



Estudo do comportamento corrosivo de ligas experimentais de aço inoxidável ferrítico com diferentes teores de Cr e alto teor de Mo soldadas pelo processo TIG

Ana Paula Rodrigues do Nascimento Barroso¹, Luana de Sousa Santos¹, Natasha Lopes Gomes¹, Rodrigo Freitas Guimarães², Marcelo Monteiro Valente Parente³, Walney Silva Araújo⁴

¹Graduandas do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial – IFCE Campus Maracanaú. e-mail: appaulabarroso@gmail.com, luanadesousasantos@yahoo.com.br, natashalopesgomes@gmail.com

²Professor Doutor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE Campus Maracanaú. e-mail: rodrigofg@ifce.edu.br

³Professor Doutor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE Campus Avançado de Caucaia. e-mail: marceloparente2@gmail.com

⁴ Professor Doutor na Universidade Federal do Ceará – UFC Campus Pici. e-mail: walney.araujo@gmail.com

Resumo: Este trabalho tem o objetivo de avaliar o comportamento corrosivo de ligas experimentais de aço inoxidável ferrítico com dois diferentes teores de cromo (15,6% e 17,6%) e 5,3% de molibdênio na condição como soldadas. As ligas, na condição solubilizada, foram submetidas ao processo de soldagem TIG autógeno utilizando argônio como gás de proteção, mantendo-se constantes a tensão e a corrente de soldagem, obtendo-se uma única condição de soldagem. Foi realizada uma análise microestrutural das amostras das ligas na condição solubilizada e soldada. Também foram retiradas duas amostras de cada liga solubilizada e soldada para análise do comportamento corrosivo através de ensaio eletroquímico de Polarização Potenciodinâmica Cíclica - PPC. Observou-se que a soldagem não alterou a microestrutura das ligas. Também se observou, através dos ensaios eletroquímicos de PPC, que o efeito da soldagem em relação ao material de base (solubilizada) não afetou significativamente o comportamento corrosivo das ligas. No entanto, observou-se que a liga com maior teor de cromo nas condições solubilizada e soldada apresentou melhor comportamento corrosivo.

Palavras-chave: corrosão, cromo, ensaios eletroquímicos, molibdênio

1. INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás tem sofrido com o aumento nos custos de manutenção devido à degradação dos equipamentos de refino causada pela corrosão naftênica, isso ocorre porque esses equipamentos foram projetados para operarem com baixo índice de acidez, não resistindo assim as atuais condições dos novos petróleos que tem apresentado alto grau de acidez.

As torres de destilação são exemplos de equipamentos prejudicados pela corrosão naftênica. Elas são feitas de aço estrutural ASTM A516 G60 e que por não possuírem boa resistência à corrosão, são revestidas internamente com aços inoxidáveis ferríticos AISI 410S ou AISI 405. Contudo, este revestimento também sofre processo de corrosão, pois não apresenta boa resistência à elevada acidez do petróleo atualmente processado. Para recuperar o revestimento corroído, utiliza-se o aço inoxidável austenítico AISI 317, que apresenta boa resistência à corrosão (GUIMARÃES, 2005, 2011), porém como ele é empregado na condição soldado, surgem trincas na zona afetada pelo calor da solda em virtude da diferença de coeficiente de dilatação térmica entre o material base (ferrítico) e o material do “lining” (SOUZA, 2004).

Apesar dos altos custos para recuperar os equipamentos danificados pela corrosão, o processamento de petróleo com alta acidez é economicamente atrativo. Então tem se pesquisado no intuito de resolver o problema de dissimilaridade entre os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos. Uma opção seria desenvolver ligas de aço inoxidáveis ferríticas mais resistentes à corrosão, pois os aços austeníticos são mais caros que os ferríticos.

É sabido que elementos de liga como cromo (Cr) e molibdênio (Mo) favorecem o aumento na resistência a corrosão naftênica (LIPPOLD, 2005) e que o aumento do teor de molibdênio além de aumentar significativamente a resistência à corrosão por “pittings” não influencia a formação da fase



α' (GROBNER, 1973). No entanto, pouco ou quase nada se tem pesquisado no sentido de definir o percentual ideal deste elemento em composições de aços inoxidáveis ferríticos e praticamente não se tem informações sobre características mecânicas e metalúrgicas, soldabilidade ou comportamento corrosivo. Assim, foram confeccionadas novas ligas com elevado teor de molibdênio (5,3%) e diferentes teores de cromo (17,6 e 15,6%) para se fazer um estudo sobre o comportamento corrosivo dessas ligas.

Visto que as ligas estudadas serão empregadas na condição como soldada, é possível que a soldagem, devido à temperatura do processo, favoreça mudanças microestruturais das ligas. Por isso as ligas estudadas passaram pelo processo de soldagem TIG, onde a tensão e corrente permaneceram constantes.

Por fim, o objetivo principal desse estudo é avaliar o comportamento corrosivo das ligas experimentais de aço inoxidáveis ferríticos denominadas Liga 1 (15Cr5Mo) e Liga 2 (17Cr5Mo) na condição como soldadas através de ensaios de polarização eletroquímica, verificando qual combinação de cromo e molibdênio favorece a uma melhor resistência a corrosão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram utilizadas ligas experimentais de aço denominadas Liga 1 e Liga 2, cuja composição química está expressa na Tabela 1. Essas ligas, inicialmente na condição laminadas à quente, foram solubilizadas para se obter corpos de prova apropriados para a realização dos estudos.

Tabela 1 – Composição química das ligas experimentais

Liga	C	Mn	Si	Cr	Mo
1	0,031	0,30	0,38	15,6	5,3
2	0,031	0,30	0,39	17,6	5,3

As ligas passaram por um processo de solubilização à temperatura de 1050 °C e mantidas nesta temperatura por um período de 15 minutos, seguido de um resfriamento rápido em água até atingir a temperatura ambiente. Após a solubilização, foi realizado procedimento metalográfico para análise microestrutural das amostras por meio de microscopia ótica. Para a realização das análises microestruturais, as amostras foram atacadas com reagente Vilella (VOORT, 1992).

Na etapa seguinte, foi realizada a soldagem autógena, empregando o processo TIG automático. As soldagens na posição plana, em único passe, foram realizadas com eletrodo não consumível, toriado de 2,4mm de diâmetro, em corrente contínua eletrodo negativo (CCEN), utilizando argônio (Ar) como gás de proteção (vazão de gás de 20L/min) com corrente de 200A, velocidade de soldagem de 34cm/min e tensão de 17V.

Após a realização das soldagens autógenas foram retiradas amostras dos corpos de prova soldados para a caracterização da seção transversal das regiões da solda e do metal de base através de exames metalográficos por microscopia ótica (MO).

Para realização dos ensaios de polarização potenciodinâmica cíclica (PPC), amostras das ligas solubilizadas e soldadas, com espessura aproximada de 4mm, foram cortadas em formato quadrangular com área de 144mm² e embutidas a frio com resina epóxi (constituindo então, essas amostras como eletrodo de trabalho no ensaio de PPC). Após a secagem da resina as amostras passaram pelo processo de lixamento com lixa de até 600 grana. Contudo, a fim de evitar qualquer tipo de infiltração indesejada no condutor (eletrodo de trabalho) foi aplicado esmalte em todo o seu perímetro, evitando contato com áreas não úteis.

Os ensaios eletroquímicos de polarização foram realizados utilizando um Potenciostato/Galvanostato AUTOLAB modelo PGSTAT 30 e o programa computacional GPES, responsável pelo controle dos ensaios e pela coleta dos resultados.

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma célula padrão de três eletrodos: o eletrodo Ag/AgCl saturado como eletrodo de referência, um contra-eletrodo de platina, com área exposta superior a três vezes ao eletrodo de trabalho, e o eletrodo de trabalho, propriamente dito. A solução eletrolítica utilizada para o estudo constituiu uma mistura de H₂SO₄ + NaCl, ambos preparados com água bidestilada a uma concentração de 0,5mols/L.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados à temperatura ambiente. A polarização iniciou-se após 5 minutos de imersão onde foi observada a estabilização do potencial de corrosão (E_{corr}). A varredura de potencial iniciou-se 200mV abaixo do E_{corr} e se estendeu até que a corrente anódica alcançasse o valor de aproximadamente 1,2mA, no qual foi aplicada a polarização de reversão. A velocidade de varredura utilizada no experimento foi de $1,67\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$. Os valores de corrente apresentados foram ajustados de acordo com a área do eletrodo.

Após os ensaios eletroquímicos, as amostras foram novamente polidas e atacadas quimicamente utilizando reagente Vilella para revelação de sua microestrutura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 pode ser observada a microestrutura das Ligas 1 e 2 após solubilização. Nela é possível verificar uma microestrutura tipicamente ferrítica, com grãos grandes e heterogêneos. Segundo a literatura, a heterogeneidade do tamanho de grão é causada pela ausência de elementos estabilizantes na composição química das ligas, como o alumínio (VILLAFUERTE *et al.*, 1990).

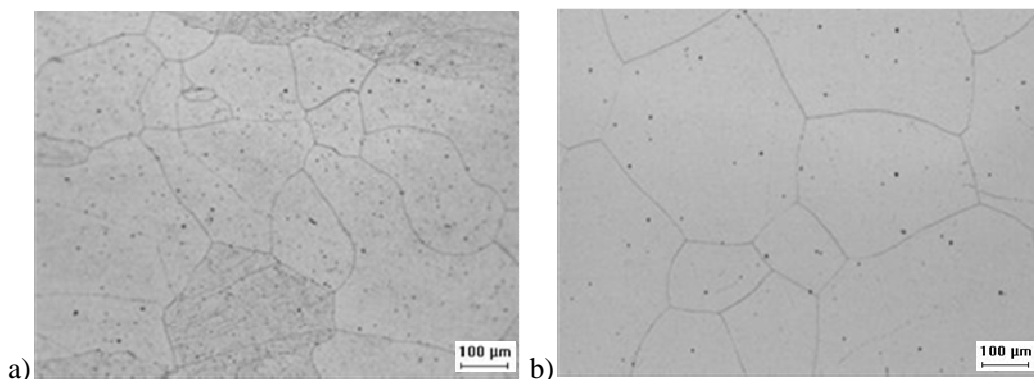


Figura 1 - Micrografia das ligas solubilizadas. Aumento 100X. a) Liga 1. b) Liga 2.

Através das análises microestruturais feitas na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) após a soldagem TIG verificou-se que as ligas estudadas continuaram apresentando uma microestrutura ferrítica. A Figura 2 mostra a micrografia das Ligas 1 e 2 após a soldagem.

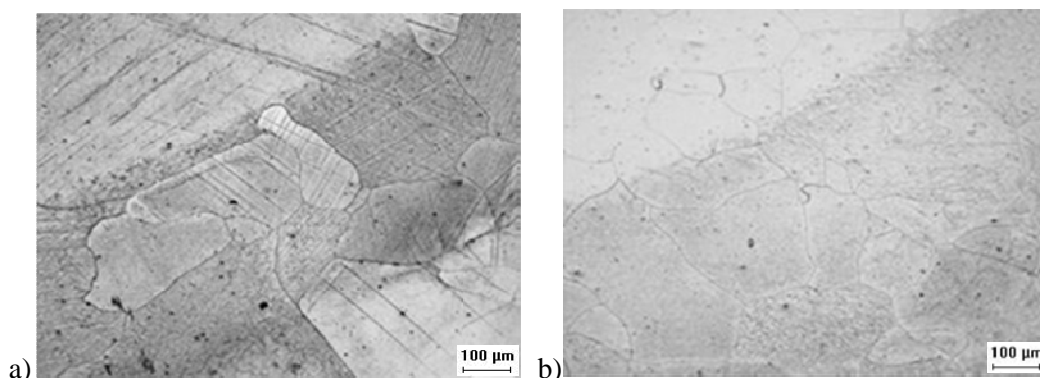
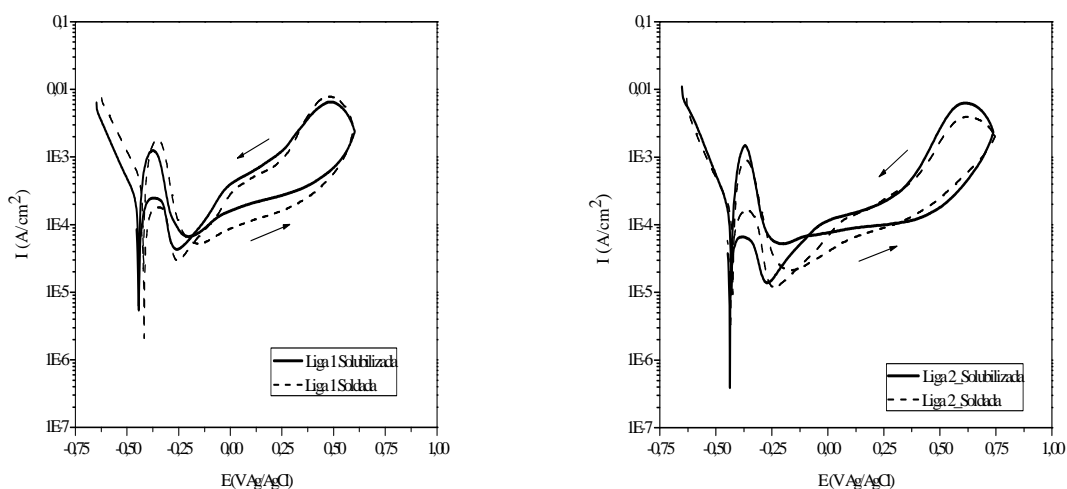


Figura 2 - Micrografia das ZACs após soldagem. Aumento: 100X. a) Liga 1. b) Liga 2.

As curvas de polarização das ligas 1 e 2 estão apresentadas na Figura 3. Observa-se, para as duas ligas, um comportamento anódico típico dos aços inoxidáveis. As mesmas apresentam uma ampla região de passivação correspondente à formação do filme de óxido de cromo (Cr_2O_3) (ASM Handbook, 1993), podendo também ter a formação de óxido de molibdênio devido ao alto teor contido nas amostras. Observa-se também uma região de transpassivação em altos potenciais indicando a dissolução do filme passivador. Para ambas as ligas, as curvas reversas de polarização apresentaram

um aumento considerável da densidade de corrente o que indica que houve formação de pite sobre a superfície das ligas.

A Figura 3 apresenta as curvas de PPC das ligas 1 e 2 para análise da variação das condições soldadas e solubilizadas. Observa-se, para as duas ligas, que a curva de PPC na condição solubilizada é semelhante à curva na condição soldada, esse resultado indica que o processo de soldagem e as condições adotadas neste trabalho para as referidas ligas não afetaram de maneira significativa o comportamento corrosivo das mesmas.

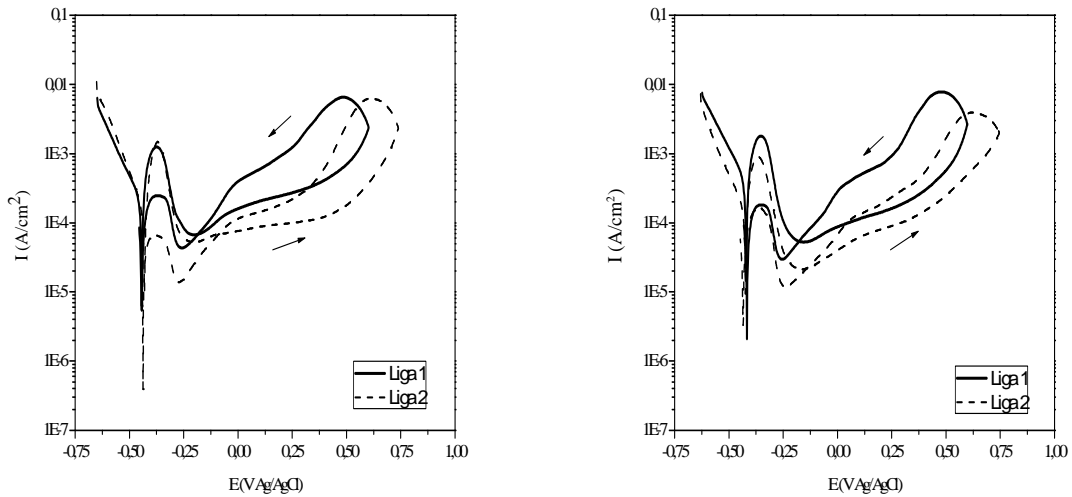


a)

b)

Figura 3 – Curvas de PPC das ligas para diferentes condições. a) Liga 1. b) Liga 2.

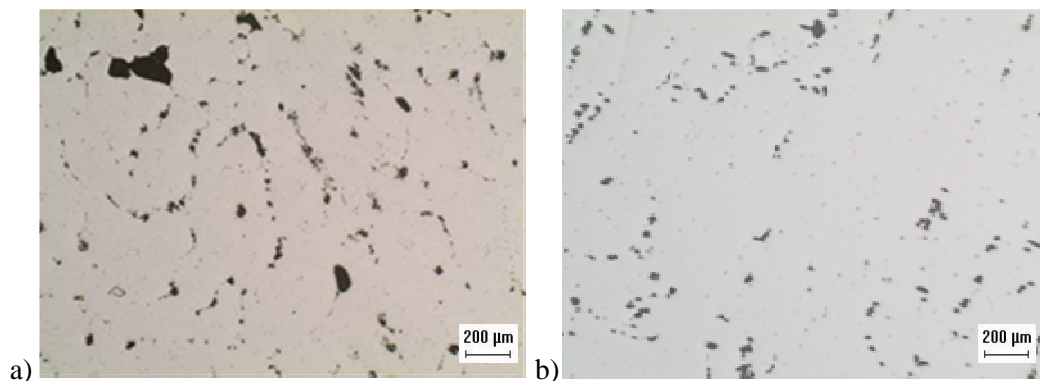
Na Figura 4 estão apresentadas as curvas de PPC das ligas 1 e 2 para as condições solubilizadas e soldadas. Na Figura 4a, para amostras solubilizadas, observa-se na curva de PPC para a Liga 2 uma região de passivação mais ampla atingindo potenciais anódicos mais elevados do que a curva PPC para a Liga 1, associados a valores de densidade de corrente consideravelmente inferiores neste patamar. Este resultado indica que a Liga 2 apresenta um comportamento anti-corrosivo superior ao da Liga 1. O mesmo pode ser justificado devido, provavelmente, ao maior teor de cromo presente na Liga 2 (GUIMARÃES, 2005). Ressalta-se que este mesmo comportamento pode ser verificado para as amostras na condição soldada (Figura 4b).



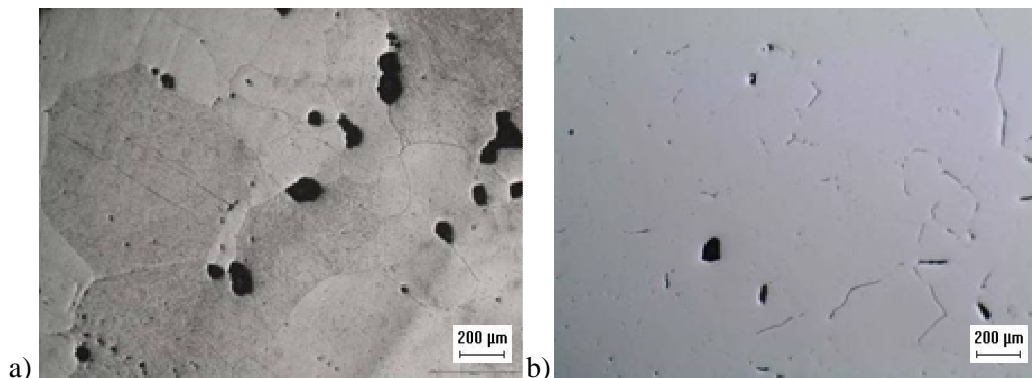
a) b)
Figura 4 – Curvas de PPC das ligas 1 e 2. a) Condição solubilizada. b) Condição soldada.

As Figuras 5 e 6 apresentam as micrografias das ligas após os ensaios de PPC. É possível observar que houve formação de pites para as duas ligas reforçando os resultados eletroquímicos obtidos. Porém, a Liga 2 exibe uma quantidade de pites, aparentemente, inferior ao da Liga 1.

Também é possível perceber que o processo de soldagem e as condições adotadas, aparentemente, não influenciaram de maneira significativa o comportamento corrosivo das ligas.



a) b)
Figura 5 – Micrografia das ligas solubilizadas após polarização. Aumento 50x. a) Liga 1. b) Liga 2.



a) b)
Figura 6 – Micrografia das ZACs das ligas soldadas após polarização. Aumento: 50x. a) Liga 1. b) Liga 2.



6. CONCLUSÕES

As ligas apresentaram microestrutura ferrítica, tanto na condição solubilizada quanto soldada.

As ligas foram soldadas sem maiores problemas.

A soldagem, nas condições adotadas, não influenciou o comportamento corrosivo das ligas.

Os ensaios eletroquímicos de PPC mostraram que a liga 2 apresentou o melhor comportamento anticorrosivo, devido, muito provavelmente, ao alto teor de cromo contido na mesma.

O bom comportamento corrosivo observado na liga 2, indica que aplicação desse material no setor petróleo e gás é possível, porém se faz necessário um estudo aprofundado no intuito de verificar o comportamento corrosivo dessa liga para outras condições de soldagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Laboratórios de Materiais (LMAT) e de Inspeção e Análise de Falhas (LIAF) 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 PETROBRAS pelo incentivo financeiro.

REFERÊNCIAS

ASM Handbook – Casting, **Nickel and Nickel Alloys**, Vol. 15, 10th Edition, ASM Metals Park, Ohio, p. 815-823, 1993.

GUIMARÃES, R. F. **Avaliação Comparativa dos Linings de Aços AISI 444 e AISI 316L para Aplicação em Torres de Destilação**. Dissertação de Mestrado, UFC, 2005.

GUIMARÃES, R. F. **Efeito do Teor de Molibdênio na Microestrutura de Juntas Soldadas em Ligas Fe-Cr-Mo**. Tese de Doutorado, UFC, 2011.

GROBNER, P.J., The 475° C embrittlement of ferritic stainless steels, **Metallurgical Transactions**, Vol. 4, Jan 1973, 251-260.

LIPPOLD, J.C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. John Wiley & Sons. USA, New Jersey, 2005.

SOUZA, J. A. **Avaliação da fragilização a 400 e 475 °C do aço inoxidável AISI 444 utilizado em torres de destilação de petróleo**. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Federal do Ceará. 83 pp. Julho, 2004.

VILLAFUERTE, J.C.; PARDO, E.; KERR, H.W. Metall. Trans. A 21A, 2009-2019, 1990.

VOORT G.F.V., JAMES H, MILLS M. K., DAVIS J.R., DESTEFANI J. D., DIETERICH D. A., CRANKOVIC G. M., FRISSELL M.J. (Eds.). ASM Handbook: **Metallography and Microstructures**. Vol, 9, USA: ASM International, p. 284, 1992.