



Estudo do efeito da variação da velocidade de soldagem no comportamento corrosivo de liga experimental inoxidável ferrítica com alto teor de molibdênio

Natasha Lopes Gomes¹, Luana de Sousa Santos¹, Ana Paula Barroso¹, Rodrigo Freitas Guimarães², Marcelo Monteiro Valente Parente³, Walney Silva Araujo⁴

¹Graduandas em Tecnologia em Manutenção Industrial – IFCE. e-mail: natashalopesgomes@gmail.com

²Professor Doutor em Engenharia de Materiais - IFCE. e-mail: rodrigofg@ifce.edu.br

³Professor Doutor em Química Inorgânica - IFCE. e-mail: marceloparente2@gmail.com

⁴Professor Doutor em Ciência dos Materiais - UFC. e-mail: walney.araujo@gmail.com

Resumo: Este trabalho tem o objetivo de avaliar o comportamento corrosivo de uma liga experimental de aço inoxidável ferrítico com 5,3% de molibdênio e 15,6% de cromo quando submetida à soldagem TIG autógena. O interesse nesta liga é a sua possível utilização na indústria do petróleo e gás natural como forma de reduzir os custos de manutenção provenientes do desgaste acelerado dos seus equipamentos. A soldagem da liga na condição solubilizada foi realizada sobre chapa plana, sem chanfro, com eletrodo toriado de 2,4 mm de diâmetro, posição plana e argônio como gás de proteção. Foram empregadas duas diferentes condições de soldagem, resultantes da variação da velocidade de soldagem, mantendo os mesmos valores de tensão e de corrente de soldagem. A liga em estudo foi submetida a uma análise microestrutural na condição solubilizada e soldada. Para cada condição de soldagem foram retiradas quatro amostras da liga para análise do comportamento corrosivo através de ensaios eletroquímicos de polarização. Os resultados mostraram que a variação da velocidade de soldagem nas condições estudadas não altera o comportamento corrosivo da liga com alto teor de molibdênio.

Palavras-chave: comportamento corrosivo, soldagem, molibdênio.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a principal empresa do setor petrolífero no Brasil tem sofrido com o desgaste de seus equipamentos devido à corrosão provocada pelos ácidos naftênicos presentes no meio a que estes estão submetidos. Dentre os equipamentos que sofrem deterioração devido a esses compostos oxigenados destacam-se as torres de destilação, constituídas de aço estrutural ASTM A516 G60 e revestidas internamente com aços inoxidáveis ferríticos AISI 410S ou AISI 405. Este revestimento, por sua vez, não apresenta boa resistência quando em contato com o petróleo de alta acidez processado no país, sendo necessário o emprego de técnicas de recuperação (GUIMARÃES, 2005, 2011).

Uma das principais técnicas de recuperação utilizadas consiste na aplicação de um revestimento soldado, no qual este possua boas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão. Atualmente utiliza-se o aço inoxidável austenítico AISI 317, por apresentar essas características (SABOIA, 2011).

O aço inoxidável austenítico, por possuir propriedades dissimilares dos aços ferríticos (revestimento original) e por ser empregado na condição como soldado, gera problemas de trincas entre o revestimento original e o recuperado, expondo o aço estrutural ao meio corrosivo e provocando a deterioração das torres de destilação (SABOIA, 2011). Diante dessa problemática, e devido ao alto custo do emprego do aço inoxidável austenítico, surge a necessidade de se empregar ligas de aço inoxidável ferrítico que resistam melhor à corrosão.

Sabendo que a adição de determinados elementos químicos pode favorecer o aumento de resistência à corrosão, e que um desses elementos químicos é o molibdênio, por este ser responsável pelo aumento da resistência do material quando submetido a atmosferas ácidas não oxidantes, à corrosão localizada e à resistência a altas temperaturas (CUNHA, 2006; ASM HANDBOOK, 1993; SOUZA, 1989; LAFFLER, 1999; EDSTRÖM, 1964; FONTANA, 1986), decidiu-se por confeccionar uma liga inoxidável Fe-Cr-Mo com elevado teor de Mo para uma possível aplicação de revestimento na indústria do petróleo na condição como soldada.

Para que o seu emprego possa ser validado, faz-se necessária uma avaliação minuciosa das propriedades da liga quanto ao seu comportamento microestrutural, comportamento corrosivo, propriedades mecânicas, avaliação da soldagem.

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento corrosivo de uma liga inoxidável ferrítica com alto teor de molibdênio após ser submetida à soldagem autógena TIG, verificando assim, a influência da variação da velocidade de soldagem no processo de degradação do material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma liga de aço inoxidável ferrítico, cuja composição química é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em massa) da liga em estudo.

Liga	C	Mn	Si	Cr	Mo
1	0,031	0,3	0,39	15,6	5,3

Inicialmente, a liga foi forjada e laminada a quente. Posteriormente, a mesma foi solubilizada à temperatura de 1050°C durante um período de 15 minutos, seguido de um resfriamento rápido em água, a fim de obter apenas uma fase homogênea em sua microestrutura.

Após a solubilização foram retirados corpos de prova da liga para caracterização microestrutural através de microscopia óptica (MO). Em seguida, os mesmos foram submetidos à soldagem autógena empregando o processo TIG automático. As soldagens foram realizadas na posição plana, com eletrodo de tungstênio toriado de 2,4 mm de diâmetro em corrente contínua eletrodo negativo (CCEN), utilizando argônio (Ar) como gás de proteção (vazão de 20 L/min), sobre chapas com dimensões de 10,00 mm x 40,00 mm x 80,00 mm.

Na deposição dos cordões de solda foram empregados dois níveis de energia (Es), mantendo a corrente (I) constante e variando a velocidade de soldagem (Vs), o que resultou em duas diferentes condições de soldagem, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Relação entre os níveis de corrente e velocidade de soldagem empregados.

Condição	Vs(cm/min)	I (A)	Es (kJ/cm)
T1	34	200	6,0
T2	20		10,0

Após a soldagem da liga, foram retiradas amostras das condições T1 e T2 para caracterização microestrutural utilizando MO e o reagente Vilella (VOORT, 1995) para revelar a microestrutura.

Foram obtidas amostras da liga nas diferentes condições adotadas de soldagem. As mesmas foram embutidas a frio em resina epóxi com o contato elétrico, constituindo o eletrodo de trabalho. Foram realizados ensaios eletroquímicos de Polarização Potenciodinâmica Cíclica (PPC), em duplicata em uma célula típica de três eletrodos, onde o eletrodo de referência constituía o prata/cloreto de prata saturado e contra-eletrodo de platina, imersos em uma solução aquosa (água bidestilada) contendo 0,5mols/L de NaCl e 0,5mols/L de H₂SO₄.

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de PPC foi o AUTOLAB Potenciostato/Galvanostato PGSTAT 30 e o software GPES. As curvas de PPC foram plotadas densidade de corrente (A/cm²), ajustada de acordo com a área do eletrodo de trabalho, versus Potencial aplicado em volts.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a micrografia da Liga 1 na condição solubilizada. Observou-se uma microestrutura caracteristicamente ferrítica, resultado esperado, uma vez que esta possui elevados teores de Cr e Mo e estes elementos químicos são ferritizantes (CALLISTER, 2007). Também é possível verificar a formação de grãos de tamanho grande e heterogêneo. Este resultado,

provavelmente, pode ter sido causado pela falta de elementos estabilizantes de tamanho de grão na composição química da liga. (VILLAFUERTE *et al.*, 1990).

Ainda observando a microestrutura mostrada na Figura 1 podemos verificar alguns precipitados no interior dos grãos, possivelmente, formados devido à presença de carbono na liga (GUIMARÃES, 2011). Ainda que o tratamento de solubilização tenha sido realizado com o objetivo de dissolver determinadas fases, é possível que o resfriamento rápido em água não tenha sido o bastante para que houvesse essa dissolução.

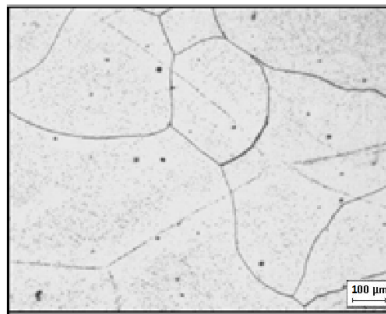


Figura 1. Micrografia da Liga 1 após a solubilização. Aumento 200X.

As micrografias da Liga 1 soldada são apresentadas nas Figura 2, as quais apresentaram características microestruturais semelhantes à condição solubilizada. Observou-se também a presença de alguns precipitados no interior dos grãos. É importante verificar a ocorrência desses precipitados, pois é sabido que, durante a soldagem, algumas fases secundárias podem ser formadas e podem afetar adversamente as propriedades de resistência à corrosão do material (NILSON, 1992; POHL, STORZ E GLOGOWSKI, 2007; BONOLLO, TIZIANI E FERRO, 2009; SATHIRACHINDA, PETTERSON, *et al.*, 2011), como aumento de dureza, formação de zonas empobrecidas em cromo na microestrutura e alteração na composição química (BRANDI, SILVEIRA e VASCONCELLOS, 2010).

Verificou-se também que a liga apresentou uma boa soldabilidade, não havendo a formação de trincas nas regiões da solda.

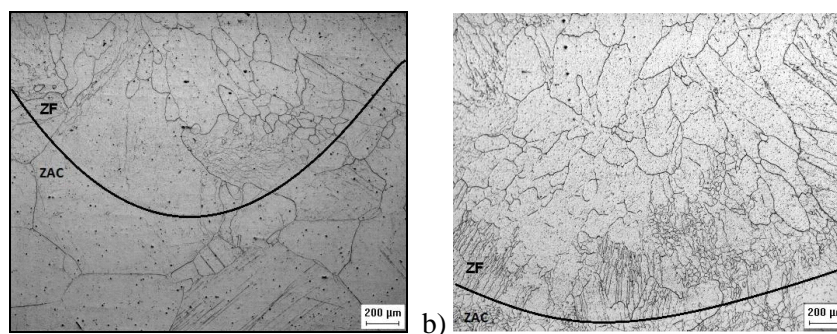


Figura 2. Micrografias da Liga 1 após a soldagem TIG. Aumento 50X. a) Condição T1. b) Condição T2.

Os resultados do ensaio de PPC estão apresentados na Figura 3, onde têm-se um gráfico comparativo entre as duas condições de soldagem T1 e T2 (variação da velocidade de soldagem). Inicialmente, podemos observar que as duas curvas apresentaram o mesmo potencial de corrosão, de aproximadamente -0,420 V. Após o início da polarização na região anódica, as curvas atingiram a densidade de corrente (DI) máxima (corrente de passivação) ao chegar ao potencial de aproximadamente -0,343 V. A partir desse ponto, a DI começa a cair, atingindo seu valor mínimo de $5,89 \times 10^{-5}$ mA/cm² para a condição T1 e de $6,53 \times 10^{-5}$ mA/cm² para a condição T2. A partir desse

ponto iniciou-se a formação da região de passivação, que se estendeu até aproximadamente +0,55 V (potencial de pite). Logo após, a DI subiu rapidamente, caracterizando a região de transpassivação (região onde ocorre a quebra do filme de passivação). A reversão da curva foi iniciada quando a corrente atingiu 1,2 mA.

O aumento da corrente durante o retorno da curva indica que houve a formação de pites em ambas as condições. No momento em que a curva descendente cruza a curva original tem-se o chamado potencial de proteção que teve seu valor por volta de -0,150 V para ambas as condições.

Para fins de comparação, foram calculadas as áreas entre as curvas de PPC para as diferentes condições de soldagem. A razão entre as áreas das curvas na condição T1 e T2 apresentou um valor de 1,11, ou seja, a diferença entre as mesmas corresponde a aproximadamente 10%, o que significa que não é significativa. É sabido que a área calculada entre as curvas indica o aumento da área ativa do eletrodo de trabalho. Para este estudo, o aumento da área está associado à formação de pite.

Os resultados obtidos do cálculo das áreas das curvas de PPC indicam que as duas condições de soldagem em estudo apresentaram, aproximadamente, a mesma quantidade relativa de pites.

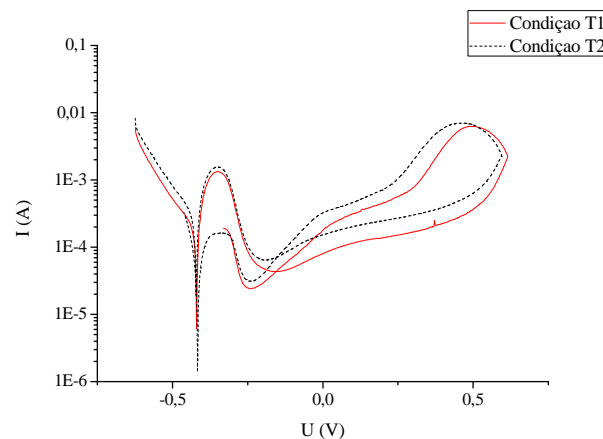


Figura 3. Curva de PPC comparativa entre as condições T1 e T2.

As micrografias apresentadas na Figura 4 comprovam os resultados obtidos anteriormente, onde é possível observar claramente a existência de pites na superfície das amostras. Visualmente, também se observa qualitativamente processos corrosivos equivalentes para as condições de soldagem adotadas.

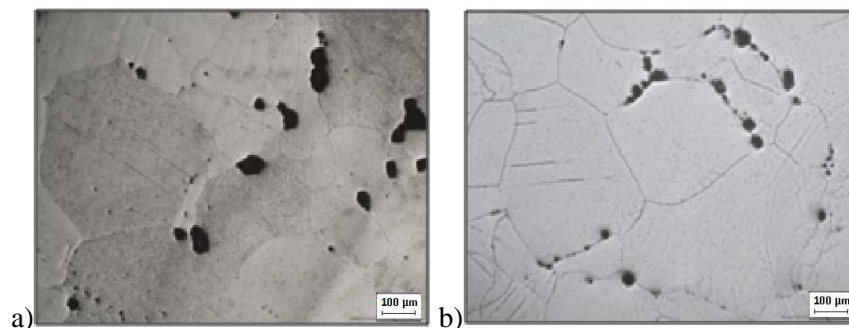


Figura 4. Micrografias da Liga 1 soldada após o ensaio de PPC. Região da ZAC. Aumento 200X. a) Condição T1. b) Condição T2.

Esses resultados somados aos obtidos do ensaio de polarização indicam que a variação da velocidade de soldagem não alterou o comportamento corrosivo da Liga 1.



6. CONCLUSÕES

- As soldagens da liga foram realizadas com sucesso.
- Os ensaios de polarização potenciodinâmica cíclica realizados e as micrografias obtidas indicam que não houve uma diferença significativa no comportamento corrosivo da liga para as condições de soldagem em estudo, mostrando que a variação do parâmetro de velocidade de soldagem não alterou a resistência à corrosão da liga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Materiais (LMAT) do IFCE e ao Laboratório de Corrosão da UFC pela realização dos experimentos, ao GIAF (Grupo de Inspeção e Análise de Falhas) do IFCE pelo suporte técnico, além do CNPQ, FUNCAP e PETROBRÁS pelo incentivo financeiro.

REFERÊNCIAS

- ASM HANDBOOK – **Casting, Nickel and Nickel Alloys**, Vol. 15, ed.10, Ohio: ASM Metals Park 1993b. 1316p.
- BONOLLO, F.; TIZIANI, A.; FERRO, P. Chapter 4: Welding processes, microstructural evolution and final properties of duplex and superduplex stainless steels. In: ALVARES-ARMAS, I.; DEGALLAIX-MOREULI, S. **Duplex Stainless Steels**. London: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, v. 1, 2009. Cap. 4, p. 141-159.
- BRANDI, S. D.; SIVEIRA, L. M. Y.; VASCONCELLOS, D. L. B. Aplicação da norma ASTM A923-Prática A para identificação de fases intermetálicas em junta soldada de aço inoxidável superduplex UNS 32750. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 1, p. 153–158, 2010.
- CALLISTER, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**, 7th Ed., USA, 2007.
- CUNHA, B. R. M. da. **Soldabilidade da nova geração de aços ferríticos Cr-W resistentes a altas temperaturas**: 2006. 109p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Rio de Janeiro.
- EDSTRÖM, H. J., LJUNDBERG, L., **Rost- und säurebeständige Chrom-Nickel- Stähle mit max. 0,030% Kohlenstoff als Konstruktionsmaterial für die chemische Industrie**. *Werkst. u. Korrosion* 15, p 743-753, 1964.
- FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering**. 3 ed. Cingapura: McGraw-Hill. 1986.544p.
- GUIMARÃES, R.F. **Avaliação Comparativa dos Linings de aços AISI 444 e AISI 316L para aplicação em Torres de Destilação**. UFC, 2005.
- GUIMARÃES, R.F. **Efeito do Teor de Molibdênio na Microestrutura de Juntas Soldadas em Ligas Fe-Cr-Mo**. UFC, 2011.
- LAFFLER, B., **Stainless – Stainless Steel and their Properties**. 3ed. Stockholm: Avesta Sheffield, 1999 pp.1-44.
- NILSON, J. O. Overview: Super duplex stainless steels. **Materials Science of Technology**, v. 8, n. 8, p. 685-700, 1992.
- POHL, M.; STORZ, O. Sigma phase in duplex stainless steels. **Zeitschrift für Metallkunde**, v. 95, n. 7, p. 631-638, 2004.



SABOIA, F.H.C. **Efeito da composição química na resistência à corrosão de ligas inoxidáveis ferríticas experimentais.** X Enicit, Maracanaú, 2011.

SATHIRACHINDA, N.; PETTERSON, R.; WESSMAN, S.; KIVISAKK, U.; PAN, J. Scanning Kelvin probe force microscopy study of chromium nitrides in 2507 super duplex stainless steel- Implications and limitations. **Electrochimica Acta**, v. 56, p. 1792-1798, 2011.

SOUZA, S. A., **Composição Química dos Aços.** São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 144p.

VOORT G.F.V. et al. ASM Handbook: **Metallography and Microstructures.** Vol, 9, USA: ASM International, p. 284, 1992.

VILLAFUERTE, J.C.; KERR, H.W. **Phase transformations in stainless steel weld metal and heat-affected zones.** Key Engineering Materials, v.69&70, p.129-148, 1992.