

CORRELAÇÕES DE TENACIDADE NA Z.A.C. DE SOLDADURAS NUM AÇO TEMPERADO E REVENIDO

A. Loureiro* e A. Fernandes**

*Dep. Eng^a Mecânica, U. de Coimbra, Lg. D. Dinis, 3000 Coimbra, Portugal

**DEMEGI, U. do Porto, R. dos Bragas, 4099 Porto Codex, Portugal

Resumo. Este trabalho teve por objectivo o estabelecimento de correlações entre a dureza Hv5 e a tenacidade Charpy V e entre esta e a tenacidade avaliada através dos ensaios COD e integral J, na zona afectada pelo calor (ZAC) de soldaduras num aço temperado e revenido (WEL-TEN 60). A correlação entre estes dois últimos parâmetros (COD e integral J) foi também estudada.

Foram realizadas soldaduras por arco submerso em preparações de junta em K de modo a obter uma ZAC direita, perpendicular à superfície da chapa e afectada quase exclusivamente por um só ciclo térmico. Para isso procedeu-se, antes da soldadura, ao revestimento por arco submerso do bordo direito da preparação de junta em K.

Verificou-se que a tenacidade Charpy diminui com o aumento do tamanho de grão da austenite prévia e que varia de forma linear com a dureza Hv5. Foi ainda possível definir correlações lineares entre a tenacidade Charpy e as tenacidades COD e integral J, a temperaturas entre -60° C e 20° C. Estas duas últimas tenacidades relacionam-se de forma linear.

Abstract. The work being reported had as its main aim the evaluation of correlations between COD and J toughness and Charpy V toughness, in the heat affected zone (HAZ) of welds in a Q&T steel (WEL-TEN 60). A correlation between hardness and Charpy V toughness was also investigated.

Welds were performed by submerged arc welding in a K joint preparation in order to produce a straight fusion line facilitating the extraction of Charpy V, COD and J specimens.

Charpy V toughness tends to decrease with the increase of prior austenite grain size and shows a linear correlation with Hv5 hardness. Linear correlations were also established between Charpy V toughness and COD and integral J parameters. The last two parameters can be correlated in a linear way.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação da tenacidade de juntas soldadas pode ser muito facilitada se for possível estabelecer correlações fiáveis entre os parâmetros da mecânica da fractura (K_{Ic} , COD e J) e a energia absorvida no ensaio Charpy.

A realização dos ensaios COD ou integral J é demorada e o seu custo é muito superior ao do ensaio Charpy. Além disso, os resultados dos ensaios Charpy

não podem ser usados directamente no projecto de estruturas que devam resistir à fractura.

Alguns dos factores que dificultam o estabelecimento dessas correlações são os seguintes [1]:

- Os ensaios da Mecânica da Fractura avaliam apenas a tenacidade à iniciação da fractura enquanto os resultados do ensaio Charpy consideram a iniciação e a propagação da fractura;

- A acuidade do entalhe é diferente nos dois casos;

- O ensaio Charpy avalia a tenacidade de uma pequena porção de material, dependente da sua

localização, enquanto o ensaio COD, p.e., integra a tenacidade das diversas zonas através da espessura;

- As condições de solicitação impostas em cada ensaio são também muito diferentes.

Foram estabelecidas muitas correlações entre os resultados do ensaio Charpy e o factor intensidade de tensão em modo I de solicitação [2-4]. Estas correlações são empíricas e nalguns casos, as expressões que as representam são dimensionalmente incorrectas. A maior parte das expressões foram obtidas em materiais de base sendo muito poucas concebidas especificamente para juntas soldadas [5]. Pisarski [1] refere que estas correlações são adequadas em aços de alta resistência mas, à medida que a tensão de cedência dos aços baixa, estas correlações tendem a ser mais conservativas.

Foram também estudadas correlações entre os resultados dos ensaios Charpy e COD para o caso de materiais depositados em aços C-Mn ou microligados. Segundo Dolby [6], o sucesso destas correlações é mais provável quando os micromecanismos de fractura e as zonas amostradas pelos dois métodos de ensaio são semelhantes.

Alguns investigadores [7] afirmam não ser possível estabelecer correlações na ZAC devido à heterogeneidade estrutural existente, contudo Kanazawa *et al* [8] estabeleceram uma relação entre o integral J e a energia absorvida no ensaio Charpy. Nesta relação prevê-se que os ensaios Charpy sejam realizados a temperatura inferior à dos ensaios J. Filosofia semelhante é seguida por algumas normas [9,10], que impõem que os ensaios Charpy sejam realizados a uma temperatura inferior à de referência do projecto.

O objectivo principal deste trabalho foi o estabelecimento de correlações entre os valores de tenacidade obtidos através dos ensaios Charpy, COD e integral J, na ZAC de juntas soldadas num aço temperado e revenido. Outros aspectos como as correlações entre a tenacidade e a dureza e entre a tenacidade e o tamanho de grão da austenite prévia (t.g. γ), na mesma zona, foram também analisados.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após preparação das juntas em K foram realizadas, sobre o bordo recto de cada conjunto, soldaduras de revestimento pelo processo de arco submerso com energias específicas de 2,4 KJ/mm e 4,3 KJ/mm. Posteriormente procedeu-se à soldadura de cada conjunto, pelo mesmo processo, utilizando uma

energia específica reduzida (2 KJ/mm). Este procedimento encontra-se esquematizado na figura 1 e já foi descrito anteriormente de forma pomenorizada [11].

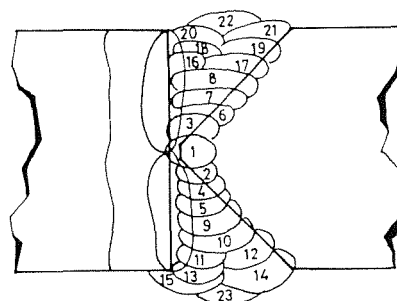


Fig. 1. Procedimento utilizado nas soldaduras com revestimento do bordo da chapa.

Pretendeu-se com este procedimento obter ZACs direitas e perpendiculares à superfície da chapa de modo a facilitar a extracção de provetes para os ensaios Charpy, COD e integral J. Estas zonas são afectadas principalmente pelo primeiro ciclo térmico. Foi ainda soldado um conjunto, sem revestimento do bordo, com uma energia específica de 8,7 KJ/mm.

A composição química e características mecânicas do metal de base (aço WEL-TEN 60 - Nippon Steel Corporation) estão indicadas na tabela 1.

Tabela 1. Composição química e características mecânicas do aço WEL-TEN 60.

%C	%Si	%Mn	%Ni	%Mo
0,13	0,24	1,26	0,43	0,19

Re N/mm ²	Rm N/mm ²	A %	Kv(J) -40°C
540	660	27	200

Nas soldaduras foram utilizados um fluxo básico e um arame de diâmetro 4 mm com a designação AWS A5.23-80: F9A10 - EA2.

As energias específicas utilizadas nas soldaduras bem como os respectivos ciclos térmicos induzidos na zona de grão grosseiro da ZAC (avaliados através do parâmetro $\Delta t_{8/5}$ - tempo de arrefecimento entre 800 °C e 500 °C) estão indicados na tabela 2.

O procedimento de extracção de provetes para os ensaios Charpy, COD e integral J está indicado na figura 2. O entalhe ou fenda de fadiga foi colocado na zona de grão grosseiro, junto à linha de fusão.

Tabela 2. Parâmetro $\Delta t_{8/5}$ induzido na zona de grão grosseiro.

Revest. do bordo	Energia esp. KJ/mm	$\Delta t_{8/5}$ (s)
Sim	2,4	18
Sim	4,3	36,5
Não	8,7	40,5

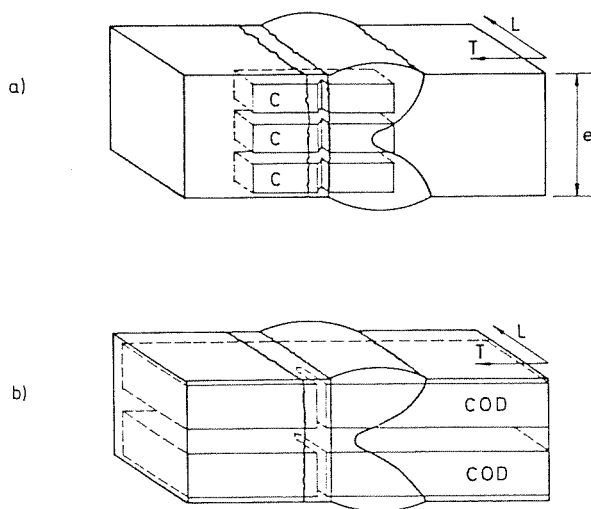


Fig. 2. Diagrama de orientação e localização dos provetes Charpy (a) e COD (b).

Os ensaios Charpy e COD foram realizados de acordo com as normas NP-269-72 e BS 5762-79 respectivamente, a temperaturas entre -60°C e 20°C. O integral J foi calculado pela expressão (1) [12].

$$J = \frac{2A}{B(W-a)} \quad (1)$$

onde:

- A - Área debaixo da curva carga - deslocamento;
- B - Espessura do provete;
- W - Largura do provete;
- a - Comprimento da fenda;

sendo verificada a observância da condição de deformação plana na extremidade da fenda pela expressão (2) [13].

$$a, B(W-a) \geq 25J \frac{J}{\sigma_f} \quad (2)$$

onde σ_f é a média da tensão de cedência e da resistência à tracção.

Foi feito o estudo metalográfico e a medição de dureza Hv5 na ZAC.

Foram ainda produzidos, num simulador Gleeble, provetes para ensaio Charpy, utilizando ciclos térmicos semelhantes aos medidos na ZAC das soldaduras. Não foi contudo possível utilizar temperaturas máximas de pico superiores a 1350 °C já que se corria o risco de fundir toda a secção do provete.

3. RESULTADOS

A influência do tamanho de grão da austenite prévia na tenacidade Charpy, no caso de juntas soldadas e de provetes simulados em aço WEL-TEN 60, está documentada na figura 3. Verifica-se uma diminuição sensível da tenacidade com o aumento do t.g.γ, em todos os casos analisados.

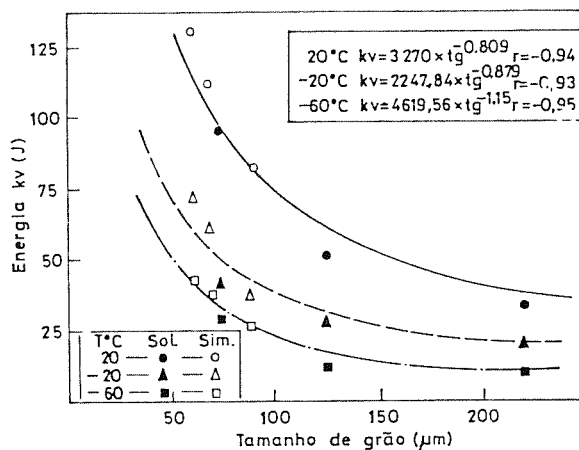


Fig. 3. Influência do tamanho de grão da austenite prévia na tenacidade Charpy V (Aço WEL-TEN 60).

Foram determinadas correlações lineares entre a dureza e a tenacidade Charpy V na zona de grão grosseiro, conforme se ilustra na figura 4. Nesta figura, todos os valores de dureza estão considerados à temperatura ambiente. A tenacidade tende a aumentar com a dureza nos provetes retirados de soldaduras e nos provetes produzidos por simulação térmica.

Estabeleceu-se uma correlação linear entre a tenacidade Charpy e a tenacidade COD na zona de grão grosseiro das juntas soldadas, tal como se documenta na figura 5. Os valores homólogos de tenacidade foram determinados à mesma temperatura.

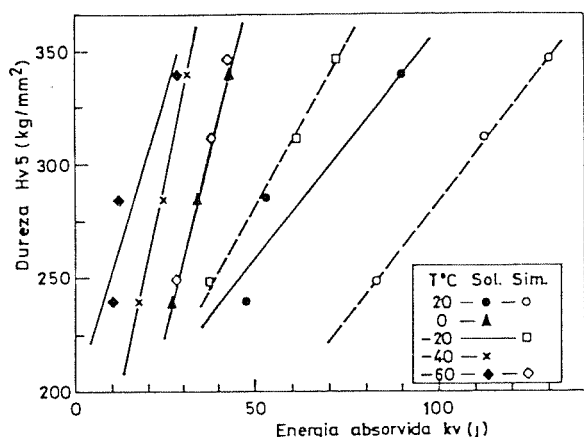


Fig. 4. Relação entre a dureza e a tenacidade Charpy na zona de grão grosseiro da ZAC.

A tenacidade Charpy foi definida em cada caso considerando a média de seis valores. Esta correlação apresenta algum desvio no caso de soldaduras sem revestimento do bordo, onde a zona de ensaio é constituída por microestruturas muito variadas. A correlação estabelecida, embora permita prever o valor de COD correspondente a uma dada tenacidade Charpy, não indica se o valor corresponde a um δ_e , δ_u ou δ_m (BS 5762-79).

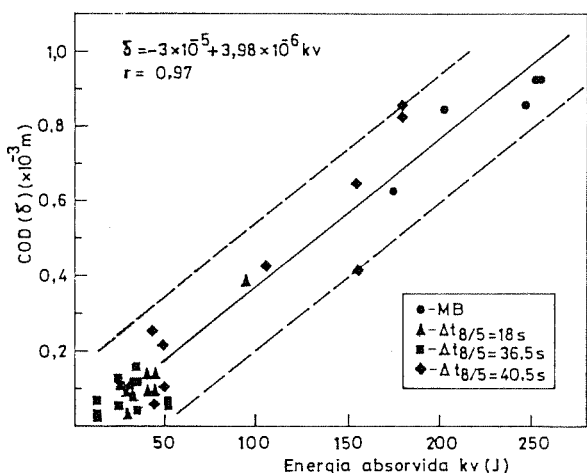


Fig. 5. Correlação entre as tenacidades Charpy e COD na ZAC. Temperaturas entre -60°C e 20°C.

A figura 6 ilustra uma correlação linear empírica estabelecida entre a tenacidade avaliada através do integral de contorno J e a tenacidade Charpy V na zona de grão grosseiro das juntas soldadas.

A tenacidade do material de base, a diversas temperaturas, está também incluída. Os símbolos abertos referem-se a provetes que não observaram a condição de deformação plana. Os valores homólogos

de tenacidade Charpy e J foram determinados à mesma temperatura. A expressão determinada apresenta um coeficiente de correlação elevado, se atendermos a que foi definida para quatro materiais diferentes, um para cada condição de soldadura mais o material de base, e para temperaturas a variar entre -60°C e 20°C.

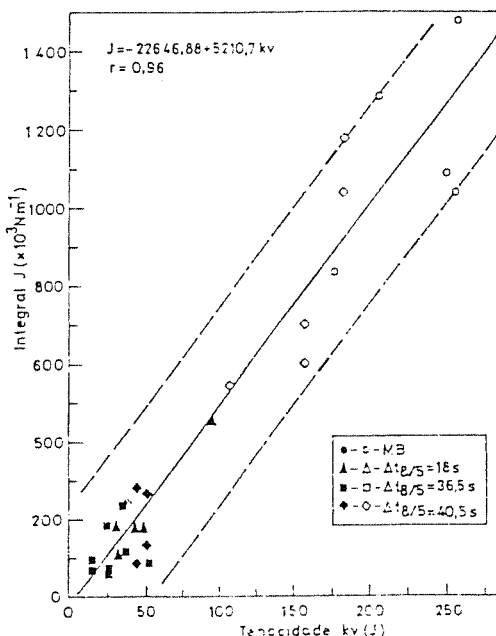


Fig. 6. Correlação entre as tenacidades Charpy e J. Temperaturas de ensaio entre -60°C e 20°C. Observância do estado plano de deformação - símbolos a cheio.

Afigura 7 apresenta uma relação linear entre a tenacidade avaliada através do integral J e a tenacidade COD, na zona de grão grosseiro. Os valores de COD foram calculados com base numa tensão de cedência definida pela média da tensão de cedência do metal depositado e do metal de base, de acordo com o critério de Squirrell *et al*[14].

4. DISCUSSÃO

A redução da tenacidade com o aumento do tamanho de grão da austenite prévia, na zona de grão grosseiro de soldaduras no aço WEL-TEN 60, conforme se documenta na figura 3, deve-se ao aumento da fracção de bainite superior e ao engrossamento da estrutura. As observações microestruturais foram já apresentadas noutra publicação [15]. Na prática o parâmetro $t.g.\gamma$ não tem grande utilidade já que é muito influenciado pela temperatura máxima de pico e é difícil de quantificar de forma expedita.

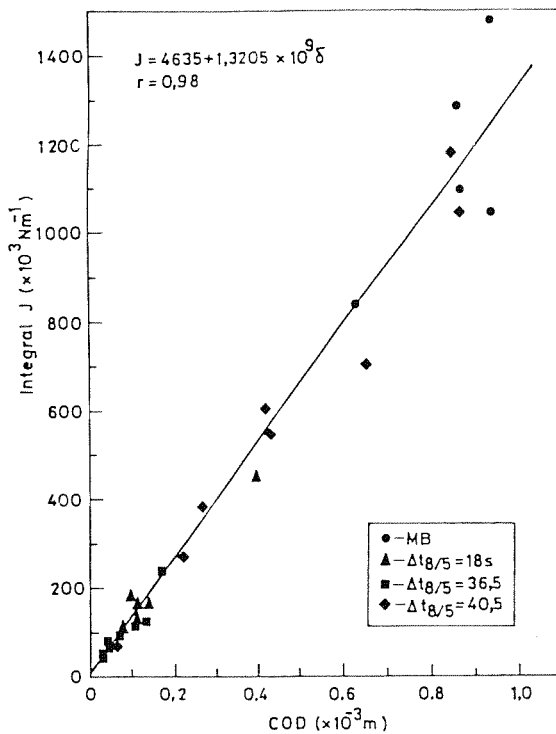


Fig. 7. Correlação entre as tencidades J e COD, definidas na ZAC de soldaduras no aço WEL-TEN 60.

Os provetes produzidos por simulação térmica apresentam, para igual dureza, tenacidade mais elevada que os provetes retirados de soldaduras, tal como se ilustra na figura 4. Isto deve-se ao maior refinamento da estrutura dos provetes simulados, ocasionado pelo menor tamanho de grão γ , induzido por temperaturas máximas de pico mais baixas.

A tenacidade aumenta de forma linear com a dureza, sendo esta tendência confirmada pelos provetes de simulação térmica. Este comportamento é compreensível já que os factores microestruturais que determinam o aumento de dureza e tenacidade são os mesmos, no caso de aços de baixo carbono. Neste caso o aumento da fracção de martensite revenida aumenta a dureza e a tenacidade [16]. Estas correlações empíricas, uma vez estendidas a um número elevado de valores de tenacidade e dureza, podem ter papel de relevo no controlo de qualidade durante o fabrico.

As figuras 5 e 6 mostram que é possível estabelecer correlações lineares entre a tenacidade Charpy e as tenacidades COD e J. A dispersão observada não invalida a importância e utilidade destes resultados. Considerando uma banda de dispersão é possível definir o valor mínimo da tenacidade COD ou J

correspondente a cada valor médio da tenacidade Charpy.

Os micromecanismos de fractura observados por microscopia electrónica de varrimento em provetes Charpy e em provetes COD e J homólogos, são semelhantes e já foram publicados [17]. Dolby [6] refere que esta condição é fundamental para que se obtenham boas correlações entre a tenacidade Charpy e COD em metais depositados por soldadura.

Na zona de grão grosseiro a tenacidade COD relaciona-se de forma linear com a tenacidade J, conforme se ilustra na figura 7. Considerando a expressão convencional (3) que estabelece a correlação entre estes parâmetros,

$$J = mR_c \delta \tag{3}$$

onde :

- m - constante
- R_c - tensão de cedência
- δ - COD

verificou-se que o valor da constante m varia entre 2 e 3,27, muito próximo portanto dos valores sugeridos por Towers (entre 2 e 3) [18]. Os valores de m foram calculados tomando a tensão de cedência como a média das tensões de cedência do metal depositado e do metal de base. Os valores de m deverão ser inferiores aos calculados pois a tensão de cedência da ZAC deverá ser superior à considerada pois a dureza máxima desta zona é superior à do metal depositado e do metal de base.

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios realizados na zona de grão grosseiro de soldaduras executadas no aço WEL-TEN 60 permitiram obter as conclusões seguintes, válidas para as condições de ensaio utilizadas:

- a) A tenacidade avaliada através do ensaio Charpy V tende a diminuir com o aumento de tamanho de grão da austenite prévia;
- b) A tenacidade Charpy V aumenta de forma linear com a dureza;
- c) A tenacidade Charpy V relaciona-se de forma linear com as tenacidades COD e J, no intervalo de temperaturas entre -60 °C e +20°C;
- d) A tenacidade avaliada através do integral J relaciona-se de forma linear com a tenacidade COD.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Instituto Nacional de Investigação Científica e contou com a colaboração das empresas LISNAVE, SORIFAME e ESAB.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Pisarski, H. G., "A review of correlations relating Charpy energy to K_{Ic} ", *The Weld. I. Bull.*, Dec., pp 362-367 (1978).
- [2] Barson, J. M. y Rolfe, S. T., "Correlations between K_{Ic} and Charpy V notch test results in the transition temperature range", *ASTM STP 466*, pp 164-191 (1970).
- [3] Sailors, R.H. y Corten, H.T., "Relationship between material fracture toughness using fracture mechanics and transition temperature tests", *ASTM STP 514*, pp 164-191 (1972).
- [4] Mandaret, B. y Sanz, G., "Evaluation of the toughness of thick medium strength steels by LEFM and correlations between K_{Ic} and CVN", *ASTM STP 631*, 72-95 (1977).
- [5] Ito, T., Tanaka, K. y Sato, M., "Study of brittle fracture initiation from surface notch in welded fusion line", *IIW Doc X-704-73* (1973).
- [6] Dolby, R.E., "Some correlations between Charpy V and COD test data for ferritic weld metals", *IIW Doc X-960-80* (1980).
- [7] Toyoda, M. y Satoh, K., "Fracture toughness of welds: the incidence of mechanical heterogeneity in the correlation of toughness parameters", *Weld. in the World*, (22),3/4, 76-86 (1984).
- [8] Kanazawa, T., Watanabe, I. y Suzuki, M., "Correlations relating Charpy energy to J_c and critical CTOD in weld -HAZs", *IIW Doc X-1085-85* (1985).
- [9] Dn V , "Rules for the design construction and inspection of offshore structures", (1977).
- [10] BS 6235-82, "Code of practice for fixed offshore structures", (1982).
- [11] Loureiro, A., Fernandes, A.A. y Apps, R.L., "Use of a buttering technique to study the fracture toughness of the HAZ of Q&T structural steels", *Proceedings of the International Conference JOM-4, Helsingor, Denmark*, pp 249-255, (1989).
- [12] Dawes, M.G., "Elastic plastic fracture toughness based on COD and J contour integral concepts", *Weld. I. Res. Rep.54/1978/E*.
- [13] Landes, J.D. y Begley, J.A., "Test results from J integral studies: An attempt to establish a J_{Ic} testing procedure", *ASTM STP-560*, p. 170 (1974).
- [14] Squirrell, S.J., Pisarski, H.G. y Dawes, M.G., "Recommended procedures for the crack tip opening displacement (CTOD) testing of weldments", *Weld. I. Res. Rep.311*, (1986).
- [15] Loureiro, A. y Fernandes, A.A., "Influence of structure on toughness of L.B.Zs of welds in Q.T. Steels", *Proceedings of the International Conference Welding 90, Hamburg*, pp. 237-244, (1990).
- [16] Ikawa, H., Oshige, H. y Tanone, T., "Effect of martensite - austenite constituent on HAZ toughness of high strength steel", *Trans. J. W. S.*,(11), p. 59, (1982).
- [17] Loureiro, A.J.R., "Estudo da tenacidade da zona afectada pelo calor de soldaduras em aços estruturais de alta resistência, temperados e revenidos", *Tese de doutoramento, Coimbra*, (1991).
- [18] Towers, O.L., "The J integral: definitions, interpretation and test procedures", *The Weld. I. Res. Bull.*, Nov., pp. 319-323, (1981).