

FRATURA FRÁGIL E DÚCTIL DE JUNTAS SOLDADAS

BRITTLE AND DUCTILE FRACTURE OF WELDED JOINTS

FRATURA FRÁGIL Y DUCTIL DE JUNTAS SOLDADAS

Arlindo A. M. Ferreira * (arlindoferreira@ipg.pt)

Awf Al-Kassir ** (aawf@unex.es)

RESUMO

Neste trabalho foi avaliado o efeito da energia de soldadura sobre os valores de tenacidade de juntas soldadas de aços. Foram realizadas soldaduras num aço estrutural de alta resistência, temperado e revenido (RQT 601 – *British Steel Corporation*). As soldaduras foram realizadas em chapas com 25 mm de espessura; para o efeito foi considerada a preparação de junta em K. A utilização desta preparação de junta teve como objectivo criar uma zona afectada pelo calor aproximadamente normal à superfície da chapa. O binário utilizado nas soldaduras foi o OK Flux 10.61/ OK Autrod 13.43 (ESAB). Foi usado um eléctrodo de 4 mm e energias específicas de 4 kJ/mm e 6.5 kJ/mm. Das soldaduras foram retirados provetes para análise química, para análise metalográfica e para o estudo da tenacidade, na zona fundida (ZF), na zona afectada pelo calor (ZAC) e no metal de base (MB). Os provetes Charpy foram retirados com orientação Y-X (entalhe segundo a direcção da soldadura). A ZF apresenta uma tenacidade superior à do MB, para qualquer das energias testadas. A ZAC apresenta, em qualquer dos casos, os valores mais baixos de tenacidade. Foi observada uma queda de tenacidade, nas zonas fundidas e zonas afectadas pelo calor, com o aumento da energia específica de soldadura.

Palavras-chave: Fractura, Juntas soldadas, Tenacidade, Teste Charpy V.

ABSTRACT

In this study, the effect of the heat input on toughness of welded joints of steel was evaluated. Submerged arc welds were performed on high strength quenched and tempered steel plates (RQT601 – *British Steel Corporation*), with 25mm thickness, using 4 kJ/mm and 6,5 kJ/mm heat input. K type joints were prepared in order to obtain heat affected zones (HAZ) perpendicular to the plate surface. The flux/wire couple used was OK flux 10.61/OK Autrod 13.43 (ESAB). Specimens for chemical analysis and

for Charpy V test were obtained from the coupon plates, with notch Y-X orientation. The results of this study demonstrated that the highest values of fracture toughness were reached in welded metal. The heat affected zones presented the lowest values of toughness in relation to the welded metal and base metal. A reduction in toughness was observed in the welded metal and heat affected zones with the increase of heat input.

Key words: Fracture, Welded joints, Toughness, Charpy V Test.

RESUMEN

En este estudio se ha evaluado el efecto de la energía de soldadura en los valores de tenacidad de juntas soldadas de acero. Se han realizada soldaduras en acero estructural de alta resistencia, templado y revenido (RQT 601 - *British Steel Corporation*). Las soldaduras fueron realizadas, mediante el proceso de arco sumergido (SAW), en placas con 25 mm de espesor; para este efecto han sido maquinadas preparaciones de junta en K. El objetivo de este tipo de preparación fue facilitar la creación de una zona afectada por el calor aproximadamente normal a la superficie de la placa. El fundente granulado de protección y el metal de aporte seleccionado fue, OK Flux 10.61 y OK Autrod 13.43 (ESAB). Se ha utilizado un electrodo de 4 mm y las energías específicas de 4 kJ/mm y 6,5 kJ/mm. De las soldaduras se han retirado probetas para el análisis químico, análisis factográfica y para el estudio de la tenacidad de la zona fundida (ZF), zona afectada de calor (ZAC) y del metal de base (MB). Las probetas Charpy fueron retiradas con orientación Y-X (entalle segundo la dirección de la soldadura). La ZF presentó una tenacidad superior a la del MB, para cualquiera de las energías de soldadura. La ZAC presentó, en todos los casos, los valores más bajos de tenacidad. Con el aumento de la energía específica de soldadura, hubo una disminución de la tenacidad en el MB y en la ZAC.

Palabras-clave: Fractura, Juntas soldadas, Tenacidad, Teste Charpy V.

* Licenciado e Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Coimbra, Professor da Unidade Técnico-Científica de Engenharia e Tecnologia da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico da Guarda..

** Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Titular Dpto. de Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales da Universidad de Extremadura,

1. INTRODUÇÃO

O aço faz parte fundamental como matéria-prima de diversos sectores da indústria, sendo, ainda, a mais importante e versátil das ligas metálicas conhecidas até à actualidade.

A operação de soldadura do aço impõe uma redução importante da tenacidade, não só da zona afectada pelo calor (ZAC), mas também da zona fundida (ZF), em relação à tenacidade do material de base (MB) (Mcgrath *et al.*, 1988).

Essa perda de tenacidade é tanto mais acentuada quanto maior for a energia específica adicionada pelo processo e procedimento de soldadura, e pode atingir proporções preocupantes se a junta soldada operar, em serviço, em condições de baixa temperatura, como acontece, por exemplo, nas plataformas petrolíferas instaladas no Mar do Norte, frequentemente sujeitas a temperaturas inferiores a cerca de -40C° .

Este facto impõe exigências em relação aos materiais e processos produtivos capazes de assegurar a segurança necessária às vidas humanas e aos avultados investimentos envolvidos (Loureiro *et al.*, 1994).

Ao longo de décadas vários estudos têm sido levados a cabo visando o aperfeiçoamento das técnicas e procedimentos de soldadura, desenvolvimento de novos consumíveis e produção de aços com elevada resistência mecânica e tenacidade à fractura, sem prejuízo da soldabilidade.

Na selecção de um aço estrutural, a soldabilidade e as propriedades mecânicas de juntas soldadas são itens tão importantes quanto as propriedades mecânicas individuais do aço.

Kishor *et al.* (2008), consideram que a elevada tenacidade da zona fundida e da zona afectada pelo calor é requisito importante dos aços soldáveis; em certas situações, a alta tenacidade assegura o bom comportamento das estruturas soldadas, mesmo em casos de condições severas de serviço.

Para Ferrante (1989), factores como elevada resistência mecânica do MB, utilização de processos de soldadura caracterizados por alta taxa de diluição, uso generalizado de elementos de microliga e especificações cada vez mais restritivas no que diz respeito aos valores de tenacidade ao impacto deram

ênfase à responsabilidade da operação de soldadura na integridade final da estrutura.

A ZAC de juntas soldadas por fusão a arco eléctrico é normalmente caracterizada por uma elevada heterogeneidade microestrutural, apresentando geralmente, as suas propriedades alteradas em relação ao MB, devido ao ciclo térmico de soldadura. Entretanto, de uma maneira geral, a região que maior alteração sofre e, portanto, onde as propriedades mecânicas podem ser mais prejudicadas é a zona de grão grosseiro.

Excepções podem ocorrer em aços sensíveis à fragilização por envelhecimento e por deformação, onde pode ocorrer fragilização da região, e em aços temperados e revenidos, onde todas as regiões podem sofrer o amaciamento (Easterling, 1983).

Neste trabalho foi avaliada a influência da energia específica de soldadura e da temperatura de ensaio, na tenacidade à fractura de juntas soldadas por fusão a arco eléctrico.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. MATERIAL DE BASE E CONSUMÍVEIS

O material de base utilizado para este estudo foi chapa de aço estrutural temperado e revenido RQT 601 – *British Steel Corporation*.

A composição química e as propriedades mecânicas do aço são apresentadas nos quadros 1 e 2, respectivamente.

Quadro 1. Composição química, em percentagem em peso do M.B.

Espessura (mm) Composição (%)	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Nb	Ti	V	Ni	Cu	B	Al
8<t<30	0.16 0.14	0.50 0.40	1.60 1.35	0.010 0.003	0.025 0.012	0.10 -	0.15 0.12	0.050 0.035	0.035 0.030	0.07 0.05	0.10 -	0.10 -	0.004 0.002	0.05 0.03
30<t<80	0.20 0.17	0.50 0.40	1.60 1.35	0.010 0.003	0.025 0.012	0.25 0.10	0.20 0.15	0.060 0.035	0.040 0.025	0.08 0.01	0.70 -	0.20 -	0.004 0.002	0.06 0.04

Fonte: Corus Construction & Industrial [6]

Quadro 2. Propriedades mecânicas do M.B

Limite elástico (MPa)	Resistência à tração (Mpa)	Alongamento (%)	Tenacidade Charpy (-45°C)
620	690-850	19	27 J

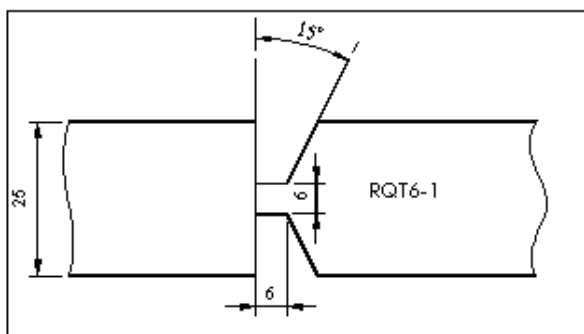
Fonte: Corus Construction & Industrial [6]

Previamente, foram maquinadas preparações de junta em K. Esta preparação de junta permitiu a obtenção de uma zona afectada pelo calor sensivelmente perpendicular à superfície da chapa, o que facilitou a posterior colocação do entalhe Charpy V.

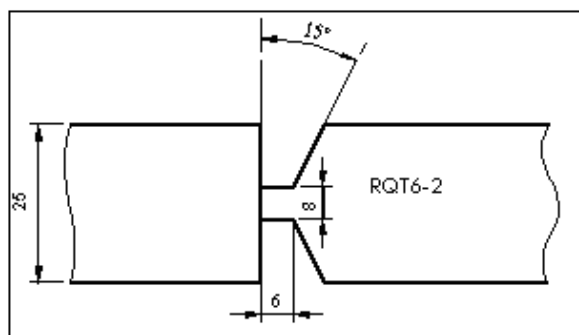
A figura 1 esquematiza as preparações de junta utilizadas nas soldaduras.

As chapas de aço, com dimensões 1000×155×25mm, foram ligadas duas a duas por soldaduras topo a topo, multipasse, pelo processo de soldadura arco submerso (SAW), com energias específicas de 4 kJ/mm (chapa referenciada por RQT 601-1) e 6,5 kJ/mm (chapa referenciada por RQT 601-2).

No quadro 3 são apresentados os parâmetros de soldadura considerados na execução das soldaduras.



a) $E = 4 \text{ kJ/mm}$



b) $E = 6,5 \text{ kJ/mm}$

Fig. 1 – Preparação de juntas utilizadas nas soldaduras

Quadro 3. Parâmetros de soldadura utilizados na execução das soldaduras

Chapa (1000×155×25)	Intensidade (A)	Voltagem (V)	Veloc. de sold. (m/h)	Energia (kJ/mm)
RQT6-1	650	32	30	4
RQT6-2	650	32	19	6,5

O fluxo utilizado foi o OK flux 10.61 (AWS A5.17-80:F6A2), com um índice de basicidade de 2,6 e uma densidade de 1,1 kg/dm³.

Como material de adição foi utilizado um arame eléctrodo (OK Autrod 13.43 (ESAB)), com 4 mm de diâmetro.

A composição química do material de adição está indicada no quadro 4

Quadro 4 – Composição química, em percentagem em peso do M.A.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb
Teor (%)	0.10	0.20	1.40	--	--	0.70	2.30	0.50	--

2.2. EXTRACÇÃO DOS PROVETES E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

De cada uma das chapas soldadas foram extraídos e preparados, com orientação T-L, provetes Charpy A e ensaiados de acordo com a norma BS 131, parte 6.

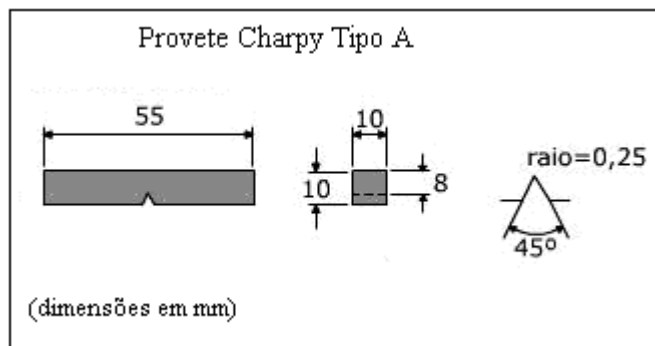


Fig. 2 – Geometria do provete Charpy V

Os ensaios Charpy foram realizados a diferentes temperaturas, compreendidas entre -85°C e 25°C ; para cada temperatura realizaram-se quatro ensaios.

As temperaturas inferiores a 25° C foram conseguidas com a utilização de uma mistura, em proporções adequadas, de álcool etílico e azoto líquido. O controlo de temperaturas fez-se com o auxílio de um termopar tipo K.

Os provetes foram imersos no fluído durante pelo menos dez minutos. Após este período, foram retirados do refrigerante e ensaiados nos cinco segundos seguintes.

Após a realização dos ensaios, foram analisadas algumas das superfícies fracturadas, com o objectivo de determinar os mecanismos de fractura presentes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ZONA FUNDIDA

No quadro 5 apresenta-se a composição química nominal do metal depositado.

Quadro 5 – Composição química nominal real do metal depositado (% em peso)

FLUXO	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
OK Flux 10.61	--	0.39	1.42	0.36	1.07	0.28

3.2. TENACIDADE CHARPY

Os resultados obtidos nos ensaios Charpy V são indicados no quadro 6. Cada valor apresentado corresponde à média de quatro ensaios.

Quadro 6 – Resultados dos ensaios Charpy V (J/cm²), (média de quatro ensaios)

Zona/Temperatura	-85 C°	-45 C°	-10 C°	25C°
MB	57	97	135	137
ZF 1	78	128	165	166
ZF 2	70	103	139	165
ZAC 1	23	30	32	71
ZAC 2	14	22	30	44

Na figura 3 estão representadas as curvas de variação de tenacidade Charpy V com a temperatura, da ZF, ZAC e MB das soldaduras realizadas com energias de 4 kJ/mm e 6.5 kJ/mm, correspondentes aos provetes RQT6-1 e RQT6-2.

Da análise comparativa da tenacidade das três zonas, constata-se que, para qualquer das soldaduras, a ZF apresenta os valores de tenacidade mais elevados, mesmo superiores aos apresentados pelo MB.

Verifica-se ainda que, para ambas as soldaduras, a ZAC apresenta uma redução acentuada da tenacidade, quando comparada com a do MB.

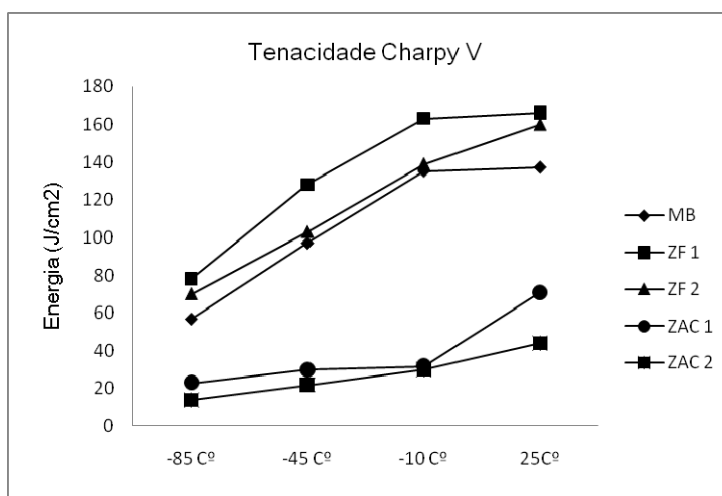


Fig. 3 – Curvas de tenacidade e temperatura das zonas das juntas soldadas

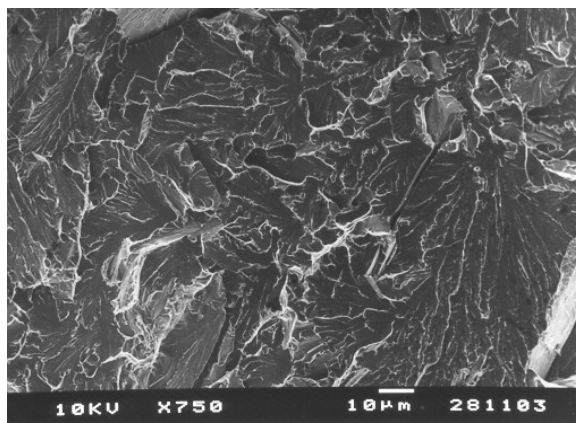
Sobre a influência da energia específica de soldadura na tenacidade, constata-se que o aumento da energia específica de 4 para 6,5 kJ/mm induziu uma queda de tenacidade tanto na ZAC como na ZF. Este facto é mais evidente na ZF e para temperaturas intermédias, entre -85°C e 25°C.

Sobre o efeito da temperatura sobre a tenacidade, constata-se que quanto mais baixa for a temperatura menor é a tenacidade. Este facto é particularmente evidente na ZF e MB.

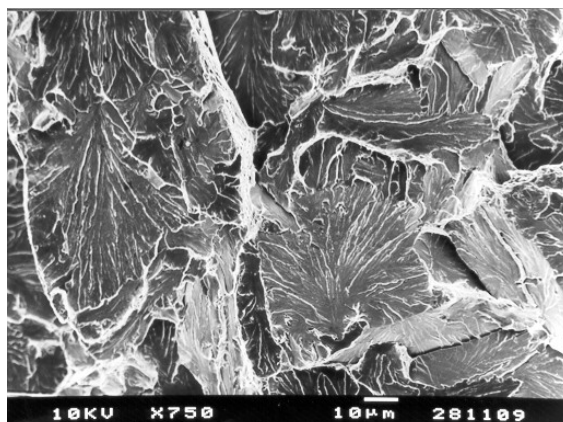
3.3. ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

A análise das superfícies de fractura dos provetes Charpy, na zona próxima do fundo do entalhe, indicia também as diferenças de tenacidade observadas quer na ZF quer na ZAC dos provetes obtidos a partir das chapas soldadas com energias de 4 kJ/mm e 6,5 kJ/mm.

Na figura 4 apresenta-se as superfícies de fractura de provetes retirados da ZAC e testados a 85 °C negativos.



a) E= 4 kJ/mm;



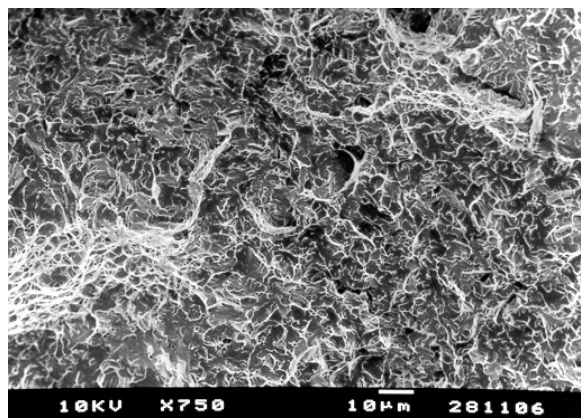
b) E= 6,5 kJ/mm

Fig. 4– Superfícies (a, b) de fractura de provetes Charpy testados a -85°C na zona de grão grosseiro

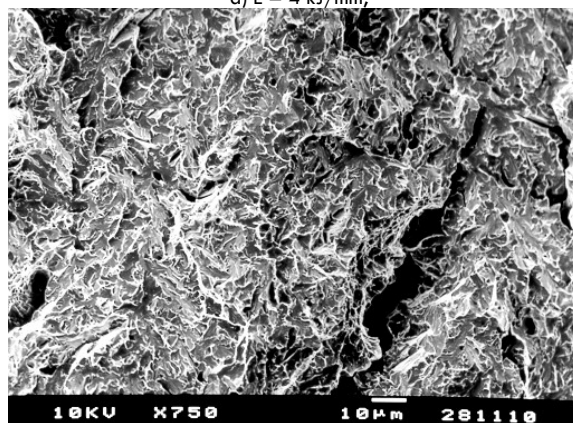
Na figura 4a) observa-se uma superfície de fractura onde coexistem facetas de clivagem de pequena e grande dimensão

reveladores do carácter frágil da fractura. Na figura 4b) o carácter frágil da fractura é mais acentuado, podendo observar-se que o plano de fractura muda de grão para grão. O aspecto em bacia hidrográfica, visível no interior dos grãos, corresponde a degraus entre facetas de clivagem do mesmo plano geral de clivagem.

Na figura 5 apresenta-se duas superfícies de fractura da zona fundida de provetes testados a 85 graus negativos.



a) $E = 4 \text{ kJ/mm}$;



b) $E = 6,5 \text{ kJ/mm}$

Fig. 5 – Superfícies de fractura de provetes Charpy testados a -85°C na zona fundida

A figura 5a) mostra uma superfície constituída por *dimples* finos, reveladores do carácter dúctil da fractura, e por pequenas facetas de clivagem, evidenciando a coexistência competitiva dos dois mecanismos de fractura presentes, dúctil e frágil.

A figura 5b) revela uma fractura de carácter mais frágil que o apresentado na figura 5a). A análise fractográfica revela uma fractura

por quasi-clivagem, com pequenas facetas de clivagem delimitadas por arestas de desagarramento.

A análise fractográfica corrobora os resultados de tenacidade obtidos através dos ensaios Charpy V. De facto, aos resultados mais baixos de tenacidade, obtidos na zona afectada pelo calor de ambas as juntas soldadas, estão associados fracturas de carácter frágil. As fractografias das zonas fundidas confirmam o carácter mais dúctil das fracturas.

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões a retirar deste estudo são as seguintes:

Realce para a qualidade da zona fundida, com valores de tenacidade superiores aos do material de base.

A operação de soldadura induziu uma queda acentuada da tenacidade da zona afectada pelo calor, quando comparada com a do metal de base. Este facto reforça o carácter problemático do comportamento da fractura da zona afectada pelo calor de juntas soldadas por fusão.

O aumento da energia específica de soldadura de 4 para 6,5 kJ/mm provocou uma queda de tenacidade, tanto na zona fundida como também na zona afectada pelo calor, das juntas soldadas.

Apesar de não ser documentado neste trabalho, a queda de tenacidade verificada na zona afectada pelo calor das juntas soldadas está associada ao engrossamento do grão da austenite prévia e da microestrutura e ao aparecimento de ferrite primária nas fronteiras de grão referidas, na zona de grão grosseiro.

O comportamento apresentado pelas juntas soldadas reforça a importância da selecção cuidada dos parâmetros e procedimentos de soldadura como forma de contribuição para preservação das propriedades mecânicas das mesmas. Este facto assume proporções ainda mais decisivas quanto mais baixas forem as temperaturas de serviço, pois, nesses casos, a tenacidade da zona afectada pelo calor pode atingir valores preocupantemente baixos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BS 131; Part 6 (1989); *Notched bar tests - Method for precision determinations of Charpy V-notch impact energies for metals*.
- Corus Construction & Industria (2008), *RQT 601 Data Sheet*.
- Easterling, K. E. (1983); *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding (Butterworths Monographs in Materials)*; Butterworth-Heinemann; London.
- Ferrante, M. (1989); "Influência da Composição Química sobre a Microestrutura e Tenacidade de Metal de Soldadura Ferrítico"; parte 1, *Soldagem & Materiais*, Vol 1, nº 3, 36-43.
- Kishor, P. e at. (2008); "Prediction of microstructure and mechanical properties of multipass SAW"; *Journal of Materials Processing Technology* Vol 197, 241-249.
- Loureiro, A. et al. (1994); "Toughness of CG HAZs of welds in Q&T Steels"; *Welding Journal*, vol.73, nº 9; 225 – 232.
- Mcgrath, J.T. et al. (1988); "Microstructure / mechanical property relationships in thick - section C-Mn narrow – groove welds"; *Welding Journal*, vol.67; 196 – 201.