



## CORRELAÇÃO ENTRE ENERGIA DE IMPACTO CHARPY E INTEGRAL J, EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO SAC 50 À TEMPERATURA AMBIENTE

### Geraldo de Paula Martins

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/CNEN, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: gpm@cdtn.br

### Emerson Giovani Rabello

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/CNEN, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: egr@cdtn.br

### Carlos Alberto Cimini Júnior

Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: cimini@dedalus.lcc.ufmg.br

### Leonardo Barbosa Godefroid

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

**Resumo.** *A aplicação de aços na construção civil tem aumentado progressivamente nos últimos anos. A substituição do concreto pelo aço implica em grandes economias, com a redução do custo das construções. Nas últimas décadas, a metodologia tradicional de projetos de estruturas e componentes através da resistência dos materiais tem sido substituída pela metodologia da mecânica de fratura, através do  $K_{IC}$ , (parâmetro que representa a tenacidade à fratura em estado plano de deformação) do CTOD (do Inglês Crack Tip Opening Displacement) e da Integral J que representam parâmetros de tenacidade à fratura de materiais com comportamento elasto-plástico. Como os ensaios da mecânica de fratura são relativamente caros, quando comparados ao ensaio Charpy, que é um ensaio dinâmico, também de tenacidade à fratura, em muitas aplicações não se justificam os custos elevados para caracterizar o material. Neste trabalho, procura-se obter uma correlação entre valores de energia de impacto Charpy e de Integral J para o aço SAC 50 de 12 mm e de 19 mm de espessura, os quais poderão ser utilizados para avaliar o risco de propagação de trinca em juntas soldadas.*

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

## 1. INTRODUÇÃO

A fabricação de estruturas e pontes de concreto vem sendo ao longo dos anos substituída pelo aço, tendo em vista a economia relacionada a preços, tempo e peso. Como a fabricação de estruturas e componentes de aço implica em união de diversas partes, o método mais indicado para essas uniões é a soldagem. Sabe-se que peças soldadas sempre apresentam defeitos tais como trincas, falta de fusão e de penetração, entre outros, os quais são aceitáveis ou não, em função de suas dimensões, e dos códigos aplicáveis em cada caso. A confiabilidade das estruturas e componentes é comprovada através de ensaios mecânicos dos materiais a serem empregados e que reproduzem as condições de serviços, em geral, de uma forma mais severa. Como a maioria dos aços empregados

em construções apresentam um comportamento elasto-plástico, isto é, admitem uma deformação plástica razoável antes de falha em serviço, os ensaios de mecânica de fratura indicados são os de CTOD (Crack Tip Opening Displacement) e da Integral J, que são ensaios para determinar a resistência à propagação de trincas no regime elasto-plástico. O ensaio Charpy, com entalhe em V (CVN) é um ensaio dinâmico e, portanto, mais severo que os ensaios de CTOD e de Integral J. É um ensaio empregado principalmente no estudo de fratura frágil, mas um levantamento de valores de ensaios de impacto em função da temperatura fornece a região de transição dúctil-frágil, apresentando nitidamente dois patamares, um inferior, que representa a faixa de baixa tenacidade e um superior que representa a faixa de alta tenacidade. A metodologia para a obtenção dos valores de Integral J é regulamentada pela Norma Americana ASTM E 813. A Norma define:

$$J_i = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (1)$$

Esta equação define o valor de J em um ponto na linha carga-deslocamento, correspondente à carga P, e deslocamento  $\delta_i$ ; para as condições de dobramento puro e de dobramento em três pontos, com uma razão de vão para largura igual a 4 (Hertzberg, 1996), J é dado por:

$$J_i = \frac{K_i^2}{E} (1 - \mu^2) + \frac{2A_i}{Bb} \quad (2)$$

onde o primeiro termo do segundo membro representa a parte elástica e o segundo termo representa a parte plástica de J;  $A_i$  é a área sob a curva carga X deslocamento do ponto de carga, B é a espessura do corpo-de-prova e b é o ligamento remanescente não trincado. A Fig (1) abaixo mostra a curva obtida de ensaios para determinação da Integral J em duas situações: (a) deslocamento constante, e (b) carga constante.

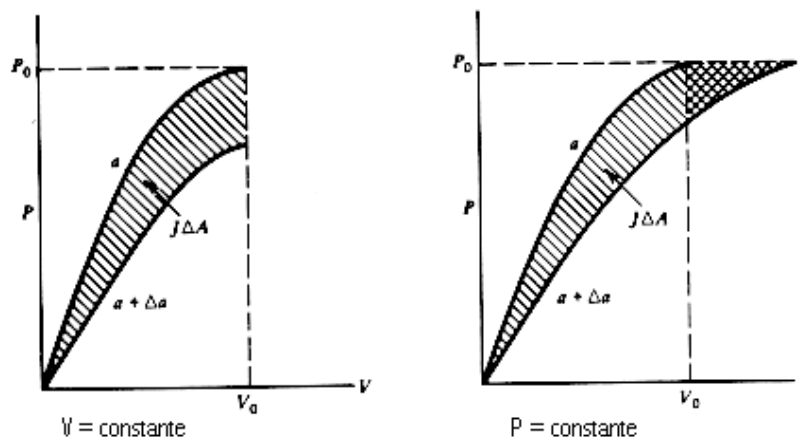


Figura 1. Gráfico de ensaio para determinação da Integral J

## 2. MATERIAIS E METODOLOGIA

O aço empregado foi o SAC 50 de espessuras 19 mm e 12 mm, respectivamente; e cuja composição química é apresentada na Tab. (1).

As soldagens foram realizadas utilizando o processo manual a arco metálico com eletrodo revestido, com preparação em juntas tipo 1/2 V, nas chapas de 12 mm e de 19 mm, recortadas em dimensões de 500 mm X 150 mm. Os procedimentos de soldagem foram os seguintes:

Chapas de 19 mm de espessura; Tipo de Chanfro: 1/2 V; número de passes: 12;

Parâmetros de soldagem: Tensão: 20 V para o primeiro e segundo passes; 22 V para os dez passes restantes (total de 12 passes); corrente: 120 A para os dois primeiros passes; 230 A, para os

dez passes restantes; eletrodo de 3,25 mm de diâmetro nos dois primeiros passes e eletrodo de 5 mm de diâmetro nos dez passes restantes;

Chapas de 12 mm de espessura: Tipo de Chanfro: 1/2 V; número de passes: 06;

Parâmetros de soldagem: Tensão: 20 V para todos os passes; corrente: 110 A para o primeiro passe; 220 A, para os cinco passes restantes; eletrodo de 3,25 mm de diâmetro no primeiro passe e eletrodo de 5 mm de diâmetro nos cinco passes restantes; separação de 2 mm entre as chapas para se obter penetração completa. Cada soldagem foi realizada com um pré-aquecimento mínimo de 323 K (50°C) e temperatura mínima entre passes de 323 K (50°C). Foi feito esmerilhamento entre os passes para retirada da escória.

Tabela 1. Composição química do aço SAC 50, espessuras de 12 mm e de 19 mm, respectivamente

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Nb	Ti	Cr	Ni
Espessura (mm)	Composição química (%)										
12	0,12	1,13	0,34	0,024	0,013	0,037	0,26	0,022	0,009	0,44	0,20
19	0,12	1,14	0,29	0,021	0,012	0,033	0,30	0,024	0,014	0,47	0,17

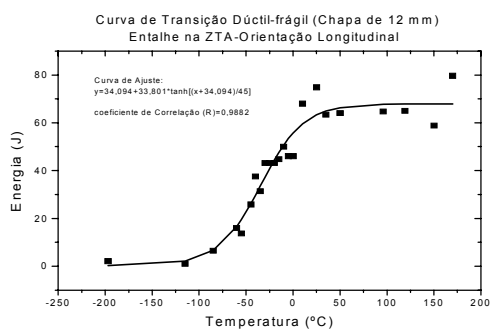
Foram confeccionados corpos-de-prova para ensaios de tração, ensaios de impacto Charpy e ensaios de Integral J para determinação de  $J_{IC}$  (valores de J para início de crescimento estável da trinca, segundo ASTM E 813). Os corpos de prova para ensaios de tração foram do tipo reduzido, sendo três retirados na direção transversal ao cordão de solda, com o cordão na região central útil e três ao longo do cordão de solda para cada uma das duas espessuras. Os corpos-de-prova para os ensaios de impacto Charpy e para os ensaios de Integral J foram preparados localizando-se o entalhe na zona termicamente afetada (ZTA), com entalhe na direção da espessura (orientação T-S) e entalhe na direção do cordão de solda (orientação T-L), para as duas espessuras.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

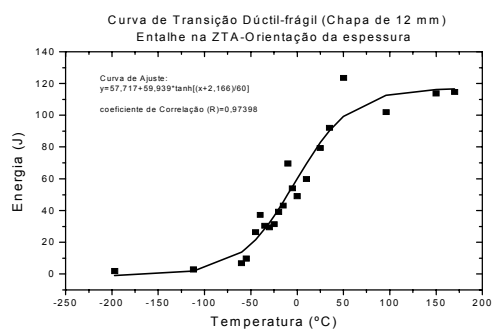
A Tab. (2) apresenta os resultados dos ensaios de tração das chapas de 12 mm e de 19 mm de espessura e as Fig. (2) e (3) apresentam as curvas de transição dúctil-frágil das mesmas chapas.

Tabela 2. Resultados de ensaios de tração das chapas de espessuras 12 mm e 19 mm

Orientação	Área (mm <sup>2</sup> )		$\sigma_e$ (MPa)		$\sigma_r$ (MPa)		Along. (%)		Estricção (%)	
	12	19	12	19	12	19	12	19	12	19
Longitudinal	28,3	60,8	519	578	675	649	25,7	19,6	41,6	39,8
	28,3	63,6	539	571	676	639	25,7	17,0	41,6	40,0
	28,3	60,8	554	601	693	668	22,8	20,2	35,0	37,5
	Média		537	583	681	652	24,7	18,9	39,4	39,1
	Desvio Padrão		14	13	8	12	1,4	1,4	3,1	1,1
	Transversal	28,3	60,8	480	407	603	540	17,0	20,6	31,7
28,3		59,4	490	396	598	544	20,0	20,2	30,0	42,5
28,3		59,4	470	406	592	555	20,0	22,3	31,7	42,5
Média		480	403	598	546	19,0	21,0	31,1	43,9	
Desvio Padrão		8	5	5	6	1,4	0,9	0,8	1,9	

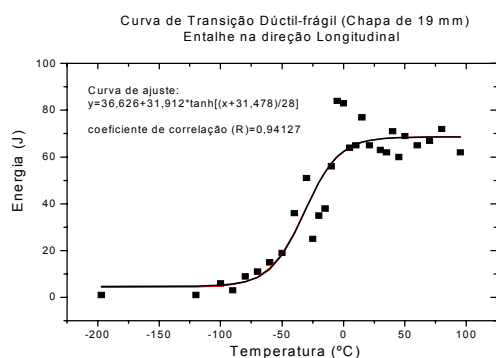


(a)

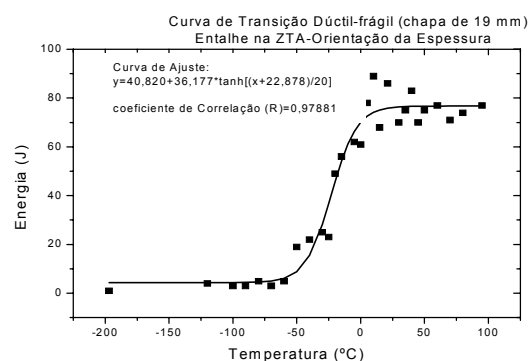


(b)

Figura 2. Curva de transição dúctil frágil da ZTA (a): com entalhe na orientação T-L. (b): com orientação T-S (chapa de 12 mm de espessura)



(a)



(b)

Figura 3. Curva de transição dúctil frágil da ZTA (a): com entalhe na orientação T-L. (b): com orientação T-S (chapa de 19 mm de espessura)

A Tabela (3) apresenta os resultados de Integral J, ( $J_i$ ) dos corpos-de-prova retirados das chapas de 12 mm e de 19 mm de espessura, nas duas orientações (T-L e T-S), e a Tab (4) apresenta em conjunto os valores médios de Integral J e de energia de impacto Charpy (CVN), à temperatura ambiente (297 K).

Tabela 3. Resultados de ensaios de Integral J

CP	B (mm)	W (mm)	$a_0$ (mm)	$a_f$ (mm)	a/W	Orientação	$J_{IC}$ (kJ/m)	Média ± Desvio Padrão (kJ/m)
G1	10,007	10,000	5,119	7,943	0,5119	T-L	87,83	81,34 ± 4,89
G2	10,003	10,000	4,663	7,384	0,4664		80,35	
G4	10,010	9,990	4,647	7,050	0,4653		75,39	
G8	10,010	9,990	4,438	6,875	0,4444	T-S	136,95	120,23 ± 11,89
G9	10,000	10,010	4,702	6,690	0,4699		113,36	
G12	10,000	9,983	4,733	7,763	0,4710		110,37	
F1	18,003	17,980	8,776	11,698	0,4880	T-L	107,36	96,26 ± 8,71
F3	18,007	17,990	9,621	11,888	0,5349		99,08	
F5	18,010	17,970	9,941	11,732	0,5532		83,15	
F7	18,000	17,990	9,993	11,960	0,5555		95,43	
F6	17,953	17,990	9,245	10,640	0,5138	T-S	167,09	176,34 ± 10,07
F8	17,980	18,000	9,707	9,978	0,5394		187,15	
F9	17,970	17,990	9,707	11,161	0,5391		165,51	
F10	18,010	17,980	9,607	10,918	0,5343		185,61	

Tabela 4. Valores de Integral J e de energia de impacto Charpy

Parâmetro de tenacidade	Orientação			
	T-L	T-S	T-L	T-S
Integral $J_{IC}$ (kN/m)	81,39	120,23	96,26	176,34
CVN (J)	63,14	82,32	68,54	76,34

Os ensaios de Integral J foram realizados à temperatura ambiente (297 K) e, conforme os resultados apresentados nas Tab. (3) e (4).

Dos gráficos de transição dúctil-frágil, Fig. (2) e (3), tira-se, a 297 K, os valores de energia de impacto Charpy, apresentados na Tab. (4). Nota-se uma grande dispersão de resultados de Integral J para as duas espessuras, (12 mm e 19 mm) o que é absolutamente normal em juntas soldadas, devido aos seguintes fatores: (a) a ZTA apresenta diversas estruturas e a localização do entalhe num mesmo tipo de estrutura para os diversos corpos-de-prova é extremamente difícil, devido às dimensões macroscópicas do entalhe em combinação com os tamanhos microscópicos das diversas zonas microestruturais; (b) em soldas multipasses, a estrutura não é homogênea ao longo do cordão de solda, e, portanto, a variação de resultados de um corpo-de-prova para outro é bem evidente.

Comparando-se os resultados de Integral J e energia de impacto, observa-se que os resultados são bem coerentes: valores maiores de Integral J correspondem a valores maiores de energia de impacto. Observa-se também que os valores tanto de Integral J quanto de energia de impacto na orientação T-S são bem superiores aos valores correspondentes na orientação T-L. Isto implica em que uma trinca existente com orientação ao longo do cordão de solda se propaga com maior facilidade do que uma trinca com orientação na espessura.

Não se procurou obter uma equação correlacionando valores de  $J_{IC}$  e de CVN, por causa do pequeno conjunto de pares ( $J_{IC}$ , CVN) obtidos dos ensaios, o que deve ser feito em outros trabalhos futuros.

Barson e Rolfe (1999) apresentam correlações entre energia de impacto Charpy e  $K_{IC}$  para diversos tipos de aços, algumas válidas para o patamar superior e outras para o patamar inferior. O comportamento observado neste trabalho mostra a possível relação entre Integral J e energia de impacto Charpy, mas, a quantidade de dados obtidos não é suficiente para se obter uma equação relacionando esses dois parâmetros; porém é uma boa indicativa para trabalhos futuros onde se pretende obter um número suficiente de dados para se estabelecer uma equação que os relacione.

#### 4. CONCLUSÕES

Dos resultados e discussões apresentados pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Os valores tanto de energia de impacto Charpy quanto de Integral J com entalhe na orientação T-S, foram superiores aos correspondentes com entalhe na orientação T-L;
- Os valores de energia de impacto Charpy e os de Integral J, obtidos das juntas soldadas em chapas de 19 mm de espessura foram superiores aos correspondentes obtidos das juntas soldadas em chapas de 12 mm de espessura;
- O comportamento dos resultados obtidos indica que se pode obter uma correlação entre resultados de impacto Charpy e de Integral J, porém, para isso deve-se obter um conjunto de dados significativo para o estabelecimento de tal correlação.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Desenvolvimento Nuclear – CDTN/CNEN, pelas instalações e equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM E 813-89. Standard test method for  $J_{IC}$ , a measure of fracture toughness. American Society for Testing Materials. Philadelphia, 1987.
- Barson, J. M. & Rolfe, S. T. Fracture and Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics. ASTM, West Conshohocken, PA, U.S.A. Third edition, 1999.
- 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. 3<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons. New York, NY, 1989.

### **CHARPY IMPACT ENERGY AND J INTEGRAL CORRELATIONS, IN SAC 50 WELDED JOINT STEELS, AT ROOM TEMPERATURE**

#### **Geraldo de Paula Martins**

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/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

#### **Emerson Giovani Rabello**

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/CNEN, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: egr@cdtn.br

#### **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.** The application of steel in building has increased progressively at the last years. The replacement of concrete by the steel implicates in great economy with the reduction of the construction costs. In the last decades, the traditional structural and components design methodology have been replaced by the fracture mechanics methodology through  $K_{IC}$ , (fracture toughness in plane strain) and CTOD (Crack Tip Opening Displacement) and  $J$  integral, which represent the fracture toughness in plane stress. As the fracture mechanics testing are relatively expensive, compared with Charpy  $V$  notch testing, which is a fracture toughness dynamic testing, in several applications it is not justificatory the high costs for materials characterization. In this work, it is intention to obtain a Charpy  $V$  notch and  $J$  integral correlation for the SAC 50 steel with 12 mm and 19 mm in thickness, that will able to be used for assessment of the crack propagation risks in welded joints.*

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