



INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DO ENTALHE NA TENACIDADE À FRATURA DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO SAC-50

Geraldo de Paula Martins

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: gpm@cdtn.br

Fernando Antônio Pascoal Júnior

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: fernandopascoal@hotmail.com

Carlos Alberto Cimini Júnior

Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Campus, Pampulha, 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: cimini@dedalus.lcc.ufmg.br

Leonardo Barbosa Godefroid

Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, e-mail: leonardo@em.ufop.br

Resumo: *Estruturas e componentes fabricados de aço sempre utilizam o processo de soldagem para união das partes. Por melhor que sejam os procedimentos de soldagem, as soldas não são perfeitas, apresentando descontinuidades tais como: falta de fusão, falta de penetração, trincas, entre outros. Neste trabalho é estudado o comportamento de juntas soldadas de aço SAC 50, através da Integral J, e estudada a influência da direção do entalhe mecânico e como consequência, a propagação da trinca ao longo do cordão de solda e direção da espessura. Conclui-se que a trinca se propaga com mais facilidade na direção do cordão de solda.*

Palavras-chave: *Integral J, tenacidade à fratura, zona termicamente afetada*

1. INTRODUÇÃO

O comportamento de juntas soldadas contendo descontinuidades pode ser estudado através de ensaios de mecânica de fratura, tais como K_{IC} , CTOD, e Integral J. O K_{IC} é um parâmetro de tenacidade à fratura elástica linear em estado plano de deformação. O CTOD e a Integral J são também parâmetros de tenacidade à fratura mas se aplicam no regime elasto-plástico. Como o aço estudado neste trabalho apresenta um comportamento tenaz na temperatura ambiente, suas propriedades de tenacidade foram obtidas por meio da Integral J, com o entalhe e a pre-trinca por fadiga localizados na Zona Termicamente Afetada (ZTA), em ambas as direções Longitudinal (ao longo do cordão de solda) e Transversal (ao longo da espessura).

2. A INTEGRAL J

A Integral J independente da trajetória proposta por Rice (RICE & ROSENGREEN, 1968) é um método de caracterização do campo de tensão na ponta de uma trinca por meio de integração através de uma trajetória tomada suficientemente longe da ponta da trinca a ser analisada e então substituída para uma trajetória próxima à região na ponta da trinca. A Integral J é uma integral de linha e sua forma é dada na Eq (1); a falha ocorre quando J assume um valor crítico.

$$J = \int_C \left(W dy - T \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \cdot ds \right) \quad (1)$$

onde x, y = coordenadas retangulares, normais à frente da trinca, Fig. (1); ds = incremento ao longo do contorno C ; T = vetor tensão atuando no contorno; u = vetor deslocamento; W = densidade de energia de deformação = $\int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$.

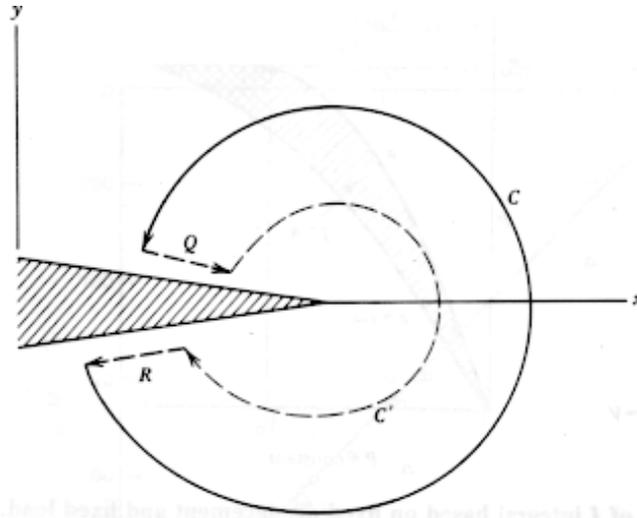


Figura 1. Contorno linear em volta da ponta da trinca

Para o caso de um contorno fechado, Rice mostrou que a integral de linha é igual a zero. Examinando o contorno $C + C' + Q + R$ na Fig. (1), encontra-se $dy = 0$ e $T_i = 0$ ao longo dos segmentos Q e R . Portanto, $J_Q = J_R = 0$, o que leva ao fato de que $J_C = J_{C'}$. Como as trajetórias ao longo dos contornos C e C' são também de sinais opostos, conclui-se que a Integral J é independente da trajetória e assim, J pode ser determinado a partir de uma análise de tensões, onde σ e ϵ são definidos em algum contorno arbitrário na vizinhança da ponta da trinca (Hertzberg, 1989).

Rice apresentou também uma definição alternativa equivalente para J , utilizando uma diferença de energia pseudo potencial entre dois corpos identicamente carregados, possuindo comprimentos de trinca ligeiramente diferentes. A variação na energia de deformação ΔU , associada com um avanço incremental da trinca Δa , está descrita na Fig. (2) e igual a $J\Delta a$ ou $J = (du/da)$, onde:

$$J = \int_0^P \left(\frac{\partial \delta}{\partial a} \right)_P dP \text{ ou } J = - \int_0^\delta \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_\delta d\delta \quad (2)$$

Da Equação (2), vê-se que J pode ser determinado a partir de registros de carga versus deslocamento do ponto de carga, para corpos de prova contendo comprimentos de trinca ligeiramente diferentes. Para condições elásticas, $G = (du/da)$, a relação entre J e G é aparente. Tanto para condições elásticas lineares quanto não lineares, J é a energia disponível na ponta da trinca, por unidade de extensão da trinca, da . Isto significa que J é equivalente à força impulsora da trinca. Portanto,

$$J = G = \frac{K^2}{E'} \quad (3)$$

sendo $E' = E$ (estado plano de tensões);

$$E' = \frac{E}{(1-\nu^2)} \text{ (estado plano de deformações).}$$

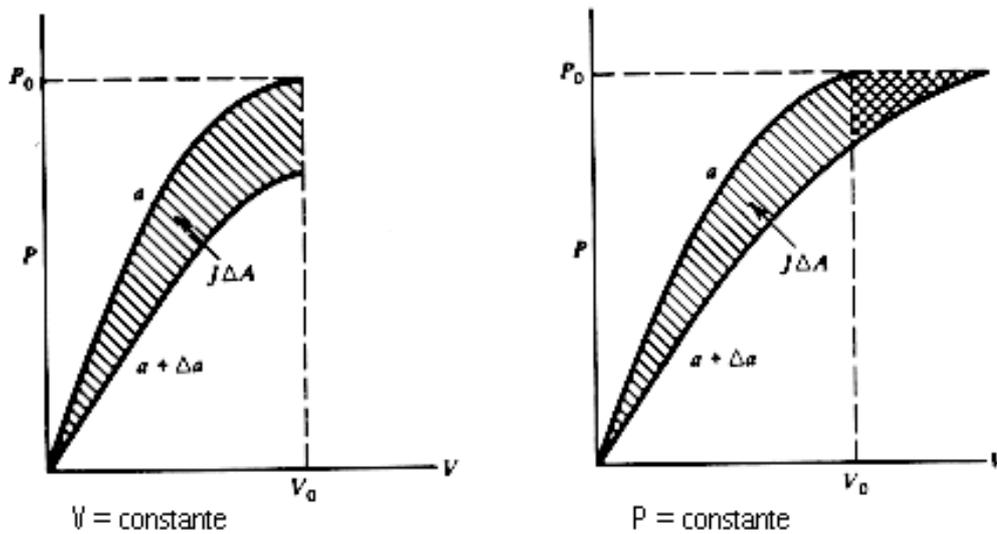


Figura 2. Determinação da Integral J, baseado em deslocamento fixo e em carga fixa

A determinação do valor de J para início de crescimento estável da trinca, representado por J_{IC} , por meio de ensaios em corpos-de-prova trincados é descrita na norma ASTM E-813/89, “Standard test Method for J_{IC} , a Measure of Fracture Toughness”.

3. TESTES DE RESISTÊNCIA À FRATURA EM JUNTAS SOLDADAS

A soldabilidade é uma propriedade complexa a qual é afetada por vários fatores. Vários testes de tenacidade à fratura têm sido desenvolvidos para determinar os efeitos desses fatores (ASTM E 813-89). Alguns estão relacionados às qualidades de fabricação para conjuntos soldados, enquanto que outros estão relacionados à performance em serviço. Os testes relacionados às qualidades de fabricação são indicados para medir a susceptibilidade do sistema metal de base e metal de solda com relação à trincas, porosidade ou inclusões sob condições de soldagem. Os testes de performance em serviço incluem resistência à tração, ao escoamento, ductilidade, tenacidade à fratura, tensão de fratura, trincamento por corrosão sob tensão, fadiga e fadiga com corrosão. Já foram desenvolvidos vários tipos de testes para determinar a tenacidade à fratura para conjuntos soldados, entre os quais se incluem: o ensaio de impacto tipo Charpy, com entalhe em V; vários testes de dobramento, o teste de queda de peso e os testes de mecânica de fratura (K_{IC} , COD, e Integral J). Cada um desses testes apresenta vantagens e desvantagens, e cada um mede algum parâmetro que representa a tenacidade à fratura para o conjunto soldado (ou de uma região particular do conjunto).

Apesar de já haver vários estudos de tenacidade à fratura de conjuntos soldados, não existe ainda uma regra geral para escolher o melhor método de teste para cada aplicação. A maioria dos testes de tenacidade à fratura tem um entalhe e/ou uma trinca de fadiga. Os materiais em geral, são heterogêneos e essa heterogeneidade na frente do entalhe ou da trinca de fadiga pode resultar em uma variabilidade significativa nos resultados dos testes. Essa variabilidade depende de muitos fatores:

- as juntas soldadas exibem propriedades heterogêneas e anisotrópicas. O volume de material com propriedades essencialmente uniformes, em especial na ZTA é muito pequeno;
- as regiões de baixa tenacidade na ZTA de soldas multipasses podem ocorrer intermitentemente ao longo da interface da solda. Esses e outros fatores dificultam a localização adequada de um entalhe ou uma pré-trinca de fadiga, em uma região que apresente propriedades uniformes. Isto resulta em uma grande dispersão de resultados de ensaios de impacto tipo Charpy com entalhe

em V, bem como dos resultados de K_{IC} e CTOD (Crack Tip Opening Displacement). As propriedades observadas para uma dada região podem ou não refletir as propriedades da junta soldada ou sua performance em uma estrutura real (Broek, 1989);

- testes de tenacidade à fratura tanto do metal de base quanto da ZTA são freqüentemente requeridos, para seleção do material, qualificação do procedimento de soldagem, ou avaliação da adequação para uso, como apresentado no documento PD 6493/91. Existem várias normas para determinação dos parâmetros de tenacidade à fratura para materiais metálicos (Rice & Rosengreen, 1989; Hertzberg, 1989), porém, nenhuma delas faz referência a juntas soldadas, embora estejam constantemente sendo aplicadas para tal fim. Existem porém, trabalhos realizados (Harrison, Dawes e Kamath, 1978 e Dawes, Pisarsk e Squirrel, 1989) com recomendações a aplicações em juntas soldadas.

Segundo Dawes e colaboradores, um requisito essencial para testes em juntas soldadas, é que as soldas devem ser completamente representativas da estrutura em serviço. Baseia-se no conhecimento de que a tenacidade à fratura dos metais de solda e das ZTAs podem depender criticamente dos seguintes fatores:

- (a) processo ou processos de soldagem e consumíveis;
- (b) composição do metal de base;
- (c) espessura da junta;
- (d) temperaturas de pré-aquecimento e entre passes;
- (e) energia de soldagem;
- (f) posição e procedimento detalhado de soldagem;
- (g) configuração da junta;
- (h) restrição com relação à distorção lateral e rotacional;
- (i) tratamento térmico pós soldagem, inclusive o tratamento para liberação de hidrogênio;
- (j) outros tratamentos térmicos, tais como aqueles envolvendo deformação plástica, irradiação, etc.;
- (k) tempo entre soldagem e ensaio;
- (l) o ambiente.

4. MATERIAIS E METODOLOGIA

O material utilizado foi o SAC 50, espessura original de 19 mm. As juntas foram soldadas pelo processo manual com eletrodo revestido, e a preparação foi em 1/2 V, para se obter uma ZTA reta. Em seguida foram retirados corpos-de-prova para os ensaios de tração, e Integral J. Os corpos-de-prova para ensaios de Integral J foram de seção quadrada e de dimensões finais de 18 mm x 18 mm x 100 mm, retirados das juntas soldadas de 19 mm de espessura. Os entalhes foram obtidos por meio de discoton, pré-trincados por fadiga para, em seguida serem realizados os ensaios de Integral J. Foram preparados corpos-de-prova com entalhe na direção da espessura (orientação T-S) e na direção do cordão de solda (orientação T-L). A Figura (3) mostra os detalhes dos corpos-de-prova. Foram realizados os ensaios mecânicos de tração, para se obter as propriedades mecânicas limite de escoamento e limite de resistência. O equipamento utilizado para os ensaios de tração foi uma Instron de capacidade 96 kN. As pré trincas de fadiga e os ensaios de Integral J foram realizados no equipamento Instron, servo hidráulico de capacidade 250 kN. Neste trabalho não foram realizadas análises de fratura, o que deverá ser feito em uma nova etapa.

Os corpos-de-prova para ensaios de mecânica de fratura foram pré-trincados por fadiga conforme a norma ASTM E 1820. Os ensaios de Integral J foram realizados conforme a norma ASTM E 813.

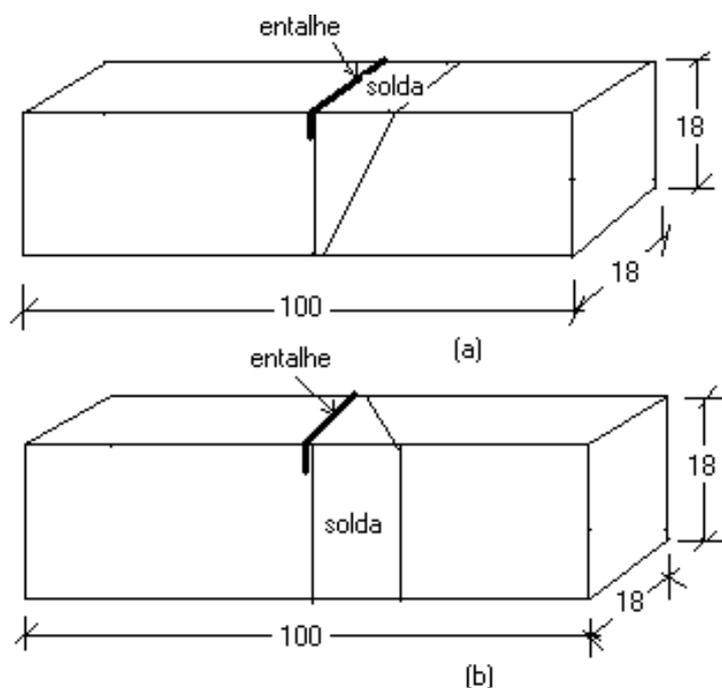


Figura 3. Corpos-de-prova para os ensaios de Integral J; (a) entalhe na direção da espessura; (b) entalhe na direção ao longo do cordão de solda

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela (1) mostra os resultados dos ensaios mecânicos, a Tab. (2) e a Tab. (3), os resultados de Integral J na direção da espessura e na direção ao longo do cordão de solda respectivamente.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de tração longitudinal e transversal, de corpos-de-prova retirados de juntas soldadas em chapas de 19 mm de espessura

C.P. nº		Área (mm ²)	Limite de escoamento a 0,2% (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)
Longitudinal	1	60,8	578	649	19,6	39,8
	2	63,6	571	639	17,0	40
	3	60,8	601	668	20,2	37,5
Transversal	4	60,8	407	540	20,6	46,6
	5	59,4	396	544	20,2	42,5
	6	59,4	406	555	22,3	42,5

Tabela 2. Resultados de Integral J dos corpos-de-prova com entalhe ao longo do cordão de solda

CP	B (mm)	W (mm)	a (mm)	J _{IC} (N/mm)
F1	18,00	17,98	8,99	102,64
F3	18,01	17,99	8,99	95,69
F5	18,01	17,97	8,99	82,70
F7	18,00	17,99	9,00	97,64
Média				94,67
Desvio Padrão				8,50

Tabela 3. Resultados de Integral J dos corpos-de-prova com entalhe ao longo da espessura

CP	B (mm)	W (mm)	A (mm)	J _{IC} (N/mm)
F6	17,95	17,99	9,25	153,20
F8	17,98	18,00	9,71	184,62
F9	17,97	17,99	9,70	149,57
F10	18,01	17,98	9,61	154,80
Média				160,55
Desvio padrão				16,20

A Figura (4 a, b, c e d) apresenta os resultados dos ensaios de Integral J dos corpos-de-prova com entalhe ao longo do cordão de solda e a Fig. (5 a, b, c e d), apresenta os resultados de Integral J dos corpos-de-prova com entalhe na direção da espessura. Os valores da Integral J para cada uma das orientações foi obtido tirando-se a média dos quatro ensaios, obtendo-se, respectivamente para as orientações T-L e T-S:

$$J_i = 94,67 \pm 8,50 \text{ kN/m} \quad \text{e} \quad J_i = 160,55 \pm 16,20 \text{ kN/m}$$

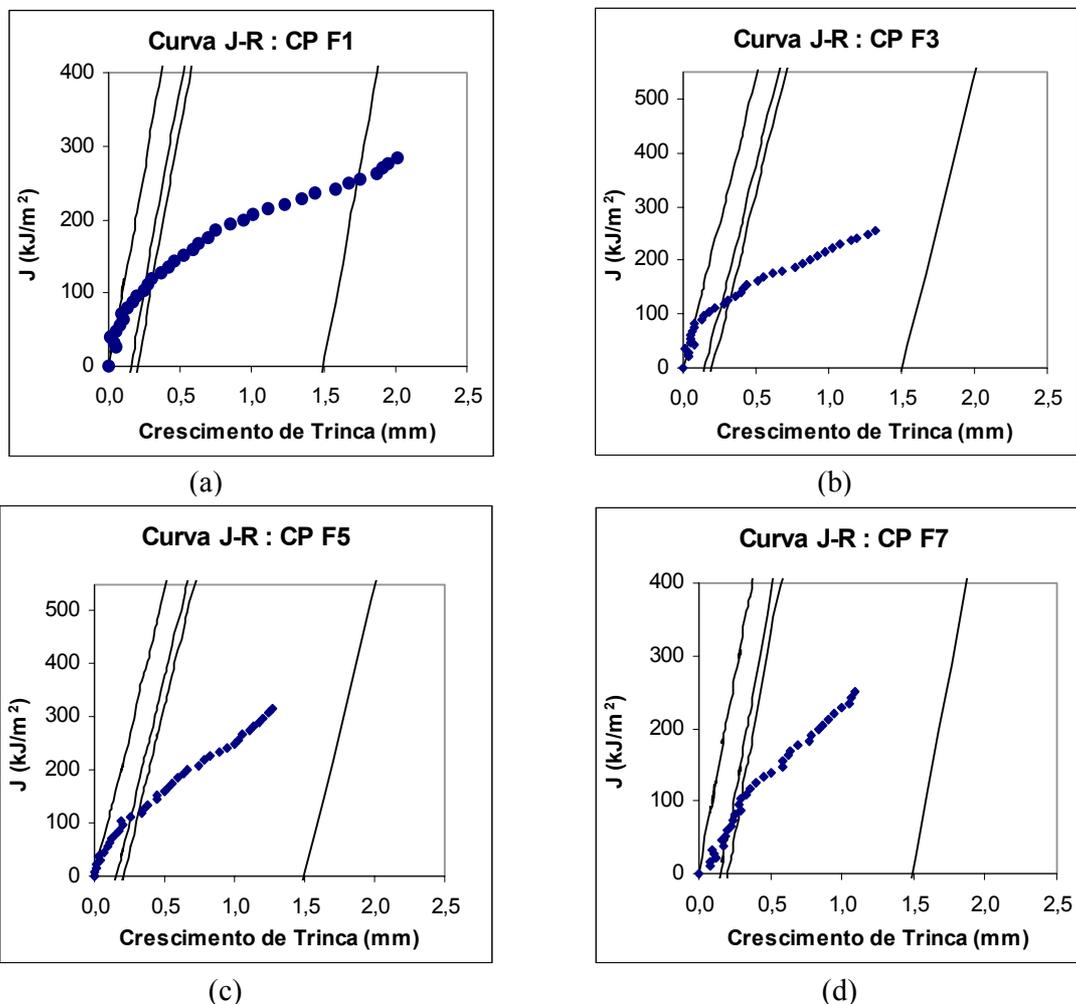


Figura 4. Gráficos dos ensaios de Integral J dos corpos-de-prova com entalhe ao longo do cordão de solda. (a) CP F1; (b) CP F3; (c) CP F5 e (d) CP F7

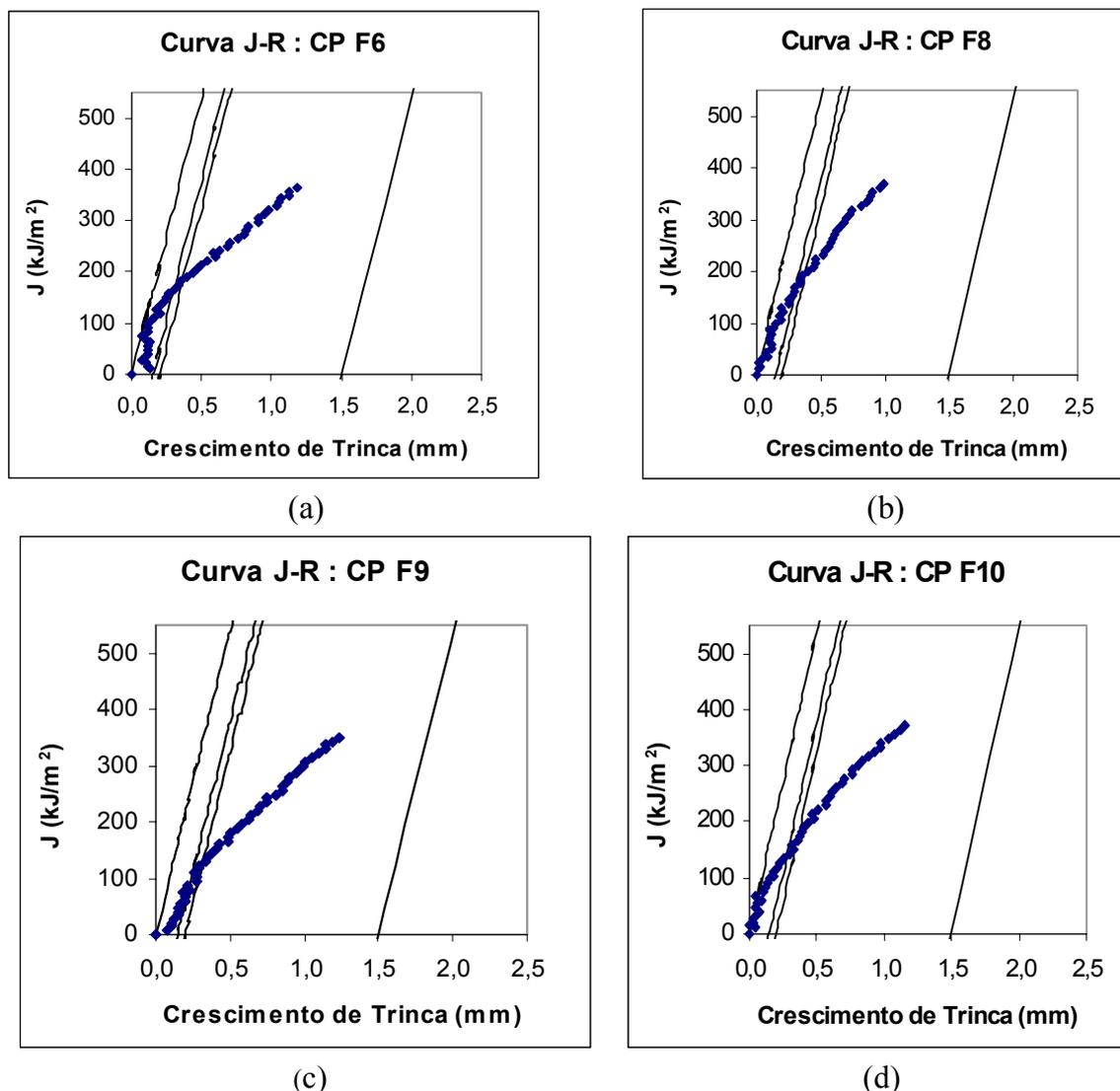


Figura 5. Gráficos dos ensaios de Integral J dos corpos-de-prova com entalhe ao longo da espessura (a) CP F6; (b) CP F8(c); CP F9; (d) CP F10

Conforme pode-se observar pelos resultados de Integral J, os valores de J_{IC} dos corpos-de-prova com entalhe na direção da espessura são bem superiores aos valores de J_{IC} na direção ao longo do cordão de solda, em torno de 68% superior. O processo de soldagem manual com eletrodo revestido é um processo relativamente rápido, resultando como consequência, um resfriamento rápido e os grãos tendem a ser alongados na direção longitudinal (ao longo do cordão de solda), e as trincas têm tendência de se propagar com mais facilidade nos contornos de grão (crescimento intergranular). Na direção da espessura, em soldas multipasses, o crescimento de trinca se torna mais difícil, devido às barreiras criadas pelas interfaces entre passes. Como consequência, uma trinca em junta soldada tende a crescer com maior facilidade na direção longitudinal.

Os resultados de Integral J para as duas orientações estão em concordância com os resultados de ensaios de impacto Charpy, obtidos em juntas soldadas do mesmo aço (Martins et al, 2001), os quais obtiveram os valores de 68 J para a orientação T-L, e 145 J para a orientação T-S, à temperatura ambiente, para corpos-de-prova retirados de soldas da chapa de 25 mm de espessura e com entalhes na ZTA. Observa-se que os valores de energia Charpy para a orientação T-S também foram bem superiores aos correspondentes à orientação T-L.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- a) Os valores de J_{IC} dos corpos-de-prova com entalhe na direção da espessura são bem superiores aos valores de J_{IC} dos corpos-de-prova com entalhe na direção ao longo do cordão de solda (aproximadamente 50% superior);
- b) As trincas que por acaso existirem, têm tendência a se propagar mais facilmente na direção ao longo do cordão de solda.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM E 813-89. Standard test method for J_{IC} , a measure of fracture toughness. American Society for Testing Materials. Philadelphia, 1987.
- ASTM E 1290. Standard test method for crack tip opening displacement (CTOD) fracture toughness measurement, 1993.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints. PD 6493, 1991.
- Broek, D., Elementary engineering fracture mechanics. Kluwer, Academic Publishers; Dordrecht, Netherlands, 1986.
- Dawes, M. G.; Pisarski, H. G.; Squirrell, S. J.; Fracture mechanics tests on welded joints. In: Nonlinear Fracture Mechanics, Vol. II, ASTM STP 995, 1989.
- Harrison, J. D.; Dawes, M. G.; Kamath, M. S.; The COD approach and its application to welded structures. The Welding Institute; Abington Hall, Abington, Cambridge, CB1 6AL, 1978.
- Hertzberg, R. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 3ª ed. John Wiley & Sons. New York, NY, 1989.
- Kanninen, M. F. & Popelar, C. H. Advanced fracture mechanics. Oxford University Press. USA, 1985.
- Rice, J. R. & Rosengren, G. F. Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 16, 1968.
- Harrison, J. D. The basis of proposed acceptance standard for weld defects; Part I: Porosity; Part II: slag inclusions. Com. XIII, Doc. XIII-817-IIW, 1977.
- Martins, G. de P.; Cimini Jr., C. A., Godefroid, L. B. Influence of welding planar defects in the fracture toughness of structural steel. Preliminary testing. 16th International Conference on Structural mechanics in Reactor Technology, SMiRT 16, August, 12 – 17, 2001. Washington, DC, USA.

INFLUENCE OF NOTCH ORIENTATION ON THE FRACTURE TOUGHNESS OF A SAC 50 STEEL WELDED JOINTS

Geraldo de Paula Martins

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: gpm@cdtn.br

Fernando Antônio Pascoal Júnior

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: fernandopascoal@hotmail.com

Carlos Alberto Cimini Júnior

Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Campus, Pampulha, 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: cimini@dedalus.lcc.ufmg.br

Leonardo Barbosa Godefroid

Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, e-mail: leonardo@em.ufop.br

***Abstract:** Structures and components manufactured of steel always make use of welding processes for union of parts. As the best as the welding procedure, the welds are not perfects, presenting discontinuities as: lack of fusion, lack of penetration, cracks, and so on. In this work, it is studied the behavior of the SAC 50 steel welded joints, through J integral, and the influence of mechanical notch orientation also studied, and, as consequence, the crack propagation through the weld bead and through the thickness. It is concluded that the crack propagates with most easily through the weld bead.*

***Keywords:** J integral, fracture toughness, heat affected zone*