

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELASTO-PLÁSTICOS CTOD E INTEGRAL J EM ESPÉCIMES SE(B) UTILIZANDO O MÉTODO η ¹

Gustavo H. B. Donato²
Roberto Liberato Neto³
Sebastian Cravero⁴
Claudio Ruggieri⁵

Resumo

Este trabalho apresenta um procedimento para determinação dos parâmetros elasto-plásticos J e CTOD em espécimes SE(B) utilizando o método η . O objetivo central é a obtenção de fatores adimensionais η (η) calibrados numericamente e aplicáveis a uma faixa abrangente de dimensões relativas de trincas ($0.05 \leq a/W \leq 0.7$) e propriedades de encruamento do material. Os resultados das análises permitem estabelecer curvas do fator adimensional η em função da dimensão da trinca (a/W) e das propriedades de encruamento do material as quais permitirão a determinação mais acurada dos parâmetros J e CTOD obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: Integral J ; CTOD; Método η ; Espécimes SE(B); Elementos finitos.

DETERMINATION OF CTOD AND J INTEGRAL ELASTO-PLASTIC PARAMETERS FOR SE(B) SPECIMENS USING THE η METHOD

Abstract

This work presents an estimation procedure to determine the elasto-plastic parameters J and CTOD for SE(B) specimens using the η method. The main purpose is to obtain numerically calibrated η (η) factors which are applicable to an extensive range of relative crack dimensions ($0.05 \leq a/W \leq 0.7$) and material hardening properties. The analysis results enable the construction of functional forms which describe the variation of the η factors with crack dimension (a/W) and material hardening properties, n . The procedure guarantees more accurate determination of J e CTOD from laboratory measurements of fracture toughness.

Key words: J Integral; CTOD; η method; SE(B) Specimens; Finite elements.

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

² Doutorando do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, gustavo.donato@poli.usp.br

³ Graduando do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, roberto.liberato@poli.usp.br

⁴ Doutorando do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, sebastian.cravero@poli.usp.br

⁵ Prof. livre docente do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, claudio.ruggieri@poli.usp.br

1 INTRODUÇÃO

Procedimentos convencionais para a avaliação da integridade mecânica de componentes e materiais estruturais, particularmente aços estruturais ferríticos, sob condições elasto-plásticas utilizam a Integral J e o CTOD (δ) para quantificar as condições de fratura na região de um defeito ou trinca.⁽¹⁾ Ensaios experimentais para medição destes parâmetros elasto-plásticos de tenacidade utilizam rotineiramente espécimes laboratoriais (padronizados) de flexão SE(B)* – *single edge crack specimen under bending* - ou compactos C(T)* – *compact tension specimen* - contendo trincas profundas ($a/W \geq 0.5$ onde a é o comprimento ou profundidade da trinca e W é a largura do corpo-de-prova). A determinação dos parâmetros J e CTOD para estes corpos-de-prova utiliza procedimentos normalizados (ASTM E1820,⁽²⁾ ASTM E1290,⁽³⁾ BS 7448⁽⁴⁾) baseados sobre a medição experimental das curvas de carga, P , em função da abertura da boca da trinca, CMOD (V), ou em função do deslocamento da linha de carga, LLD (Δ). Uma vez obtidas as curvas experimentais P vs. CMOD ou P vs. LLD, a Integral J é calculada por intermédio da área plástica sob a curva⁽²⁾ enquanto o CTOD é calculado por intermédio do modelo da rótula plástica.^(3,4)

Entretanto, os procedimentos normalizados para determinação dos parâmetros J e CTOD apresentam diversas limitações as quais podem potencialmente comprometer a acurácia das medições experimentais de tenacidade. Os fatores adimensionais η (sobre os quais a determinação de J é baseada) fornecidos pela ASTM E1820 são primariamente válidos para corpos-de-prova com trinca profunda ($a/W \geq 0.5$). No caso de ensaios de corpos-de-prova com trincas mais rasas ($a/W < 0.4$) ou com geometrias diversas, aqueles fatores η perdem sua estrita aplicabilidade. Adicionalmente (e talvez mais importante), o modelo da rótula plástica (sobre o qual a determinação do CTOD é baseada) é reconhecidamente inadequado (particularmente para pequenos valores de CTOD) uma vez que assume a existência de um centro de rotação fixo localizado aproximadamente sobre a metade do ligamento remanescente da trinca, $W - a$.

Este trabalho apresenta um procedimento para determinação dos parâmetros elasto-plásticos J e CTOD em espécimes SE(B) utilizando o método *eta*. O objetivo central é a obtenção de fatores adimensionais η calibrados numericamente e aplicáveis a uma faixa abrangente de dimensões relativas de trincas ($0.05 \leq a/W \leq 0.7$) e propriedades de encruamento do material. Os resultados das análises permitem estabelecer curvas do fator adimensional η em função da dimensão da trinca (a/W) e das propriedades de encruamento do material, as quais permitirão a determinação mais acurada dos parâmetros J e CTOD obtidos experimentalmente.

2 METODOLOGIA ETA PARA DETERMINAÇÃO DA INTEGRAL J E CTOD

Métodos para medição experimental da Integral J são geralmente fundamentados sobre a sua interpretação energética caracterizada pela taxa de liberação de energia para materiais lineares e não lineares (elasto-plásticos). O procedimento usual para

* ESIS TC7D-1-96: Guidelines for Terminology and Nomenclature in the Field of Structural Integrity

determinação experimental deste parâmetro adotado por diversas normas e recomendações (como, por exemplo, ASTM E1820⁽²⁾) baseia-se na separação de J em componentes elásticas, J_{el} , e plástica, J_{pl} , na forma

$$J = J_{el} + J_{pl} = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_{J-C} A_{pl}}{B_N(W-a)} \quad (1)$$

onde E é o módulo de elasticidade longitudinal, ν é o coeficiente de Poisson, B_N é a espessura efetiva do corpo-de-prova ($B_N = B$ para corpos-de-prova sem entalhe lateral) e η_{J-C} representa um fator adimensional dependente da geometria do corpo de prova. Na expressão acima, a componente plástica da Integral J é função da área plástica sob a curva P vs. CMOD, denotada A_{pl} . A Figura 1 ilustra uma curva P vs. CMOD típica para um espécime SE(B) indicando os principais parâmetros utilizados para a determinação de J .

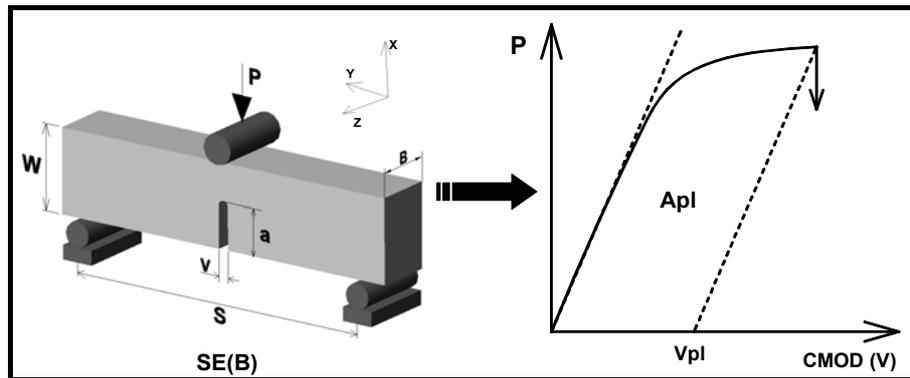


Figura 1. Ilustração esquemática da evolução da carga aplicada, P , em função do CMOD (V) para um corpo-de-prova flexão SE(B).

Uma vez que o parâmetro J relaciona-se diretamente com o CTOD (δ) por meio de

$$\delta = \frac{d_n J}{\sigma_{ys}} \quad (2)$$

onde d_n é uma constante adimensional dependente do expoente de encruamento do material,⁽¹⁾ é possível adotar procedimento análogo para a determinação experimental do CTOD por intermédio de suas componentes elásticas e plásticas

$$\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{2\sigma_{ys}E} + \frac{\eta_{\delta-C} A_{pl}}{\sigma_f B_N(W-a)} \quad (3)$$

onde σ_f é tensão de fluxo do material definida por $\sigma_f = (\sigma_{ys} + \sigma_i)/2$ e $\eta_{\delta-C}$ representa um fator adimensional dependente da geometria do corpo de prova. Analogamente, a componente plástica, δ_{pl} , é função da área plástica sob a curva P vs. CMOD, denotada A_{pl} (Figura 1).

Nas expressões acima referentes ao cálculo das parcelas J_{pl} e δ_{pl} , os fatores *eta* correspondentes são obtidos a partir de curvas de carga vs. deslocamento da boca da trinca, P -CMOD. Alternativamente, é também possível determinar fatores *eta* a partir de curvas de carga vs. deslocamento da linha de carga, P -LLD, denotados η_{J-L} e $\eta_{\delta-L}$. O caráter das Eqs. (1) e (3) anteriores continua idêntico, mas os valores η_{J-L} e $\eta_{\delta-L}$ diferem dos valores correspondentes η_{J-C} e $\eta_{\delta-C}$ como será apresentado a seguir.

3 ANÁLISES NUMÉRICAS

Um elemento-chave para o correto e acurado cálculo dos parâmetros J e CTOD é a determinação dos fatores η_J e η_δ por intermédio de análises numéricas refinadas não lineares utilizando o método dos elementos finitos. Tais análises fornecem simulações numéricas detalhadas das forças e deslocamentos necessários para construção das curvas P - $CMOD$ (ou P - LLD) as quais serão utilizadas para extração dos fatores η . A matriz de análise considera espécimes SE(B) submetidos a flexão 3 pontos com geometria convencional ($W = 2B$) e diferentes relações de tamanho da trinca sobre largura, $a/W = 0.05$ a 0.7 em intervalos de 0.05 . A geometria dos corpos-de-prova analisados é representada pelo esquema anteriormente apresentado na Figura 1.

As análises numéricas não lineares sob estado plano de deformações (EPD) foram conduzidas utilizando-se o programa de elementos finitos WARP3D.⁽⁵⁾ As soluções computacionais utilizam modelos constitutivos elasto-plásticos obedecendo a teoria de plasticidade incremental (J_2) sob pequenas deformações e critério de Von Mises. A Figura 2 apresenta o modelo de elementos finitos construído para o corpo-de-prova SE(B) 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 1241 elementos isoparamétricos 3D de 8 nós constituindo, portanto, uma única camada representando o plano X-Y do modelo. 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, representado por uma seta na Figura 2; tal estratégia permite melhorar substancialmente a convergência numérica das análises.

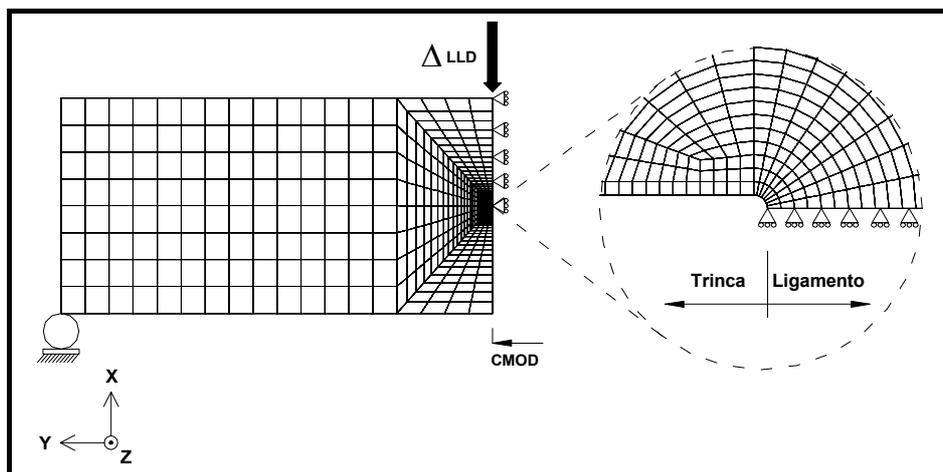


Figura 2. Modelo de elementos finitos com condições de contorno e detalhe da malha focal na ponta da trinca. Restrições em Z (não representadas) simulam estado plano de deformações.

O comportamento tensão vs. deformação adotado para os materiais utilizados nas análises obedece um modelo elasto-plástico da forma

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad , \quad \sigma < \sigma_{ys} \quad \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ys}} \right)^n \quad , \quad \sigma \geq \sigma_{ys} \quad (4)$$

onde n é o expoente de encruamento do material, σ_{ys} e ε_{ys} são a tensão e deformação de escoamento (0.2% *offset*). As propriedades mecânicas para os materiais analisados consideram características típicas de aços estruturais ferríticos (por exemplo, aços para vasos de pressão): $\sigma_{ys} = 257$ MPa e $n = 5$, $\sigma_{ys} = 412$ MPa e $n = 10$, $\sigma_{ys} = 687$ MPa e $n = 20$. Em todas as análises, $E=206$ Gpa e $\nu=0.3$.

4 FATORES ETA PARA DETERMINAÇÃO DE J E CTOD

As Figuras 3-5 apresentam os resultados-chave obtidos das análises conduzidas neste trabalho. O presente compêndio de fatores η permite a determinação mais acurada dos parâmetros elasto-plásticos J e CTOD. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos da calibração de η_{J-C} utilizando as curvas P -CMOD. Nota-se que a influência de n é praticamente desprezível; todas as curvas colapsam essencialmente sobre uma única curva descrevendo a variação de η_{J-C} com a/W . Para valores de a/W inferiores a 0.15, é possível observar uma maior dependência do parâmetro *eta* sobre o valor de n . Além disso, ocorre uma variação algo abrupta na tendência das curvas em torno de $a/W \approx 0.15$. Investigações adicionais revelam que tal comportamento está associado à grande sensibilidade do CMOD para corpos-de-prova com trincas rasas.

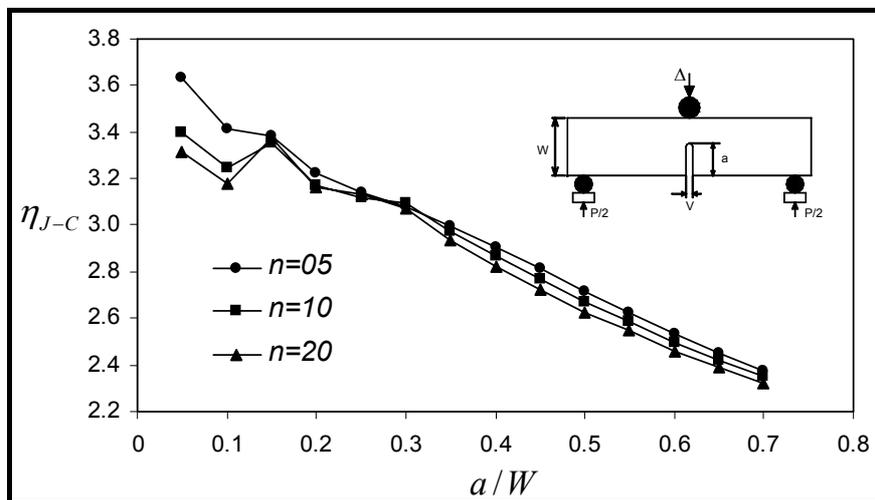


Figura 3. Variação de η_{J-C} em função de a/W e n para espécimes SE(B).

Utilizando agora uma regressão quadrática para descrever a relação funcional de η_{J-C} com a/W para $0.15 \leq a/W \leq 0.7$ resulta

$$\eta_{J-C} = 3.650 - 2.111 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) + 0.341 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 \quad (\text{para } 0.15 \leq a/W \leq 0.7) \quad (5)$$

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos da calibração de η_{J-L} para toda a gama de espécimes em estudo. Devido à grande sensibilidade apresentada por η_{J-C} para trincas rasas, a utilização da curva P vs. LLD na determinação de η_{J-L} surge como uma valiosa alternativa à determinação de J para trincas rasas ($a/W \leq 0.15$). Embora η_{J-L} seja percentualmente mais sensível a n e a/W e a medição de LLD adicione maior complexidade experimental, o comportamento das curvas, principalmente para valores reduzidos de a/W , é mais adequado e garante maior acurácia na determinação do parâmetro J . Sendo assim, a equação 6 apresenta uma regressão biparamétrica do segundo grau em função de a/W e n para a determinação de η_{J-L} para $0.05 \leq a/W \leq 0.15$ e $5 \leq n \leq 20$.

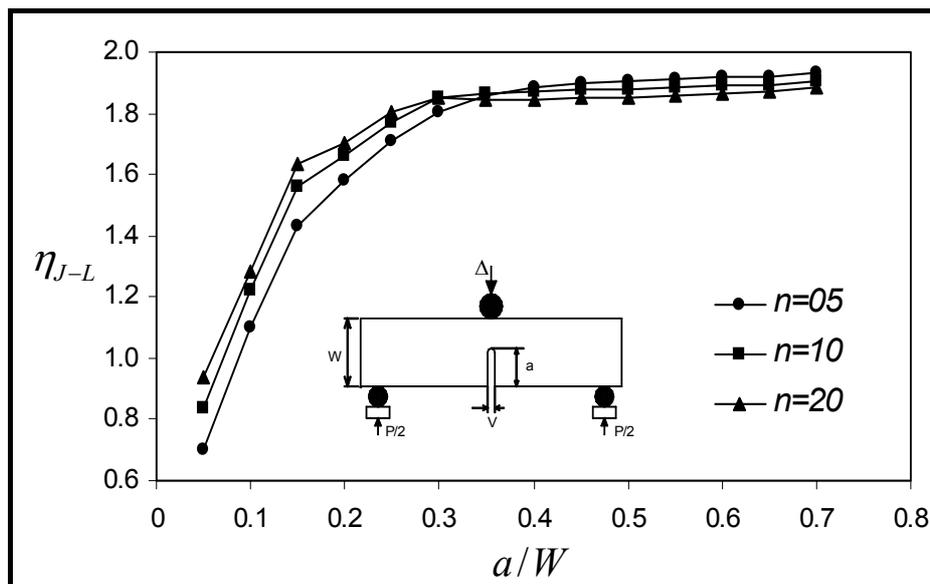


Figura 4. Variação de η_{J-L} em função de a/W e n para espécimes SE(B).

$$\eta_{J-L} = (-0.0014 \cdot n^2 + 0.0591 \cdot n - 0.0346) + (0.0043 \cdot n^2 - 0.342 \cdot n + 11.816) \cdot \left(\frac{a}{W}\right) + (-0.0252 \cdot n^2 + 1.6971 \cdot n - 22.459) \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 \quad (\text{para } 0.05 \leq a/W \leq 0.15 \text{ e } 5 \leq n \leq 20) \quad (6)$$

A Figura 5 apresenta a calibração de $\eta_{\delta-C}$. Nota-se a sensível influência de n e a/W sobre este parâmetro. Entretanto, $\eta_{\delta-C}$ apresenta tendência estável e clara ao longo de toda a gama de valores de n e a/W estudados, configurando-se como um fator acurado na determinação do parâmetro CTOD. A equação 7 apresenta uma regressão biparamétrica do segundo grau em função de a/W e n para a determinação de $\eta_{\delta-C}$ para toda a faixa $0.05 \leq a/W \leq 0.7$ e $5 \leq n \leq 20$.

$$\eta_{\delta-C} = (1.01 + 0.196 \cdot n - 0.0053 \cdot n^2) + \frac{a}{W} \cdot (-1.2123 - 0.1493 \cdot n + 0.0028 \cdot n^2) + \left(\frac{a}{W}\right)^2 \cdot (0.9592 - 0.0308 \cdot n + 0.0024 \cdot n^2)$$

(para $0.05 \leq a/W \leq 0.7$ e $5 \leq n \leq 20$) (7)

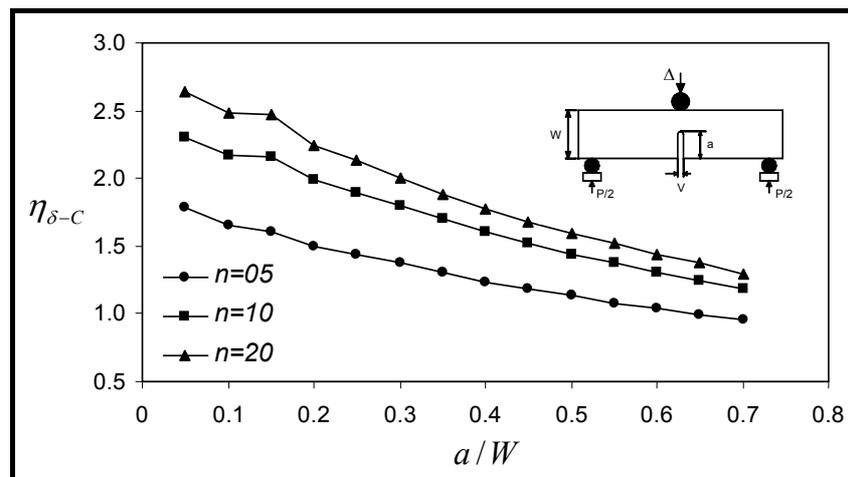


Figura 5. Variação de $\eta_{\delta-C}$ em função de a/W e n para espécimes SE(B).

4 APLICAÇÃO: DETERMINAÇÃO DO CTOD EM ESPÉCIMES SE(B)

Esta seção descreve a aplicação da metodologia e resultados anteriores para a determinação do parâmetro elasto-plástico CTOD em corpos-de-prova SE(B) por intermédio dos fatores $\eta_{\delta-C}$ obtidos na Seção 4. O objetivo central é comparar os valores de CTOD derivados da metodologia *eta* com os valores correspondentes obtidos a partir do modelo da rótula plástica utilizado pela norma BS 7448⁽⁴⁾ (e também pela ASTM E1290⁽³⁾).

Os corpos-de-prova SE(B) utilizados nesta aplicação exploratória foram testados por Ohata⁽⁶⁾ e possuem espessura $B=30\text{mm}$, largura $W=60\text{mm}$, comprimento entre apoios, $S=240\text{mm}$ com diferentes tamanhos de trinca: $a/W=0.157$ e $a/W=0.503$. A Figura 6 apresenta as curvas (médias) P vs. CMOD medidas experimentalmente. Ensaios mecânicos convencionais forneceram as seguintes propriedades mecânicas: tensão de escoamento, $\sigma_{YS} = 382\text{MPa}$, limite de resistência, $\sigma_{YS} = 500\text{MPa}$, e coeficiente de encruamento, $n=10.6$.

Com os valores de n e a/W , os fatores $\eta_{\delta-C}$ são determinados para cada um dos espécimes ensaiados utilizando-se a função de ajuste descrita pela Eq. (7) anterior. Estes resultados em conjunção com as curvas P vs. CMOD fornecem os

valores de δ_{exp} tanto pelo modelo da rótula plástica como pelo método η para ambos espécimes no ponto de carga máxima (indicado pela seta na Figura 6). A Tabela 1 apresenta os valores obtidos de δ_{exp} para os dois métodos. A Figura 7 apresenta o evolução do CTOD com o aumento da carga P experimental para ambos corpos-de-prova (os pontos sobre as retas definem valores de CTOD para um mesmo valor de carga aplicada P).

Tabela 1. Resultados de δ_{exp} para os espécimes ensaiados.

	$\delta_{exp-BS7448}$	$\delta_{exp-\eta}$	Desvio %
a/w=0.157	0.8652	0.6057	29.99%
a/w=0.503	0.6409	0.4828	24.67%

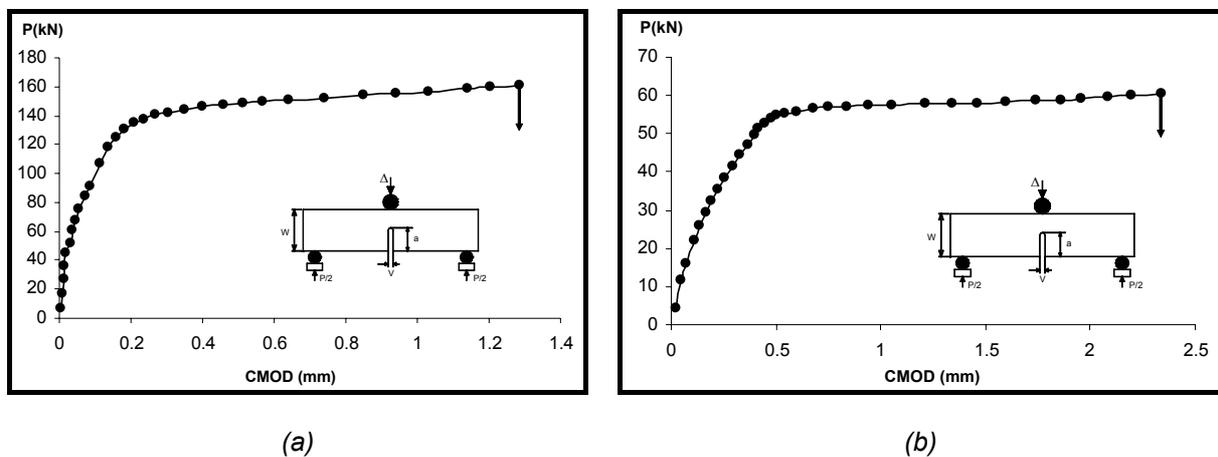


Figura 6. Curvas P vs. CMOD para (a) espécime SE(B) $a/W=0.157$ e (b) espécime SE(B) $a/W=0.503$ (6).

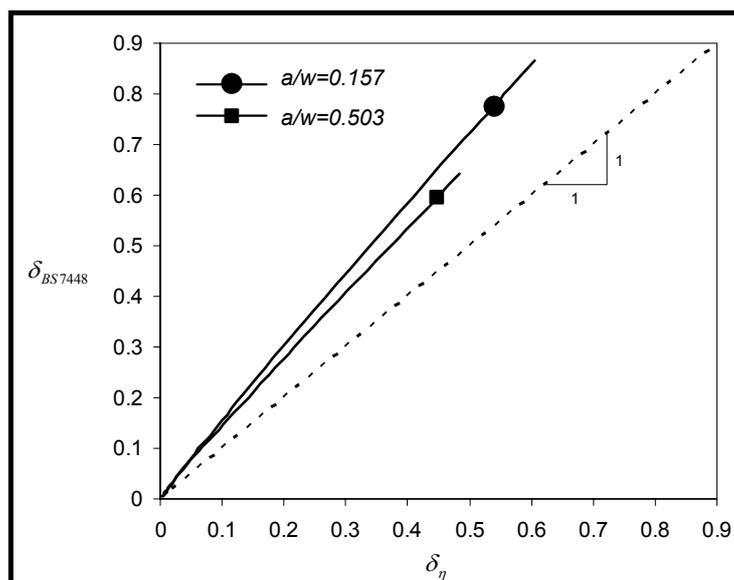


Figura 7. Evolução do CTOD com o aumento da carga P experimental para ambos corpos-de-prova (os pontos sobre as retas definem valores de CTOD para um mesmo valor de carga aplicada P).

5 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- A aplicação da metodologia *eta* possibilita a determinação mais acurada dos parâmetros J e CTOD obtidos experimentalmente, incluindo configurações geométricas diversas e extensiva faixa de propriedades mecânicas;
- Os fatores η_{J-C} são praticamente independentes das propriedades de encruamento do material na faixa $0.15 \leq a/W \leq 0.7$. Para trincas mais rasas ($0.05 \leq a/W \leq 0.15$), o parâmetro η_{J-L} mostra-se mais adequado.
- Os fatores $\eta_{\delta-C}$ apresentam maior dependência sobre as propriedades de encruamento do material na faixa de comprimentos de trinca analisada;
- A aplicação da metodologia *eta* em substituição ao modelo da rótula plástica na determinação do CTOD fornece valores mais realistas. Os valores de CTOD obtidos a partir da análise exploratória de ensaios experimentais conduzidos sobre corpos-de-prova SE(B) são maiores se calculados pelo modelo da rótula plástica da BS7448, apresentando diferença percentual da ordem de 30% em relação ao método *eta* para trincas rasas.

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 Doutorado No. 04/15719-1).

REFERÊNCIAS

- 1 ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications - 3rd Edition*, CRC Press, New York, 2005.
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Methods for Measurements of Fracture Toughness*. ASTM E-1820, 1996.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement*. ASTM E-1290, 1993.
- 4 BRITISH STANDARD. *Fracture Mechanics Toughness Tests – Part I: Method for Determination of K_{Ic} , Critical CTOD and Critical J values of Metallic Materials*. BS 7448, 1991.
- 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 OHATA, M., *The Effect of Specimen Geometry on CTOD -Values Based Upon the Local Approach*, Ms.C. Thesis, Department of Manufacturing Science, Osaka University, 1993 (Em Japonês).