

DETERMINAÇÃO DE FATORES DE INTENSIDADE DE TENSÕES (SIFs) EM ESPÉCIMES SE(T) FIXADOS POR PINOS E GARRAS¹

Mario S. G. Chiodo²
Claudio Ruggieri³

Resumo

Trabalhos recentes demonstram que valores de tenacidade medidos experimentalmente por meio de espécimes SE(T) são mais aplicáveis à caracterização das condições de fratura de tubulações e dutos pressurizados, vasos de pressão e estruturas cilíndricas em relação à espécimes convencionais sob flexão SE(B) ou compactos C(T) contendo trincas profundas ($a/W \geq 0.5$). Entretanto, apesar da potencialidade de utilização do espécime SE(T) em procedimentos de análise de defeitos, este corpo-de-prova e suas técnicas de ensaio ainda não são completamente padronizados. Em particular, não há ainda estudos plenamente sistematizados para a determinação dos fatores de intensidade de tensões (SIFs) para espécimes SE(T) os quais afetam diretamente a determinação da componente elástica da Integral J em procedimentos experimentais para medição das curvas de resistência $J-R$. Como um passo nesta direção, este trabalho apresenta um estudo numérico utilizando o método dos elementos finitos para a determinação dos fatores de intensidade de tensões para espécimes SE(T) com diversas configurações geométricas e submetidos a diferentes condições de fixação/carregamento. O objetivo central é fornecer funções polinomiais representativas dos SIFs adimensionais $F(a/W)$ as quais permitirão realizar facilmente o cálculo do fator de intensidade de tensões de corpos-de-prova SE(T) para qualquer geometria e condição de carregamento.

Palavras-chave: Fator de intensidade de tensões; Espécimes SE(T); Ensaio de tenacidade; Elementos finitos.

STRESS INTENSITY FACTORS FOR PIN-LOADED AND CLAMPED SE(T) SPECIMENS

Abstract

Recent studies reveal that toughness values measured using SE(T) specimens provide better characterization of fracture conditions for pressurized pipelines, pressure and cylindrical vessels than conventional fracture specimens under bending, such as SE(B) specimens, or compact C(T) specimens having deep cracks ($a/W \geq 0.5$). However, this specimen configuration and its laboratory testing are not yet standardized. In particular, there are no broad studies addressing the determination of stress intensity factors for SE(T) specimens which enters directly in calculations of the elastic component for the J Integral used in experimental measurements of $J-R$ curves. As a step in this direction, this work provides a numerical study based upon the finite element method to determine the stress intensity factors (SIFs) for SE(T) specimens with varying crack configurations and subjected to different loading conditions. The primary objective is to derive the fitting functions fully describing the nondimensional SIFs, $F(a/W)$, which enable easy calculations of the stress intensity factors for SE(T) specimens.

Key words: Stress intensity factor; SE(T) specimens; Fracture mechanics tests; Finite elements.

¹Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

²Graduando do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, mario.sgc@gmail.com

³Prof. livre docente do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, claudio.ruggieri@poli.usp.br

1 INTRODUÇÃO

Aços estruturais ferríticos (tais como, por exemplo, aços para vasos de pressão) geralmente exibem substancial aumento da tenacidade à fratura, caracterizada pela Integral J sobre os milímetros iniciais ($\Delta a \approx 3 \sim 5$ mm) de propagação estável (extensão dúctil) de uma trinca. Este crescimento de trinca é freqüentemente acompanhado por um grande aumento da plasticidade do material em relação à uma trinca estacionária. Conseqüentemente, uma estrutura operando sob regime dúctil e contendo um defeito continua a suportar elevados níveis de carga mesmo após a iniciação e propagação estável da fratura. Procedimentos avançados para a avaliação de defeitos estruturais objetivam incorporar quantitativamente este aumento da tenacidade do material durante a extensão dúctil de trincas através da utilização de curvas de resistência à propagação da fratura J vs. Δa (as quais também são usualmente denominadas curvas J - R).

Ensaio de corpos-de-prova à fratura para a medição das curvas de resistência consistentemente revelam um efeito significativo do tamanho (absoluto) e da geometria do corpo-de-prova, tamanho relativo da trinca (a/W) e modo de carregamento (flexão vs. tração) sobre as curvas J - Δa .⁽¹⁾ Estes efeitos observados sobre as curvas J - R têm motivado o desenvolvimento de procedimentos de engenharia mais acurados para avaliação de defeitos em componentes estruturais sob baixos níveis de triaxialidade (*crack-tip constraint*). Alguns destes procedimentos advogam a utilização de corpos-de-prova laboratoriais mecanicamente similares ao componente estrutural contendo um defeito; desta forma, o nível de triaxialidade do espécime corresponde ao nível de triaxialidade do componente estrutural garantindo, portanto, a condição de similitude para ambas as configurações geométricas. Em particular, Cravero e Ruggieri⁽²⁾ demonstraram recentemente que valores de tenacidade obtidos por meio de espécimes SE(T) – *single edge notch specimens under tension* – são mais aplicáveis à caracterização das condições de fratura de tubulações e dutos pressurizados, vasos de pressão e estruturas cilíndricas em relação à espécimes convencionais sob flexão SE(B) – *single edge notch under bending* – ou compactos C(T) – *compact tension* – contendo trincas profundas ($a/W \geq 0.5$). Devido à similaridade das condições de carregamento entre um espécime SE(T) e um duto contendo um defeito planar superficial, os campos de tensões e deformações os quais controlam o micromecanismo operativo de fratura para ambas as configurações também são similares. Entretanto, apesar da potencialidade de utilização do espécime SE(T) em procedimentos de análise de defeitos demonstrada por Cravero e Ruggieri,⁽²⁾ este corpo-de-prova e suas técnicas de ensaio ainda não são completamente padronizados. Em particular, não há ainda estudos plenamente sistematizados para a determinação dos fatores de intensidade de tensões (SIFs) de espécimes SE(T) os quais afetam diretamente a determinação da componente elástica da Integral J em procedimentos experimentais para medição das curvas J - R .

Como um passo nesta direção, este trabalho apresenta um estudo numérico por intermédio do método dos elementos finitos para a determinação dos fatores de intensidade de tensões (K_I ou *stress intensity factor* – SIF) para espécimes SE(T) com diversas configurações geométricas e submetidos a diferentes condições de fixação/carregamento. O objetivo central é fornecer funções polinomiais representativas dos SIFs adimensionais $F(a/W)$ as quais permitirão realizar facilmente o cálculo do fator de intensidade de tensões de corpos-de-prova SE(T) para qualquer geometria e condição de carregamento.

2 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES, K , EM COMPONENTES ESTRUTURAIS CONTENDO TRINCAS

Esta seção apresenta os elementos centrais associados ao procedimento para determinação do parâmetro K em componentes estruturais contendo trincas com aplicação direta sobre a determinação dos SIFs para espécimes SE(T). A apresentação detalhada dos fundamentos da mecânica da fratura elástica linear (sobre a qual os procedimentos utilizados para a determinação de K são baseados) está além do escopo deste breve trabalho. Entretanto, alguns conceitos fundamentais serão introduzidos de forma a suportar os resultados obtidos por intermédio das análises descritas adiante na Seção 4.

A caracterização monoparamétrica das condições na vizinhança de uma trinca é diretamente associada ao fator de intensidade de tensões, K , como uma medida da *amplitude* da singularidade representada pela ponta da trinca. Sob Modo I de deformação, existe uma relação unívoca entre o campo de tensões, σ_{ij} ($i,j=1,2,3$), e K_I da forma

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (1)$$

onde (r, θ) representam coordenadas polares centradas na ponta da trinca e f_{ij} são funções trigonométricas.⁽³⁾

Dentro do contexto de comportamento à fratura sob regime elástico linear, é possível estabelecer uma conexão entre a taxa de variação da energia potencial de um sólido ou componente estrutural contendo uma trinca e o fator de intensidade de tensões. Sob estado plano de deformações (EPD), esta relação resulta

$$J = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{E} \quad (2)$$

onde E é o módulo de elasticidade longitudinal, ν é o coeficiente de Poisson e a Integral J é expressa por intermédio da integral de linha (Figura 1)

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (3)$$

onde W é a densidade de energia de deformação, T_i são as componentes do vetor de tração agente sobre o contorno Γ , u_i são as componentes do vetor de deslocamentos e ds é um comprimento infinitesimal ao longo de Γ .⁽³⁾

É importante destacar que a validade do fator de intensidade de tensões, K , e conseqüentemente da sua relação com a Integral J expressa pela Eq. (2) é restrita a condições de plasticidade (ou escoamento) limitado na ponta da trinca. A satisfação de tal condição é obtida impondo-se dimensões máximas para o tamanho da zona plástica na ponta da trinca. O critério mais largamente utilizado deriva dos requisitos estabelecido pela ASTM E399⁽⁴⁾ o qual estabelece

$$a, (W - a), B \geq 2.5 \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (4)$$

onde a é o comprimento da trinca, W é a largura do espécime ou componente, B é a sua espessura e σ_{ys} é a tensão de escoamento do material. A condição especificada pela Eq. (4) implicitamente define que o raio da zona plástica à frente da trinca seja no máximo 1/25 da dimensão da trinca a , do ligamento remanescente $(W-a)$ ou da espessura.

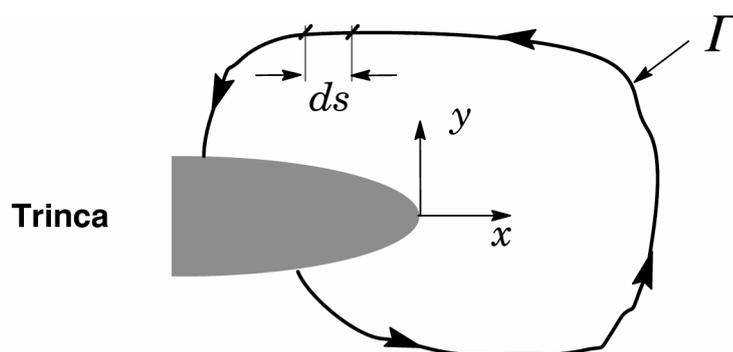


Figura 1. Contorno arbitrário ao redor de uma trinca para definição da Integral J .

Há diversos métodos para determinação do fator de intensidade de tensões, K , em sólidos elásticos contendo trincas. Os trabalhos iniciais focalizaram sobre a determinação de K para diversas configurações geométricas baseada em conceitos de teoria de elasticidade e utilização de funções complexas de tensões.⁽³⁾ Alternativamente, uma maneira muito mais simples e conveniente é a utilização do método de elementos finitos para a obtenção de soluções refinadas do campos de tensões e deformações para avaliação da Integral J expressa pela Eq. (3) anterior. Desta forma, uma vez calculado o valor de J para cada configuração sob análise, a correspondente determinação do parâmetro K torna-se trivial pela simples aplicação da relação definida na Eq. (2) sob condições de validade do critério fornecido pela Eq. (4). A seção seguinte apresenta detalhes da estratégia utilizada para determinação de J e do parâmetro K em espécimes SE(T).

3 SOLUÇÕES NUMÉRICAS

A simulação numérica refinada por intermédio do método dos elementos finitos representa um ingrediente central à correta e acurada determinação dos fatores de intensidade de tensões para espécimes SE(T) com configurações geométricas diversas e submetidos a diferentes condições de carregamento. Tais análises fornecem os campos de tensões, deformações e deslocamentos a partir dos quais os valores da Integral J serão extraídos. A matriz de análise considera espécimes SE(T) submetidos a diferentes condições de carregamento (pino vs. garra) e relações diversas de tamanho da trinca sobre largura, $a/W=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ e 0.8 , e distância do ponto de aplicação da carga sobre largura, $H/W=2, 4, 6, 8, 10, 20, 50$. A geometria dos corpos-de-prova analisados é representada pelo esquema apresentado na Figura 2 onde SE(T)_P denota carregamento por pino e SE(T)_C denota carregamento por garra. As análises adotam ainda uma relação convencional entre largura e espessura, $W/B=2$, com $B=25.4$ mm (1 pol.); tais dimensões correspondem a um corpo-de-prova com espessura “padrão” 1-T (é importante destacar, entretanto, que as análises conduzidas são bidimensionais e, portanto, uma espessura unitária, $B=1$ mm é adotada em todos os cálculos).

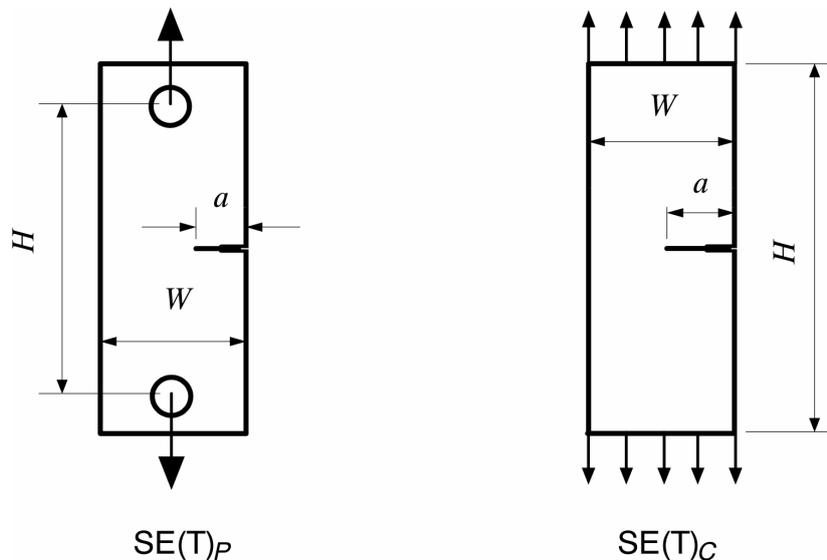


Figura 2. Geometria dos corpos-de-prova SE(T) carregados por pino e garra.

As análises numéricas lineares 2D sob estado plano de deformações (EPD) foram conduzidas utilizando-se o programa de elementos finitos WARP3D (5). O procedimento numérico para determinação da integral expressa pela Eq. (3) utiliza uma estratégia de integral de domínio implementada em WARP3D. Para os modelos analisados, o valor da Integral J é determinado para domínios de integração definidos fora da região próxima à ponta da trinca, onde intensa deformação plástica e carregamento não proporcional invalidam a sua definição; os valores calculados, portanto, retêm uma forte independência do caminho de integração. Estes valores de J apresentam grande concordância com os valores obtidos por esquemas de avaliação experimental (e.g., método η da ASTM E1820⁽⁶⁾).

A Figura 3 apresenta o modelo de elementos finitos construído para o corpo-de-prova SE(T) com $a/W = 0.5$; os demais modelos possuem configurações similares. Condições de simetria permitem a construção de somente metade da amostra com vínculos apropriados impostos sobre o ligamento ($W - a$) da trinca. A metade simétrica do modelo possui 1400 elementos isoparamétricos 3D de 8 nós constituindo, portanto, uma única camada sobre o plano $X-Y$ do corpo-de-prova. As condições correspondentes ao estado plano de deformações são obtidas através da imposição de deslocamentos (vínculos) $w = 0$ na direção Z sobre cada nó do modelo. A aplicação do carregamento é feita através de deslocamentos nodais impostos na região do ponto de aplicação da carga na Figura 3. A malha de elementos finitos na região da ponta da trinca possui uma resolução bastante refinada para modelar adequadamente os campos de tensões e deformações. Detalhes adicionais da modelagem utilizada podem ser vistos em Chiodo e Ruggieri.⁽⁷⁾

As análises consideraram ainda o efeito da excentricidade do ponto de aplicação da carga sobre o valor do parâmetro K para o caso dos espécimes SE(T)_P. A aplicação de carga excêntrica neste espécime introduz um momento fletor adicional positivo ou negativo (dependendo do valor da excentricidade em relação à ponta da trinca) com conseqüentes implicações (aumento ou diminuição) sobre o fator de intensidade de tensões. A Figura 4 ilustra a configuração geométrica de um espécime SE(T) carregado por pino onde c representa a excentricidade de carga. Nas análises presentes, foram considerados valores de $c = \pm 0.05W$ e $\pm 0.10W$.

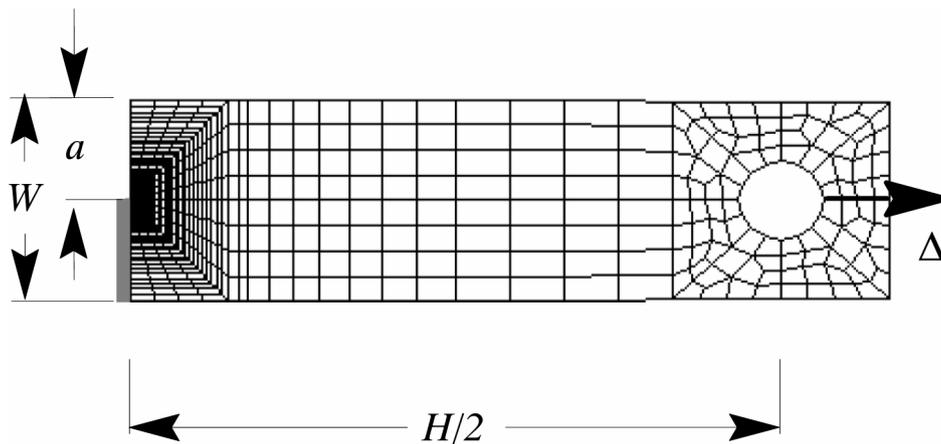


Figura 3. Modelo de elementos finitos para o corpo-de-prova SE(T)_P com $a/W=0.5$.

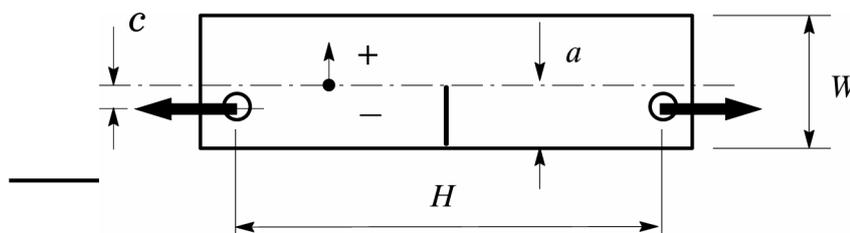


Figura 4. Excentricidade de carga para o corpo-de-prova SE(T)_P.

4 RESULTADOS

As Figs. 5-7 apresentam os resultados-chave obtidos diretamente das extensivas análises conduzidas neste trabalho e que permitem obter os fatores de intensidade de tensões para corpos-de-prova SE(T) com configurações geométricas diversas ($0.1 \leq a/W \leq 0.7$ e $2 \leq H/W \leq 50$). Os valores dos SIFs para todos os casos são apresentados na forma

$$F(a/W) = \frac{K_I B \sqrt{W}}{P} \quad (5)$$

onde $F(a/W)$ representa um fator de intensidade de tensões *adimensional*.

A Fig. 5 apresenta a variação de $F(a/W)$ com a relação a/W e diversos valores de H/W para o espécime SE(T) carregado por pino. O resultado importante associado a este corpo-de-prova é a sua completa independência de $F(a/W)$ em relação ao comprimento H . Em contraste, a Fig. 6 revela que o espécime SE(T) exibe grande dependência sobre o valor de H/W , particularmente para comprimentos maiores de trinca ($a/W \geq 0.5$). A Fig. 7 apresenta a variação de $F(a/W)$ em função da relação a/W e diversos valores da excentricidade de carga, c , para o espécime SE(T) carregado por pino. Como poderia ser antecipado, valores negativos da

excentricidade c aumentam o momento fletor agente sobre a trinca com conseqüente incremento do SIF para um mesmo nível de carga, P .

Para facilitar o cálculo dos SIFs para espécimes SE(T), foi realizado um ajuste não linear (por intermédio do método dos mínimos quadrados) de todos os resultados numéricos derivados das análises apresentadas. As curvas foram ajustas através de funções polinomiais de grau 5 expressas por

$$F(a/W) = \beta_0 + \beta_1(a/W) + \beta_2(a/W)^2 + \beta_3(a/W)^3 + \beta_4(a/W)^4 + \beta_5(a/W)^5 \quad (5)$$

onde os coeficientes do polinômio são apresentados na Tabela 1. O caso SE(T)_P com $c = 0$ corresponde aos resultados das análises apresentadas na Figura 5.

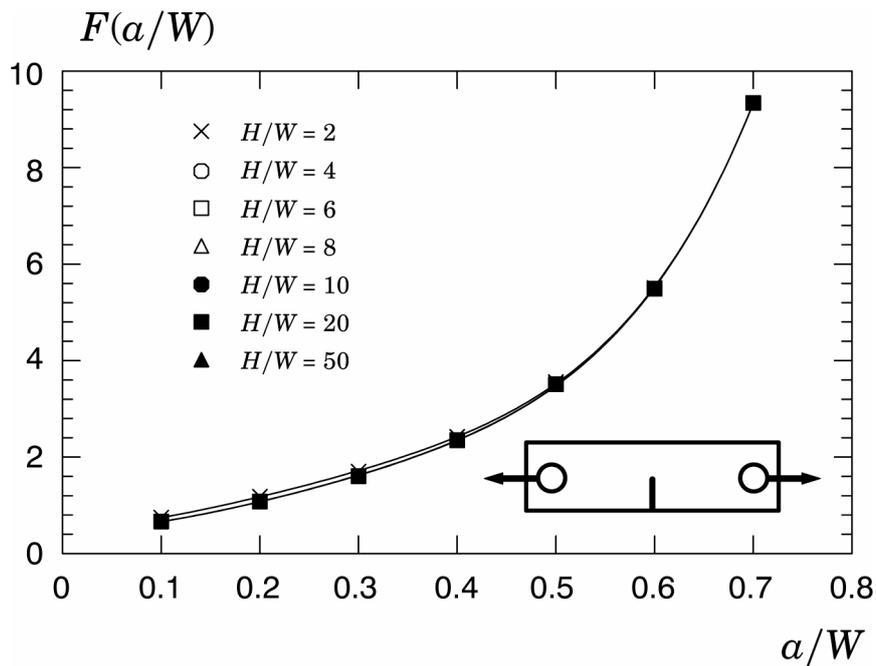


Figura 5. Variação de $F(a/W)$ em função de a/W e diferentes valores de H/W para o espécime SE(T) carregado por pino.

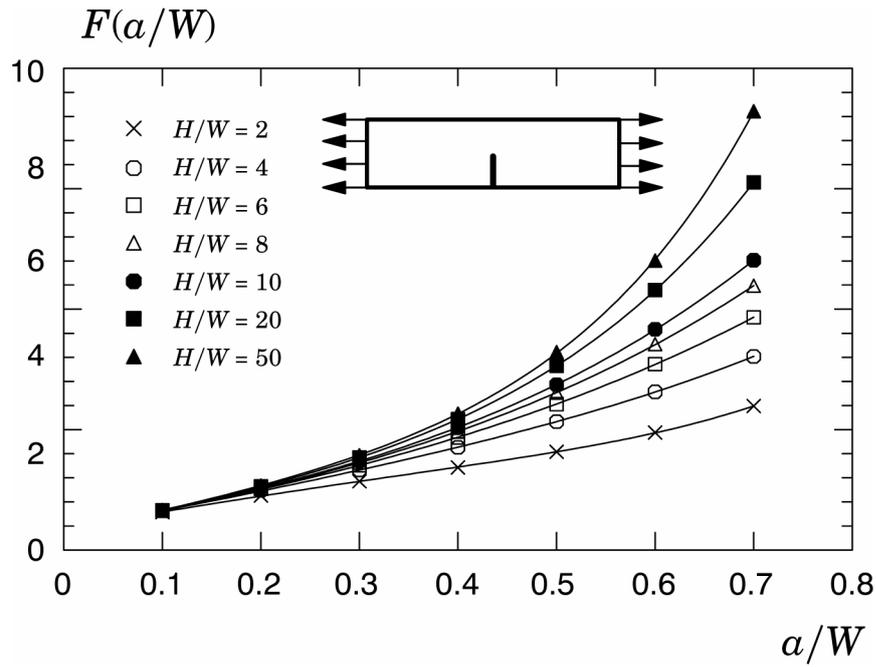


Figura 6. Variação de $F(a/W)$ em função de a/W e diferentes valores de H/W para o espécime SE(T) carregado por garra.

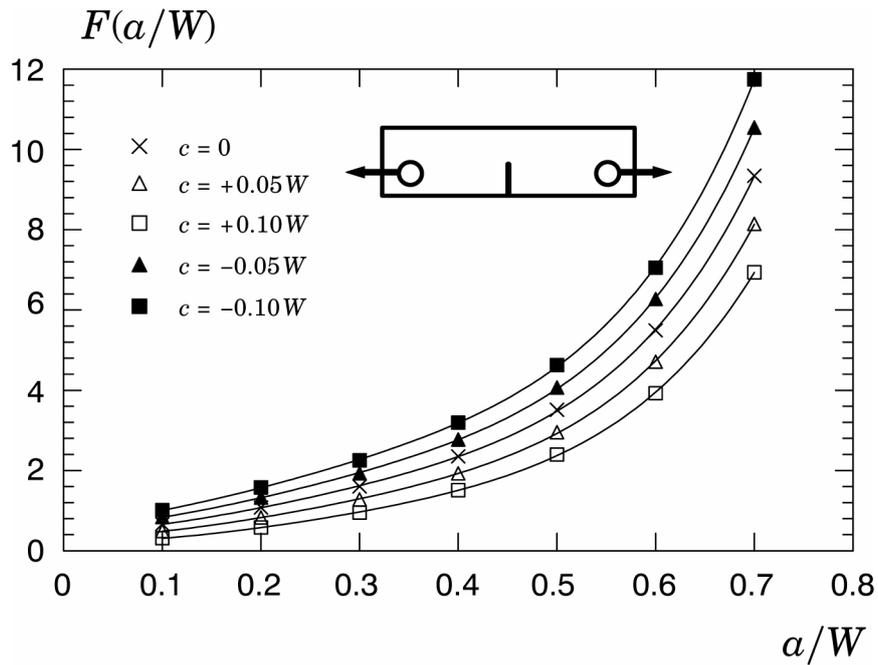


Figura 7. Variação de $F(a/W)$ em função de a/W e diferentes valores da excentricidade c para o espécime SE(T) carregado por pino.

Tabela 1. Valores dos coeficientes β para o cálculo dos SIFs de espécimes SE(T).

| Espécime | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 | |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| SE(T) _C | H/W=2 | 0.2390 | 4.7685 | -10.8390 | 22.8483 | -25.1329 | 13.8204 |
| | H/W=4 | 0.2565 | 4.4604 | -7.0538 | 18.6928 | -19.4703 | 9.2523 |
| | H/W=6 | 0.2681 | 4.1916 | -4.5098 | 12.5442 | -6.4726 | 0.7304 |
| | H/W=8 | 0.2852 | 3.8168 | -1.4522 | 3.5078 | 9.4071 | -7.8491 |
| | H/W=10 | 0.2832 | 3.8497 | -1.4885 | 4.1716 | 9.9094 | -7.4188 |
| | H/W=20 | 0.2682 | 4.1767 | -3.8639 | 14.9622 | -7.9416 | 9.4143 |
| | H/W=50 | 0.0746 | 8.2866 | -34.2306 | 117.6196 | -165.6966 | 104.8546 |
| SE(T) _p | c=0 | -0.0720 | 11.6294 | -61.6928 | 223.4007 | -355.5166 | 239.3969 |
| | c=+0.10W | -0.1686 | 7.9465 | -45.7298 | 171.8898 | -277.5427 | 188.2173 |
| | c=+0.05W | -0.1202 | 9.7885 | -53.7084 | 197.6581 | -316.5813 | 213.8444 |
| | c=-0.05W | -0.0220 | 13.4455 | -69.4658 | 248.5322 | -393.6637 | 264.5494 |
| | c=-0.10W | 0.0267 | 15.2810 | -77.3966 | 274.1506 | -432.4923 | 290.0683 |

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou os resultados de extensivas e refinadas análises para espécimes SE(T) com diversas geometrias e submetidos a diferentes condições de fixação/carregamento os quais permitem determinar acuradamente e de forma simples os fatores elásticos de intensidade de tensões (SIFs). Tais análises resultaram em funções polinomiais representativas dos SIFs adimensionais $F(a/W)$ as quais descrevem completamente a variação do parâmetro K_I em função de a/W .

Agradecimentos

Esta investigação é patrocinada pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Estado de São Paulo – FAPESP (Projeto Temático 03/02735-6 e bolsa de iniciação científica 05/52877-7)

REFERÊNCIAS

1. RUGGIERI, C.; DODDS, R. H. *Numerical Modeling of Ductile Crack Growth in 3-D Using Computational Cell Elements*. International Journal of Fracture, Vol. 82, pp. 67-95, 1996.
2. CRAVERO, S.; RUGGIERI, C. *Correlation of fracture behavior in high pressure pipelines with axial flaws using constraint designed test specimens - Part I: Plane-Strain Analyses*. Engineering Fracture Mechanics, V. 72, p. 1344-1360, 2005.
3. ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications - 3rd Edition*, CRC Press, New York, 2005.
4. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. ASTM E-399, 1996.
5. KOPPENHOEFER, K., GULLERUD, A., RUGGIERI, C., DODDS, R. AND HEALY, B. *WARP3D: Dynamic Non-linear Analysis of Solids Using Preconditioned Conjugated Gradient Software Architecture*. Structural Research Series (SRS) 596, UILU-ENG-94-2017, University of Illinois at Urbana Champaign.
6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Methods for Measurements of Fracture Toughness*. ASTM E-1820, 1996.
7. CHIODO, M. S. G.; RUGGIERI, C. *Fatores Elásticos de Intensidade de Tensões (SIFs) para Espécimes SE(T)*. Boletim Técnico da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (Manuscrito em Preparação)