

EFEITOS DA GEOMETRIA E MODO DE CARREGAMENTO SOBRE CURVAS DE RESISTÊNCIA J - R EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS API X80¹

Claudio Ruggieri²
Leonardo Luiz Siqueira Mathias³

Resumo

Este trabalho apresenta uma investigação das propriedades de fratura dúctil para uma junta soldada circunferencial fabricada a partir de um aço API 5L X80 utilizando curvas de resistência $J - R$ medidas experimentalmente. O uso destes materiais é motivado pela demanda crescente de aplicações envolvendo aços de alta resistência utilizados em dutos, tubulações para a indústria de gás e petróleo, incluindo *risers* rígidos em catenária (*SCRs*). Os ensaios das juntas soldadas utilizaram corpos de prova SE(T) fixados por garra e corpos de prova SE(B) com entalhe central ao cordão de solda para determinação das curvas de resistência baseadas no método da flexibilidade no descarregamento (UC) e com técnica de corpo de prova único. Funções de flexibilidade e fatores η aplicáveis a corpos de prova SE(T) e SE(B) recentemente desenvolvidos são introduzidos para determinação mais acuradas de curvas de resistência $J - \Delta a$ a partir de medições experimentais de carga e deslocamento.

Palavras-chave: Curvas de resistência $J - R$; Fratura dúctil; Corpo de prova SE(T); Corpo de prova SE(B); Crescimento de trinca.

EFFECTS OF GEOMETRY AND LOADING MODE ON CRACK GROWTH RESISTANCE CURVES FOR AN X80 PIPELINE GIRTH WELD

Abstract

This work presents an investigation of the ductile tearing properties for a girth weld made of an API 5L X80 pipeline steel using experimentally measured crack growth resistance curves. Testing of the pipeline girth welds employed side-grooved, clamped SE (T) specimens and 3P bend SE(B) specimens with a weld centerline notch and varying crack sizes to determine the crack growth resistance curves based upon the unloading compliance (UC) method using a single specimen technique. Recently developed compliance functions and η -factors applicable for SE (T) and SE(B) fracture specimens are introduced to determine crack growth resistance data from laboratory measurements of load-displacement records.

Key words: J - R curves; Ductile fracture; SE(T) specimen; SE(B) specimen; Crack growth.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Eng^o Naval, Ph.D., Professor Titular, Núcleo Avançado em Mecânica da Fratura e Integridade Estrutural (NAMEF), PNV, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), SP, Brasil; claudio.ruggieri@poli.usp.br.

³ Eng^o Metalurgista, Mestre em Engenharia, Doutorando da Escola Politécnica (PNV-EPUSP), Universidade de São Paulo, SP, Brasil; leonardomathias@usp.br.

1 INTRODUÇÃO

Metodologias de avaliação do comportamento à fratura dúctil em componentes estruturais baseadas em conceitos de mecânica da fratura utilizam curvas de resistência à propagação de trincas (curvas $J - \Delta a$ ou curvas $J - R$) para caracterizar a sua extensão (dúctil) seguida de instabilidade do material. Estas metodologias permitem a especificação de tamanhos críticos de defeitos baseada na estimativa de crescimento estável de trincas sob condições de serviço. Procedimentos correntes de avaliação de defeitos em desenvolvimento advogam o uso de corpos de prova (CPs) SE(T) - *single edge notch tension* – para medição experimental de curvas JR mais aplicáveis a sistemas de tubulações pressurizados, incluindo juntas soldadas circunferenciais de *risers* submarinos para transporte de gás e petróleo.

A motivação central para a utilização de CPs de tenacidade SE(T) em procedimentos de avaliação de defeitos (ou procedimentos *ECA*) nesta categoria de componentes estruturais é a forte similaridade dos campos de tensões e deformações (os quais controlam o processo de fratura) para ambas as configurações de trinca (*i.e.*, CPs SE(T) e dutos contendo defeitos circunferenciais). Entretanto, embora utilizado efetivamente em avaliações experimentais da tenacidade de juntas soldadas circunferenciais de dutos e *risers*, algumas dificuldades associadas aos procedimentos de ensaios de CPs SE(T), incluindo condições de fixação e escorregamento de garras, introduzem alguns questionamentos em relação à significância e qualificação das curvas de resistência obtidas experimentalmente. Embora ligeiramente mais conservador, testes de CPs flexão 3 pontos SE(B) com trincas rasas (os quais não são configurações usuais) podem tornar-se atrativos devido ao seu protocolo de ensaio e procedimentos laboratoriais mais simples além de cargas muito menores para propagação da trinca. Este trabalho apresenta uma investigação das propriedades de fratura dúctil para uma junta soldada circunferencial fabricada a partir de um aço API 5L X80 utilizando curvas de resistência $J - R$ medidas experimentalmente. O uso destes materiais é motivado pela demanda crescente de aplicações envolvendo aços de alta resistência utilizados em dutos, tubulações para a indústria de gás e petróleo, incluindo *risers* rígidos em catenária (*SCRs*). Os ensaios das juntas soldadas utilizaram CPs SE(T) fixados por garra e CPs SE(B) com entalhe central ao cordão de solda para determinação das curvas de resistência baseadas no método da flexibilidade no descarregamento (UC) e com técnica de corpo de prova único. Funções de flexibilidade e fatores η aplicáveis a CPs SE(T) e SE(B) recentemente desenvolvidos são introduzidos para determinação mais acuradas de curvas de resistência $J - \Delta a$ a partir de medições experimentais de carga e deslocamento.

2 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURVAS DE RESISTÊNCIA $J-R$ BASEADAS NO MÉTODO DA FLEXIBILIDADE NO DESCARREGAMENTO

2.1 Procedimento de Avaliação da Integral J

Programas convencionais de ensaios para medição experimental de curvas de resistência à propagação de trincas (curvas $J - \Delta a$) em materiais metálicos utilizam rotineiramente o método da flexibilidade no descarregamento (*UC - unloading compliance*) baseado no teste de um corpo de prova único. Um procedimento largamente empregado (o qual é a base da norma ASTM E1820)⁽¹⁾ para

determinação da Integral J com a extensão (dúctil) de uma trinca deriva diretamente de uma estratégia incremental para atualizar os valores das componentes elástica, J_e , e plástica, J_p , em cada estágio de descarregamento, denotado k , durante as medições de carga e deslocamento como na Equação 1.

$$J^k = J_e^k + J_p^k \quad (1)$$

Na qual o termo elástico é simplesmente expresso pela Equação 2.

$$J_e^k = \left(\frac{K_I^2}{E'} \right)_k \quad (2)$$

E a componente plástica obedece a uma formulação incremental aplicável a medições de deslocamento em termos de CMOD (*crack mouth opening displacement*) na forma.^(2,3)

$$J_p^k = \left[J_p^{k-1} + \frac{\eta_{J-CMOD}^{k-1}}{b_{k-1} B_N} (A_p^k - A_p^{k-1}) \right] \left[1 - \frac{\gamma_{LLD}^{k-1}}{b_{k-1}} (a_k - a_{k-1}) \right] \quad (3)$$

Onde o fator γ_{LLD} é avaliado a partir da expressão

$$\gamma_{LLD} = \left[-1 + \eta_{J-LLD}^{k-1} - \left(\frac{b_{k-1}}{W \eta_{J-LLD}^{k-1}} \frac{d\eta_{J-LLD}^{k-1}}{d(a/W)} \right) \right] \quad (4)$$

Nas formulações acima, K_I é o fator elástico de intensidade de tensões para a configuração de teste, A_p é a área plástica sob a curva carga vs. deslocamento, B_N é a espessura líquida medida na raiz dos entalhes laterais ($B_N = B$ se a configuração de teste ou corpo de prova não possui entalhes laterais, onde B é a espessura total ou nominal), b é o ligamento remanescente ($b = W - a$, onde W é a largura do corpo de prova) e a é o comprimento da trinca. Na definição da Equação 2, condições associadas ao estado plano de deformações (EPD) são adotadas tal que $E' = E/(1 - \nu^2)$ onde E e ν representam o módulo elástico longitudinal e o coeficiente de Poisson, respectivamente. O fator η_J presente nas Equações 3 e 4 caracteriza um parâmetro adimensional que relaciona a contribuição plástica da energia de deformação do componente contendo a trinca com a Integral J . Adicionalmente, é importante notar que A_p (e, conseqüentemente, η_J) pode ser definida em termos do deslocamento da linha de carga (LLD ou Δ) data ou da abertura da boca da trinca (CMOD or V) data; estas quantidades são denotadas η_{J-LLD} e η_{J-CMOD} . A Figura 1 ilustra esquematicamente o procedimento descrito.

A expressão incremental para J_p definida pela Equação 3 conjuntamente com a Equação 4 contém duas contribuições: uma derivada do trabalho plástico em termos do CMOD e, portanto, associada a η_{J-CMOD} , e outra devido à correção de J por efeitos de crescimento da trinca em termos do LLD e, portanto, associada a η_{J-LLD} . A avaliação das Equações 3 e 4 é relativamente simples desde que os dois fatores geométricos, η_{J-CMOD} e η_{J-LLD} , sejam conhecidos.

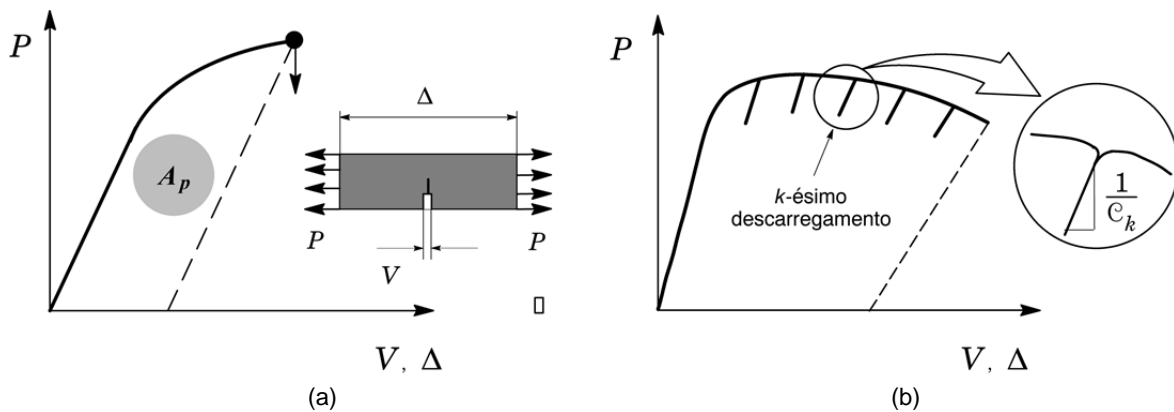


Figura 1. (a) Definição da área plástica sob a curva carga vs. deslocamento; (b) Descarregamento parcial durante a evolução da carga com a abertura da boca da trinca (CMOD).

Para o CP SE(T) fixado por garra com $H/10 = 10$ e a configuração convencional SE(B) utilizada neste estudo, um ajuste polinomial conveniente dos resultados fornecidos por Cravero e Ruggieri,⁽⁴⁾ Ruggieri⁽⁵⁾ e Donato e Ruggieri⁽⁶⁾ resulta em equações correspondentes dos fatores η na forma:

$$\eta_{J-CMOD}^{SET} = 1.067 - 1.767 \frac{a}{W} + 7.808 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 19.269 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 15.295 \left(\frac{a}{W}\right)^4 - 3.083 \left(\frac{a}{W}\right)^5 \quad (5)$$

$$0.2 \leq a/W \leq 0.7$$

$$\eta_{J-LLD}^{SET} = -0.623 + 9.336 \frac{a}{W} - 4.584 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 47.963 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 87.697 \left(\frac{a}{W}\right)^4 - 44.875 \left(\frac{a}{W}\right)^5 \quad (6)$$

$$0.2 \leq a/W \leq 0.7$$

$$\eta_{J-CMOD}^{SEB} = 3.650 - 2.111 \frac{a}{W} + 0.341 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \quad (7)$$

$$0.1 \leq a/W \leq 0.7$$

$$\eta_{J-LLD}^{SEB} = 0.020 + 18.086 \frac{a}{W} - 72.256 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 152.225 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 159.769 \left(\frac{a}{W}\right)^4 + 66.879 \left(\frac{a}{W}\right)^5 \quad (8)$$

$$0.1 \leq a/W \leq 0.7$$

2.2 Estimativas do Comprimento da Trinca

Os protocolos de ensaio para medição de curvas de resistência $J - R$ utilizando um corpo de prova único são primariamente baseados na técnica de flexibilidade no descarregamento (UC) para obtenção de estimativas acuradas do comprimento corrente da trinca a partir da flexibilidade da configuração de teste medida em descarregamentos periódicos durante a progressão da carga aplicada. A Figura 1b anterior ilustra as características essenciais do método. A inclinação da curva de carga vs. deslocamento no k -estágio de descarregamento define a flexibilidade corrente do CP, denotada, C_k , a qual depende da configuração geométrica e comprimento da trinca. Para os CPs SE(T) fixados por garra e SE(B) analisados

neste estudo, a flexibilidade normalizada, μ , é expressa como as Equações 9 e 10.^(1,4)

$$\mu_{CMOD}^{SET} = \left[1 + \sqrt{EB_e C_{CMOD}} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$\mu_{CMOD}^{SEB} = \left[1 + \sqrt{\frac{EWB_e C_{CMOD}}{S/4}} \right]^{-1} \quad (10)$$

Onde μ_{CMOD}^{SET} e μ_{CMOD}^{SEB} definem a flexibilidade normalizada para os CPs SE(T) fixados por garra e SE(B). Nas expressões acima, C_{CMOD} é a flexibilidade do CP definida em termos da abertura da boca da trinca ($C_{CMOD} = V/P$ onde V é o valor do CMOD e P representa a carga aplicada) e a espessura efetiva, B_e , é definida pela Equação 11.

$$B_e = B - \frac{(B - B_N)^2}{B} \quad (11)$$

Onde B_N foi definido anteriormente. Por meio da medição da flexibilidade instantânea durante o descarregamento da configuração de teste, (Figura 1), o comprimento corrente da trinca resulta diretamente da solução da dependência funcional entre o comprimento da trinca e a flexibilidade do CP em termos de μ_{CMOD} .

Para as configurações SE(T) fixados por garra e flexão 3 pontos SE(B) analisadas, as expressões correspondentes de flexibilidade são dadas por Cravero e Ruggieri⁽⁴⁾ e ASTM E1820⁽¹⁾ como as Equações 12 e 13.

$$\left[\frac{a}{W} \right]_{SET} = 1.9215 - 13.2195\mu + 58.7080\mu^2 - 155.2823\mu^3 + 207.3987\mu^4 - 107.9176\mu^5 \quad (12)$$

$$0.1 \leq a/W \leq 0.7$$

$$\left[\frac{a}{W} \right]_{SEB} = 10.9997 - 3.9504\mu + 2.9821\mu^2 - 3.2141\mu^3 + 51.5164\mu^4 - 113.0310\mu^5 \quad (13)$$

$$0.1 \leq a/W \leq 0.8$$

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Descrição do Material e Procedimento de Soldagem

O material utilizado neste estudo é uma aço de alta resistência microligado classe API X80 utilizado em dutos para transporte de gás e petróleo e produzido na forma plana (chapa) utilizando uma rota de processamento por laminação controlada sem resfriamento acelerado. As propriedades mecânicas e a combinação de tenacidade/resistência são obtidas, principalmente, pelo refinamento do tamanho de grão e endurecimento por formação de precipitados de segunda fase na matriz ferrítica. Os tubos com costura longitudinal utilizados para preparação dos CPs SE(T) e SE(B) foram fabricados por intermédio do processo UOE e possuem diâmetro externo, $D_e = 508mm$ (20 polegadas) e espessura de parede, $T_w = 19mm$.

As juntas soldadas circunferenciais foram executadas por meio do processo arame tubular (FCAW) na posição 1G (plana) com um chanfro simples em V e passe de raiz executado utilizando-se um processo MIG com técnica *STT* (*surface tension transfer*) desenvolvido pela *Lincoln Electric*. Os parâmetros principais de soldagem para fabricação da junta soldada por meio do processo arame tubular são: i) número

de passes 12 (incluindo o passe de raiz pelo processo *STT*); ii) corrente de soldagem 165 A; iii) tensão de soldagem 23 V; iv) insumo de calor médio 1.5 kJ/mm. Mathias⁽⁷⁾ fornece detalhes das propriedades mecânicas da junta soldada testada e

do material base: $\sigma_{ys}^{WM} = 715$ MPa, $\sigma_{uts}^{WM} = 750$ MPa, $\sigma_{ys}^{BM} = 609$ MPa e $\sigma_{uts}^{BM} = 679$ MPa. Aqui, σ_{ys} e σ_{uts} representam a tensão de escoamento e o limite de resistência do material, e *WM* e *BM* denotam o metal de solda e o metal base. O nível de dissimilaridade mecânica (*weld strength overmatch*) é ~18% de tal forma que os efeitos da dissimilaridade sobre as curvas de resistência *J – R* são considerados pequenos.

3.2 Configurações Geométricas de Teste

Mathias⁽⁷⁾ conduziu ensaios de tenacidade à fratura para medição de curvas de resistência *J – R* à temperatura ambiente foram conduzidos sobre CPs SE(T) fixados por garras extraídos da junta soldada e contendo um entalhe central ao cordão de solda. As configurações SE(T) possuem geometria definida pela relação $H/W = 10$ e $a/W = 0,4$ com espessura $B = 14,8$ mm (ligeiramente inferior à espessura do tubo, t_w , largura $W = 14,8$ mm, distância entre garras $H = 148$ mm e $a = 5,9$ mm (Figura 2a). Ensaios de tenacidade à fratura (temperatura ambiente) também foram conduzidos sobre CPs SE(B) extraídos da junta soldada e contendo um entalhe central ao cordão de solda com $a/W = 0,25$, espessura $B = 14,8$ mm, largura $W = 14,8$ mm e distância entre apoios, $S = 4W$ (Figura 2b).

Todos os CPs, incluindo as configurações SE(T), foram pré-trincados por fadiga em flexão utilizando um dispositivo de flexão em 3 pontos similar a um ensaio de flexão concencional. Após a abertura da pré-trinca por fadiga, os CPs foram submetidos à usinagem de um entalhe lateral com redução de 15% da espessura (7,5% de cada lado) para promover crescimento de trinca uniforme em acordo com as recomendações descritas na norma ASTM E1820.⁽¹⁾ Os registros de carga e deslocamento (CMOD) foram obtidos por meio de extensômetros acoplados a facas fixadas na superfície dos corpos de prova.

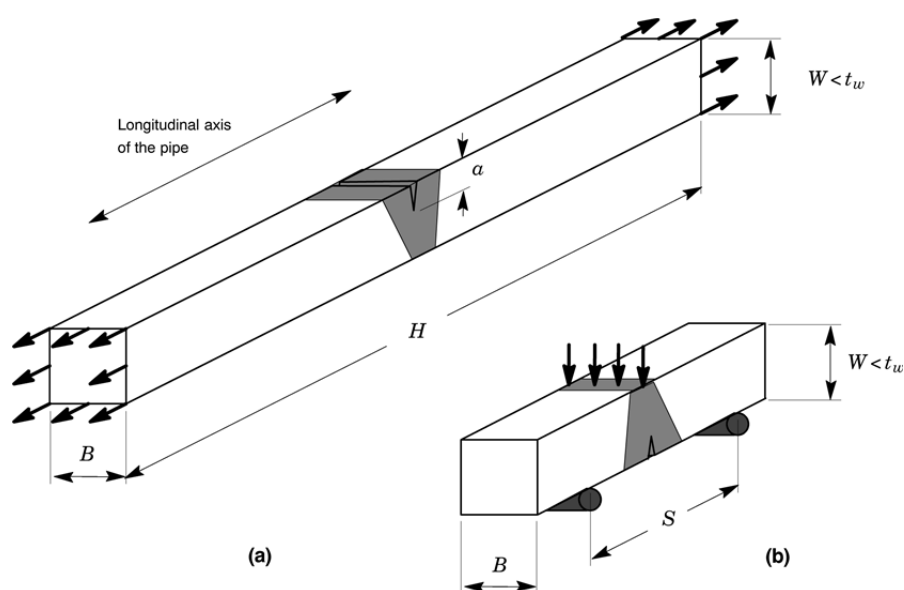


Figura 2. Geometria dos corpos de prova de tenacidade contendo trinca central ao cordão de solda: (a) CPs SE(T) fixados por garras com $H/W = 10$ e $a/W = 0,4$; (b) CPs flexão 3 pontos SE(B) com $a/W = 0,25$ e $S = 4W$. Todas as geometrias com configuração $B \times B$.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS: CURVAS J-R

Esta seção apresenta os resultados de tenacidade à fratura em termos de curvas $J - R$ para a junta soldada do aço API X80 descrita anteriormente baseados em medições experimentais de carga e CMOD para os CPs SE(T) fixados por garras e CPs de flexão SE(B) com a trinca no centro do cordão de solda. As características geométricas e dimensionais de cada CP e as propriedades mecânicas do material foram definidas na seção precedente. Inicialmente, a Figura 3 mostra uma curva experimental típica carga-deslocamento (P vs. CMOD) para ambas as configurações de teste a qual revela claramente a reduzida carga de ensaio para o CP SE(B) em comparação à configuração SE(T).

A avaliação da curva de resistência à propagação dúctil deriva da determinação de J e Δa em cada estágio de descarregamento da curva experimental $P - CMOD$. Baseado nos fatores η e funções de flexibilidade introduzidos anteriormente na Seção 2, as análises conduzidas neste estudo utilizam valores de η_{J-CMOD} e η_{J-LLD} para estimar a componente plástica da Integral J , descrita por J_p . As Figuras 4 e 5 apresentam as curvas de resistência $J - R$ para as configurações de teste SE(T) e SE(B). As características significantes associadas a estes resultados incluem: (i) Os CPs SE(B) com trinca rasa fornecem curvas de resistência $J - R$ razoavelmente comparáveis às curvas de resistência correspondentes aos CPs SE(T) com trinca profunda. Os valores médios da Integral J correspondentes a valores fixos de

crescimento de trinca, $\Delta a = 1$ e 2 mm, são respectivamente $J_{\Delta a=1\text{mm}}^{\text{SE(B)}} \approx 700 \text{ kJ/m}^2$, $J_{\Delta a=2\text{mm}}^{\text{SE(B)}} \approx 900 \text{ kJ/m}^2$, $J_{\Delta a=1\text{mm}}^{\text{SE(T)}} = 500 \text{ kJ/m}^2$, $J_{\Delta a=2\text{mm}}^{\text{SE(T)}} = 800 \text{ kJ/m}^2$. Embora a curva de resistência $J - R$ para o CP SE(B) seja algo mais elevada, as diferenças de valores $J - \Delta a$ entre os CPs SE(B) e SE(T) são significativamente menores do que comparadas, por exemplo, com corpos de prova compactos C(T) de elevada triaxialidade de tensões; e (ii) o valor estimado da Integral J correspondente à iniciação da extensão estável (rasgamento dúctil) da trinca, J_{Ic} , é relativamente independente da geometria e modo de carregamento dos CPs ensaiados. Tal resultado concorda com diversos estudos experimentais (por exemplo, o de Joyce, Hackett e Roe⁽⁸⁾) sobre o relativo fraco efeito da geometria do corpo de prova sobre valores da Integral J para a iniciação da extensão estável. De fato, um procedimento simples de extrapolação de valores $J - \Delta a$ para $\Delta a \geq 0.5 \text{ mm}$ permite estimar $J_{Ic}^{\text{SE(B)}} \approx 350 \sim 400 \text{ kJ/m}^2$ e $J_{Ic}^{\text{SE(T)}} \approx 300 \text{ kJ/m}^2$.

Após os testes, todos os CPs foram mantidos aquecidos em um forno a 300°C (*heat tinting*) por 30 min e subsequentemente resfriados ao ar antes de sofrerem separação de suas superfícies de fratura para medição da extensão da trinca. A Tabela 1 compara as extensões de trinca previstas e medidas para as configurações de teste. Para os CPs SE(T) fixados por garras, o desvio Ψ é da ordem de 1.5~6.2% enquanto para os CPs SE(B), o desvio Ψ é da ordem de 12~17%; aqui o desvio entre a extensão da trinca prevista e medida é definido por

$$\Psi = \left| (a_{\text{previsto}} - a_{\text{medido}}) / a_{\text{medido}} \right|$$

Estes resultados indicam que o método da flexibilidade no descarregamento (UC) fornece estimativas bastante razoáveis do comprimento da trinca para o CP SE(T) fixado por garra. Em contraste, as estimativas de crescimento da trinca para a configuração SE(B) resultam em desvios algo elevados em relação às medições

físicas; tal comportamento é provavelmente associado ao severo tunelamento da frente de trinca observado para os CPs SE(B).

Tabela 1. Estimativas do comprimento da trinca baseadas no método da flexibilidade no descarregamento (UC)

ID	a_0 (mm)	a_p (mm)		ψ (%)
		Medido	Previsto	
SE(B)				
S1	3.85	7.85	6.68	14.9
S2	4.15	8.21	7.15	12.9
S3	3.65	7.55	6.29	16.7
S4	3.72	7.82	6.53	16.4
SE(T)				
S1	5.66	8.84	8.76	0.9
S2	6.11	8.06	8.56	6.2
S3	6.29	9.78	9.20	5.9
S4	6.70	10.75	10.59	1.5

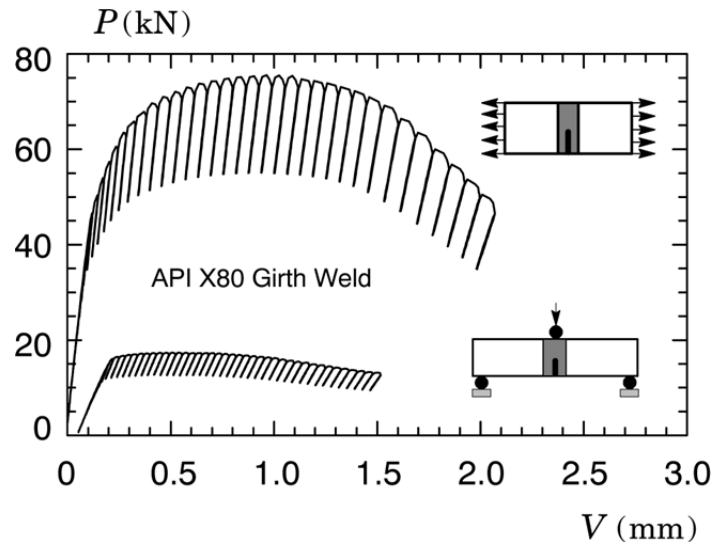


Figura 3. Curvas experimentais típicas de carga vs. CMOD para a junta soldada testada utilizando CP SE(T) fixados por garras com $a/W = 0,4$ e CP flexão 3 pontos SE(B) com $a/W = 0,25$.

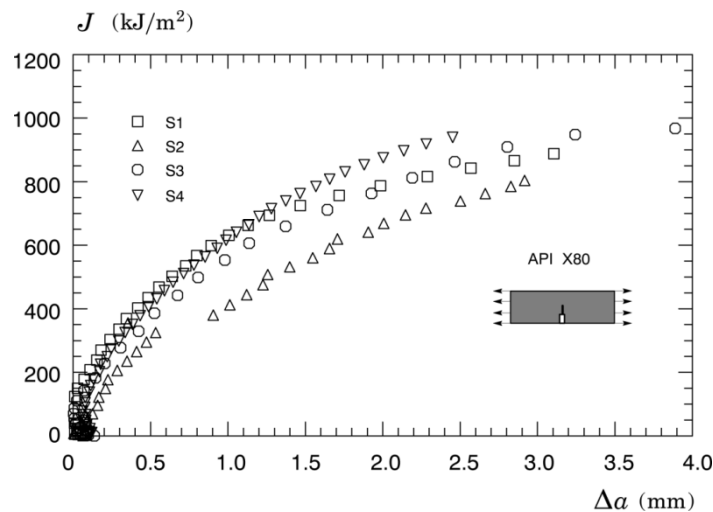


Figura 4. Curvas de resistência experimentais para o CP SE(T) fixados por garras com $a/W = 0,4$.

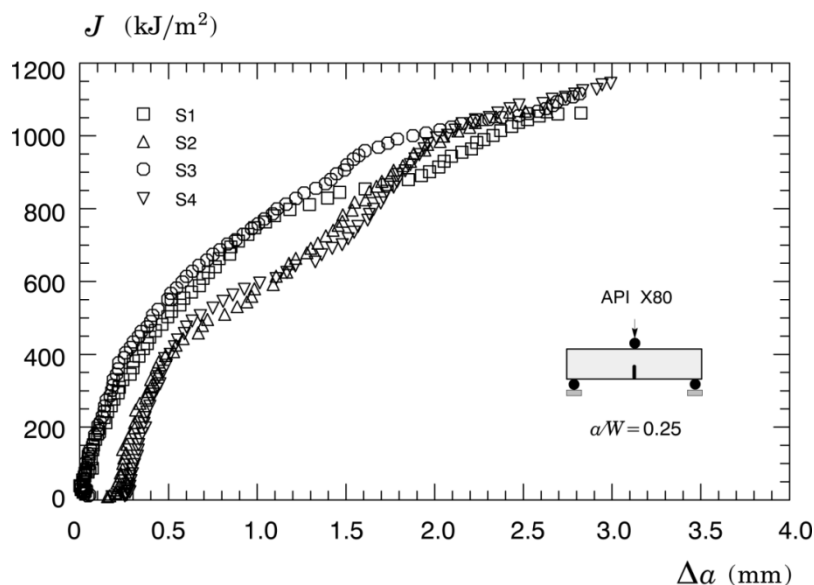


Figura 5. Curvas de resistência experimentais para o CP flexão 3 pontos SE(B) com $a/W = 0,25$.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma investigação das propriedades de propagação estável (rasgamento dúctil) de trincas em uma junta soldada de um aço API X80 utilizando curvas de resistência ($J - \Delta a$) medidas experimentalmente. O estudo descrito neste breve artigo suporta as seguintes conclusões:

- corpos de prova SE(B) com trinca rasa fornecem curvas de resistência $J - R$ que podem ser consideradas razoavelmente comparáveis às curvas de resistência para corpos de prova SE(T) fixados por garras. Apesar da dispersão relativamente elevada para as curvas $J - R$ experimentais, particularmente para os CPs SE(B), os valores médios da Integral J para valores fixos de crescimento de trinca, $\Delta a = 1$ e 2 mm , para ambas as configurações testadas não diferem significativamente;
- as estimativas de crescimento estável da trinca, Δa , baseadas no método da flexibilidade no descarregamento apresentam boa concordância (desvios $\approx 6\%$) com as medições experimentais para os corpos de prova SE(T). Em contraste, o método da flexibilidade no descarregamento forneceu estimativas de valores Δa com desvios algo excessivos ($\approx 16\%$) em relação às medições experimentais para os corpos de prova SE(B).

Trabalhos adicionais estão em andamento para validações complementares do uso de CPs SE(B) com trinca rasa como uma configuração de teste adequada a medições realistas de curvas de resistência $J - R$.⁽⁹⁾ Investigações paralelas também focam sobre o estabelecimento de correlações robustas entre a Integral J e CTOD para trincas estacionárias e em propagação para configurações SE(T) em SE(B) aplicáveis em ensaios de tenacidade à fratura.

Agradecimentos

Esta investigação é suportada pela FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo 2012/13053-2) e pelo CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico (Processo 473975/2012-2). Os autores agradecem

o valioso auxílio e colaboração da *Lincoln Electric do Brasil*, particularmente na pessoa do Eng. Antonio C. Souza, para a preparação e fabricação das juntas soldadas.

REFERÊNCIAS

- 1 American Society for Testing and Materials, 2011, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", ASTM E1820.
- 2 S. Cravero, C. Ruggieri, 2007, "Further Developments in *J* evaluation Procedure for Growing Cracks Based on LLD and CMOD Data", *International Journal of Fracture*, 148, 347-400.
- 3 X. K. Zhu, B. N. Leis, J. A. Joyce, "Experimentation Estimation of *J-R* curves from Load-CMOD Record for SE(B) specimens", *Journal of ASTM International*, 5 JAI101532.
- 4 S. Cravero, C. Ruggieri, 2007, "Estimation Procedure of *J*-Resistance Curves for SE(T) Fracture Specimens Using Unloading Compliance", *Engineering Fracture Mechanics* 74, 2735-2757.
- 5 C. Ruggieri, 2012, "Further Results in *J* and CTOD Estimation Procedures for SE(T) Fracture Specimens - Part I: Homogeneous Materials", *Engineering Fracture Mechanics* 79, 245-265.
- 6 G. H. B. Donato, C. Ruggieri, "Estimation procedure for *J* and CTOD Fracture Parameters Using Three-Point Bend Specimens", in: *6th International Pipeline Conference (IPC 2006)*, Calgary, Canada, 2006.
- 7 L. L. S. Mathias, "Avaliação Experimental de Curvas *J-R* em Juntas Soldadas Circunferenciais de Risers Rígidos de Aço API 5L X80 Utilizando Corpos de Prova SE(T) e SE(B)", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 106 p., 2013.
- 8 Joyce, J. A., Hackett, E. M. and Roe, C., "Effects of Crack Depth and Mode loading on the *J-R* Curve Behavior of a High Strength Steel", in: *Constraint Effects in Fracture*, ASTM STP 1171, E. M. Hackett, et al. Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 239-263, 1993.
- 9 L. L. S. Mathias, D. F. B. Sarzosa, C. Ruggieri, "Effects of Specimen Geometry and Loading Mode on Crack Growth Resistance Curves of a High-Strength Pipeline Girth Weld", *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (Aceito para Publicação).