

EFEITO DAS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE METAIS DE SOLDA DE ALTA RESISTÊNCIA OBTIDOS PELO PROCESSO GMAW*

Samuel Soares Queiroz¹
Jorge Carlos Ferreira Jorge²
Luís Felipe Guimarães de Souza³
Ivani de Souza Bott⁴

Resumo

O presente trabalho realiza um estudo das propriedades mecânicas de metais de solda de alta resistência obtidos pelo processo de soldagem GMAW com diferentes condições de soldagem. Foram soldadas juntas multipasses pelo processo GMAW, com preaquecimento de 150°C e 250°C, corrente contínua, posição plana e aporte térmico médio de 1,4kJ/mm. Após a soldagem, realizaram-se ensaios mecânicos e metalográficos em corpos-de-prova retirados integralmente do metal de solda depositado, tanto na condição de como soldado quanto após tratamento térmico a 600°C por 1 hora. Os resultados mostraram que a tenacidade ao impacto experimentou uma redução substancial após o tratamento térmico.

Palavras-chave: Metal de solda; Tratamento térmico pós-soldagem; Propriedades mecânicas.

EFFECT OF WELDING CONDITIONS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH STEEL WELD METAL OBTAINED BY GMAW PROCESS

Abstract

The present work evaluates the effect of different welding conditions on the mechanical properties of high strength steel weld metals obtained by GMAW process. Welded joints by GMAW process were prepared, using a preheat of 150 and 250°C, direct current, flat position and heat input of 1.4 kJ/mm. After welding, mechanical tests and metallographic examination were performed in specimens removed integrally from the weld metal. The results show that the PWHT promoted a substantial reduction on impact toughness

Keywords: Weld metal; Post weld heat treatment; Mechanical properties.

¹ Eng. Mecânico, Mestrando. CEFET-RJ, PEMM, RJ, Brasil.

² Eng. Metalúrgico, D.Sc., Professor. CEFET-RJ, PPEMM, RJ, Brasil.

³ Eng. Metalúrgico, D.Sc., Professor. CEFET-RJ, PPEMM, RJ, Brasil.

⁴ Física, Ph.D., Professora, PUC-Rio - DEQM, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Para acompanhar o desenvolvimento dos aços de alta resistência, faz-se necessário uma análise da evolução dos consumíveis adequados para a soldagem destes aços, visto que estudos anteriores mostraram que o metal de solda tem se apresentado como a região crítica da junta soldada [1-4], o que em parte deriva do fato das normas de qualificação de consumíveis de soldagem [5] se limitarem a valores da ordem de 120ksi (830 MPa) para a tensão limite de resistência, valor inferior ao especificado para alguns graus de aços utilizados em componentes da indústria offshore [6]. Adicionalmente, embora o processo eletrodo revestido tenha propiciado resultados satisfatórios [7,8], seria importante o conhecimento do comportamento dos materiais quando submetidos a ciclos térmicos com processos de maior taxa de deposição, de forma a permitir que a soldagem apresente competitividade adequada na fabricação e reparo destes componentes. Particularmente neste sentido, a literatura apresenta evidências que mostram ser o processo GMAW uma alternativa interessante para a soldagem de aços de alta resistência [9-11].

Neste contexto, o presente trabalho investiga o efeito do preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) nas propriedades mecânicas de metais de solda obtidos pelo processo GMAW, visto o efeito importante destes parâmetros nas propriedades do metal de solda.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Soldagem

A Figura 1 mostra a geometria da junta utilizada. A soldagem foi realizada na posição plana pelo processo GMAW com um arame sólido de composição básica 0,4Cr-2,2Ni-0,55Mo da classe AWS 5.28 ER 120S-G [12] de 1,2mm de diâmetro e uma mistura Ar-20%CO₂ como gás de proteção com vazão de 18l/min.

Foram utilizadas temperaturas de preaquecimento de 150°C e 250°C e os parâmetros de soldagem mostrados na Tabela 1. Os tempos de resfriamento entre 800°C e 500°C ($\Delta t_{8/5}$) foram calculados de acordo com a norma EM 1011-2 Anexo D [13] para a posição onde os corpos-de-prova dos ensaios mecânicos foram retirados.

A Tabela 2 mostra a composição química dos metais depositados.

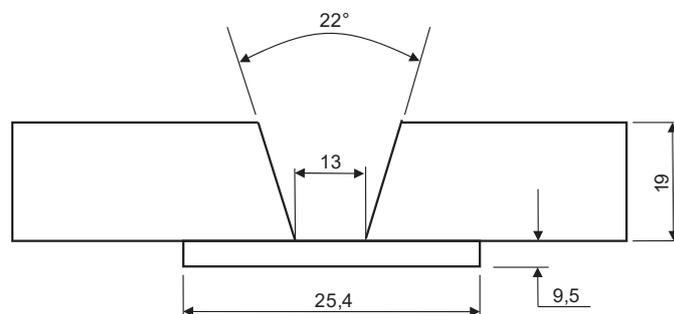


Figura 1. Detalhes da geometria da junta utilizada. Cotas em mm.

Tabela 1. Parâmetros médios de soldagem utilizados.

Metal de solda	Corrente (A)	Tensão (V)	Energia de soldagem (kJ/mm)	Número de passes	$\Delta t_{8/5}$ (s)
S150	244	31	1,39	15	6,8
S250	238	29	1,37	14	14,0

Tabela 2. Composição química dos metais depositados (% peso).

Metal de solda	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Ceq
S150	0,05	0,64	1,52	0,005	0,006	0,36	0,53	2,00	0,028	0,006	0,62
S250	0,06	0,59	1,51	0,008	0,007	0,36	0,50	1,91	0,026	0,008	0,61

(*)Ceq = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15.

Após a soldagem, realizou-se tratamento térmico a 600°C por 1 hora seguido de resfriamento ao ar, para comparação de propriedades com o estado de como soldado.

2.2 Ensaios Mecânicos

Foram removidos corpos-de-prova longitudinais e transversais ao cordão de solda para ensaios de tração, impacto Charpy-V e dureza.

Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, em corpos-de-prova retirados longitudinalmente ao cordão de solda, sendo realizados dois ensaios para cada condição analisada.

Foram realizados ensaios de impacto Charpy-V à temperatura de -20°C. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova normalizados conforme a norma ASTM A-370 [14] nas dimensões de 10mmX10mmX55mm, retirados transversalmente ao cordão de solda e a 2 mm da superfície da junta, sendo realizados três ensaios para cada condição analisada. O entalhe foi posicionado no plano da espessura e no centro do cordão de solda.

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers com carga de 500gf. em corpos-de-prova transversais ao cordão de solda, sendo realizada uma varredura de dureza da superfície até a raiz do metal de solda em intervalos de 1,0mm.

2.3 Ensaios Metalográficos

Foram realizados ensaios macro e micrográficos por microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) nos metais de solda, para avaliação das microestruturas. Foram observados os constituintes microestruturais nas regiões colunar (RC) e reaquescida (RR) na ponta do entalhe Charpy-V.

A preparação para análise consistiu de lixamento convencional e polimento com pasta de diamante com granulometrias de 6, 3 e 1µm, seguido de ataque químico com o reagente nital 2%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios de tração, onde se nota uma variação da tensão limite de escoamento para as duas temperaturas de TTPS enquanto que a tensão limite de resistência mostra uma redução com o TTPS para o preaquecimento de 150°C. De fato, uma análise dos valores obtidos para a tensão

limite de resistência mostra uma variação da ordem de 14% desta propriedade para as condições de análise. Segundo Keehan et al. [15], esta diferença pode estar associada ao tempo de resfriamento ($\Delta t_{8/5}$) superior a 13 segundos. Também naquele trabalho [15], foi verificado que embora com redução, os valores do limite de resistência se situaram em patamares elevados como no presente trabalho. Este é um resultado relevante, já que como abordado pela literatura [16,17], a obtenção de valores elevados de resistência mecânica para os consumíveis de maior resistência tem sido o foco de maior preocupação, sendo apontado como o maior desafio a ser superado, notadamente após a execução de tratamentos térmicos pós-soldagem [7,8,18-20].

Estes elevados valores de limite de resistência parecem estar associados com a microestrutura constituída de martensita e bainita, com predominância de martensita para o metal de solda S150 e de bainita para o metal de solda S250 (Figura 3), ocorrência normal para metais de solda de alta resistência [7,8,17,18,21,22].

A realização do TTPS promoveu uma redução na resistência mecânica somente para o metal de solda S150, em decorrência do maior efeito do revenimento na microestrutura martensítica deste metal de solda.

Concordante com esta proposição, os resultados de dureza (Figura 4) mostram tendência similar aos valores de resistência mecânica, com o metal de solda S150 apresentando os resultados mais elevados para a condição de como soldado e a maior redução com o TTPS.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de tração.

Metal de solda	Condição	LE(MPa)	LR (MPa)	Al(%)	RA(%)
S150	CS	869	996	22	64
	TTPS	804	886	23	65
S250	CS	794	866	24	67
	TTPS	739	866	26	63

Onde: LE- limite de escoamento; LR – limite de resistência, Al – alongamento; RA – redução de área, CS – como soldado ; TTPS – Tratamento térmico pós-soldagem.

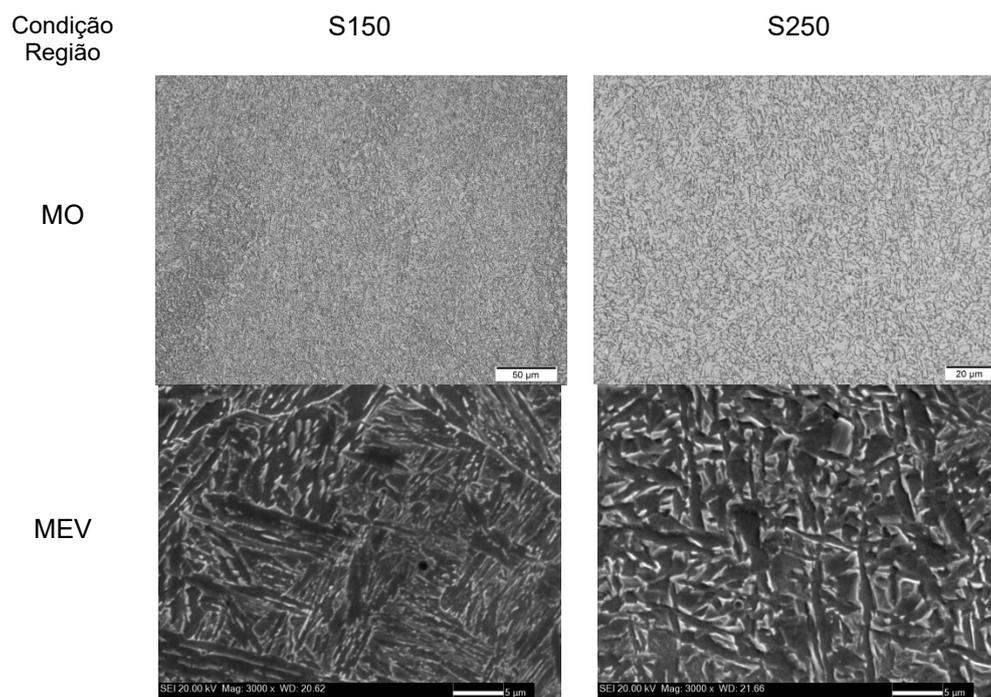


Figura 3. Microestrutura dos metais de solda. Ataque: nital 2%.

Comportamento diferente foi observado em relação à tenacidade ao impacto (Figura 5), onde não se verificou variações na tenacidade ao impacto com a mudança do preaquecimento, mas uma redução significativa após o TTPS. Este comportamento parece estar associado com a ocorrência de precipitação de carbonetos no contorno de grão nos metais de solda após a execução do TTPS (Figura 6), conforme também verificado em outras evidências disponíveis na literatura [7,8,18,19,24-26].

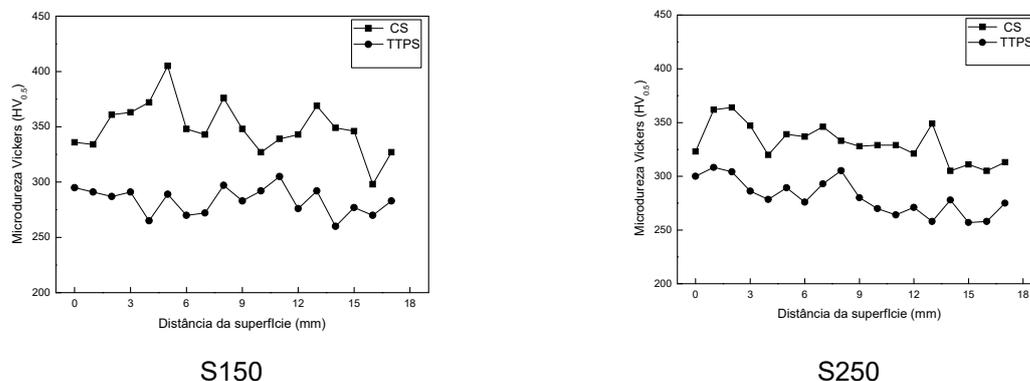


Figura 4. Valores de microdureza Vickers medidos a partir da superfície da junta em direção a raiz para cada condição.

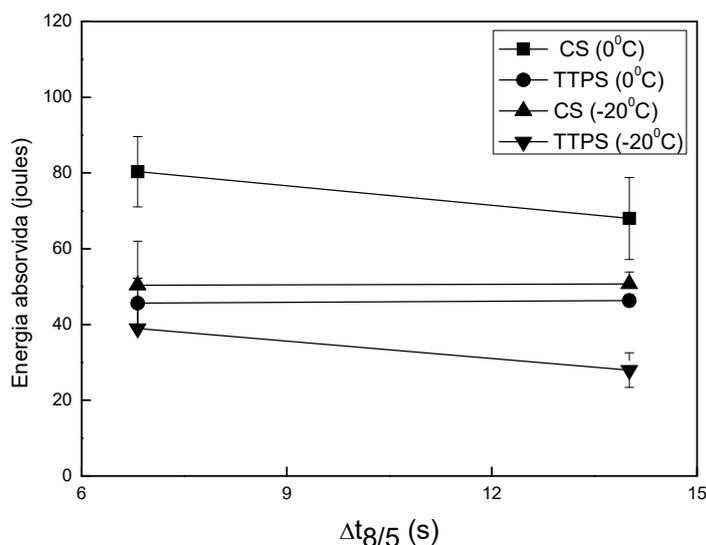


Figura 5. Resultados dos ensaios de impacto Charpy-V dos metais de solda.

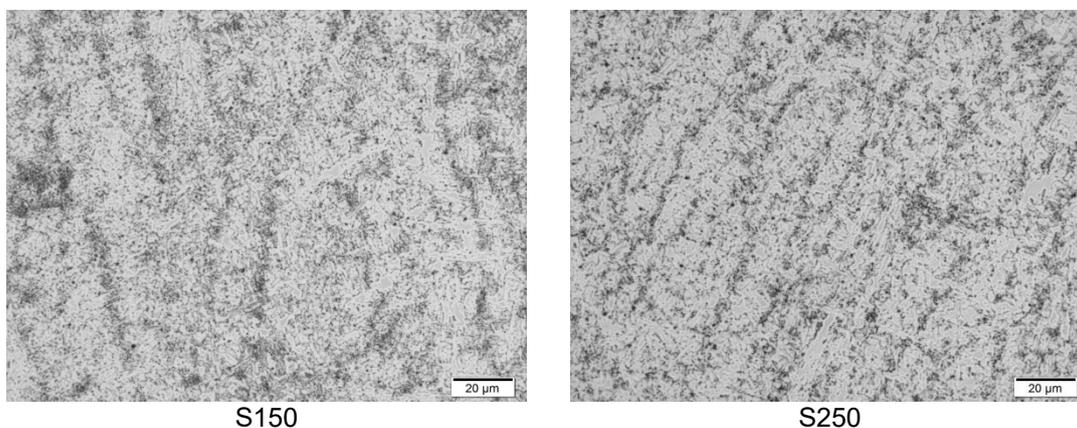


Figura 6. Ocorrência precipitação no contorno de grão (MO). Ataque: nital 2%.

Os resultados obtidos no presente trabalho estão em concordância com outras publicações que avaliaram a influência do tempo de resfriamento nas propriedades de metais de solda de alta resistência [10,15,27], notadamente em relação à queda da resistência mecânica para tempos de resfriamento superiores a 10 segundos. Já em relação à tenacidade ao impacto, o comportamento é mais relacionado com a microestrutura, com grande dependência primariamente da composição química. Em relação ao efeito do TTPS, notou-se um comportamento diferente na comparação com o estudo de Monteiro et al. [10] que utilizaram metodologia similar, pois naquele caso houve uma melhoria da tenacidade ao impacto após o TTPS. Este resultado parece estar associado aos teores mais elevados de elementos potentes formadores de carbonetos do presente trabalho, tais como o cromo e molibdênio, os quais favorecem a queda de tenacidade após o tratamento térmico [8,19,23-27].

4 CONCLUSÃO

Do exposto no transcurso do presente trabalho, pode-se concluir que:

- a) o metal de solda estudado apresentou elevado limite de resistência para todas as condições de estudo;
- b) a execução do TTPS promoveu uma redução da tenacidade ao impacto devido à precipitação de carbonetos nos contornos de grão;
- c) as propriedades mecânicas se correlacionaram bem com a microestrutura obtida, a qual apresenta grande dependência do tempo de resfriamento e;
- d) taxas de resfriamento maiores propiciam menor tenacidade ao impacto.

Agradecimentos

Os autores agradecem às Instituições pelo apoio prestado na execução do presente trabalho: Fluke Engenharia Ltda., Cefet/RJ, PUC-Rio, CNPq e FINEP.

REFERÊNCIAS

1. Suman JA, Jorge JCF, Souza LFG, Bott IS. Efeito de tratamentos térmicos pós-soldagem nas propriedades de aço fundido de elevada resistência para sistemas de ancoragem de plataformas marítimas, Soldagem & Inspeção, 2004; 9(4):205-212.
2. Jorge JCF, Souza LFG, Pacheco PMCL, Santos Filho AMF, Santos Filho OR, Diniz JLC, Bott IS. Evaluation of the mechanical properties on welded links of high strength steel mooring chains after fatigue testing, Anais do 2º Congresso Latino Americano de Soldagem, 2008; São Paulo, 1-10.
3. Santos Filho OR e Jorge JCF. Alternative procedure for the replacement of chain links by manual welding – An overview, Anais do Seminário Internacional de Ancoragem, 2012, Macaé, 1-39.
4. Lins Junior AS, Costa HRM, Souza LFG e Jorge JCF. Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas do aço HY-80 pelos processos eletrodo revestido e GMAW, Soldagem e Inspeção, 2014; 19(3):200-211.
5. AWS 5.5, Specification for low alloy steel electrodes for shielded metal arc welding, 1996.
6. International Association of Classification Societies, W22, Offshore Mooring Chain, June, 2011.

7. Jorge JCF, Faragasso SM, Souza LFG e Bott IS. Effect of postwelding heat treatment on the mechanical and microstructural properties of extra high-strength steel weld metals, for application on mooring equipment, *Welding International*, 2015; 29:521–529.
8. Gomes AJM, Jorge JCF, Souza LFG e Bott IS. Influence of chemical composition and post welding heat treatment on the microstructure and mechanical properties of high strength steel weld metals, *Materials Science Forum*, 2013; 758:21-32.
9. Lins Junior AS, Jorge JCF e Souza LFG. Avaliação das propriedades mecânicas de metal de solda de aço de alta resistência obtido pelo processo GMAW para aplicação em componentes de sistemas de ancoragem, *Anais do 69º Congresso Internacional da ABM*, 2014;1-12.
10. Monteiro JLD, Sousa Junior AL, Jorge JCF, Souza LFG e Bott IS. Influence of preheat and post welding heat treatment on the microstructure and mechanical properties of high strength steel weld metal for application in mooring components, *Anais do 23º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica da ABCM*, 2015;1-8.
11. Nathan SR, Balasubramanian V, Malarvizi S e Rao AG. Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints, *Defence Technology*, 2015;11:308-317.
12. AWS 5.28, Specification for low alloy steel electrodes and rods for gas shielded arc welding, 1996.
13. European Norm 1011-2, Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 2: Arc welding of ferritic steels, 2003.
14. ASTM International, 2005. 'Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products', ASTM A-370-05, 2005, West Conshohocken, USA, ASTM.
15. Keehan E, Zachrisson Je Karlsson L. Influence of cooling rate on microstructure and properties of high strength steel weld metal, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010;15:233-238.
16. Surian ES, de Rissone NMR, Svoboda HG e de Vedia LA. SMAW, FCAW and SAW high-strength ferritic deposits: the challenge is tensile properties, *Welding Journal*, 2010, 89(3):54s-64s.
17. Ramirez JE. Examining the mechanical properties of high-strength steel weld metals, *Welding Journal*, 2009; 88(1):32-38.
18. Jorge JCF, Souza LFG, Santos Filho OR e Bott IS. Estudo de metais de solda de aço de extra alta resistência para utilização em componentes de ancoragem de plataformas de petróleo. Parte I: Propriedades Mecânicas, *Anais do 37º Congresso Nacional de Soldagem*, 2011;1-10.
19. Bauné E, Chovet C, LedueyB e Bonnet C. Consumables for welding of (very) high strength steels – mechanical properties of weldments in as-welded and stress-relieved applications', *IIW Doc. II-1696-06*, 2006.
20. Surian ES, de Rissone MNR e de Vedia LA. Influence of molybdenum on ferritic high-strength SMAW all-weld-metal properties, *Welding Journal*, 2005; 84(4):53s-62s.
21. Karlsson L, Svensson LE e Hurtig K. Influence of dilution on properties of high strength steel weld metals, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 2014; 5:62-70.
22. Zhang, T., Li Z., Young F., Kim HJ, Li H. e Tillmann W. Global progress on welding consumables for HSLA steel', *ISIJ International*, 2014; 54:1472–1484.
23. Vogas PVBD et al.; Efeito do tratamento térmico pós-soldagem nas propriedades de metal de solda de alta resistência obtidos por arame tubular tipo flux cored, *Anais do 67º Congresso Internacional da ABM*, 2012;374-387.
24. GomesAJM, Jorge JCF, Souza LFG e Bott IS. Estudo comparativo de metais de solda de aços de extra alta resistência para utilização em componentes de linhas de ancoragem de plataformas de petróleo, *Anais do 67º Congresso Internacional da ABM*, 2012;806-808.
25. Couto JLS, Jorge JCF e Souza LFG. Influência da composição química nas propriedades mecânicas de metais de solda de alta resistência, *Anais do 69º Congresso Internacional da ABM*, 2014; 1-13.

26. Pinheiro MM, Jorge JCF, Souza LFG e Bott I S. Efeito do preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem nas propriedades de metal de solda de alta resistência obtidos por arame tubular tipo metal cored, Anais do 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2013;1-11.
27. Zhang L, Pittner A, Michael T, Rhode M eKannengiesser T. Effect of cooling rate on microstructure and properties of microalloyed HSLA steel weld metals, Science and Technology of Welding and Joining, 2015; 20(5):371-377.