

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM NAS PROPRIEDADES DE METAL DE SOLDA DE ALTA RESISTÊNCIA OBTIDOS POR ARAME TUBULAR TIPO *METAL CORED*¹

Marcelo Marmello Pinheiro²
Jorge Carlos Ferreira Jorge³
Luís Felipe Guimarães de Souza³
Ivaní de Souza Bott⁴

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo analisar o efeito de tratamentos térmicos pós-soldagem em metal de solda de aço de alta resistência obtidos pelo processo de arame tubular tipo *Metal Cored*. Em estudos anteriores, os resultados obtidos com esse processo de soldagem propiciaram propriedades muito próximas dos limites mínimos aceitáveis para utilização em soldagem de reparo de componentes de linhas de ancoragem de plataformas de petróleo fabricados em aço da classe IACS W22 Grau R3, de onde surgiu a necessidade do estudo sobre a variação do tempo do tratamento térmico, na melhoria das propriedades de impacto do metal de solda. Foram soldadas juntas multipasses, pelo processo arame tubular, utilizando consumíveis da classe AWS E 110C-G com 1,2 mm de diâmetro, com preaquecimento de 200°C, corrente contínua, posição plana e aporte térmico médio de 1,24 kJ/mm. Após a soldagem, realizaram-se ensaios de tração, impacto Charpy-V e dureza em corpos-de-prova retirados integralmente do metal depositado, tanto na condição de como soldado quanto após tratamento térmico pós-soldagem. Os tratamentos térmicos pós-soldagem consistiram de aquecimento a 580°C por 1 h, 2 h e 3 horas seguidos de resfriamento ao ar. Os resultados mostraram que o metal de solda apresentou propriedades satisfatórias em todas as condições de análise. Adicionalmente, verificou-se que aumento do tempo de tratamento térmico não propiciou mudanças significativas na tenacidade ao impacto.

Palavras-chave: Metal de solda; Arames tubulares tipo *Metal Cored*; Aços de alta resistência; Tratamento térmico pós-soldagem.

EFFECT OF POST WELD HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH STEEL WELD METAL BY METAL CORED TUBULAR ELECTRODES

Abstract

The main goal of the present work, which is part of an extensive ongoing research program, is to evaluate the effect of the post weld heat treatment on the mechanical properties of high strength steel weld metals obtained by metal cored tubular electrodes. Previous studies on this program using the same procedure has produced results very close to minimum required by IACS W22 Grade R3 steels. Consequently, it was necessary to study the effect of varying the time of post weld heat treatment on the impact toughness. Multi-pass joints were welded using AWS E 110C-G metal cored electrode by FCAW process, with 1,2 mm diameter, pre-heating of 200°C, direct current, flat positioned and heat input average of 1,24 kJ/mm. After the welding, tensile, Charpy-V impact and hardness tests, in testing pieces removed entirely from the weld metal both in the as welded and after post weld heat treatment conditions. The post weld heat treatment consisted by heating to 580°C by 1 h, 2 h and 3 hours, respectively, followed by air cooling. The results showed that the obtained weld metals presented satisfactory mechanical properties in all conditions. Additionally, it was verified that the post weld heat treatment did not provided important changes on the weld metal impact toughness.

Key words: Weld metal; Metal cored consumables; High strength steels; Post weld heat treatment.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Produção. Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais (PEMM), Cefet, RJ, Brasil.

³ Eng. Metalúrgico, M.Sc. DSc., Professor. PPEMM. Cefet, RJ, Brasil.

⁴ Física, M.Sc., Ph.D., Professora. Departamento de Engenharia de Materiais, PUC-Rio, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As plataformas de petróleo para operação offshore, são unidades flutuantes cujo sistema de amarração consiste em longos trechos de amarras de aço, cabos de aço e outros acessórios (Figura 1).



Figura 1. Esquema de sistema de ancoragem de plataforma semi-submersível.⁽¹⁾

Normalmente, estes sistemas são compostos de inúmeros componentes diferentes (Figura 2) e projetados para uma vida útil em torno de 20 anos, devendo-se prever inspeções periódicas para monitoramento da vida em fadiga dos mesmos. Durante estas operações de inspeção, considerando a criticalidade do funcionamento dos sistemas de ancoragem, pode ser verificada a ocorrência de inúmeros danos, os quais podem gerar a necessidade de substituição de elos individuais, de forma a garantir a integridade estrutural de todo o sistema, assim como a continuidade do funcionamento regular da plataforma, estando neste caso, envolvidos enormes custos de paradas não previstas.

Quando ocorre a previsão de substituição de um único elo de amarra, faz-se necessária uma movimentação de enormes proporções visto que as linhas de ancoragem devem ser retiradas de serviço, trazidas à terra, embarcadas em transporte terrestre e encaminhadas às fábricas para possibilitar a substituição, o que se caracteriza por um custo elevado e um prazo dilatado. Adicionalmente, deve-se considerar que o transporte terrestre envolve uma limitação de peso e comprimento de amarras, o que obriga a colocação de elos de ligação do tipo kenter, o qual, reconhecidamente apresenta vida em fadiga muito inferior ao dos elos comuns.

Com o objetivo de minimizar estes custos, iniciou-se um programa de estudos com o objetivo de qualificar procedimentos confiáveis de soldagem para elos de amarras de aço, o qual já produziu inúmeros resultados positivos⁽²⁻⁹⁾ pelo processo eletrodo revestido. Baseado nestes resultados promissores, o programa avançou e foi introduzido o processo de soldagem por arame tubular, com o objetivo de aumentar a produtividade na soldagem destes elos de amarra.⁽¹⁰⁾

No entanto, embora com resultados interessantes, verificou-se naquele estudo,⁽⁸⁾ que a tenacidade ao impacto obtida no metal de solda foi muito próxima do mínimo para o grau R3 da norma IACS W22.⁽¹¹⁾

O presente trabalho dá sequência à estes estudos e tem por objetivo avaliar o efeito do aumento do tratamento térmico pós-soldagem na tenacidade ao impacto do metal de solda, visando a melhoria desta propriedade.

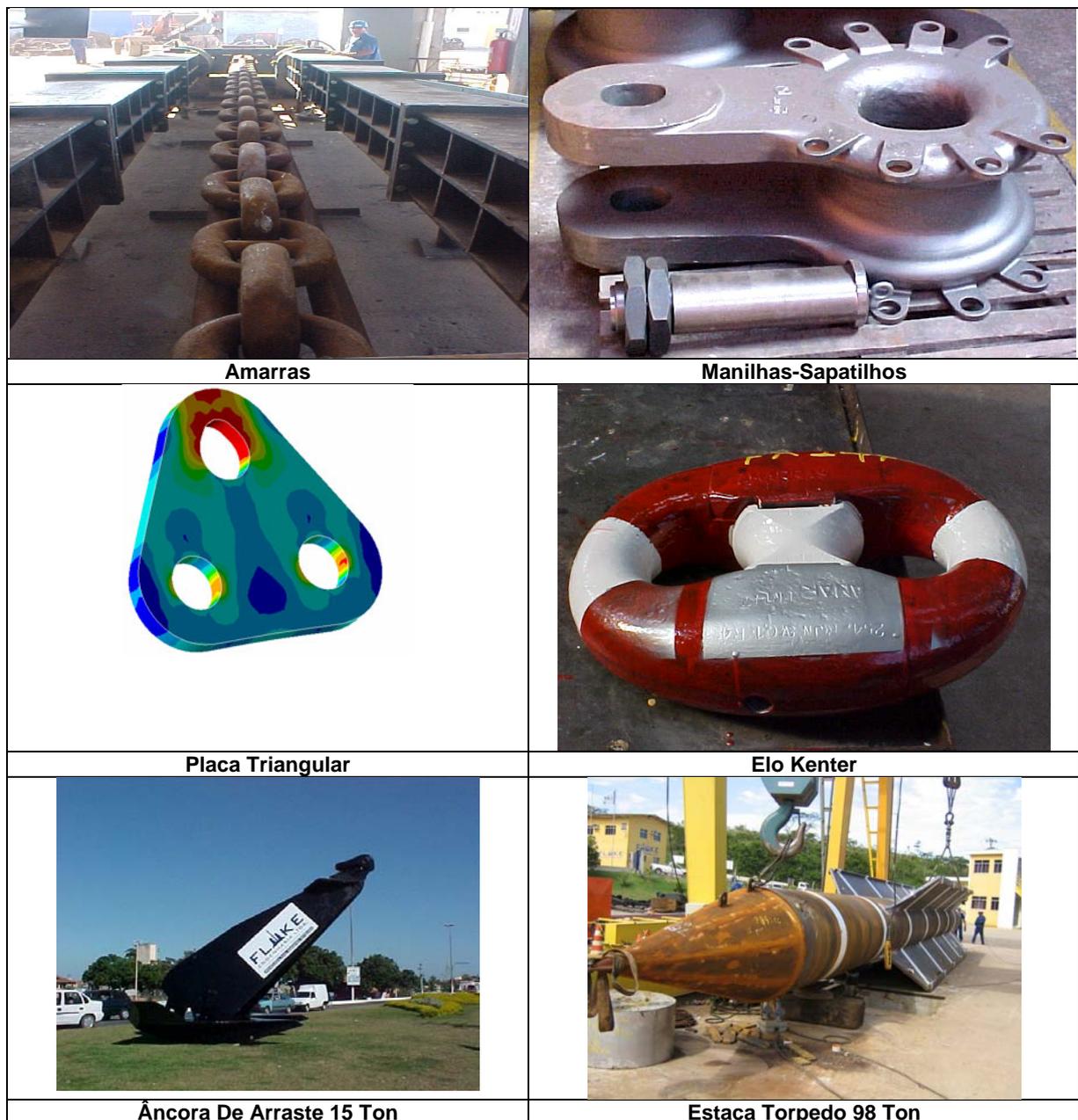


Figura 2. Componentes de linhas de ancoragem de plataformas de petróleo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

As juntas soldadas foram efetuadas utilizando-se como material de base chapas de aço de classificação ASTM A-36 nas dimensões de 700 mm X 300 mm X 19 mm. Como material de adição foi utilizado o arame tubular do tipo AWS E 110C-G com 1,2 mm de diâmetro. A Tabela 1 apresenta a composição química do metal depositado.

Tabela 1. Composição química dos metais de solda (% em peso)

Elemento	C	Si	P	S	Mn	Mo	Ni	Cr	V	Ceq
% Peso	0,051	0,411	0,021	0,005	1,324	0,524	2,478	0,024	0,012	0,549

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

2.2 Soldagem dos Corpos-de-Prova

As juntas foram soldadas a partir de chapas com 19 mm de espessura e 700 mm de comprimento. A geometria e demais dimensões da junta são apresentadas na Figura 3.

As juntas foram preaquecidas à temperatura de 200°C e posteriormente foi realizada a soldagem multipasse, na posição plana, utilizando-se uma mistura de 75%Ar-25%CO₂ como gás de proteção.

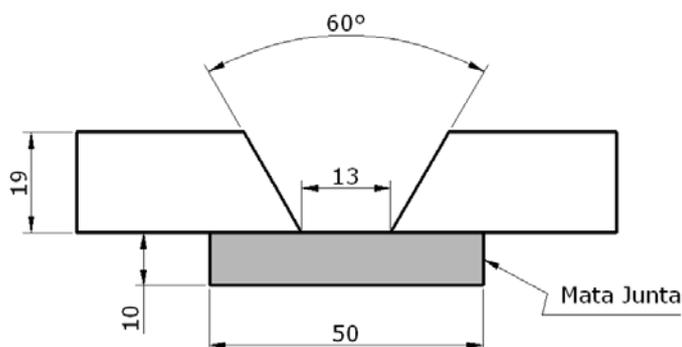


Figura 3. Detalhes da geometria da junta utilizada.

A Tabela 2 apresenta o conjunto de parâmetros médios utilizados para a soldagem.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem utilizados

I(A)	V (Volts)	AT (kJ/mm)	Nr. Passes
281-299	31-32	1,24	21

Nota: AT – aporte térmico.

2.3 Tratamentos Térmicos Pós Soldagem (TTPS)

Foram realizados tratamentos térmicos consistindo de aquecimento a 580°C por 1 h, 2 h e 3 horas, sendo estas condições comparadas à condição da junta de como soldada.

2.4 Ensaio Mecânicos

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

Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, em corpos-de-prova retirados longitudinalmente ao cordão de solda, para avaliação de todas as propriedades de tração dos metais de solda.

Foram realizados ensaios de impacto Charpy-V, à temperatura de -20°C, realizados na condição de como soldado (CS) e após TTPS para tempos de 1 h; 2 h e 3 horas, para avaliação de possíveis alterações da tenacidade ao impacto devido à variação do tempo de tratamento.

Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova normalizados conforme a norma ASTM A-370⁽¹²⁾ nas dimensões de (10 mm x 10 mm x 55 mm) e retirados transversalmente ao cordão de solda, à 2 mm da superfície da junta. O entalhe foi posicionado no plano da espessura e no centro do cordão de solda.

Foram realizados ensaios de dureza Vickers com aplicação de carga de 10 Kgf em corpos de prova transversais ao cordão de solda, sendo realizada uma varredura de dureza da superfície até a raiz do metal de solda.

3 RESULTADOS

3.1 Ensaio de Tração

A Tabela 3 e Figura 4 apresentam os resultados dos ensaios de tração para os metais de solda obtidos, juntamente com o critério de aceitação utilizado que é referente aos aços da classe grau R3⁽¹¹⁾ para acessórios de ancoragem, onde se notam as seguintes características principais:

- verifica-se que os metais de solda atendem aos requisitos R3 para todas as condições de análise;
- a realização do tratamento térmico pós-soldagem propiciou uma redução contínua da resistência mecânica e do limite de escoamento, embora estas diferenças não sejam tão significativas; e
- todos os valores de alongamento e redução de área estão bem superiores aos mínimos requeridos para os aços grau R3.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de tração

Condição	LE(MPa)	LR(MPa)	Al(%)	RA(%)
Como Soldado	659	744	25,71	65,48
TTPS – 1 h	640	742	22,86	66,51
TTPS – 2 h	593	705	24,57	69,42
TTPS – 3 h	583	694	25,71	66,35
Mínimo R3 ⁽¹¹⁾	410	690	17,00	50,00

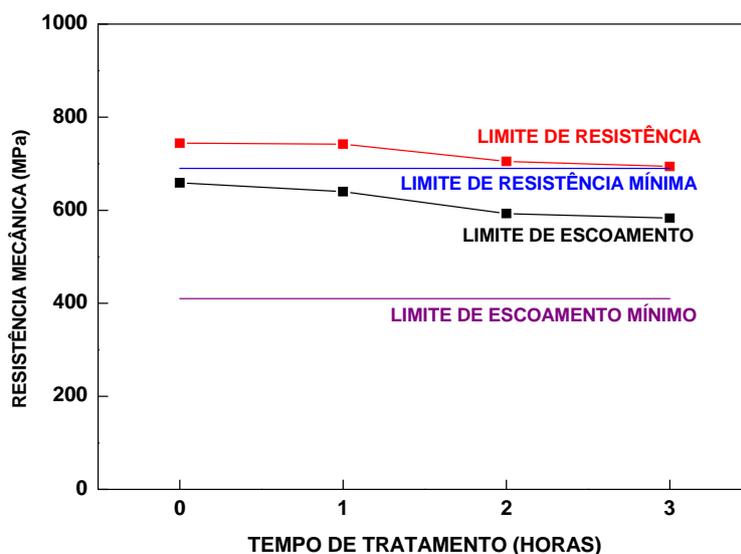


Figura 4. Variação da resistência mecânica com o tempo de tratamento térmico.

3.2 Ensaios de Impacto Charpy V

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de impacto Charpy V para os metais de solda obtidos, juntamente com o critério de aceitação utilizado, onde se notam as seguintes características principais:

- verifica-se que os metais de solda atendem aos requisitos R3 para todas as condições de análise;
- a realização do tratamento térmico pós-soldagem propiciou uma redução da tenacidade ao impacto do metal de solda;
- o aumento do tempo de tratamento térmico não modificou o comportamento da tenacidade ao impacto; e
- os melhores resultados de tenacidade ao impacto foram obtidos para a condição de como soldado.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de Impacto Charpy-V realizados à -20°C, em Joules

Condição	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	Média
Como Soldado	54,5	64,5	75,5	64,8
TTPS – 1h	51,5	60,5	36,5	49,5
TTPS – 2h	36,5	61,5	47,0	48,3
TTPS – 3h	52,0	59,5	47,5	53,0
Mínimo R3 – Metal Base ⁽¹¹⁾				40,0
Mínimo R3 – Solda ⁽¹¹⁾				30,0

3.3 Ensaios de Dureza

A Figura 5 apresenta os perfis de dureza obtidos para os metais de solda nas condições CS e TTPS, medidos a partir da superfície da chapa, onde se nota que não houve grande variação nesta propriedade para as diversas condições de estudo.

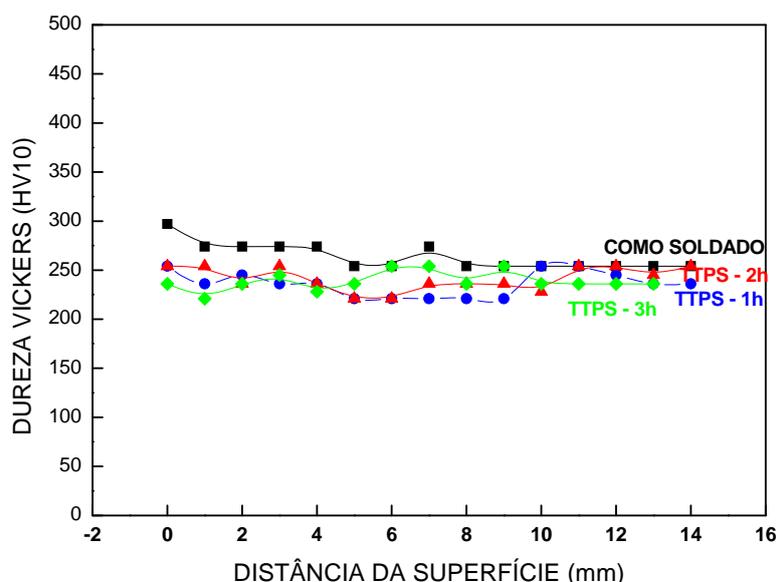


Figura 5. Perfil de dureza dos metais de solda nas diversas condições de análise.

3.4 Ensaios Metalográficos

A Figura 6 apresenta o aspecto macrográfico da juntas soldada, onde se observa o aspecto da soldagem multipasse.

A inspeção visual da seção macrográfica não detectou a ocorrência de defeitos como trincas, porosidades, inclusão de escória ou quaisquer outras descontinuidades de natureza metalúrgica e/ou operacional.



Figura 6. Aspecto macrográfico da junta soldada.

4 DISCUSSÃO

Na utilização de estruturas soldadas observa-se a importância crescente da necessidade de juntas soldadas com propriedades mecânicas adequadas às condições de serviço, cujas exigências podem inviabilizar um reparo por soldagem, caso não apresente a confiabilidade exigida. No caso de operações *offshore*, a confiabilidade depende fundamentalmente da segurança das linhas de ancoragem. No caso de componentes para ancoragem de plataformas, existem regras específicas para materiais adequados,⁽¹¹⁾ as quais definem requisitos extremamente complexos, visto haver necessidade de associar elevadas resistências mecânicas com um alto padrão de tenacidade ao impacto. Este nível de exigência torna a soldagem destes componentes um grande desafio em termos não somente da definição do procedimento de soldagem mais adequado, como, principalmente na seleção e/ou desenvolvimento de consumíveis adequados para a aplicação. É importante ressaltar que nestes casos, mesmo as normas de qualificação de consumíveis de soldagem, tais como AWS A 5.5,⁽¹³⁾ AWS 5.28⁽¹⁴⁾ e MIL-E-22200/1F,⁽¹⁵⁾ por exemplo, podem não atender integralmente os requisitos dos metais base utilizados em ancoragem de plataformas marítimas,⁽¹¹⁾ visto que, são limitadas à resistências mecânicas da ordem de 120 ksi (830 MPa), nem sempre definem critérios de resistência ao impacto mínima, devendo ser os mesmos serem acordados entre fornecedor e cliente,^(13,14) e apresentam ainda um outro complicador, não fazem menção à manutenção de propriedades quando se faz necessária a realização de tratamento térmico de alívio de tensões, tratamento mandatório para acessórios de ancoragem. As normas que realizam esta avaliação, podem até ter requisitos inferiores para a condição de tratado termicamente.⁽¹⁵⁾ Considerando este aspecto de impossibilidade de garantia de fornecimento de

consumíveis com as propriedades requeridas com garantia de norma específica, é fundamental um estudo criterioso e investigativo para avaliar a adequação de consumíveis especiais disponíveis no mercado.

O presente trabalho dá sequência à publicação anterior,⁽¹⁰⁾ procurando avaliar a adequação de consumíveis que sejam adequados à soldagem com requisitos desafiadores de resistência mecânica e tenacidade. Particularmente, se avalia a possibilidade de melhoria da tenacidade ao impacto com o aumento do tempo de tratamento térmico pós-soldagem, já que o aumento da temperatura de tratamento não pode ser realizado para não causar efeitos nocivos ao metal base para o qual se está estudando o consumível em questão.

A Tabela 4 mostra os resultados dos ensaios de impacto Charpy V, juntamente com os requisitos tanto para o metal base quanto para a solda da norma IACS W22.⁽¹¹⁾ Nota-se que o resultado obtido é cerca de 20% superior ao requisito do metal base e da ordem de 60% superior ao valor exigido para o metal de solda.

A Figura 7 mostra estes resultados, juntamente com os valores obtidos em publicação anterior por Farneze et al.,⁽¹⁰⁾ onde se verifica também que os resultados aqui encontrados foram muito próximos aos obtidos anteriormente para o preaquecimento de 200°C. Esta questão é digna de menção, pois embora o consumível utilizado não apresente requisitos específicos para qualificação, pois segundo a norma AWS 5.28⁽¹⁴⁾ as propriedades para este consumível devem ser acordadas entre fornecedor e cliente, cabe destacar esta repetibilidade de resultados para corridas diferentes.

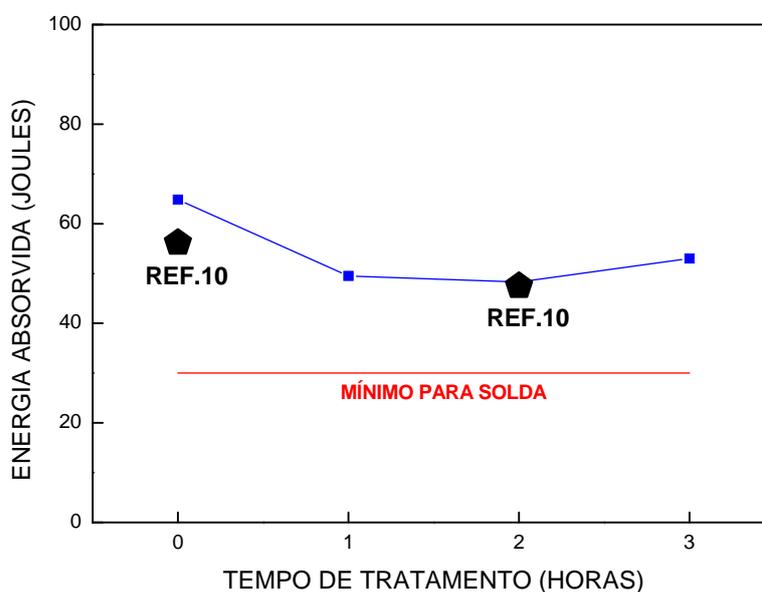


Figura 7. Análise comparativa da tenacidade ao impacto para diversas condições.

No tocante ao comportamento da tenacidade ao impacto em relação ao tratamento térmico, verifica-se a mesma evolução para os dois casos (Figura 7), ou seja, uma leve diminuição em relação ao estado de como soldado e a manutenção do patamar de tenacidade com o aumento do tempo de tratamento até 3 horas. Farneze et al.,⁽¹⁰⁾ comentam em seu trabalho esta questão da estabilidade microestrutural com o tratamento térmico para metais de solda com teores elevados de Ni e Mn, como justificativa para a manutenção da tenacidade com o tratamento térmico.

A microestrutura observada era constituída de martensita e ferrita com segunda fase, com predominância do primeiro constituinte (Figura 8).

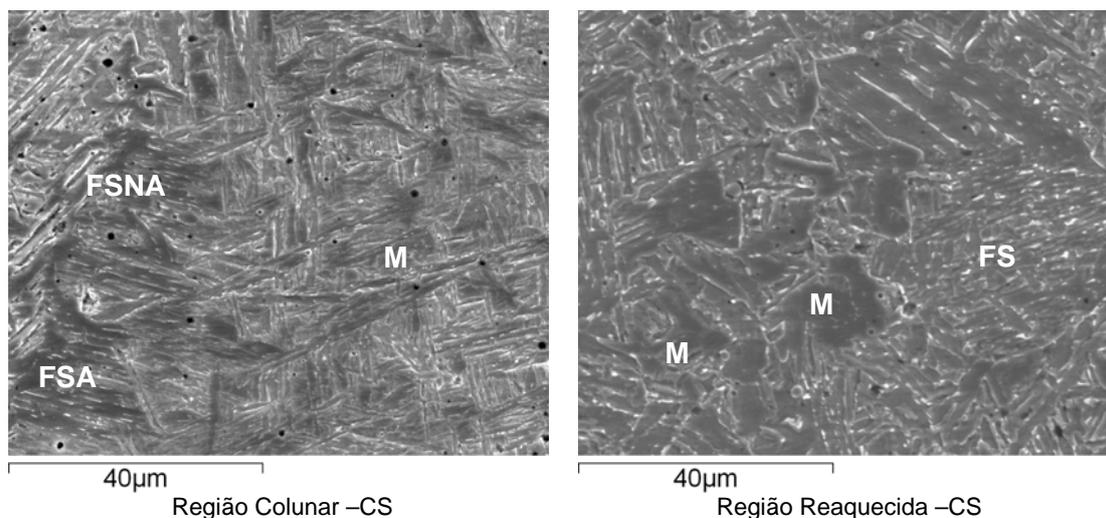


Figura 8. Microestrutura do metal de solda na condição de como soldado obtido por arame tubular metal cored com 1,10 kJ/mm observado por microscopia eletrônica de varredura.⁽¹⁰⁾ (C-0,02%, Si-0,45%, Mn-1,37%, Mo-0,54%, Ni-2,66%, Cr-0,037%). Aumento: 1.000X. Ataque: Nital 2%.

Vários estudos⁽¹⁶⁻²¹⁾ têm evidenciado a necessidade de se manter um balanço preciso da relação Ni-Mn para obtenção de patamares de tenacidade ao impacto satisfatórios, devido à inúmeros fatores microestruturais que interferem sobremaneira na relação tenacidade/microestrutura. No entanto, é digno de menção um estudo de Surian et al.⁽²²⁾ no qual se afirma que após tantos anos de estudo, a obtenção de valores de tenacidade adequados não é mais o problema. A questão que se coloca no presente momento é, como alcançar os requisitos de resistência mecânica desejados para os padrões atuais.

No caso do presente estudo, esta questão também é evidenciada, pois ao se aumentar o tempo de tratamento para se promover algum ganho de tenacidade ao impacto, se verifica uma queda de resistência (Figura 4), o que coloca em questão este procedimento não seja recomendável.

5 CONCLUSÕES

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

- O metal de solda estudado, mostrou-se adequado para utilização na soldagem do aço grau R3 da norma IACS W22 com utilização de preaquecimento de 200°C e tratamento térmico pós-soldagem até 2 horas;
- o aumento do tempo de tratamento térmico para 3 horas, gerou uma redução na resistência mecânica, o que comprometeu a sua adoção como procedimento recomendável; e
- o aumento do tempo de tratamento térmico não promoveu mudanças substanciais na tenacidade ao impacto.

Agradecimentos

Os autores agradecem às Instituições pelo apoio prestado na execução do presente trabalho: A Fluke Engenharia Ltda., Cefet/RJ, PUC-Rio e ESAB. Os autores agradecem também a: Marcio Moura, Tatiana Farias e Jorge Vieira da Fluke

Engenharia Ltda., pelo apoio na realização das soldagens e ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

- 1 PAIVA, A.M.C.; “Integridade de Sistemas de Ancoragem: contribuições às metodologias de análise”, Dissertação de M.T., COCPG/CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
- 2 JORGE, J.C.F. et al.; “Desenvolvimento de procedimento de reparo por soldagem de amarras de aço para ancoragem de plataformas de petróleo”, IN: XXVII Congresso Nacional de Soldagem , outubro, Brazil, 2001.
- 3 JORGE, J. C. F., BOTT, I. S., SUMAM, J. A., SOUZA, L. F. G., “Efeito de tratamentos térmicos pós-soldagem nas propriedades de aço fundido de elevada resistência para sistemas de ancoragem de plataformas marítimas”, Revista Soldagem & Inspeção, vol. 9, no. 4, dezembro, p.205 - 212, 2004.
- 4 JORGE, J. C. F. et al. “Relação tenacidade/microestrutura da ZTA de aço fundido ASTM A 148 GR. 80 50 para acessórios de ancoragem de plataformas de petróleo”, Revista Soldagem & Inspeção. , vol. 9, no. 4, dezembro, , p.192-197, 2004.
- 5 JORGE, J.C.F. et al., “Desenvolvimento de Procedimento de Reparo por Soldagem de Amarras de Aço para Ancoragem de Plataformas de Petróleo, Parte III – Comportamento em Fadiga”, In: XXXII Congresso Nacional de Soldagem, Anais do XXXII CONSOLDA, 2006.
- 6 JORGE,J.C.F. et al., “Influência da composição química e tratamento térmico pós-soldagem nas propriedades mecânicas e microestruturais de metais de solda de alta resistência”, IN: XXXIII Congresso Nacional de Soldagem, Anais do XXXIII CONSOLDA, 2007.
- 7 JORGE,J.C.F. et al., “Evaluation of the mechanical properties on welded links of high strength steel mooring chains after fatigue testing”, In: 2nd Latin American Welding Congress, São Paulo, 2008.
- 8 JORGE,J.C.F. et al., “Avaliação de propriedades mecânicas de elos de amarras de aço de alta resistência submetidos à ensaios de fadiga”, Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.
- 9 FARAGASSO, S.M. et al., “Avaliação de Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Metal de Solda de Aço de Extra Alta Resistência para Utilização em Equipamentos de Ancoragem”, Anais do CONSOLDA 2011, 2011.
- 10 FARNEZE, H. N.; JORGE, J.C.F.; SOUZA, L.F.G; BOTT, I.B. ; “Estudo comparativo de metais de solda de aço de alta resistência obtidos pelos processos eletrodo revestido e arame tubular para aplicação em equipamentos de amarração offshore”; Soldagem & Inspeção; vol.14; no.2; São Paulo Abril./Junho, p.151-160, 2009
- 11 International Association of Classification Societies, W22, Offshore Mooring Chain, June, 2011.
- 12 ASTM A 370-05, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 2005
- 13 AWS 5.5, Specification for low alloy steel electrodes for shielded metal arc welding , 1996.
- 14 AWS 5.28, Specification for low alloy steel electrodes and rods for gas shielded arc welding, 1996.
- 15 MIL 22200-1F, Electrodes, welding, mineral covered, iron-powder, low hydrogen medium and high tensile steel , as welded or stress-relieved weld application, 1981.
- 16 EVANS, G. M.; The Effect of Nickel on the Microstructure and Proprieties of C-Mn All-Weld Metal Deposits. Welding Research Abroad Vol. XXVII No. 2, 3 Feb/ Mar, 1991.
- 17 KANG, B. Y.; KIM , H. J.; HWANG, S. K.; Effect of Mn and Ni on the Variation of the Microstructure and Mechanical Properties of Low-carbon Weld Metals. ISIJ International, Vol. 40 (2000), No. 12, p. 1237–1245.
- 18 KEEHAN, E.; ANDRÉN, H. -O.; KARLSSON; L.; MURUGANANTH, M. ;BHADESHIA, H. K. D. H.; Microstructural and Mechanical Effects of Nickel and Manganese on High

- Strength Steel Weld Metals. Disponível em <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Keehan.Trends.2002.pdf> >
- 19 TRINDADE, V. B.; PARANHOS, R. P. R.; PAYÃO, J. C.; SOUZA, L. F. G.; Influência da Adição de Níquel na Tenacidade de Metais de Solda de Aços C-Mn Antes e Após Tratamento Térmico de Alívio de Tensões. Soldagem Insp., Vol. 10, No. 4, Out-Nov 2005, p. 164-171.
 - 20 ZHANG, Z.; FARRAR, R. A.; Influence of Mn and Ni on the Microstructure and Toughness of C-Mn-Ni Weld Metals. Welding Journal, No.5, p. 183-196, 1997.
 - 21 EVANS, G.M., Development of MMA electrodes for offshore application, Metal Costruction, p. 438-443, 1983.
 - 22 SURIAN, E., RISSONE, N. M., SVOBODA, H. G., VEDIA, L.A. "SMAW, FCAW and SAW High-Strength Ferritic Deposits: The Challenge Is Tensile Properties". Welding Journal, Vol. 89, March 2010, 54-64-s.