

EFEITOS DE DISSIMILARIDADES MECÂNICAS SOBRE A DETERMINAÇÃO DO CTOD E INTEGRAL J EM ESPÉCIMES SE(B) DE JUNTAS SOLDADAS¹

Gustavo H. B. Donato²
Claudio Ruggieri³

Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação paramétrica exploratória do efeito de dissimilaridades mecânicas de juntas soldadas sobre a determinação dos parâmetros elasto-plásticos Integral J e CTOD através da metodologia *eta*. Os objetivos principais são essencialmente: 1) a análise da relação entre força motriz na ponta da trinca e carregamento global em materiais mecanicamente heterogêneos; 2) a verificação dos efeitos de dissimilaridades mecânicas sobre os campos de tensões e sobre os fatores η (*eta*).

Palavras-chave: Dissimilaridade mecânica; Integral J ; CTOD; Método *eta*; Elementos finitos.

EFFECTS OF WELD STRENGTH MISMATCH ON THE DETERMINATION OF CTOD AND J INTEGRAL IN WELDED JOINTS OF SE(B) SPECIMENS

Abstract

This work presents an exploratory parametric evaluation of the effects of weld strength mismatch on the determination of the elasto-plastic parameters J and CTOD using the *eta* method. The central objectives are essentially: 1) to analyse the relationship between the crack tip driving force and global loading of mechanic dissimilar materials; 2) to verify the effects of mechanical dissimilarities on the near-tip stress fields and on η (*eta*) factors.

Key words: Weld mismatch; J Integral, CTOD; *Eta method*; 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 Prof. livre docente do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, claudio.ruggieri@poli.usp.br

1 INTRODUÇÃO

Juntas soldadas são uma realidade em estruturas mecânicas em geral e acabam por ampliar a complexidade das práticas de projeto e análise de integridade estrutural. As estruturas atuais exigem níveis de segurança e confiabilidade operacionais cada vez mais elevados, objetivando redução de custos, aumento de eficiência operacional, otimização de vida útil e, mais importante, a eliminação de acidentes causadores de danos ambientais, prejuízos financeiros e riscos à população. Dentro deste contexto de segurança e otimização operacional, a resistência à fratura de juntas soldadas representa um componente-chave na avaliação de integridade estrutural. Observações experimentais^(1,2) revelam a ocorrência freqüente de defeitos na forma de trincas em juntas soldadas (e.g., formação de trincas por Hidrogênio, falta de penetração, etc.).

Procedimentos avançados para a avaliação da integridade mecânica de componentes estruturais (API 579,³ BS 7910⁴) sob condições elasto-plásticas utilizam a Integral J e o CTOD (δ) – *crack tip opening displacement* – para quantificar as condições de fratura na ponta de um defeito ou trinca. Sob condições de plasticidade restrita na ponta da trinca, tais procedimentos adotam uma correlação direta entre valores de tenacidade medidos experimentalmente (J_c , δ_c) e o comportamento à fratura de um componente estrutural em serviço. Conseqüentemente, a medição experimental acurada destes valores de tenacidade assume significativa relevância dentro de metodologias mais realistas para avaliação da criticidade de defeitos. Entretanto, procedimentos experimentais para medição de tenacidade (ASTM E1290,⁵ ASTM E1820,⁶ BS 7448⁷) apresentam diversas limitações as quais podem potencialmente comprometer a acurácia das determinações de J e CTOD. Os fatores adimensionais η (sobre os quais a determinação de J é baseada) fornecidos pela ASTM E1820 são essencialmente 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 aplicabilidade. Analogamente, 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, $W - a$. Adicionalmente (e mais importante no escopo do presente trabalho), as normas correntes não são aplicáveis à avaliação de integridade estrutural de juntas soldadas, já que não levam em conta o grau de dissimilaridade mecânica (*mismatch*) das juntas.

Como um passo nesta direção, este trabalho contempla uma investigação numérica sobre os efeitos de heterogeneidades mecânicas sobre a resistência à fratura de juntas soldadas baseada na metodologia *eta*. O objetivo central é uma investigação paramétrica do efeito do grau de heterogeneidade mecânica da junta de solda sobre o campo de tensões e sobre os fatores η calibrados numericamente e utilizados na determinação dos parâmetros elasto-plásticos J e CTOD.

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).⁸ O procedimento usual para determinação experimental deste parâmetro adotado por diversas normas e

recomendações (como, por exemplo, ASTM E1820⁶) baseia-se na separação de J em componentes elástica, 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} (ver detalhes adicionais em Donato et al.^[12]).

Uma vez que o parâmetro J relaciona-se diretamente com o CTOD δ , é possível adotar procedimento análogo para a determinação experimental do CTOD por intermédio de suas componentes elásticas e plásticas

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

onde σ_f é tensão de fluxo do material definida por $\sigma_f = (\sigma_{ys} + \sigma_t)/2$ 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} .

Nas expressões acima referentes ao cálculo de 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, alterando os seus valores, mas não o caráter das Eqs. (1) e (2) anteriores.^[12]

3 ANÁLISES NUMÉRICAS

O efeito de heterogeneidades mecânicas sobre os parâmetros J e CTOD em juntas soldadas foi investigado por intermédio de análises 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 as quais, juntamente aos fatores *eta* calibrados, parâmetros J e CTOD (também obtidos numericamente), possibilitam a avaliação do efeito de dissimilaridades mecânicas.

A junta de soldagem utilizada na realização da presente avaliação paramétrica é idealizada e resulta da “extração” de um espécime SE(B) de uma estrutura dotada de junta paralela, como indica a Figura 1a. Tal procedimento permite analisar um espécime com junta quadrada (*square groove*) de largura D e trinca posicionada no meio do cordão de solda, como apresenta a Figura 1b. A matriz de análise deste estudo considera espécimes SE(B) submetidos a flexão 3 pontos com espessura $B=25.4$ mm e geometria convencional ($W = 2B$), largura de cordão de solda $D=10$ mm e duas relações de tamanho da trinca sobre largura, $a/W = 0.1$ e $a/W = 0.5$.

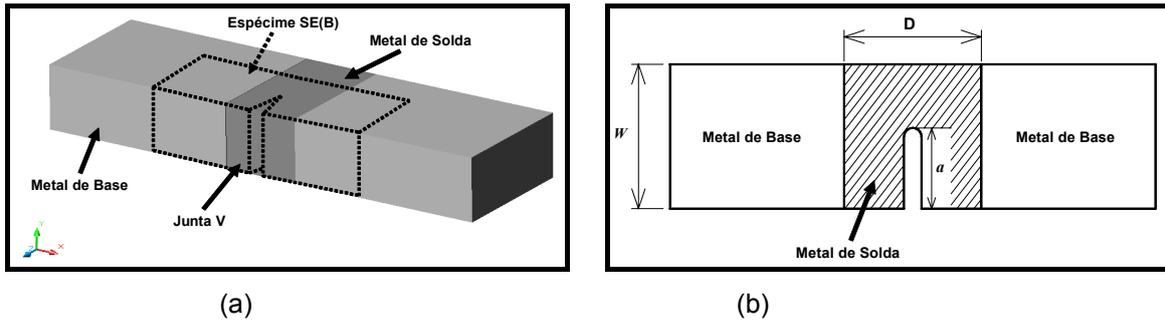


Figura 1. Junta paralela com indicação da posição de extração dos espécimes SE(B) modelados. Nota-se o posicionamento da trinca no meio do cordão de solda.

O grau de heterogeneidade mecânica HM é definido como $HM = \sigma_{YS}^{MS} / \sigma_{YS}^{MB}$, onde σ_{YS}^{MS} e σ_{YS}^{MB} definem a tensão de escoamento do metal de solda e metal base, respectivamente. O comportamento tensão vs. deformação adotado para os materiais utilizados nas análises obedece um modelo elasto-plástico da forma

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (\sigma < \sigma_{ys}) \quad , \quad \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ys}} \right)^n \quad (\sigma \geq \sigma_{ys}) \quad (3)$$

onde n é o coeficiente de encruamento do material, σ_{ys} e ε_{ys} são a tensão e deformação de escoamento (0.2% offset).

Para a realização da análise paramétrica, as propriedades do metal base foram mantidas inalteradas ($\sigma_{YS}^{MB} = 420MPa$ e $n = 10$), sendo, portanto, o grau de heterogeneidade mecânica caracterizado pela variação das propriedades mecânicas do metal de solda. Foram simulados os graus de heterogeneidade mecânica $HM=0.6$, $HM=0.8$, $HM=1$, $HM=1.2$, $HM=1.5$ e $HM=2$. As análises numéricas 3D não lineares sob estado plano de deformações (EPD) foram conduzidas utilizando-se o programa de elementos finitos WARP3D.⁹ As soluções computacionais utilizam modelos constitutivos elasto-plásticos obedecendo 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 2527 elementos isoparamétricos lineares constituindo, portanto, uma única camada representando o plano X-Y da amostra.

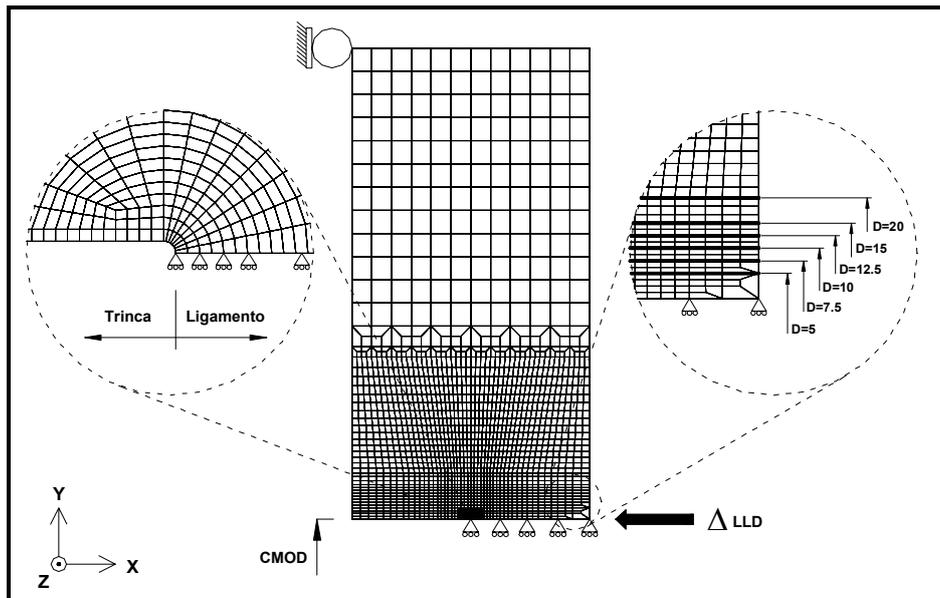


Figura 2. Malha usada em modelos bi-materiais SE(B) 1T com $a/W=0.5$. Nota-se no detalhe à esquerda malha focal bastante refinada na ponta da trinca e no detalhe à direita a metodologia de definição das interfaces de soldagem.

4 EFEITO DE HETEROGENEIDADES MECÂNICAS (*STRENGTH MISMATCH*) SOBRE O CAMPO DE TENSÕES EM JUNTAS SOLDADAS

A relação entre J e os campos de tensões na ponta da trinca para materiais elasto-plásticos sob condições SSY representa a condição de similaridade fundamental para o estabelecimento da metodologia clássica da mecânica da fratura (conhecida como metodologia monoparamétrica); tal condição permite assumir que um parâmetro único (como a Integral J e seu equivalente: parâmetro de abertura da ponta da trinca - CTOD) caracterize univocamente os campos de tensões e as condições de fratura nas vizinhanças da trinca para sólidos fraturados com diversas configurações geométricas. Em termos práticos, é esta importante condição de similaridade que permite inferir o comportamento à fratura de estruturas genéricas (como, por exemplo, um vaso de pressão ou um duto para transporte de gás ou petróleo) a partir de valores experimentais de tenacidade (J_c) utilizando-se corpos de prova de pequenas dimensões (e.g., SE(B), C(T)).

Entretanto, para o caso particular de uma junta soldada, a heterogeneidade mecânica (*strength mismatch*) entre o metal base e o metal de solda influencia significativamente a relação entre o carregamento remoto aplicado e a força motriz da trinca (caracterizada pela Integral J ou CTOD no presente contexto), alterando significativamente o campo de tensões à frente da trinca. A Figura 3 apresenta a influência do grau de heterogeneidade mecânica sobre o campo de tensões à frente da trinca (espécime $a/W=0.5$, $D=10\text{mm}$), através da representação do tamanho da zona de processo de fratura ($\sigma_1 \geq 2.5 \cdot \sigma_{ys}$, onde σ_1 representa a tensão máxima principal) para diferentes graus de dissimilaridade. Nota-se que com o aumento do grau de heterogeneidade mecânica, reduz-se significativamente o tamanho da zona de processo de fratura, como consequência direta do desvio de maior parte das deformações para o metal de base, aliviando as tensões nas proximidades do defeito.

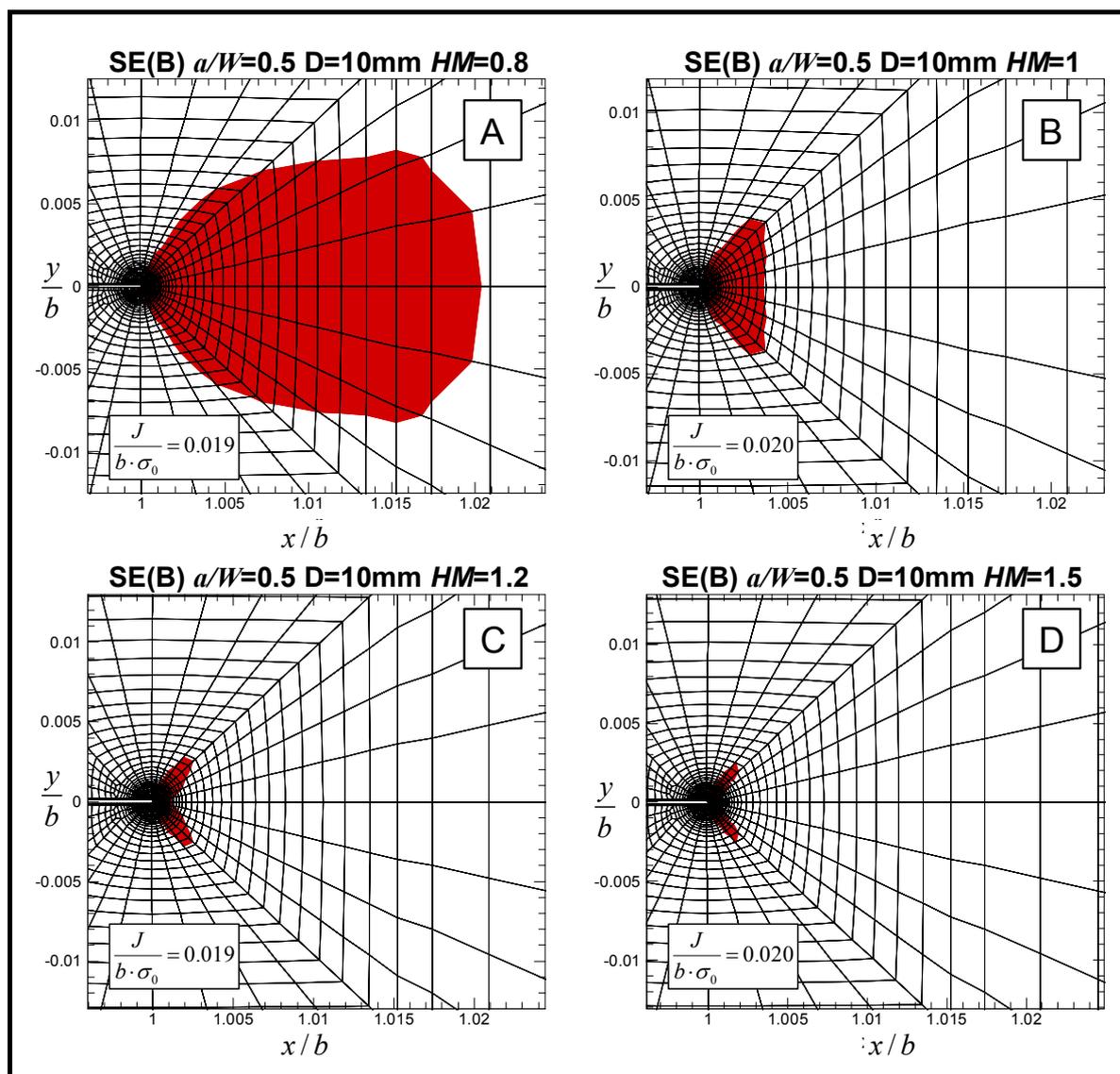


Figura 3. Variação do tamanho da zona de processo de fratura de acordo com o grau de HM para espécime SE(B) $a/W=0.5$ $D=10\text{mm}$.

5 EFEITO DE HETEROGENEIDADES MECÂNICAS (STRENGTH MISMATCH) SOBRE OS FATORES PLÁSTICOS η

Diversos códigos e práticas correntes de fabricação (e.g., ASME¹⁰ e AWS¹¹) especificam a utilização de metais de solda com resistência mecânica elevada em relação ao material base (uma condição normalmente referenciada como *weld overmatch*) como forma de "proteger" a junta soldada dos potenciais efeitos deletérios dos procedimentos de soldagem sobre a integridade estrutural. Sob um carregamento remoto fixo, a condição *overmatch* reduz o nível de deformações plásticas no metal de solda (o qual, presumivelmente, contém uma maior quantidade de defeitos de soldagem) aumentando, conseqüentemente, a capacidade de carga do componente estrutural soldado, como sugerem os resultados da Figura 3. Conseqüentemente, procedimentos realistas para avaliação de defeitos em estruturas soldadas devem considerar o efeito da heterogeneidade mecânica (*weld mismatch*). Adicionalmente e igualmente importante é a consideração da formação

de zonas frágeis localizadas sobre a resistência à fratura de juntas soldadas, porém tal avaliação foge do escopo do presente estudo.

A Figura 4 apresenta a variação de J para diferentes graus de HM em espécimes SE(B) com $a/W=0.1$ e $a/W=0.5$. Nota-se que o aumento de HM gera a redução de J , como resultado do alívio do campo de tensões observado na Figura 3. Por exemplo para o caso de $HM=1.5$ e J -homogêneo aproximadamente de $400\text{Mpa}\cdot\text{mm}$, tal redução é em média de 8.5% para $a/W=0.1$ e de 10% para $a/W=0.5$. Adicionalmente, a Figura 5 apresenta a variação de η_J para as mesmas condições. Nota-se que o aumento de HM provoca redução de η_J , como consequência da correlação direta apresentada entre J e η_J na fração plástica da equação (1). Neste gráfico e também nos gráficos subseqüentes, os valores dos fatores η para o material homogêneo (equivalente às propriedades mecânicas e de encruamento do metal base) são obtidos da referência.^[12]

A Figura 6 apresenta a variação de δ para diferentes graus de HM em espécimes SE(B) $a/W=0.1$ e $a/W=0.5$, sendo que a Figura 7 apresenta a correspondente variação dos fatores η_δ . Por exemplo para o caso de $HM=1.5$ e CTOD-homogêneo próximo de 0.55mm, ocorre queda de 15% no CTOD para $a/W=0.1$ e 14% para $a/W=0.5$. As respectivas variações médias de η_δ representam acréscimo de 21.6% para $a/W=0.1$ e 27.3% para $a/W=0.5$. Nota-se que o comportamento de variação de δ e η_δ não é direto como ocorre com J . Tal aspecto decorre do fato de tais parâmetros variarem também de acordo com as propriedades mecânicas representada por σ_f na fração plástica da equação 2.

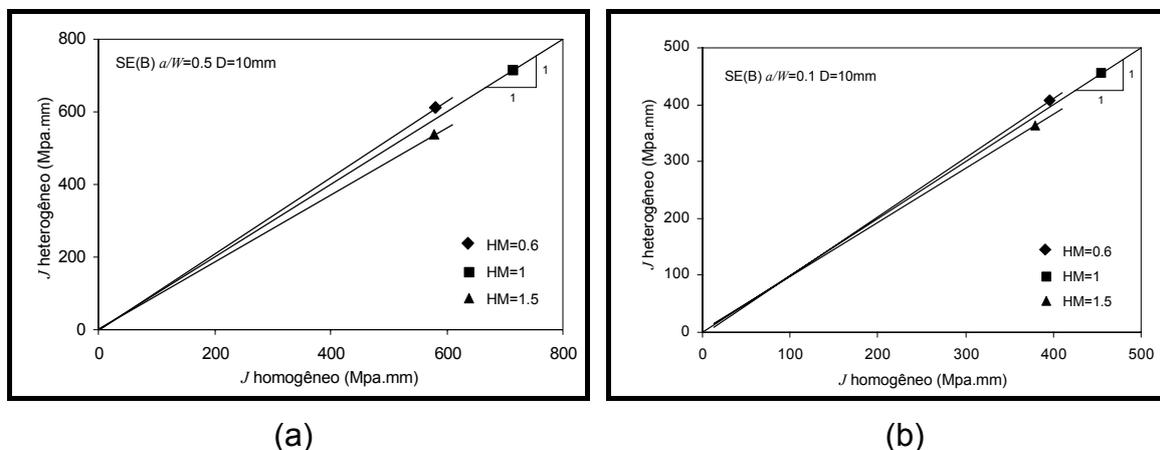
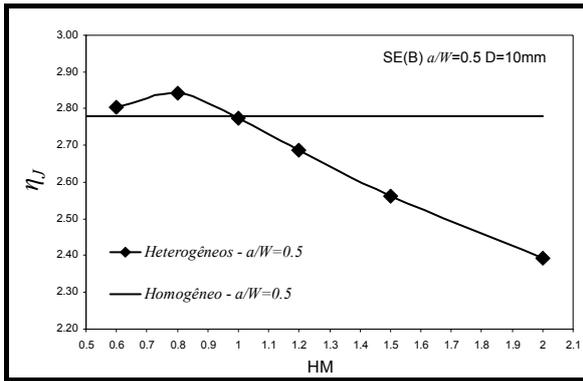
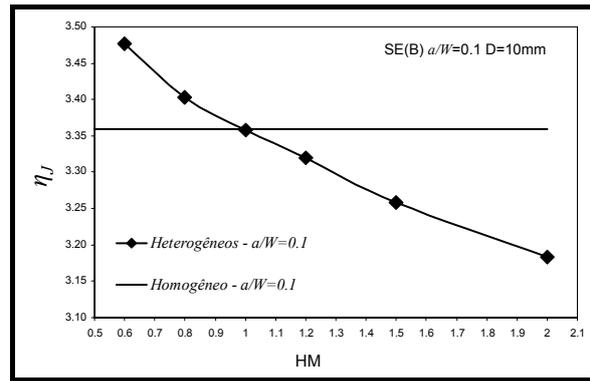


Figura 4. Variação de J para diferentes HM, fixando-se a A_{pl} para a tomada dos dados. Espécimes SE(B) $a/W=0.5$ D=10mm (a) e SE(B) $a/W=0.1$ D=10mm (b).

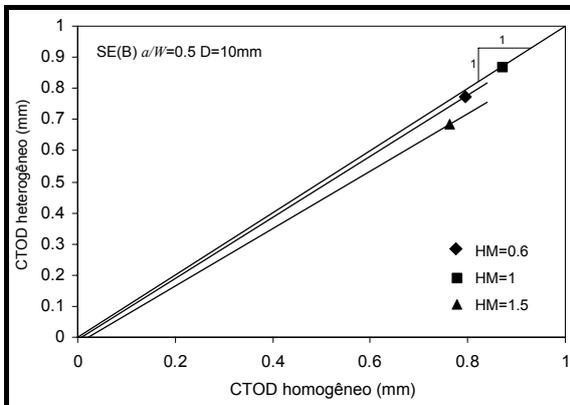


(a)

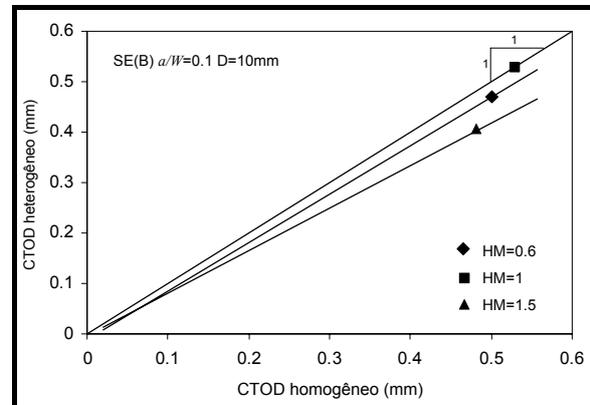


(b)

Figura 5. Variação de η_J para diferentes HM em espécimes SE(B) heterogêneos com $D=10\text{mm}$ e relações $a/W=0.5$ (a) e $a/W=0.1$ (b).

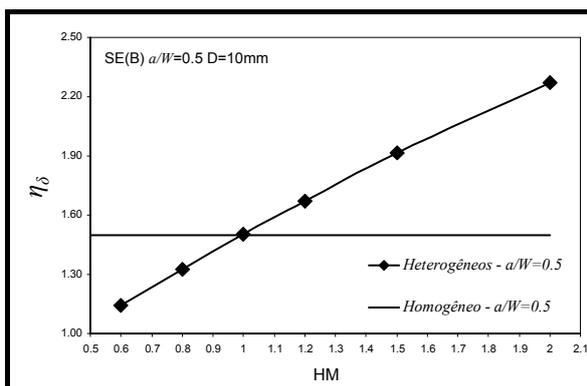


(a)

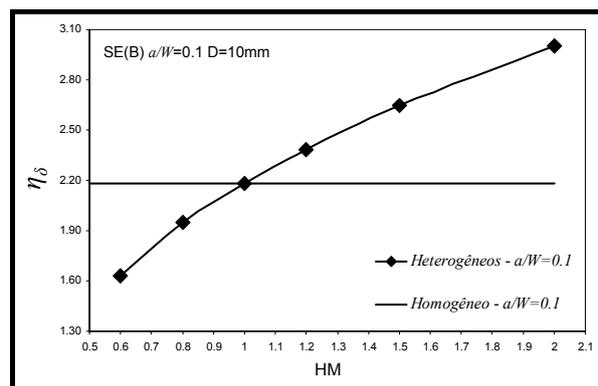


(b)

Figura 6. Variação de CTOD- δ para diferentes HM, fixando-se a A_{pl} para a tomada dos dados. Espécimes SE(B) $a/W=0.5$ $D=10\text{mm}$ (a) e SE(B) $a/W=0.1$ $D=10\text{mm}$ (b)..



(a)



(b)

Figura 7. Variação de η_δ para diferentes HM em espécimes SE(B) heterogêneos com $D=10\text{mm}$ e relações $a/W=0.5$ (a) e $a/W=0.1$ (b).

6 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- A variação do grau de heterogeneidade mecânica HM decorrente da utilização de juntas soldadas altera significativamente o campo de tensões à frente de trincas potencialmente presentes em estruturas reais;
- O aumento de HM provoca pequena redução da integral J e conseqüente redução dos fatores η_J relacionados, como conseqüência da correlação direta apresentada entre J e η_J na fração plástica da Eq. (1). Comportamento similar é também observado para o caso de δ e η_δ , embora a redução em relação ao material homogêneo seja um pouco maior devido ao efeito das propriedades mecânicas (representadas por σ_f na fração plástica da Eq. (2)).
- O nível de dissimilaridade mecânica (*mismatch*) não altera significativamente os procedimentos de determinação de J e CTOD. Por outro lado, afeta fortemente a relação entre o carregamento global e a força motriz das trincas.

Agradecimentos

Esta investigação é patrocinada pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Estado de São Paulo – FAPESP (Bolsa de Doutorado No. 04/15719-1).

REFERÊNCIAS

- 1 Glover, A. G., Hauser, D. and Metzbower, E. A., "Failure of Weldments" in Metals Handbook, Vol. 8, 1986.
- 2 Jutla, T., "Fatigue and Fracture Control of Weldments" in ASM Handbook, Vol. 19, pp. 434-449, 1996.
- 3 API RECOMMENDED PRACTICE 579 Fitness-for-service. 1st ed., 2000.
- 4 BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures BS7910. Londres, 1999.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement. ASTM E-1290, 1993.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Methods for Measurements of Fracture Toughness*. ASTM E-1820, 1996.
- 7 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.
- 8 Anderson, T. L. "Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications", 2^a edição, 1995.
- 9 Koppenhoefer, K., Gullerud, A., Ruggieri, C., Dodds, R. and Healy, B., WARP3D: Dynamic Nonlinear Analysis of Solids Using a Preconditioned Conjugate Gradient Software Architecture, Structural Research Series (SRS) 596, UILUENG-94-2017, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994.
- 10 American Society of Mechanical Engineers, "Boiler and Pressure Vessel Code", 1998.
- 11 American Welding Society, "Structural Welding Code", 1980.
- 12 Donato, G. H. B., Liberato, R., Cravero, S. e Ruggieri, C., "Determinação dos Parâmetros Elasto-Plásticos CTOD e Integral J em Espécimes SE(B) Utilizando o Método *Eta*" in 61^o Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2006.