

PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURA DE METAIS DE SOLDA DE ALTA RESISTÊNCIA OBTIDOS PELOS PROCESSOS GMAW E SMAW*

Antonio José de Carvalho Gomes¹
Samuel Soares Queiroz²
Jorge Carlos Ferreira Jorge³
Luís Felipe Guimarães de Souza³
Matheus Campolina Mendes⁴
Leonardo Sales Araújo⁵

Resumo

O presente trabalho apresenta uma análise comparativa entre as propriedades mecânicas dos metais de solda de aço de alta resistência obtidos pelos processos eletrodo revestido (SMAW) e Gas Metal Arc Welding (GMAW). Foram realizadas soldagens multipasses pelos processos SMAW e GMAW, com preaquecimento de 200°C, posição plana e energia de soldagem média de 1,49kJ/mm para o processo SMAW e 1,33kJ/mm para o processo GMAW. Após a soldagem, realizou-se um tratamento térmico a 600°C durante 1 hora, sendo esta condição comparada com a condição de como soldada. Foram realizados ensaios de tração, Charpy-V, dureza e metalográficos por microscopia eletrônica de varredura para caracterização mecânica e microestrutural dos metais de solda. Os resultados mostraram que ambos os processos propiciaram boas propriedades mecânicas para todas as condições.

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

MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF HIGH STRENGTH STEEL WELD METALS OBTAINED BY GMAW AND SMAW PROCESSES

Abstract

The present work presents a comparative analysis between the mechanical properties of high strength steel weld metals obtained by the shielded metal arc (SMAW) and gas metal arc welding (GMAW) processes. Multipass welding by SMAW and GMAW processes were performed with preheating of 200°C, in the flat position and average energy welding of 1.49kJ/mm for SMAW and 1.33kJ/mm for GMAW process. After welding a post weld heat treatment at 600°C for 1 hour was performed, this condition being compared with the as welded condition. Tensile, Charpy-V notch, hardness tests and metallographic examination by scanning electron microscopy were performed for mechanical and microstructural characterization. The results showed that good mechanical properties were obtained in all conditions for both processes.

Keywords: Weld metal; Mechanical properties; Heat treatment.

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

² Eng. Mecânico, M.Sc., Nuclep, RJ, Brasil.

³ Eng. Metalúrgico, D.Sc., Professor Titular do CEFET/RJ, PPEMM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁴ Eng. Metalúrgico, M.Sc., Professor Assistente do CEFET/RJ, CEMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁵ Eng. Metalúrgico, D.Sc., Professor Adjunto da UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A evolução na tecnologia de fabricação de aços de alta resistência tem se tornado também um desafio para a tecnologia da soldagem e, em particular, do desenvolvimento de consumíveis de soldagem [1]. Considerando que a microestrutura dos metais de solda que apresentam limite de escoamento da ordem de 600MPa ou superior consistem basicamente de bainita e martensita ao invés de uma microestrutura com predominância de ferrita acicular, a formulação da composição básica do metal de solda deve ser diferente para cada caso [2]. Particularmente, para projetos com exigência mais rigorosa de resistência, tais como estruturas navais e offshore [3,4], há um desafio adicional, uma vez que as normas de qualificação são limitadas a 120ksi (830MPa) e podem não considerar a influência do tratamento térmico pós-soldagem obrigatório nestes projetos para o alívio das tensões residuais [5,6].

Um outro aspecto importante, está relacionado à necessidade de grandes volumes de solda na maioria das aplicações industriais, o que torna a produtividade um fator muito importante neste contexto. Embora trabalhos anteriores mostrem uma boa relação entre resistência mecânica e tenacidade ao impacto para o metal de solda obtido pelo processo eletrodo revestido [7-10], é importante ressaltar que existe uma tendência à piora destas propriedades mecânicas com o aumento da produtividade, o que torna importante um estudo mais sistemático sobre esta questão.

Neste contexto, o presente trabalho realiza uma análise comparativa da influência do ciclo térmico de soldagem e de tratamento térmico as propriedades mecânicas e microestruturais dos metais de solda obtidos pelos processos eletrodo revestido (SMAW) e GMAW, de forma a verificar a possibilidade do aumento de produtividade nas operações de fabricação e reparo de estruturas fabricadas com aços de alta resistência.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Soldagem

A Figura 1 mostra a geometria da junta utilizada. A soldagem foi realizada na posição plana, preaquecimento de 200°C e temperatura interpasses máxima de 250°C, pelo processo por eletrodos revestidos (SMAW) com utilização de eletrodo de 4,0mm de diâmetro da classe AWS 5.5 E12018M [5] e pelo processo GMAW com um arame sólido da classe AWS 5.28 ER 120S-G [6] de 1,2mm de diâmetro e uma mistura Ar-20%CO₂ como gás de proteção com vazão de 18l/min.

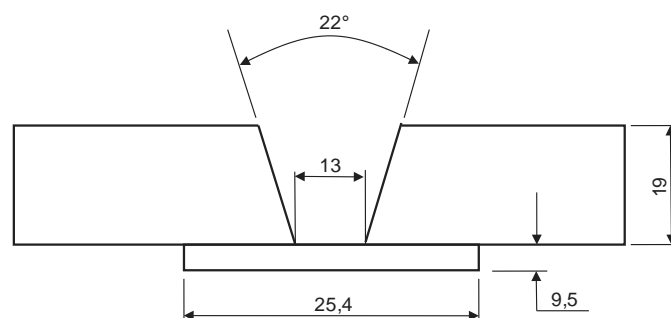


Figura 1. Detalhes da geometria da junta utilizada. Cotas em mm.

Os parâmetros de soldagem são 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 EN 1011-2

Anexo D [11] para a posição onde os corpos-de-prova dos ensaios mecânicos foram retirados.

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

A Tabela 2 mostra a composição química dos metais depositados.

Tabela 1. Parâmetros médios de soldagem utilizados

Metal de solda	Corrente (A)	Tensão (V)	Energia de soldagem (kJ/mm)	Número de passes	Tx deposição (kg/h)	$\Delta t_{8/5}$ (s)
SMAW	183	27	1,49	28	1,12	11,7
GMAW	240	31	1,33	14	3,15	9,8

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

Metal de solda	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Ceq ⁽¹⁾	Pcm ⁽²⁾
SMAW	0,07	0,44	1,41	0,018	0,006	0,83	0,44	2,03	0,031	0,020	0,70	0,26
GMAW	0,08	0,71	1,70	0,005	0,006	0,40	0,55	1,90	0,027	0,044	0,69	0,28

$$^{(1)}\text{Ceq} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15.$$

$$^{(2)}\text{Pcm} = \text{C} + \text{Si}/30 + \text{Mn}/20 + \text{Cu}/20 + \text{Ni}/60 + \text{Cr}/20 + \text{Mo}/15 + \text{V}/10 + 5\text{B}$$

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 [12] 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 metalográficos por microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos metais de solda, para avaliação dos constituintes microestruturais presentes na região do metal de solda onde foi posicionado o 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%.

2.4 Simulação termodinâmica e cinética

Para verificar as fases formadas em função da composição química dos metais de solda, foram realizadas simulações da evolução das fases por meio de cálculos termodinâmicos e cinéticos por meio do programa Thermocalc 2017a. A base de dados termodinâmica TCFE8 foi usada para os cálculos e a base cinética MOBFE3.

A temperatura e tempo utilizados como referência nos cálculos foi a de temperatura de TTPS (600°C, 1 hora).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios de tração, onde se nota que tanto a tensão limite de escoamento quanto a tensão limite de resistência se mostram muito próximas para os dois processos utilizados, com variações sempre inferiores a 4% desta propriedade para as condições de análise. Estes resultados estão concordantes com os dados experimentais obtidos por outros pesquisadores [7,9,13-19], conforme mostrado na Figura 2, e parecem corroborar as afirmações de Ramirez [13] de que mesmo com composições básicas diferentes, as propriedades de tração apresentam uma tendência de acompanhar o carbono equivalente.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de tração.

Metal de solda	Condição	LE(MPa)	LR (MPa)	Al(%)	RA(%)
SMAW	CS	842	942	23	62
	TTPS	851	958	23	62
GMAW	CS	864	966	23	65
	TTPS	825	946	24	63

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

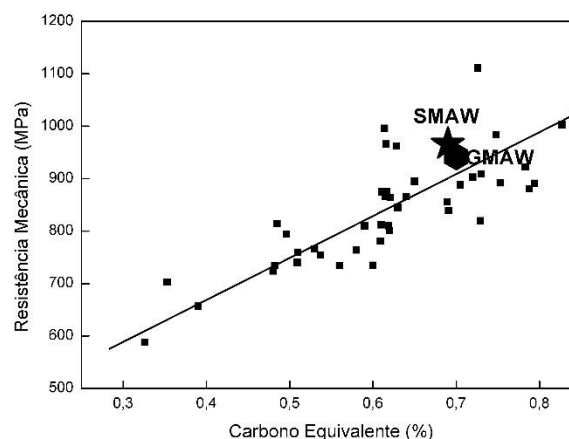
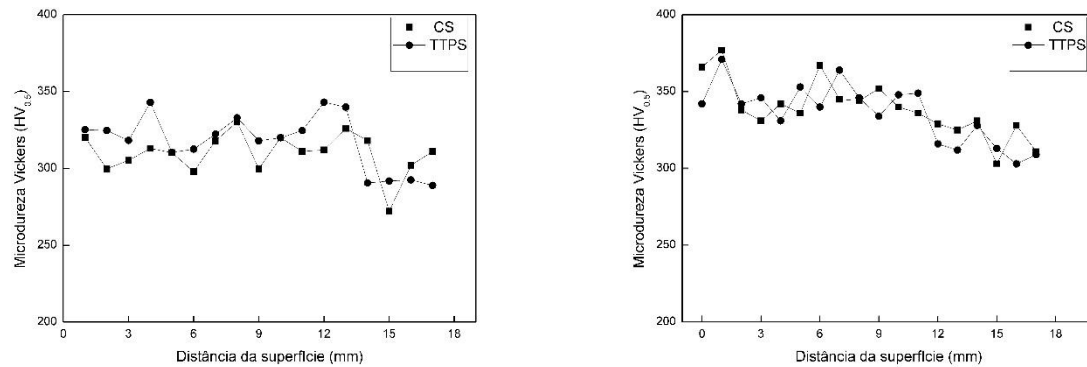


Figura 2. Variação da resistência mecânica com o carbono equivalente segundo diversos autores [7,9,13-20]

Um outro aspecto importante e que também foi verificado em outros estudos [7,9,14,21,22], diz respeito ao efeito do TTPS nas propriedades de tração de metais de solda de alta resistência. De fato, todos estes trabalhos parecem apontar que para maiores teores de elementos de liga esta redução não é tão acentuada, como verificado no presente trabalho (Tabela 3).

Os resultados de dureza (Figura 3) mostram a mesma tendência do comportamento da resistência mecânica, com resultados ligeiramente superiores para o metal de solda obtido pelo processo GMAW e com pouca variação desta propriedade após o TTPS.



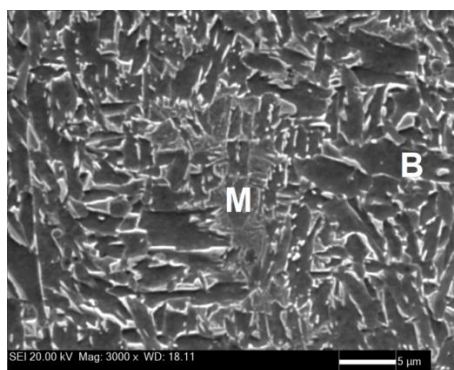
SMAW

GMAW

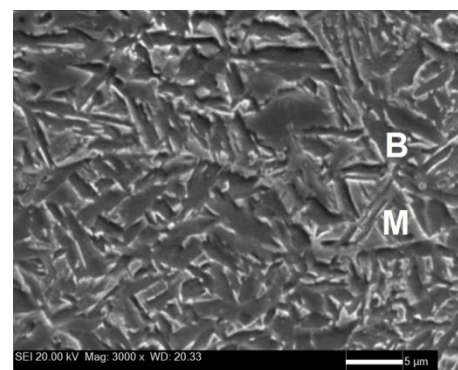
Figura 3. Resultados dos ensaios de dureza Vickers.

Estes elevados valores de limite de resistência estão associados com uma microestrutura constituída de martensita (M) e bainita (B) revenidas (Figura 4), como consequência dos múltiplos passes de soldagem, sendo esta ocorrência esperada para metais de solda de alta resistência [2,7,9,14,15,18-20].

Para metais de solda, é naturalmente esperado valores inferiores de energia de impacto [25]. No entanto, os valores desta propriedade obtidas no presente trabalho apresentam resultados superiores aos propiciados por outros trabalhos experimentais [19,20,22,23,25-27], notadamente para o processo GMAW (Figura 5).



SMAW (68%RC)



GMAW (66%RC)

Figura 4. Microestrutura dos metais de solda no estado de como soldado (MEV). Ataque: nital 2%.

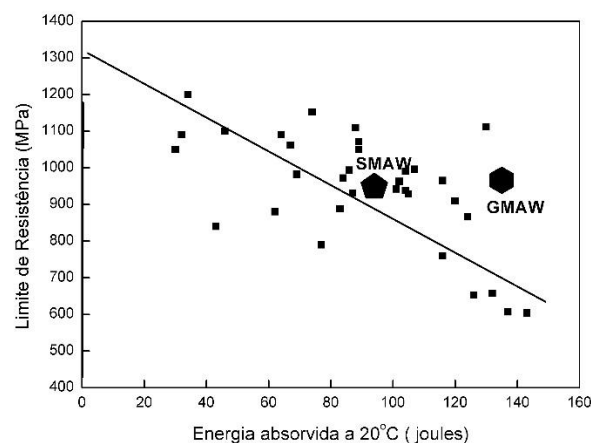


Figura 5. Variação da resistência mecânica com a tenacidade ao impacto segundo diversos autores [19,20, 22,23,25-27].

Em termos comparativos, a tenacidade ao impacto dos metais de solda apresentou comportamento distinto em relação ao estado de como soldado e após TTPS. De fato, a análise dos resultados obtidos (Figura 6) evidencia que para o estado de como soldado, foi possível obter valores elevados desta propriedade mesmo para temperaturas da ordem de -40°C , o que concorda com outros pesquisadores que utilizaram metais de solda similares aos aqui estudados [7,19,23]. No entanto, como comentado anteriormente, a maioria dos estudos disponíveis da literatura não avalia as propriedades mecânicas após a realização do TTPS, o que pode promover diferenças significativas nas conclusões sobre seleção de consumíveis de soldagem. No caso do presente estudo, verificou-se que a execução do TTPS promoveu uma redução da tenacidade ao impacto para ambos os metais de solda, o que pode estar associado com extensiva ocorrência de segundas fases nos contornos de grão (Figura 7), conforme também verificado em outras evidências disponíveis na literatura [7,9,14,15,21,23, 24].

Este tipo de incidência é observado invariavelmente em aços e metais de solda contendo elementos Cromo e Molibbdênio [28] e dependendo do teor dos elementos de liga presentes, pode conduzir a uma queda expressiva da tenacidade ao impacto.

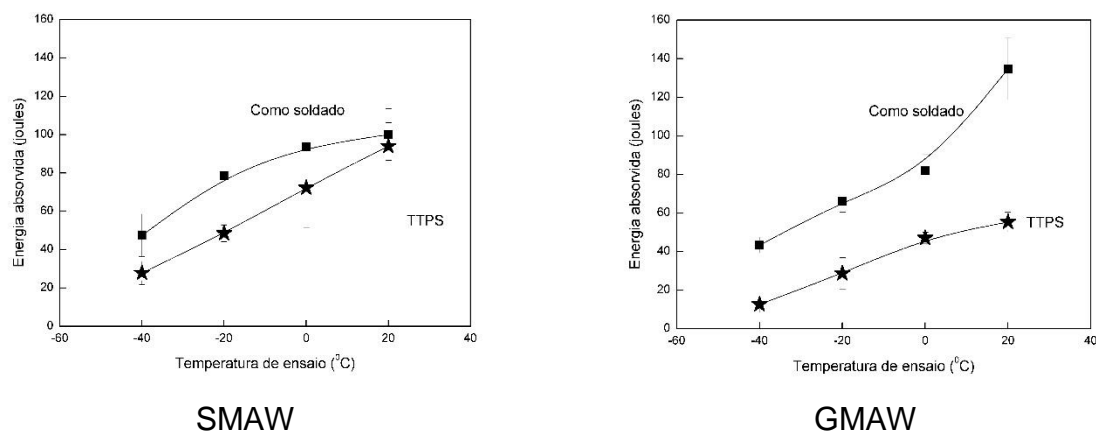


Figura 6. Variação da energia absorvida com a temperatura para os metais de solda.

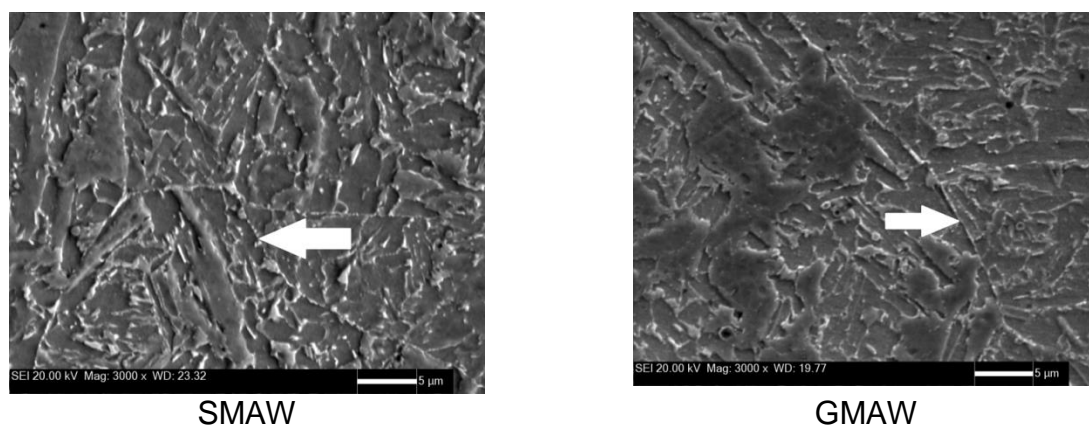


Figura 7. Ocorrência de precipitação nos contornos de grão (indicado pela seta) após o TTPS (MEV). Ataque: nital 2%.

A Figura 8 mostra os diagramas de fases formadas com a redução da temperatura para os metais de solda. Nota-se que em ambos os casos há formação de diferentes carbeto após a transformação da austenita em ferrita, dada à limitada solubilidade do carbono na ferrita. Em ambos os casos são previstas a formação de carbeto MC (ricos em Mo e V) e M_2C (rico em Mo). No caso dos carbeto ricos em Cr e Fe, no

caso do metal de solda SMAW é prevista a formação de $M_{23}C_6$ e sua transformação em M_7C_3 para menores temperaturas. No caso do metal de solda GMAW, o $M_{23}C_6$ é estável mesmo para as menores temperaturas consideradas, como a do TTPS. Tal fato decorre da maior proporção de Cr do metal de solda SMAW, favorecendo este carbeto. Cabe notar que, para ambos os processos, uma percentual em torno de 5% de austenita retida é prevista. A Tabela 4 mostra a fração volumétrica das fases previstas para 600°C. É importante ressaltar que tais cálculos são baseados em análises termodinâmicas, onde há o pressuposto da estabilidade das fases e tempo suficiente longo para tal. De forma a estimar qual a contribuição do TTPS na formação de fases, a Figura 9 apresenta o diagrama transformação-tempo-temperatura para ambas as amostras, considerando o tempo de 1 hora (3600 segundos) proposto para o TTPS. As curvas foram definidas para um valor mínimo em volume de 0,1% de fase formada. Nota-se que, a 600°C, no metal de solda SMAW é prevista a formação de $M_{23}C_6$ com cerca de 2000 segundos. No caso do metal de solda GMAW, para o tempo considerado no TTPS não é prevista a formação de carbetos. O primeiro a se formar é o MC, em cerca de 3800 segundos, portanto acima do tempo de TTPS.

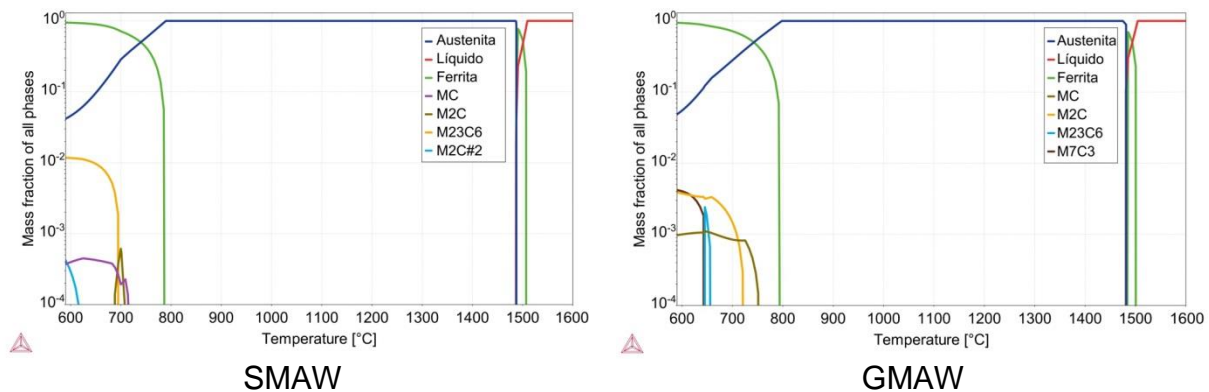


Figura 8. Diagrama de fases formadas com o decréscimo da temperatura.

Tabela 4. Fração volumétrica de fases formadas para os metais de solda.

Fase	Fração volumétrica (%)	
	GMAW	SMAW
Ferrita	93,7	94,2
Austenita	5,4	4,5
MC	0,13	0,05
M ₂ C	0,34	0,03
M ₇ C ₃	0,41	-
M ₂₃ C ₆	-	0,11

Finalmente, é importante verificar que a soldagem pelo processo GMAW propiciou uma produtividade muito superior a obtida com o processo SMAW, conforme verificado pela taxa de deposição mostrada na Tabela 1. Neste aspecto, observa-se que os resultados obtidos pelo processo GMAW estão de acordo com outros trabalhos experimentais [29,30], mas os resultados do processo SMAW apresenta-se inferiores ao observado pela literatura [10,30,31]. No entanto, esta variação permitiu a obtenção de metais de solda com tempos de resfriamento próximos (Tabela 1), parâmetro importante na avaliação das propriedades mecânicas, que é o objetivo principal do presente trabalho. Assim, mesmo considerando um aumento da

taxa de deposição do processo SMAW para valores usuais da ordem de 2,0kg/h [31], a produtividade obtida pelo processo GMAW é ainda muito superior.

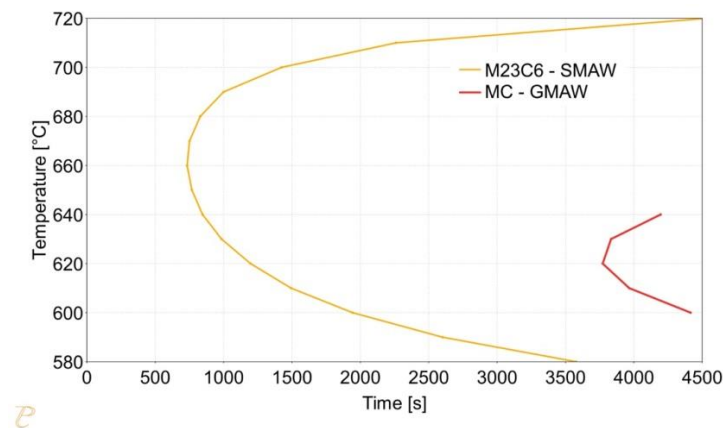


Figura 9. Diagrama transformação-tempo-temperatura de formação dos carbetos (fração mínima estabelecida de 0,1% em volume).

4. CONCLUSÕES

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

- Os metais de solda obtidos pelos processos SMAW e GMAW apresentaram boas propriedades mecânicas;
- a execução do TTPS não promoveu mudanças significativas na resistência mecânica;
- a execução do TTPS promoveu uma redução da tenacidade ao impacto devido à precipitação de carbonetos nos contornos de grão e;
- a soldagem pelo processo GMAW permitiu a obtenção de metais de solda com boas propriedades mecânicas e um aumento significativo de produtividade.

Agradecimentos

Os autores agradecem às Instituições pelo apoio prestado na execução do presente trabalho: Cefet/RJ, NUCLEP, UFRJ, CNPq e FINEP.

REFERÊNCIAS

- Zhang T, Li Z, Young F, Kim HJ, Li H, Jing H and Tillmann W. Global progress on welding consumables for HSLA steel, Iron and Steel Institute of Japan International, 2014; 54:1472–1484.
- Kitagawa Y and Kawasaki H. Recent development of high-strength and tough welding consumables for offshore structures, Kobelco Technology Review. 2013; 32:1-8.
- US Department of Defense,, MIL-S-16216K , Steel Plate, Alloy, Structural, High Yield Strength HY-80 and HY-100, 1987.
- International Association of Classification Societies, W22, Offshore Mooring Chain, June, 2011.
- American Welding Society, AWS 5.5, Specification for low alloy steel electrodes for shielded metal arc welding, 1996.
- American Welding Society , AWS 5.28, Specification for low alloy steel electrodes and rods for gas shielded arc welding, 1996.
- 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.

8. 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.
9. 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.
10. Farneze HN, Jorge JCF, Souza LFG and Bott IS. Comparative study of high-strength steel weld metals obtained by the SMAW and FCAW processes for offshore applications and mooring chains, Welding International, 2010; 24:903–910.
11. European Norm 1011-2, Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 2: Arc welding of ferritic steels, 2003.
12. ASTM International, 2005. 'Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products', ASTM A-370-05, 2005, West Conshohocken, USA, ASTM
13. Ramirez JE. Examining the mechanical properties of high-strength steel weld metals, Welding Journal, 2009; 88(1):32-38.
14. 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.
15. Gomes AJM, Souza LFG, Bott IS, Jorge JCF. Estudo de propriedades mecânicas e microestruturais de metal de solda de extra alta resistência com diferentes tratamentos térmicos pós-soldagem, Anais do Congresso Nacional de Soldagem, 380, 2012, Ouro Preto, Minas Gerais: Brasil, 2012, p.1-13.
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. Surian ES, de Vedia LA. All-weld-metal design for AWS E10018M, 11018M and 12018M type electrodes, Welding Journal, 1999; 78:217s-228s.
18. Lord M and Jennings G. Effect of interpass temperature on properties of high-strength weld metals, Svetsaren, 1999; 54(1-2):53-58.
19. 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.
20. 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.
21. Bauné E, Chovet C, Leduey B 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.
22. 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.
23. Queiroz SS, Jorge JCF, Souza LFG e Bott IS., Efeito das condições de soldagem nas propriedades mecânicas de metais de solda de alta resistência obtidos pelo processo GMAW, Anais do 71º Congresso Internacional da ABM, 2016;1-8.
24. 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
25. Schnitzer R, Zügner D, Haslberger P, Ernst W and Kozeschnik E. Influence of alloying elements on the mechanical properties of high-strength weld metal, Science and Technology of Welding and Joining, 2017, DOI:10.1080/13621718.2016.1274095
26. Peng Y, Peng X, Zhang X, Tian Z e Wang T. Microstructure and mechanical properties of GMAW weld metal of 890MPa class steel, Journal of Iron and Steel Research International, 2014; 21(5):539-544.

27. 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.
28. Kaiser MS. Effect of heat input on the weld toughness of chromium-molybdenum steel, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, 2013; 7(1):33-35.
29. Rutzinger B. Influence of the welding process to the dilution rate of weld overlays on unalloyed steel using the weld consumable ERNiCrMo-3 (Alloy 625), Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2014; 5:72–75.
30. 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.
31. Myres, D. Metal cored wires: vantagens e desvantagens, Welding Journal, 2002; 81(9):39-42.