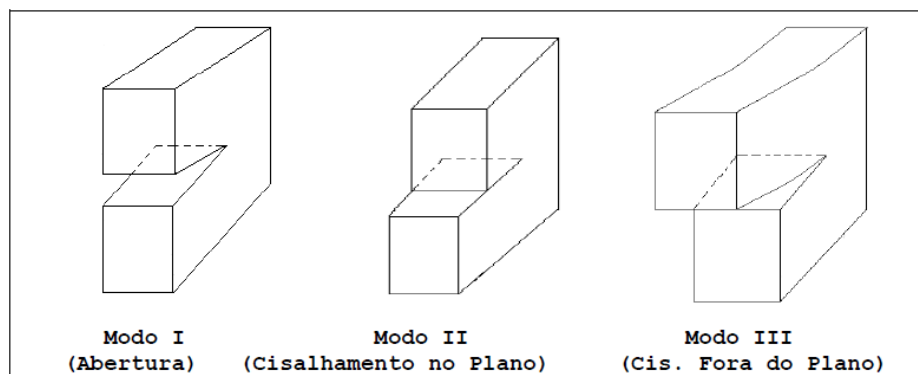


Figura 1 - Movimentos relativos das duas superfícies das trincas (Fonte: Broek, 1986).

Considerando os eixos apresentados na Figura 2, o modo I caracteriza-se pelo deslocamento local simétrico aos planos $x - y$ e $x - z$. No modo II, os deslocamentos são antissimétricos ao plano $x - z$ e simétricos em relação ao plano $x - y$. Já no modo III, os deslocamentos são antissimétricos em ambos os planos.

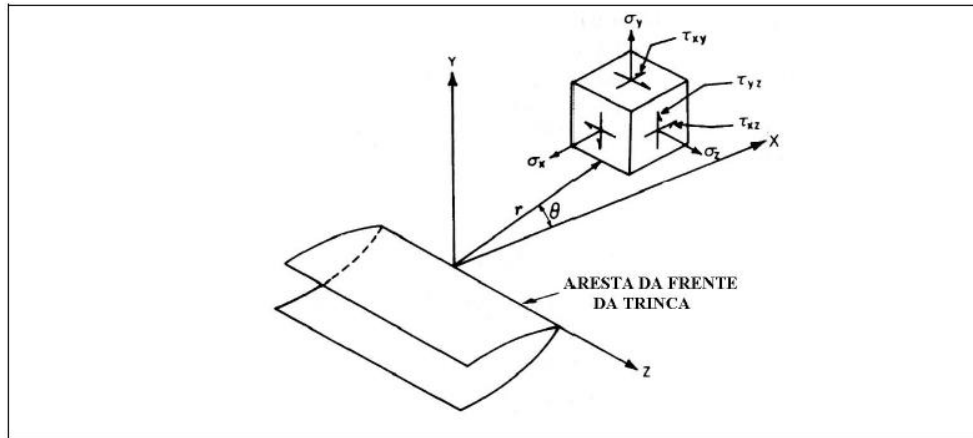


Figura 2 - Sistema de eixos (Fonte: Strohaecker, 1986).

A abertura é o tipo de fraturamento que mais acontece nas peças que sofreram trincas e, por isso, é o modo mais importante nos projetos. Cada tipo de fraturamento relaciona-se com um tipo de distribuição de tensões nos arredores da ponta da trinca; sendo assim, a deformação ocorrida na mesma é decorrente da combinação de abertura e cisalhamento (dentro e fora do plano) (Miranda, 2003).

O fator K está relacionado com a carga nominal aplicada na frente da trinca (σ), com a raiz quadrada do tamanho da trinca (a) e com o parâmetro f (vinculado à geometria da peça, condições de carregamento, orientação e forma da trinca), sendo dado de forma geral pela expressão:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a f} \quad (2.1)$$

A relação, no caso geral, entre a taxa de alívio e o fator de intensidade de tensão é:

$$\mathcal{G} = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2G} \quad (2.2)$$

Onde $E' = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ e $E' = E$ nos casos de deformação plana e tensão plana, respectivamente.

2.2 Direção e Propagação da Trinca

De acordo com Carvalho (1998), existem três tipos de análises numéricas referentes à direção de crescimento da propagação da trinca em um regime linear elástico. A primeira, conhecida como Máxima Tensão Circunferencial ($\sigma_{\theta \text{máx}}$), é definida por Erdogan & Sih (1963) como a situação em que a trinca crescerá na direção que potencializa a tensão circunferencial numa região fechada na extremidade da trinca. Sih (1974), em relação à análise denominada Mínima Densidade de Energia de Deformação ($S_{\theta \text{mín}}$), declarou que a direção de crescimento da trinca está em função de um valor mínimo de densidade de energia de deformação próximo à extremidade da trinca. Já Hussain (1974), relativamente à análise Máxima Taxa de Liberação de Energia Potencial ($G_{\theta \text{máx}}$), propôs que o crescimento da trinca acontecerá na direção que provoca a maior taxa de liberação de energia de propagação.

Aqui, será apresentado o critério da Máxima Tensão Circunferencial ($\sigma_{\theta \text{máx}}$), uma vez que esse é adotado no programa de análise.

2.2.1 Máxima Tensão Circunferencial ($\sigma_{\theta\text{máx}}$)

Considerando os tipos de fraturamento abertura e cisalhamento no plano (modos I e II, respectivamente), as tensões localizadas na extremidade da trinca resultam da soma das tensões obtidas por cada modo (Barsom & Rolfe, 1987), conforme Figura 3.

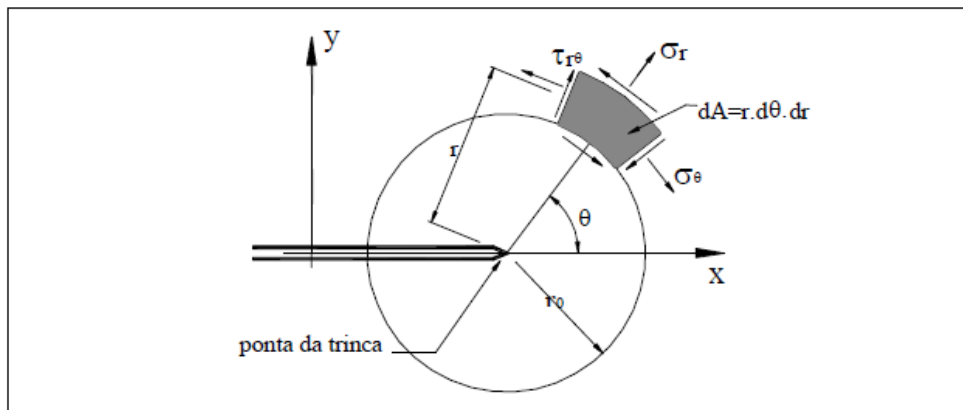


Figura 3 - Tensões localizadas na extremidade da trinca (Fonte: Miranda, 2003).

As expressões das tensões normais e cisalhantes na ponta da trinca, em coordenadas polares, são:

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos(\theta/2) \left\{ K_I [1 + \sin^2(\theta/2)] + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2 K_{II} \tan \theta/2 \right\} \quad (2.3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos(\theta/2) \left[K_I \cos^2(\theta/2) - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad (2.4)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos(\theta/2) [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] \quad (2.5)$$

Este critério numérico determina que a extensão da trinca iniciará no plano ortogonal à direção em que a tensão normal σ_θ alcança seu valor máximo, ou seja, quando a tensão cisalhante $\tau_{r\theta}$ for nula. Além disso, a extensão sem fadiga (denominada monotônica) acontecerá quando a tensão normal $\sigma_{\theta\text{máx}}$ alcançar um valor equivalente ao valor do fator de intensidade de tensão crítico (do modo I de fraturamento), K_{Ic} , chamado também de tenacidade à fratura. Considerando $\tau_{r\theta} = 0$ e fazendo as devidas simplificações, a expressão que calcula os valores medianos do ângulo de propagação da trinca é:

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right) \quad (2.6)$$

Os valores mínimos e máximos deste ângulo são 0° e $70,5^\circ$ (em módulo), e K_I e K_{II} são os FITs, respectivamente, dos Modos I e II explicados anteriormente.

2.3 O Método dos Elementos de Contorno Dual (MECD)

A utilização do MEC convencional não é suficiente para a resolução de problemas que envolvem trincas, uma vez que a coincidência dos contornos da trinca gera um problema mal

posto (Gomes et. al., 2016). “Isso ocorre para um par de pontos fonte, coincidentes no contorno da trinca, onde as equações algébricas relativas a um dos pontos são idênticas às do ponto oposto, tendo em vista que a mesma equação integral de deslocamento é aplicada em ambos os pontos fonte, com mesmo caminho de integração e ao longo de todo o contorno do problema” (Gomes et. al., 2016).

Visando resolver este impasse, o método de elementos de contorno dual (MECD) (Portela, 1992; Aliabadi, 2002) foi criado. Este método emprega duas equações separadamente: as equações integrais de deslocamentos e de forças de superfície. Essas equações possuem o mesmo caminho de integração para cada par de pontos fontes coincidente; no entanto, como as equações integrais de contorno são distintas, são geradas equações algébricas independentes.

2.3.1 Formulação do MECD

A equação integral de deslocamento (considerando a ausência de forças de corpo e a continuidade de deslocamentos) do MECD, de acordo com Aliabadi (2002) é:

$$C_{ij}(x')u_j(x') + CPV \int_{\Gamma} T_{ij}(x', x)u_j(x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} U_{ij}(x', x)t_j(x)d\Gamma(x) \quad (2.7)$$

Onde $T_{ij}(x', x)$ e $U_{ij}(x', x)$ são as soluções fundamentais de Kelvin para tração e deslocamento num ponto x do contorno. O termo CPV representa a integral com Valor Principal de Cauchy, $C_{ij}(x')$ denota os coeficientes dados pela expressão $\delta_{ij}/2$ para contornos suaves no ponto x' .

A partir da equação integral de força de superfície, e considerando detalhes como a ausência de forças, a continuidade nas deformações e força de superfície em x' sobre um contorno suave, chega-se à equação das componentes de tração t_j :

$$\frac{1}{2}t_j(x') + n_i(x')HPV \int_{\Gamma} S_{ijk}(x', x)u_k(x)d\Gamma(x) = n_i(x')CPV \int_{\Gamma} D_{ijk}(x', x)t_k(x)d\Gamma(x) \quad (2.8)$$

Na qual n_i simboliza a i -ésima componente do vetor normal unitário ao contorno, no ponto x' . Ambas as equações representam o fundamento do MECD e permitem a formação de um sistema linear de equações algébricas, onde os deslocamentos e as forças de superfície são calculados sobre os pontos do contorno:

$$Hu = Gt \quad (2.9)$$

Considerando que H e G possuem as integrais relacionadas às soluções fundamentais T_{ij} e U_{ij} . As componentes de tração e deslocamentos no contorno estão nos vetores t e u . A equação anterior também pode ser dada da forma:

$$Ax = By = f \quad (2.10)$$

A e B são matrizes obtidas a partir da reorganização, na forma padrão do MEC, das matrizes H e G . O termo x simboliza o vetor que contém t_i e u_i e o termo y é o vetor que possui as condições de contorno $\bar{t}_i$ e $\bar{u}_i$.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

Métodos numéricos de análise, como o MEF e o MEC, são utilizados na engenharia por meio de softwares. Um sistema de análise completo deve realizar três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento (Delgado Neto et al., 2016), como pode ser visto na Figura 4:

- Pré-processamento: definição da geometria, vinculação das propriedades físicas à geometria e criação da malha;
- Processamento: realização da análise numérica;
- Pós-processamento: avaliação dos dados gerados pela análise numérica.

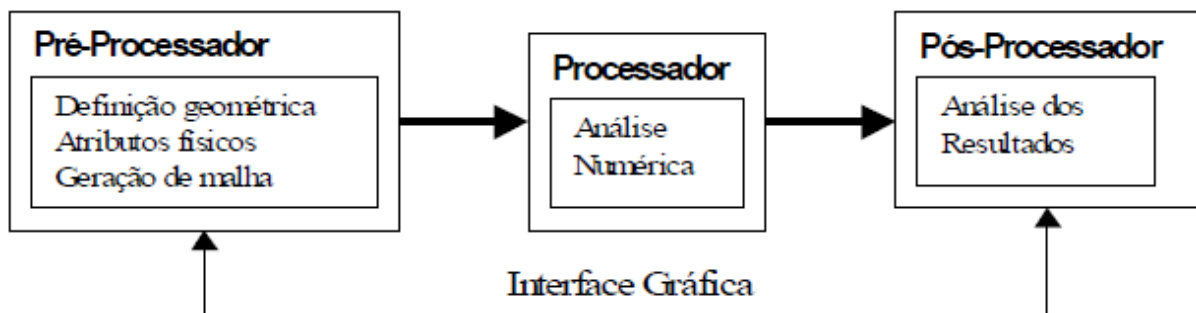


Figura 4 - Esquema de um sistema de análise (Fonte: Delgado Neto et al., 2016).

A primeira e a terceira etapas são responsáveis pela interação do usuário com o sistema, permitindo ao mesmo a manipulação dos objetos. Neste trabalho, o processador e a interface gráfica (pré-processador e pós-processador) são, respectivamente, BemCracker2D e BEMLAB2D. Uma breve revisão acerca desses programas é descrita nas seções seguintes.

3.1 Sobre o programa BEMLAB2D

A interface gráfica BEMLAB2D (Delgado Neto et al., 2016) foi desenvolvida em MATLAB, sendo específica para geração de malhas (MEC/MEF/MESHLESS) e análise com o MEC através do programa BemCracker2D.

O BEMLAB2D foi criado baseando-se em Gomes (2000) que desenvolveu em linguagem C++ uma estrutura de dados utilizada para a representação de elementos de contorno bidimensionais, viabilizando a modelagem via programas de pré-processamento (Gomes, 2002 e 2012). O programa é formado por vários módulos responsáveis por realizar as atribuições de suas funções, que trabalham de forma independente, favorecendo a reutilização de dos dados e de suas aplicações (Delgado Neto et al., 2016). A interface gráfica do BEMLAB2D, bem como seus principais módulos, é mostrada na Figura 5.

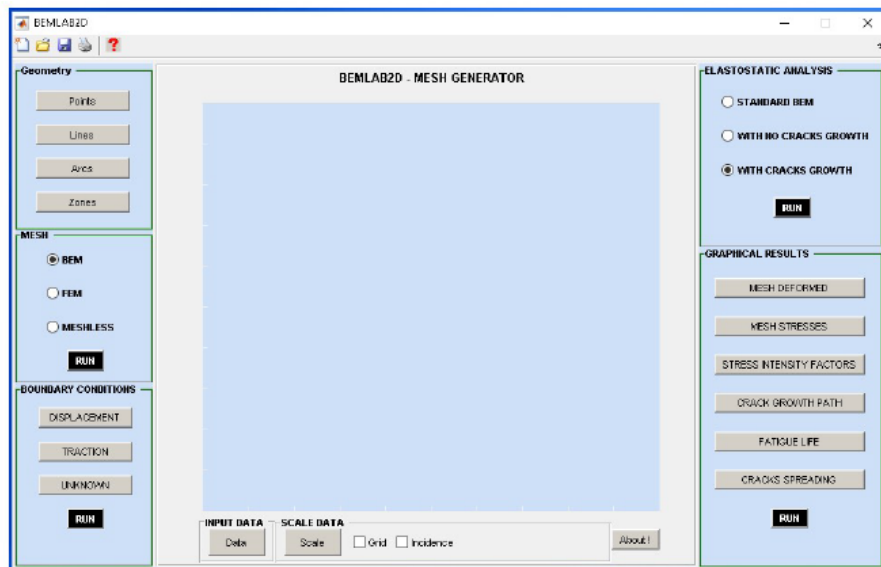


Figura 5 - Interface gráfica do BEMLAB2D (Fonte: Delgado Neto et. al., 2016).

O BEMLAB2D, por ser uma interface amigável, é de fácil entendimento e utilização. Seu ambiente gráfico é formado por diversos botões e menus de comando, pelos quais são inseridos os dados de entrada do problema (características geométricas e físicas). Após a inserção, estes são apresentados de forma gráfica na área de desenho presente na interface.

O modelo é, inicialmente, criado a partir da inserção de pontos que o delimitam (vértices principais, locais de apoio, locais onde se aplicam as forças, centro e extremidades de possíveis furos, pontos delimitadores da trinca, etc.). Posteriormente, estes pontos são ligados por linhas (segmentos retos) e por arcos (no caso de furos). Feito isso, é concebido o modelo geométrico do problema.

Parte-se então para a delimitação das zonas Mestre e furo. Delimitadas as zonas, é informada ao programa a quantidade respectiva de elementos no contorno, bem como nas faces da trinca. Nesta fase é criada a malha de elementos de contorno do problema.

Por fim, são inseridos os apoios e as solicitações (forças) externas e então pode-se fazer a análise elastostática. Esta análise pode ser feita de três formas: com MEC Padrão (para problemas elastostáticos convencionais sem trincas), com MEC Dual (para problemas envolvendo trincas sem/com propagação). Nos exemplos a serem trabalhados, será considerado o terceiro tipo de análise, uma vez que a finalidade deste trabalho está relacionada com o caminho de propagação da trinca.

O exemplo mostrado na Figura 6 é devido a Gomes et. al. (2016) e visa ilustrar a fase do pré-processamento. Nesta fase define-se a geometria do problema e atribuem-se as propriedades físicas da estrutura. Por fim, a malha de elementos de contorno é gerada no BEMLAB2D, interface gráfica responsável pelo pré-processamento. Na primeira imagem da Figura 6 tem-se o modelo da chapa com três furos e uma trinca; a segunda mostra o modelo geométrico do exemplo; a terceira e a quarta apresentam, respectivamente, a malha de elementos de contorno com as condições de contorno (apoios e solicitações externas) e um detalhe ampliado da discretização da trinca.

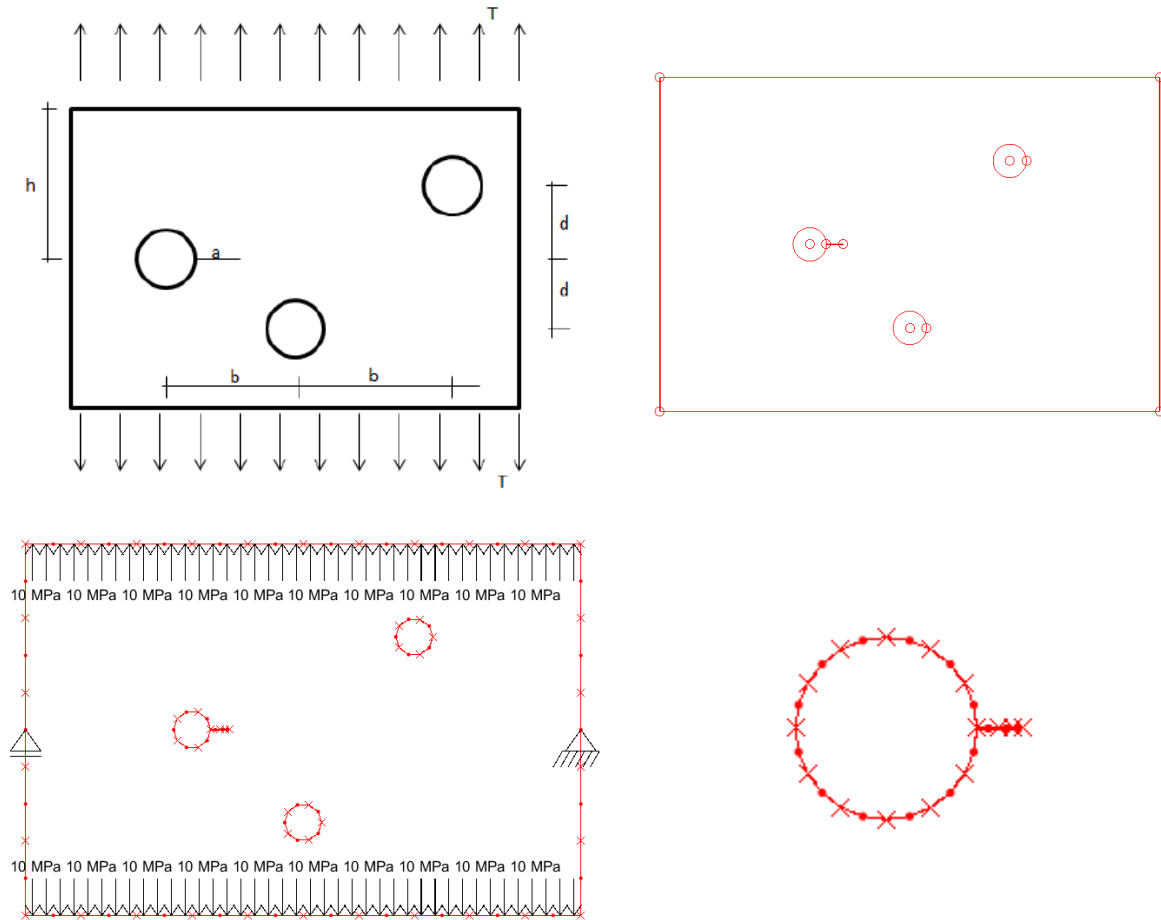


Figura 6 – (a) Modelo da placa retangular com furos e trinca (Fonte: Gomes et. al., 2016); (b) Modelo geométrico da placa; (c) Malha de elementos de contorno com as condições de contorno (apoios e solicitações externas); (d) Detalhe ampliado da discretização da trinca.

Na malha de elementos de contorno do exemplo é possível notar o uso de elementos de contorno quadráticos contínuos no contorno do domínio e elementos de contorno quadráticos descontínuos no contorno da trinca (detalhe ampliado).

3.2 O programa de análise BemCracker2D

O programa BemCracker2D foi desenvolvido a partir dos conceitos da Programação Orientada a Objetos (POO), em linguagem C++. Ele é direcionado à análise de problemas elastostáticos bidimensionais por meio do MEC e contém os seguintes módulos (Gomes et. al., 2016):

- MEC convencional (módulo I);
- MECD Sem Propagação (módulo II);
- MECD Com Propagação (módulo III)
 - Análise de Tensões com MEC
 - Avaliação de FITs (Integral J)

- Avaliação da Direção/Correção do crescimento da trinca (Critério de Tensão Máxima)
- Avaliação de Vida à Fadiga (Lei de Paris)

O BemCracker2D é fundamentado em Gomes (2000) no que diz respeito à modelagem do MEC convencional (emprego da equação de deslocamento e de elementos quadráticos contínuos) e em Aliabadi (2002) relativamente à técnica da análise incremental e à formulação dual.

4 ESTUDO DA MALHA

O exemplo estudado neste trabalho é devido a Miranda (2003) e refere-se a uma chapa com três furos e uma trinca. Se trata de um Compact Test Specimen (CTS) composto de aço carbono SAE 1020 cujo módulo de Young é $E=205$ GPa. O furo principal da placa possui 7 mm de diâmetro e sua posição varia em relação à trinca (nas distâncias A e B) nos modelos denominados CTS01, CTS02, CTS03 e CTS04, como mostra a Figura 7.

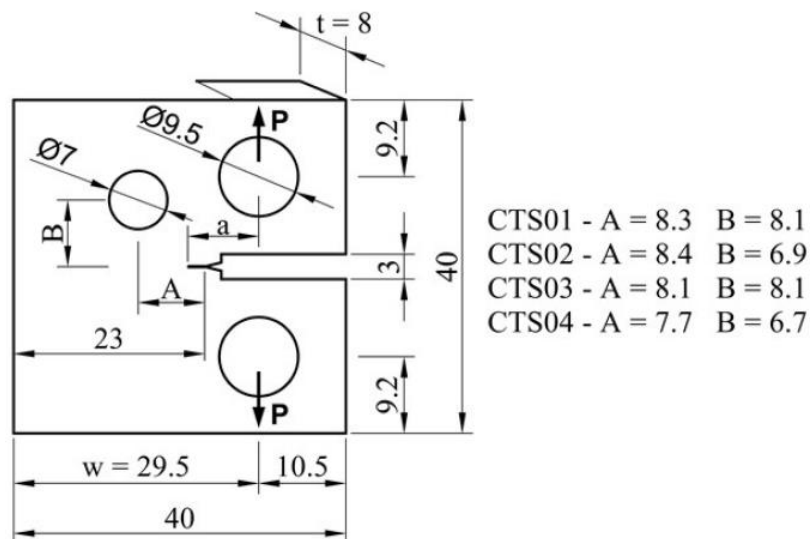


Figura 7 – Características geométricas do CTS (Fonte: Miranda, 2003).

A Figura 8 ilustra um modelo de malha do espécime gerado pelo BEMLAB2D para as coordenadas definidas pelo CTS04 com 16 elementos no furo principal e uma trinca inicial de 2.5 mm, sendo que, por questões de simplificação, as demais malhas não serão mostradas aqui. Para todas as malhas, a discretização da trinca foi feita com 4 elementos quadráticos descontínuos, por face, na razão de 0.4 – 0.3 – 0.2 – 0.1.

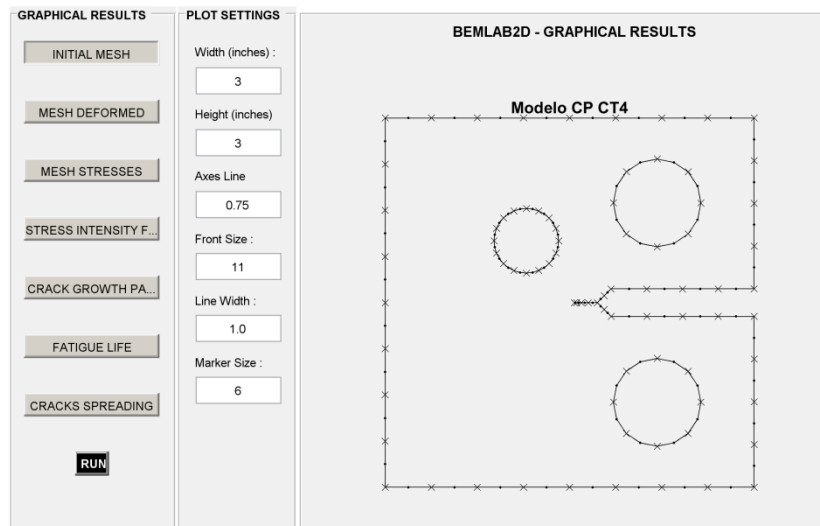


Figura 8 – Malha de elementos de contorno da placa.

A metodologia consiste em transladar o furo principal, conforme coordenadas especificadas nos quatro modelos da Figura 7, e avaliar o caminho de propagação nas vizinhanças de seu contorno. Para cada modelo, diferentes malhas de elementos de contorno, de tamanhos de elementos na ponta da trinca (avanço) e de incrementos são analisadas de acordo com as seguintes definições:

- Modelos: CTS01, CTS02, CTS03, CTS04;
- Número de elementos no furo principal: 8, 16 e 24, dando um total de 76, 84 e 92 em toda a malha, respectivamente;
- Avanço da trinca (mm): 0.25, 0.50, 0.75 e 1.00.

É importante destacar que o número de incrementos foi definido por tentativa e erro, a partir do “estouro” dos FITs na vizinhança do contorno do furo, considerando aquele imediatamente inferior no momento da variação brusca do KI, bem como respeitando o raio mínimo da Integral-J pelo programa de 0.25 mm. A Tabela 1 apresenta os números de incrementos por avanço para cada modelo.

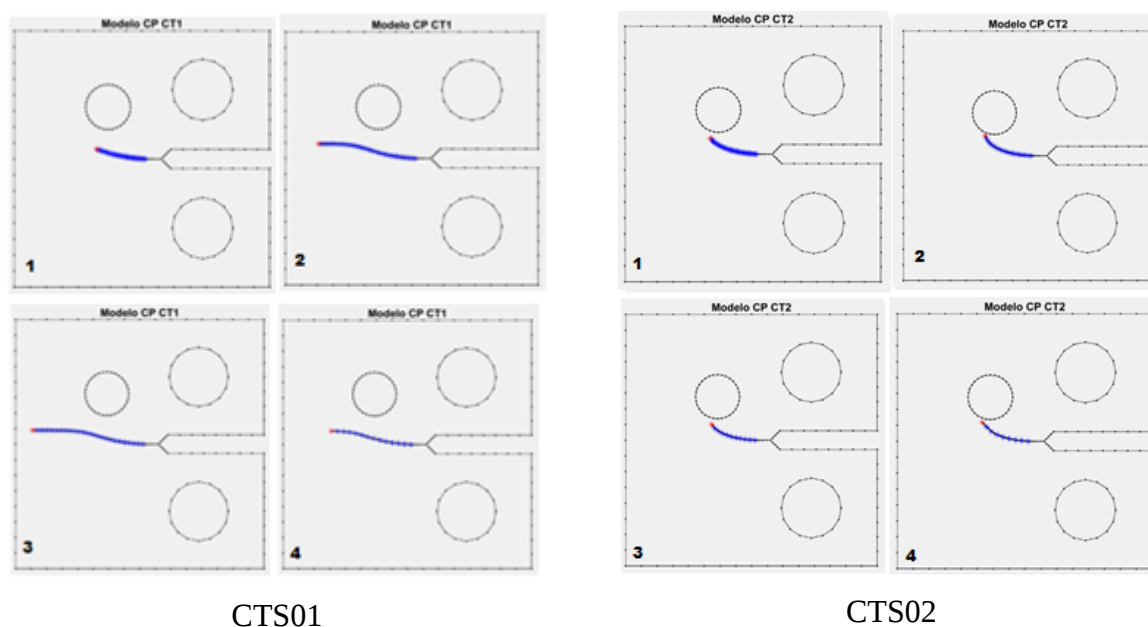
Tabela 1 – Número de Incrementos para cada modelo.

Modelos	Avanço (mm) / Incrementos			
	0.25	0.50	0.75	1.00
CTS01	24	24	24	13
CTS02	24	17	10	8
CTS03	24	24	24	12
CTS04	24	14	9	6

4.1 Resultados

O caminho de propagação da trinca, obtido com o BemCracker2D para os 4 modelos da malha com 16 elementos no furo principal e por avanço da trinca, é ilustrado na Figura 9, onde pode-se perceber que, independente da malha, nos modelos CTS01 e CTS03 o caminho de propagação se afasta do furo, enquanto nos modelos CTS02 e CTS04 se aproxima. Este comportamento era esperado e justificado pela proximidade do furo principal com o caminho, o que é refletido pelo número de incrementos utilizados para cada modelo e pelo avanço da trinca, conforme ilustrado na Tabela 1. As malhas para 8 e 24 elementos no furo principal não serão mostradas aqui por não alterarem o número de incrementos.

Para as figuras seguintes (Figuras 10 a 13) apresentamos o gráfico dos Fatores de Intensidade de Tensão (KI) obtidos com o BemCracker2D versus o experimental, devido a Miranda (2003), para cada avanço e por conjunto de malhas de elementos (8-16-24) no furo principal do modelo CTS04. O número de incrementos referência é aquele obtido com o experimental, que foi calculado com um avanço aproximado de 1 mm.



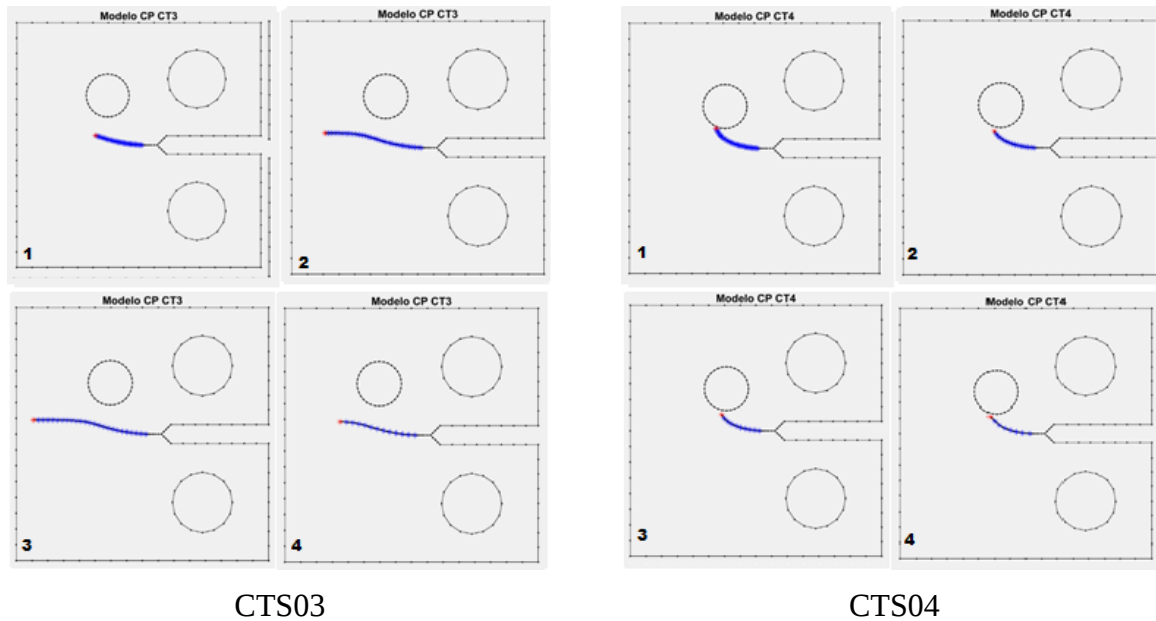


Figura 9 – Caminho de Propagação da Malha com 16 elementos no furo: 1- 0.25 mm; 2- 0.50 mm; 3- 0.75 mm; 4- 1.00 mm.

Na Figura 10, observamos que todas as malhas se confundem devido ao tamanho do avanço muito pequeno e, ainda, que as mesmas convergem para um KI experimental da ordem de 10 com cerca de 30 incrementos.

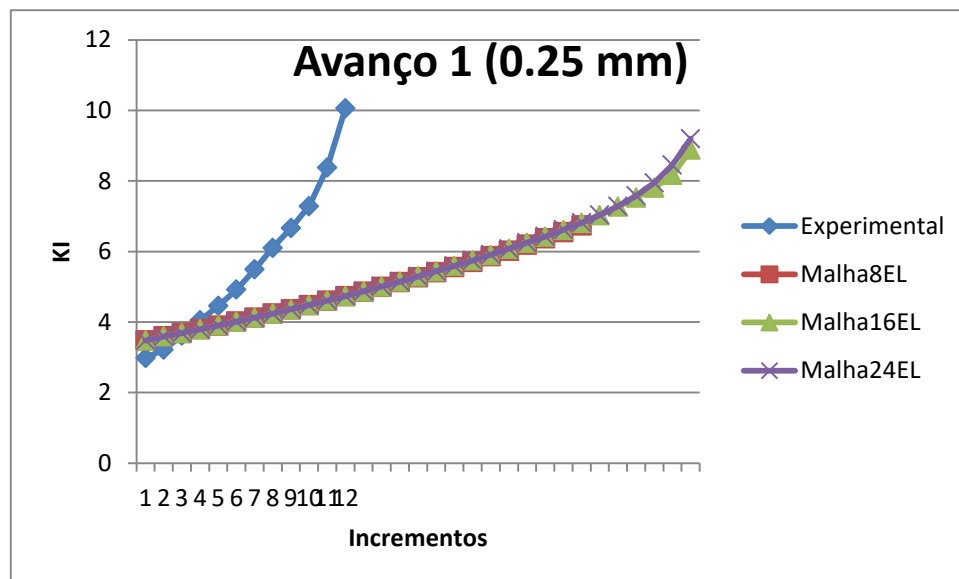


Figura 10 – Modelo CTS04 com Avanço 1

Na Figura 11, temos uma aproximação maior das malhas com relação à experimental, no entanto ainda com um número de incrementos maior do que 12 e buscando a convergência próxima dos 16 incrementos.

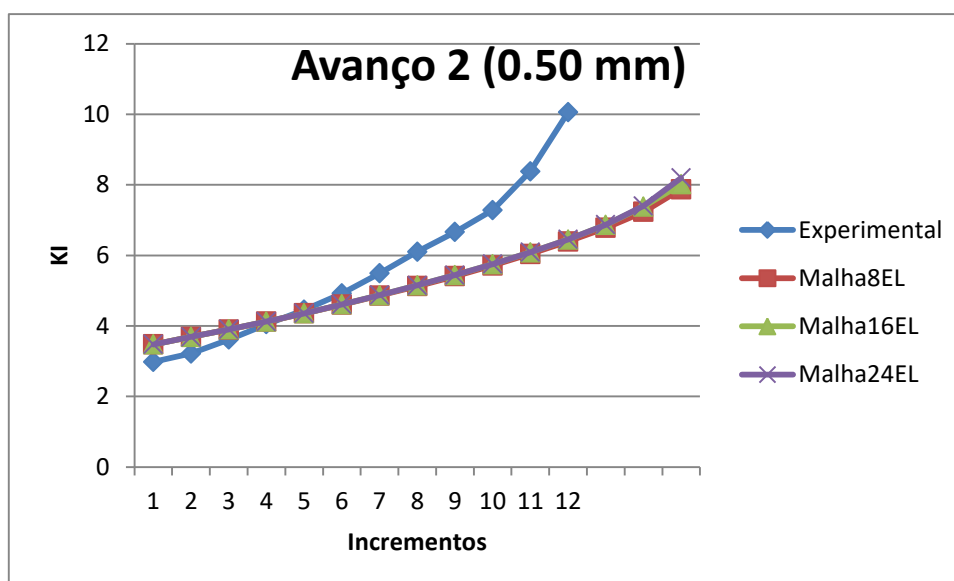


Figura 11 – Modelo CTS04 com Avanço 2

Na Figura 12, observamos que o tamanho do avanço numérico está mais próximo do experimental, onde as malhas com 8 e 16 elementos apresentam melhores resultados em relação ao experimental.

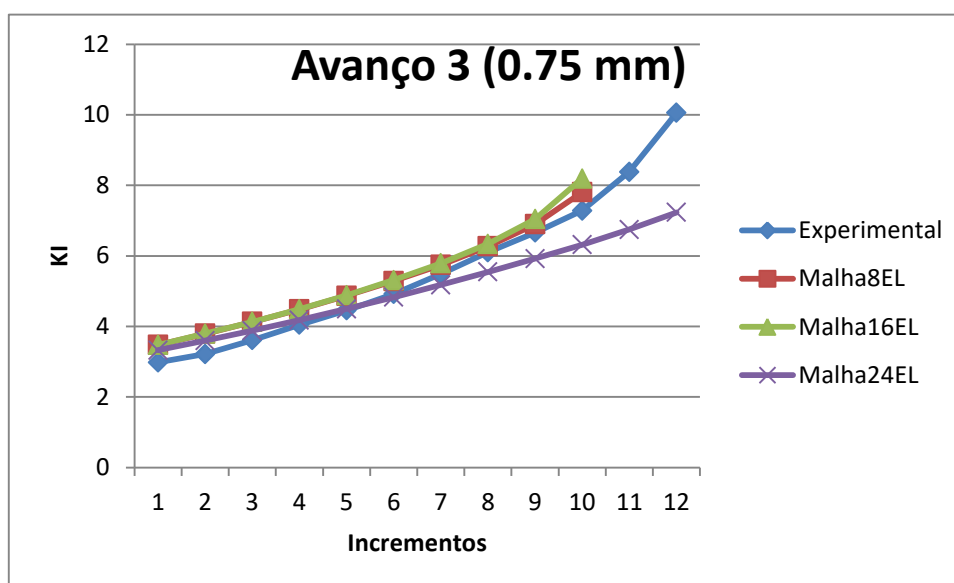


Figura 12 – Modelo CTS04 com Avanço 3

Na Figura 13, observamos o mesmo comportamento entre a malha com 8 elementos e o experimental, inclusive em numero de incrementos, ao passo que as demais malhas se confundem e se afastam da experimental.

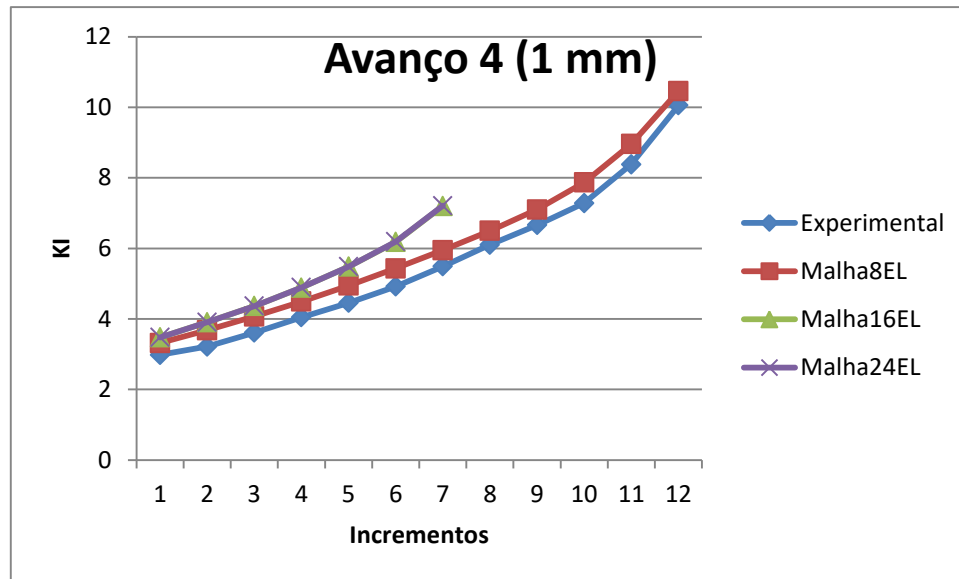


Figura 13 – Modelo CTS04 com Avanço 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como pôde ser visto, o caminho de propagação se afasta do furo principal nos modelos CTS01 e CTS03 e se aproxima nos demais. Isso acontece porque nos casos CTS02 e CTS04 o furo está mais próximo à trinca e, por isso, o caminho de propagação da mesma vai se aproximar do furo principal. Analisando o modelo CTS04 por avanço (1- 0.25 mm, 2- 0.50 mm, 3- 0.75 mm e 4- 1.00 mm) e por malha (8, 16 e 24 elementos no furo principal), percebeu-se que nos avanços 1 e 2 o KI aproximava-se de 10 (experimentalmente e pelo BemCracker2D), porém o número de incrementos nas malhas modeladas era bem superior ao valor do número experimental, que era aproximadamente 12.

Para o avanço 3, notou-se que nas malhas de 8 e 16 elementos, o KI e o número de incrementos eram bem próximos aos experimentais. Já para o avanço 4, a malha de 8 elementos no furo principal foi a que mais se aproximou dos valores experimentais (comparando-a com todos os outros avanços) tanto no valor de KI, quanto no número de incrementos. Neste caso, as demais malhas divergiram em relação aos resultados experimentais.

Portanto, notou-se que o parâmetro avanço, que é o tamanho do elemento na ponta da trinca, influencia muito na qualidade dos resultados da malha, exemplificando-se o KI. Já o parâmetro da quantidade de elementos no furo principal não foi muito relevante na qualidade da malha, uma vez que no caso do avanço 4 foi a malha 8 que apresentou os melhores resultados. Foi notado também que o aumento do avanço possibilita a diminuição do número de incrementos na ponta da trinca, possibilitando a obtenção de valores que se aproximam dos reais/experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

Aliabadi, M. H. The Boundary Element Method, Vol. 2, Applications in Solids and Structures. Chippenhams: John Wiley & Sons, 2002.

Barsom, J.M. e Rolfe, S.T., Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice-Hall, New Jersey, 1987.

Blandford, G. E.; Ingraffea, A. R.; Liggett, J. A. Two-Dimensional Stress Intensity Factor Computations Using the Boundary Element Method. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 17, p. 387-404, 1981.

Borges, M. L. M. Análise de propagação de trincas por meio da mecânica da fratura. 2010. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Brebbia, C. A., Dominguez, J. Boundary Elements, An Introductory Course. Boston : Computational Mechanics Publications, 1989.

Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4th ed., Martinus Nijhoff 1986.

Carvalho, C. V. A., “Simulação Bidimensional Adaptativa por Elementos Finitos de Processos de Fraturamento por Fadiga”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 1998.

Delgado Neto, Alvaro M.(2017). BEMLAB2D: Interface Gráfica de Modelagem, Visualização e Análise com Elementos de Contorno – Uma Aplicação em Problemas Elastostáticos. Dissertação de Mestrado, Publicação 005A/2017, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 94p.

Delgado Neto, A. M. at. al. BEMLAB2D: GUI modeling, visualization and analysis with boundary element – an application in elastostatic problems. In: XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 37., 2016, Brasília. Anais...Brasília: Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia, 2016.

Erdogan, F. e Sih, G.C., “On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear”, Journal of Basic Engineering, v. 85, 1963, pp.519-527.

Gomes, G. Aplicação dos métodos de elementos de contorno e reciprocidade dual em problemas de plasticidade 2D orientada a objeto. 2006. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília.

Gomes, G., 2000, Estrutura de Dados para Representação de Modelos Bidimensionais de Elementos de Contorno. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil.

Gomes, G. at. al. Modelagem e visualização de trincas 2D usando equação integral de contorno dual. In: XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON

COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 37., 2016, Brasília. Anais...Brasília: Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia, 2016.

Henriques, A. A. R. Aplicação de novos conceitos de segurança no dimensionamento do betão estrutural. 1998. 502 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto.

Hussain, M.A., PU, S.U., E Underwood, J. “Strain Energy Release Rate for a Crack under Combined Mode I and II”, ASTM STP 560, 1974, pp. 2-28.

Irwin, G. R..Fracture dynamics. Fracturing of metals. Cleveland, OH: American Society for Metals; 1948. pp. 147-166.

Miranda, A. C. de O. Propagação de trincas por fadiga em geometrias 2D complexas sob cargas cíclicas variáveis. 2003. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Portela, A., Aliabadi, M. H. and Rooke, D. P., 1992, The Dual Boundary Element Method: Effective Implementation for Crack Problems. International Journal for Numerical Method in Engineering, Vol. 33, pp. 1269-1287.

Portela, A., Aliabadi, M. H., and Rooke, D. P., 1993, Dual boundary element incremental analysis of crack propagation, Computer and Structures, Vol. 46, pp. 237-247.

Sih, G.C., “Strain-Energy-Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems”, International Journal of Fracture Mechanics, v. 10, 1974, pp. 305-321.

Strohaecker, T. R. e Bastian, F. L., “Avaliação do Efeito do Hidrogênio Sobre o Comportamento à Fratura de um Aço de Alta Resistência Mecânica”, Anais dos Painéis do Encontro sobre Gases em Metais e Ligas, São Carlos, SP, 1986.

William, G.R., “On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack”, Journal of Applied Mechanics, v. 24, 1957, pp. 109-114.