

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Corrosão da liga AISI 316L em junta tubo-espelho soldada por TIG autógena

Luis Henrique Guilherme^a, Marcelo Falcão de Oliveira^b, Guilherme Beck^c, Arthur Mariano de Souza Malafaia^d

Abstract

Nowadays industries use heat exchangers with tube-to-tubesheet welded joints that are made out of austenitic stainless steel; this weld can be done by using the TIG process without deposition of weld metal. The AISI 316L SS is used in corrosive environment because of its satisfactory performance for various applications. However, the welding thermal cycle process can cause metallurgical changes that reduce the performance of the equipment and its corrosion resistance. Thus, the aim of this work was to study the intergranular and uniform corrosion mechanisms present in the AISI 316L alloy, which has a tube-to-tubesheet welded joint done by the TIG process without any deposition of weld metal. The susceptibility to precipitation of chromo carbide was tested by using an optical microscopy technique. Whereas, the uniform corrosion was evaluated by using the immersion corrosion test performed in a 0,5 mol/L of H₂SO₄ concentration and also in a 0,5 mol/L of HCl concentration. Both these solutions were tested at the temperatures of 30 °C, 50 °C, 70 °C e 90 °C. The results showed that there was a precipitation of chromo carbide on the grain's boundaries located near the weld fusion line, and the corrosion of tube-to-tubesheet occurred mainly at the HAZ formed between the tube and the weld metal.

Keywords: Tube-to-tubesheet joint, 316L SS, TIG process, corrosion.

Resumo

O uso de trocadores de calor de aço inoxidável austenítico com juntas tubo-espelho soldada pelo processo TIG sem adição de metal de solda (autógena) é amplamente empregada nas indústrias. Para meios corrosivos tem-se a liga AISI 316L, que se trata de uma liga que apresenta um satisfatório desempenho em inúmeras aplicações. No entanto, a soldagem causa alterações metalúrgicas que podem comprometer o desempenho do equipamento, inclusive com relação à resistência à corrosão. Desse modo, o presente trabalho teve por objetivo estudar os mecanismos de corrosão intergranular e generalizada da liga AISI 316L em junta tubo-espelho soldada, pelo processo TIG autógena. Avaliou-se a susceptibilidade à corrosão intergranular por microscopia ótica, e conduziram-se ensaios de perda de massa por imersão nas soluções de 0,5 mol/L H₂SO₄ e 0,5 mol/L HCl e nas temperaturas de 30 °C, 50 °C, 70 °C e 90 °C. Os resultados indicaram que ocorreu a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos próximos à linha de fusão do metal de solda. Os ensaios de imersão indicaram que a corrosão na junta tubo-espelho ocorre preferencialmente na ZAC formada entre o tubo e a solda, e sob o metal de solda próximo à margem com o tubo.

^a Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais - EESC/USP

^b Dr., Professor Adjunto - EESC/USP

^c Engenheiro Mecânico - EESC/USP

Palavras-chave: Junta tubo-espelho, AISI 316L, soldagem TIG, corrosão.

Introdução

O aço inoxidável austenítico AISI 316L é amplamente utilizado em equipamentos de processo nas plantas industriais. Em função de sua composição química e estrutura cristalina FCC a liga AISI 316L possui excelentes propriedades, fato que a caracteriza como material de fácil fabricação que apresenta excelente ductilidade e resistência à corrosão, diferenciais que a tornam, muitas vezes, a melhor opção para aplicações industriais desde temperaturas criogênicas até altas temperaturas (1, 2).

A liga AISI 316L apresenta boa soldabilidade, e costuma-se executar a soldagem de juntas tubo-espelho de trocadores de calor pelo processo TIG, sem a deposição de metal de solda (autógena). No entanto, quando o equipamento inicia a operação, o ambiente exposto caracteriza-se pela elevada temperatura associada ao escoamento de um fluido corrosivo. Destaca-se que os mecanismos de corrosão observados frequentemente na indústria em equipamentos fabricados com a liga AISI 316L são: corrosão intergranular e generalizada (3, 4, 5).

A corrosão intergranular trata-se de um ataque localizado ao longo dos contornos de grão, enquanto o interior do grão mantém-se intacto, e a principal causa da corrosão intergranular nos aços inoxidáveis está relacionada à precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, fenômeno conhecido por sensitização. A sensitização é caracterizada pela formação de finos e frágeis precipitados de carbonetos ricos em cromo, nos contornos de grão, enquanto as regiões adjacentes aos contornos de grão se tornam empobrecidas de cromo devido à velocidade de difusão do cromo ser menor que a do carbono. Quando ocorre a exposição a um ambiente corrosivo, os próprios carbonetos não seriam atacados, mas sim a fina região empobrecida de cromo, pois esta é menos resistente à corrosão. Os precipitados de carbonetos apresentam a composição $M_{23}C_6$, onde M corresponde a $Fe_{0,2-0,3}Cr_{0,7-0,8}$, ou seja, os carbonetos contêm de 70-80%Cr em peso, enquanto a matriz adjacente aos contornos apresenta teores abaixo de 12%Cr em peso, tornando-se suscetível à corrosão intergranular. (6, 7).

A corrosão uniforme é caracterizada pelo ataque corrosivo efetuado igualmente sobre toda a superfície ou uma ampla fração da área total. A fragilização e impedimento de formação da película protetora, da camada passiva, são, frequentemente, os fatores que conduzem à corrosão uniforme. A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis está relacionada com a formação de uma película passivadora na superfície do material, e quando estas ligas são expostas a meios redutores (ácido clorídrico, ácido fosfórico ou ácido sulfúrico) a formação da camada passiva é dificultada ou impedida e o material corrói uniformemente. A corrosão generalizada não deve ser negligenciada porque as alterações na superfície do componente causadas por este mecanismo de corrosão podem acarretar a nucleação de outras formas de corrosão mais graves (6, 8).

De acordo com inúmeras publicações, a soldagem afeta a resistência à corrosão da liga AISI 316L. No entanto, não há publicações que indiquem o desempenho em corrosão da junta tubo-espelho soldada de forma autógena composta pela liga AISI 316L. (9, 10, 11, 12, 13, 14) Desse modo, o presente trabalho teve por objetivo estudar os mecanismos de corrosão intergranular e generalizada da liga AISI 316L utilizada em junta tubo-espelho soldada pelo processo TIG de forma autógena.

Metodologia

Na preparação das amostras utilizou-se exclusivamente da liga AISI 316L, compondo a chapa do espelho com espessura de 16,8 mm, e o tubo de \varnothing 38,10 mm com espessura de parede de 1,20 mm. A Tabela 1 apresenta a composição química da liga segundo certificado do fabricante.

Tabela 1 - Composição química dos aços inoxidáveis ensaiados

| Amostra | Elementos (% em peso) | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|----------------|
| | C | Cr | Ni | Mo | Mn | P | S | Si | Ti | N ₂ |
| Chapa AISI 316L | 0,023 | 16,66 | 10,02 | 2,011 | 1,33 | 0,032 | 0,001 | 0,44 | 0,00 | 0,00 |
| Tubo AISI 316L | 0,023 | 16,73 | 10,00 | 2,022 | 1,33 | 0,031 | 0,002 | 0,59 | 0,00 | 0,0286 |

Preparação e montagem da junta tubo-espelho

Em função da necessidade de se ter uma dimensão relativamente pequena para os ensaios de perda de massa, a junta tubo-espelho foi preparada contendo apenas um tubo, porém, sendo este uma réplica exata da junta tubo-espelho do equipamento.

Na chapa do espelho foi realizada uma furação de $(38,35 \pm 0,05)$ mm, e os tubos foram montados faceando o espelho; executou-se a expansão do diâmetro interno do tubo com o uso de uma mandriladora elétrica com controle de torque, e posteriormente as juntas foram soldadas. A Figura 1 mostra esquematicamente a junta tubo-espelho, o processo de expansão dos tubos e a solda.

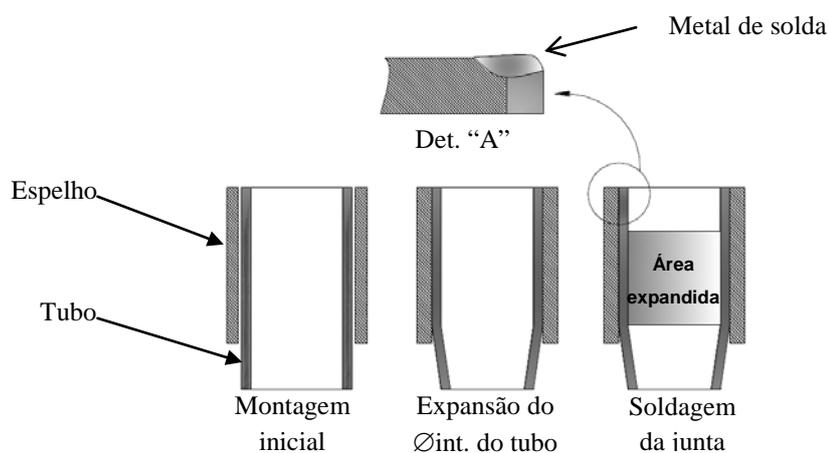


Figura 1 - Montagem da junta tubo-espelho

Para o ensaio de susceptibilidade à corrosão intergranular foi efetuado um corte transversal em uma das amostras, de modo a obter uma face conforme mostrada no detalhe A da Figura 1, e então esta face foi embutida em resina epóxi com um arame de cobre fixado na extremidade oposta, para a passagem de corrente no ensaio eletroquímico. A Figura 2 mostra esse conjunto preparado para o ensaio.

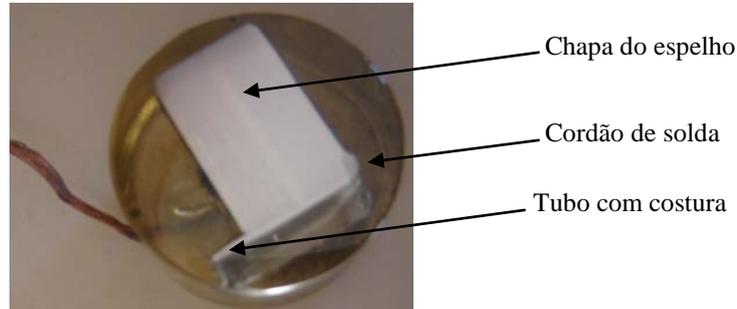


Figura 2 - Preparação da junta tubo-espelho soldada para o ensaio de sensibilização

A preparação da amostra para o ensaio de perda de massa por imersão consistiu em usar a espessura do espelho para reduzi-la de 16,8 mm para 7,0 mm, com a finalidade de diminuir a massa da amostra. As faces da amostra que não entram em contato com o produto de corrosão durante a operação do equipamento (não foram alvo do estudo) sendo protegidas com a aplicação de pintura anti-corrosiva (jateamento com granalha de aço, aplicação de uma demão de tinta *primer* como fundo, e em seguida, aplicação da pintura com tinta epoxi anti-corrosiva para alta temperatura). A Figura 3 mostra a junta tubo-espelho preparada para o ensaio, com as faces que foram protegidas através de pintura.

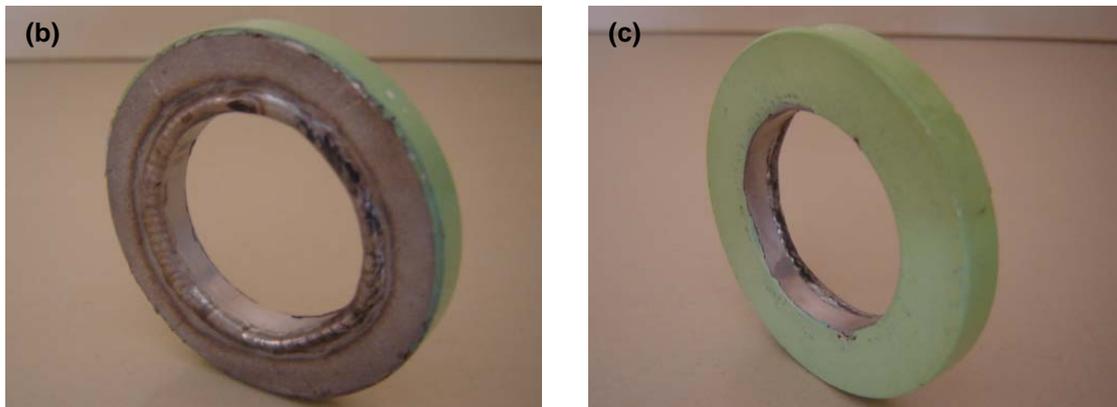


Figura 3 - Junta tubo-espelho preparada para ensaios de perda de massa por imersão mostrando em (a) face externa, solda e tubo que entram em contato com o eletrólito; (b) face interna da junta protegida por pintura.

Soldagem TIG das amostras

A soldagem da junta tubo-espelho foi realizada pelo processo TIG, de forma manual e autógena (sem deposição de metal de adição). O procedimento de soldagem baseou-se nos

parâmetros utilizados na fabricação do equipamento, e os parâmetros relevantes de soldagem são apresentados na Tabela 2. Adicionalmente, é necessário considerar que a soldagem foi realizada na posição 5G (de acordo com ASME IX, onde o tubo localiza-se parado na horizontal), utilizando-se argônio como gás de proteção a uma vazão de 8 L/min na tocha.

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem utilizados

| Processo | Metal Depositado | Densidade de Corrente | | Tensão de Soldagem | Velocidade Média de Soldagem |
|----------|------------------|-----------------------|-----------|--------------------|------------------------------|
| | | Tipo/Pol. | Densidade | | |
| TIG | Autógena | CC | 80 A | 12 - 13 V | (20,5 ± 1) cm/min |

Realizou-se uma análise relacionada à metalurgia da junta soldada, direcionada à microestrutura do metal de solda e ao teor de ferrita, baseadas nos métodos do diagrama de Schaeffler e no diagrama WRC-92, respectivamente. Considerou-se a diluição como 100%, já que não é utilizado metal de adição.

Ensaio de susceptibilidade à corrosão intergranular

O ensaio de sensibilização foi executado conforme ASTM A-262 (2010) prática A. Executou-se o ensaio através de um ataque eletrolítico em solução aquosa contendo 10% $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ácido oxálico), e uma densidade de corrente de 1 A/cm^2 durante aproximadamente 90s. Para a realização do ensaio utilizou-se de uma fonte de corrente marca Elektrolyser mod. ELYN1. Após o ataque com ácido oxálico, foi realizada análise microestrutural por microscopia ótica (MO) com sistema digital de aquisição de imagem.

Ensaio de perda de massa por imersão

Os ensaios de perda de massa foram realizados conforme ASTM G-31 (2004) nas soluções de 0,5 mol/L ácido sulfúrico (H_2SO_4) e 0,5 mol/L ácido clorídrico (HCl), e nas temperaturas: 30 °C, 50 °C, 70 °C e 90 °C. Utilizou-se de três amostras para cada condição de ensaio, tendo por objetivo garantir a reprodutividade dos resultados. O procedimento de limpeza das amostras pré-teste e pós-teste foram executados conforme requisitos da norma ASTM G-1, e consistiu em lavar cada amostra em água corrente, com escova de cerdas não-metálicas e com aplicação de álcool etílico absoluto durante a escovação. Em seguida, os corpos de prova foram desengordurados com auxílio de ultra-som durante 10 minutos e secos ao ar quente em um secador de amostras metalográficas.

A perda de espessura em função do tempo de imersão foi determinada durante um período de 1 hora para os ensaios em ácido sulfúrico e de 2 horas para os ensaios em ácido clorídrico. Estes períodos de ensaio não alteram a corrosividade da solução, segundo a literatura (9), para a relação de $0,20 \text{ mL/mm}^2$ entre o volume do reservatório do eletrólito e a área exposta da amostra.

Os resultados foram tratados de forma a fornecer a taxa de corrosão em mm/ano (milímetros por ano), conforme Equação 1. A medida da massa das amostras foi realizada em uma balança de precisão analítica da marca METTLER modelo H54AR (precisão de 0,01 mg). A avaliação

da corrosão da junta tubo-espelho foi realizada por macrografia, com ampliações de até 40 vezes.

$$\text{Taxa de corrosão} \cdot (\text{mm/ano}) = \left[\frac{KW}{AT\rho} \right] \quad (1)$$

Onde:

K: $8,76 \times 10^4$ (constante)

W: perda de massa (g)

A: Área (cm²)

T: duração do ensaio (horas)

ρ : densidade (g/cm³)

Resultados e discussão

A análise microestrutural da junta soldada através do diagrama de Schaeffler e do diagrama WRC-92 indicaram que o procedimento de soldagem, sem a adição de metal de solda, deveria apresentar uma microestrutura satisfatória. O metal de solda bruto de solidificação ficou situado na região de boa soldabilidade do diagrama de Schaeffler, com teores de cromo e níquel equivalentes de 19,5 e 11,3, respectivamente. O teor de ferrita no metal de solda foi estimado entre 9 e 10 *ferrite number* (FN). A Figura 4 mostra a previsão microestrutural.

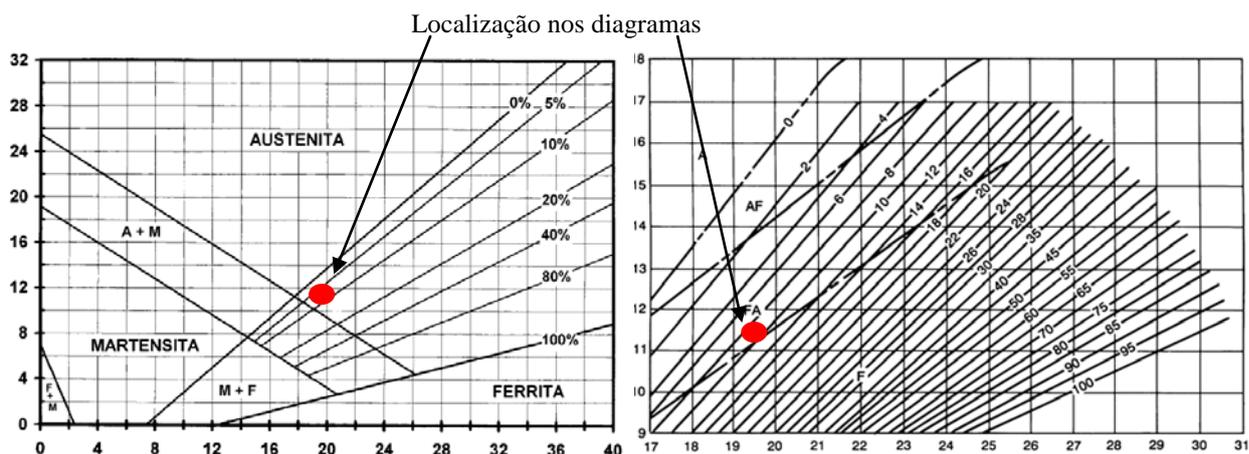


Figura 4 - Previsão da microestrutura da junta de solda com base no diagrama de Schaeffler e determinação do FN pelo WRC-92

Susceptibilidade à corrosão intergranular

A precipitação de carbonetos de cromo foi observada na fronteira da linha de fusão do metal de solda. Nessa região houve a formação de valas parciais nos contornos de grãos, e isto indica a precipitação de carboneto de cromo, entretanto, nenhum grão foi completamente contornado por valas. O metal de solda apresentou microestrutura dendrítica, típica de uma estrutura de aço inoxidável austenítico soldado, apresentando-se esta microestrutura contornada sem o ataque das dendritas.

O metal de base do tubo com costura apresentou grãos alongados próximos ao metal de solda, provavelmente devido à deformação a frio aplicada pelo processo de expansão do diâmetro interno do tubo, com a formação de degraus nos contornos de grão.

A precipitação de carbonetos de cromo também foi observada na ZAC da chapa do espelho, mais afastada da linha de fusão da solda, e uma hipótese para esta ocorrência é que a técnica de soldagem autógena da junta tubo-espelho consiste em efetuar a fusão da parede do tubo sobre a chapa, direcionando o arco elétrico para a chapa, esta região recebe, portanto, maior intensidade de calor da soldagem. Desse modo, a relação necessária entre temperatura e tempo para a precipitação de carboneto de cromo é mais facilmente alcançada nessa região. Esse resultado pode ser um indicativo de que a realização da solda com metal de adição produza uma microestrutura melhor, principalmente devido ao menor teor de carbono e à presença de elementos estabilizadores no metal de adição. A Figura 5 mostra as fotomicrografias do ensaio de sensitização da junta tubo-espelho soldada.

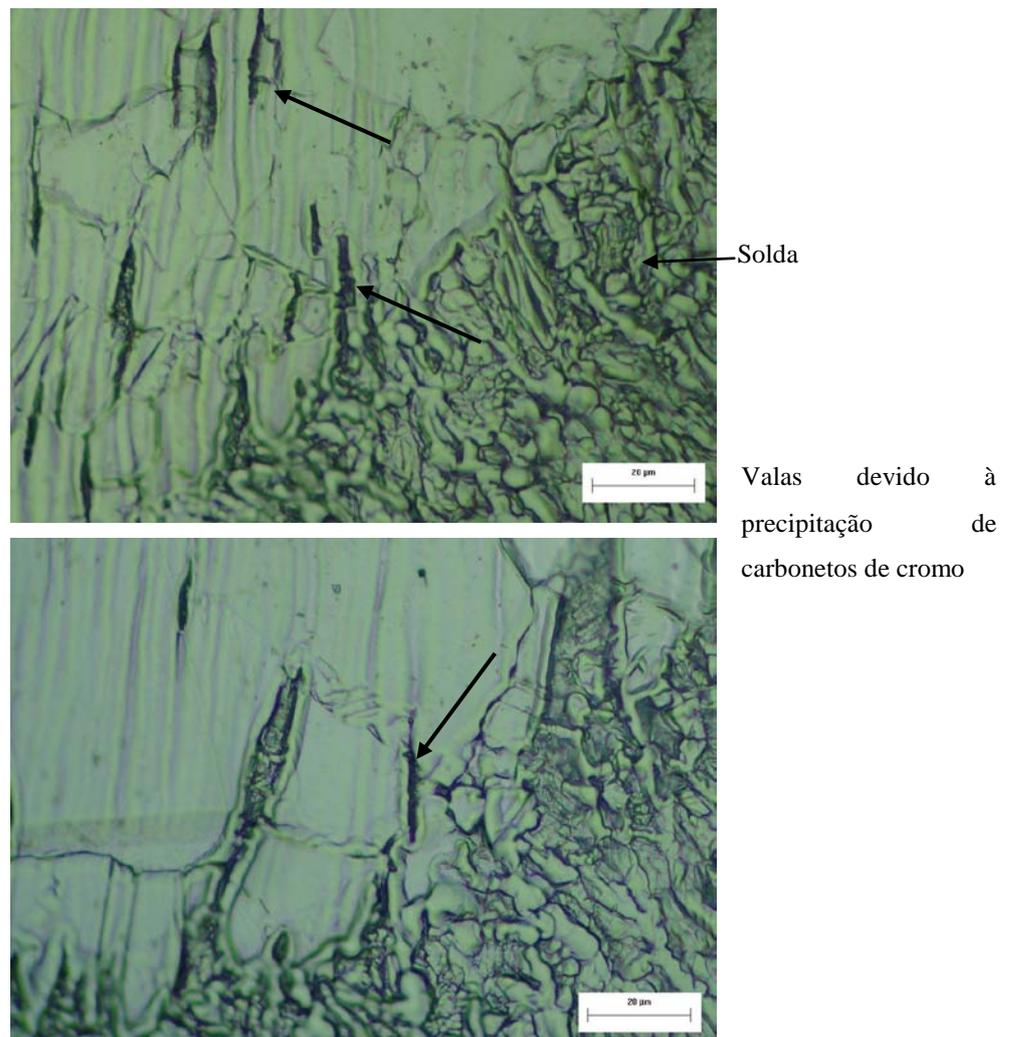


Figura 5 - Fotomicrografia do ensaio de sensitização da junta soldada, mostrando em (a) e (b) a formação de valas nos contornos de grão localizados na margem da linha de fusão do metal de solda com a chapa

Perda de massa por imersão em 0,5 mol/L H₂SO₄

As taxas de corrosão obtidas dos ensaios de perda de massa por imersão em 0,5 mol/L H₂SO₄ são apresentadas na Figura 6. Observou-se que a temperatura influenciou significativamente o

processo corrosivo, o que é evidenciado pelo expressivo aumento da taxa de corrosão em função da elevação da temperatura.

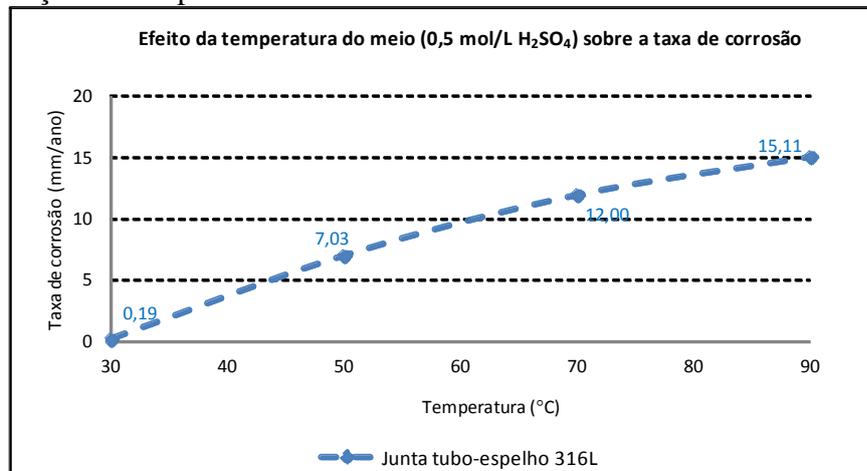


Figura 6 - Variação da taxa de corrosão da junta tubo-espelho em 0,5 mol/L H₂SO₄

Considerando-se como critério de aceitação a taxa de corrosão de 0,3 mm/ano (16), tem-se que, à temperatura de 30 °C, com uma taxa de corrosão de 0,19 mm/ano, obteve-se um desempenho satisfatório. Nas temperaturas de 50 °C, 70 °C e 90 °C as taxas de corrosão foram respectivamente 7,03 mm/ano, 12 mm/ano e 15,11 mm/ano, e, portanto, acima do critério adotado.

Com base nas macrografias foi possível perceber que, apesar do ensaio à temperatura de 30 °C ter apresentado uma taxa de corrosão dentro do critério de aceitação ocorreu corrosão localizada na linha de fusão da solda, na interface tubo-metal de solda. Com o aumento da temperatura foi observado que a corrosão tornou-se mais severa, no entanto, através dos mesmos mecanismos. As formas de corrosão em 0,5 mol/L H₂SO₄ caracterizaram-se pela corrosão localizada da ZAC do tubo, da linha de fusão da solda formada entre o tubo e o metal de solda, e uma corrosão localizada no metal de solda (próximo à margem do tubo). Nas temperaturas de 70 °C e 90 °C observou-se uma significativa perda do brilho e aumento da rugosidade do material, indicando que ocorreu a corrosão generalizada em toda a superfície da amostra. A Figura 7 mostra algumas fotomicrografias das amostras.

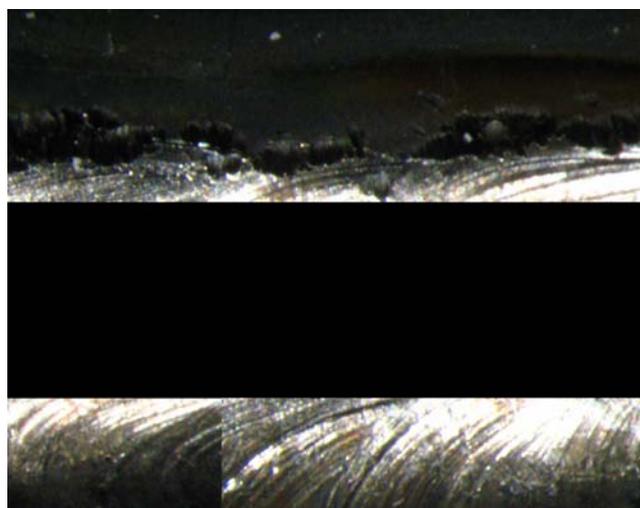




Figura 7 - Fotomicrografia da junta tubo-espelho soldada em $0,5 \text{ g.mol}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ apresentado em (a) Corrosão localizada na interface tubo-metal de solda na temperatura ambiente; (b) Corrosão localizada no metal de solda.

Perda de massa por imersão em 0,5 mol/L HCl

Os resultados obtidos referentes às taxas de corrosão em 0,5 mol/L HCl são apresentados na Figura 8. Em meio contendo cloreto, a liga AISI 316L é mais susceptível à corrosão (15), e a temperatura exerceu uma considerável influência na perda de massa das amostras nos ensaios desse estudo.

Para todas as temperaturas de ensaio em 0,5 mol/L obteve-se como resultado uma taxa de corrosão acima do critério adotado. De um modo geral, os mecanismos de corrosão foram semelhantes em todas as condições, destacando-se que a severidade da corrosão aumentou em função da elevação da temperatura.

Na temperatura de 30 °C observou-se a corrosão localizada no fechamento de arco do cordão de solda. O fato da solda da junta tubo-espelho ter sido realizada com uma máquina que não possui abertura de arco por alta frequência, ocasionou esse tipo de descontinuidade, típica do processo TIG. Na temperatura de 50 °C, especificamente, ocorreu um processo de incrustação do produto de corrosão na superfície do espelho, provavelmente pela característica de maior rugosidade da chapa. Nas temperaturas de 70 °C e 90 °C houve a degradação pela corrosão localizada da ZAC da costura do tubo, que somada à solda da junta tubo-espelho, consiste numa região que sofreu dois ciclos térmicos de soldagem, causando, provavelmente, significativas alterações metalúrgicas na microestrutura da liga. Observou-se também que, na ZAC do tubo e no metal de solda próximo à margem do tubo, ocorreu corrosão localizada.

O ensaio macrográfico não registrou a ocorrência de corrosão por pite em nenhuma das amostras, sendo que, estudos com a liga AISI 316L em 0,5 mol/L HCl indicam a tendência à ocorrência desse mecanismo de corrosão. A Figura 9 mostra as fotomicrografias após o ensaio de corrosão.

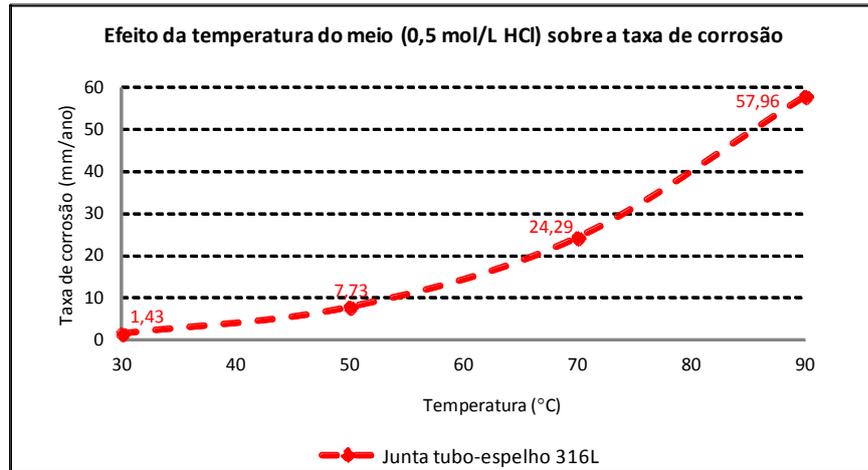


Figura 8 - Variação da taxa de corrosão da junta tubo-espelho em 0,5 mol/L HCl

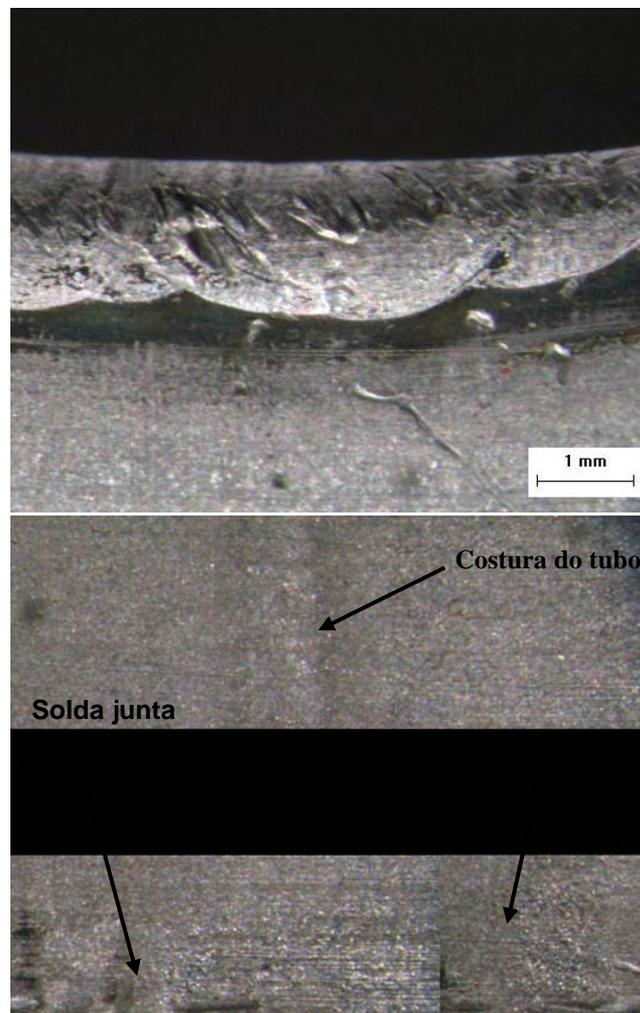


Figura 9 - Fotomacrografia da junta tubo-espelho soldada em 0,5 mol/L HCl apresentado em (a) Corrosão localizada no metal de solda próximo à margem do tubo; (b) Corrosão localizada preferencial na intersecção entre as soldas da costura do tubo e da junta tubo-espelho

Conclusões

As principais conclusões obtidas do presente trabalho são as seguintes:

- Com base no diagrama de Schaeffler e diagrama WRC-92 considera-se haver boa soldabilidade da junta soldada pelo processo TIG de forma autógena para a liga AISI 316L;
- Ficou constatado que a precipitação de carbonetos de cromo na junta tubo-espelho soldada ocorreu exclusivamente na linha de fusão do metal de solda, acarretando na formação de valas intergranulares, na interface com a estrutura dendrítica da solda;
- O ensaio de perda de massa por imersão permitiu observar que a temperatura influencia de forma significativa a taxa de corrosão da junta tubo-espelho soldada da liga AISI 316L;
- A utilização da macrografia demonstrou que, apesar da amostra apresentar uma pequena taxa de corrosão, inclusive aceitável de acordo com o critério adotado (16), ocorreu corrosão localizada na ZAC do tubo, formando valas, com tendência à propagação de trincas;
- A mandrilagem do diâmetro interno do tubo provavelmente diminuiu a resistência à corrosão (deformação plástica a frio com tensões residuais), sendo o principal motivo pela corrosão preferencial da ZAC do tubo e do metal de solda na margem do mesmo;
- A corrosão localizada na zona afetada pelo calor observada nos ensaios de perda de massa por imersão provavelmente tem relação com os resultados de precipitação de carbonetos de cromo observados nos ensaios de sensitização;
- O ciclo térmico de soldagem diminuiu a resistência à corrosão da junta tubo-espelho soldada, principalmente na região da costura do tubo, que sofre dois ciclos térmicos de soldagem.

Agradecimentos

Os autores gostaria de agradecer à Fapesp pelo apoio financeiro processo n°. 2010/04586-1 e à empresa Citrotec pela preparação das amostras.

Referências bibliográficas

- (1) MARSHALL, P. **Austenitic stainless steels: microstructure and mechanical properties**. England: Elsevier, 1984.
- (2) PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C. **Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades**. Curitiba: Hemus, 2004.
- (3) TELLES, P.C.S.T. **Vasos de pressão**. 2nded. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- (4) GEORGE, G.; SHAIKH, H. Introduction to austenitic stainless steels. In: KHATAK, H.S.; RAJ, B. **Corrosion of austenitic stainless steels: mechanism, mitigation and monitoring**. India: Narosa, 2002. Cap.1, p.1-35.
- (5) ROBERGE, P.R. **Handbook of corrosion engineering**. New York: McGraw-Hill, 2000.
- (6) SEDRIKS, A.J. **Corrosion of stainless steel**. 2nded. New York: John Wiley, 1996.

-
- (7) GARCIA, C.; MARTIN, F.; TIEDRA, P.; BLANCO, Y.; LÓPEZ, M. Pitting corrosion of welded joints of austenitic stainless steels studied by using an electrochemical minicell. **Corrosion Science**, v.50, 1184-1194, 2008.
- (8) GENTIL, V. **Corrosão**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- (9) GUILHERME, L.H. **Estudo da corrosão em junta tubo-espelho soldada por SATG entre as ligas AISI 316L e AISI 444**. 2011. 181p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- (10) GUILHERME, L.H.; OLIVEIRA, M.F. Corrosão de junta tubo-espelho soldada: uma avaliação comparativa de desempenho.. **In: 66° Congresso da ABM**, São Paulo, 66., 2011.
- (11) GUILHERME, L.H.; OLIVEIRA, M.F. Estudo da sensitização de juntas soldadas similares e dissimilares compostas por aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 444 utilizadas em trocadores de calor. **In: Congresso Nacional de Soldagem - XXXVI CONSOLDA**, 36., Recife-PE, 2010.
- (12) PASSOS, D.O.; OTUBO, J. A Influência da ferrita delta em aços inoxidáveis austeníticos forjados. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.63, n.1, p.57-63, jan./mar. 2010.
- (13) SONG, Y.; BAKER, T.N.; McPHERSON, N.A. A Study of precipitation in as-welded 316LN plate using 316L/317L weld metal. **Materials Science and Engineering**, Amsterdam, v.212, n.2, p.228-234, July 1996.
- (14) DADFAR, M; FATHI, M.H., KARIMZADEH, M.R., DADFAR, A., SAATCHI, A. Effect of TIG welding on corrosion behavior of 316L stainless steel. **Materials Letters**, v.61, p.2343-2346, 2007.
- (15) MARIANO, N.A. **Corrosão sob tensão de um aço inoxidável austenítico em soluções aquosas contendo cloretos**. 1997. 194p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- (16) PETRÓLEO BRASILEIRO S.A (PETROBRÁS). **N-253: projeto de vasos de pressão**. Rio de Janeiro, 1999.