



CORROSÃO DE JUNTA TUBO-ESPELHO SOLDADA: UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE DESEMPENHO ¹

Luis Henrique Guilherme ²
Guilherme Beck ³
Marcelo Falcão de Oliveira ⁴

Resumo

O presente estudo teve por objetivo avaliar a corrosão uniforme em função da perda de massa por imersão em 0,5 M H₂SO₄ e 0,5 M HCl da atual junta tubo-espelho composta por aço inoxidável AISI 316L (chapa do espelho e feixe tubular) e da junta proposta para substituição que utiliza como feixe tubular a liga AISI 444, aplicados em concentradores de vinhaça. Réplicas do projeto da junta tubo-espelho do equipamento foram preparadas para serem utilizadas como corpos de prova nos ensaios de corrosão. A caracterização de desempenho foi efetuada baseando-se na taxa de corrosão e na análise metalográfica por microscopia ótica. Os resultados demonstram um desempenho satisfatório da junta tubo-espelho proposta utilizando-se do tubo AISI 444 na temperatura de 50°C, indicando a necessidade de testes de campo e análises eletroquímicas para suportar decisões mais concretas. Entretanto, nos estágios do equipamento que operam com temperaturas mais elevadas recomenda-se manter a atual junta composta pela liga AISI 316.

Palavras-chave: Corrosão uniforme; Junta tubo-espelho soldada; Liga AISI 316L; Liga AISI 444.

CORROSION OF WELDED TUBE-TO-TUBESHEET: A COMPARATIVE EVALUATION PERFORMANCE

Abstract

The aim this work was to evaluate the general corrosion through of mass loss by immersion in solutions of 0,5 M H₂SO₄ and 0,5 M HCl. The actual tube-to-tubesheet composed by AISI 316L austenitic stainless steel (sheet and tube) and the tube-to-tubesheet studied like an alternative composed by AISI 444 ferritic stainless steel (only tube) was evaluated, to use in vinasse concentration equipments. Mockups of tube-to-tubesheet were produced to use in corrosion tests. The performance characterization was evaluated by measurement of corrosion rate and analysis in optical microscopy (OM). The results showed a satisfactory performance of tube-to-tubesheet with AISI 444 stainless steel to applications in 50°C. Field tests and electrochemistry techniques are necessary to support decisions more consistent. However, in the stages where the equipment will be working in high temperatures, it is recommended to use the tube-to-tubesheet with AISI 316L stainless steel.

Key words: General corrosion; Welded tube-to-tubesheet; AISI 316L alloy; AISI 444 alloy.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Engenheiro de Produção, Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais - SMM/EESC/USP

³ Graduando em Engenharia Mecânica - EESC/USP

⁴ Engenheiro de Materiais, Dr., Professor da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP

1 INTRODUÇÃO

O processo corrosivo trata-se de uma preocupante realidade nas indústrias de processamento, pois podem causar falhas de equipamentos ou componentes quando em serviço, reduzindo assim sua vida útil.⁽¹⁾ No setor sucro-alcooleiro a vinhaça, resíduo da destilação do álcool, caracterizasse por um produto que apresenta elevada condutividade associado à presença de cloretos, sulfatos e sulfetos, fatores que influenciam na corrosividade do resíduo.⁽²⁾

O escoamento da vinhaça nos equipamentos e tubulações induz à ocorrência do mecanismo de corrosão uniforme, uma das mais comuns nas indústrias e que favorece a ocorrência de mecanismos de corrosão localizada.⁽³⁾ Os equipamentos que processam a vinhaça são fabricados com aços inoxidáveis, e de acordo com Sedriks,⁽⁴⁾ nesses materiais a resistência à corrosão 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 ocorrência da corrosão uniforme fica evidente nos aços inoxidáveis em sua aparência, pois o acabamento superficial brilhante ou polido dos aços é comprometido quando estes são corroídos uniformemente, devido à quebra da camada passiva e conseqüentemente evidenciando que a superfície foi atacada.^(5,6)

Equipamentos para concentração da vinhaça são atualmente projetados com aço inoxidável austenítico AISI 316L, que combinam boas propriedades mecânicas, de resistência à corrosão e soldabilidade.^(7,8) Entretanto, esta liga possui um elevado custo de aquisição, devido à presença do níquel em sua composição química.⁽⁹⁾ Como alternativa, avalia-se o aço inoxidável superferrítico AISI 444, que caracteriza-se por ser uma liga de estrutura ferrítica com alto teor de cromo e molibdênio (18%Cr-2%Mo), baixo teor de níquel e estabilizado com titânio.⁽¹⁰⁾

O objetivo deste trabalho foi estudar a corrosão uniforme através da perda de massa por imersão em meios oxidantes (ácido sulfúrico e clorídrico) presentes na vinhaça, da atual junta tubo-espelho e da junta tubo-espelho proposta para substituição, e utilizadas em concentradores de vinhaça.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais Utilizados

Avaliaram-se duas diferentes juntas tubo-espelho soldadas utilizadas em trocadores de calor de concentradores de vinhaça. A primeira, identificada como 316/316, trata-se da atual junta utilizada no projeto do equipamento. A segunda, identificada como 444/316, refere-se à junta soldada em análise para substituição da atual. A Tabela 1 apresenta a configuração dos materiais de cada junta tubo-espelho ensaiada.

Tabela 1. Identificação e caracterização das juntas soldada

Identificação da Junta Tubo-Espelho	Status	Tubo	Chapa do Espelho
Junta 316/316	Junta atual	AISI 316L	AISI 316L
Junta 444/316	Junta proposta	AISI 444	AISI 316L

A junta tubo-espelho proposta é composta por aços inoxidáveis dissimilares devido ao fato que para a espessura do espelho não é fornecido no mercado chapa da liga AISI 444, e por isso, manteve-se a liga AISI 316L. Os tubos utilizados são da liga

AISI 316L e AISI 444, específicos para uso em trocadores de calor e fornecidos conforme as normas ASTM A-269 e ASTM A-268, respectivamente. A composição química dos materiais utilizados é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química dos aços inoxidáveis testados

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
Tubo AISI 444	0,008	17,60	0,20	1,871	0,150	0,033	0,001	0,48	0,1389	0,0138

Fonte: Certificado da qualidade do material, segundo o fabricante.

2.2 Preparação das Juntas para Soldagem

Foram produzidos corpos de prova replicados da junta tubo-espelho do projeto do concentrador de vinhaça, considerando os processos de fabricação e tolerâncias dimensionais e de acabamento.

A espessura da chapa do espelho é de 16,8 milímetros, e foi usinada com $38,2 \pm 0,05$ para posterior montagem dos tubos. Com uma mandriladora elétrica com controle de torque executou-se a expansão do diâmetro internos dos tubos, e em seguida realizou-se a soldagem.

2.3 Soldagem dos Corpos de Prova

Previamente à soldagem das juntas tubo-espelho executou-se a qualificação do procedimento de soldagem e dos soldadores, de acordo com os requisitos do código ASME⁽¹¹⁾ seção IX item QW-193 (*tube-to-tubesheet tests*).

A soldagem das juntas tubo-espelho foi realizada no processo TIG (GTAW) na posição 5G. A junta 316/316 foi soldada de forma autógena (sem deposição de material), e a soldagem da junta 444/316 foi executada com metal de adição ER316L, conforme indicado para aços inoxidáveis superferríticos.⁽¹²⁾ A soldagem foi realizada manualmente, e os parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 3. Com relação à energia de soldagem, foram padronizadas as características elétricas, e a velocidade de soldagem foi o único parâmetro que variou de acordo com a junta.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem utilizados em CC⁻

JUNTA	Processo	Metal Depositado		Corrente		Voltagem	Velocidade
		Classe	Diâmetro	Tipo/Pol.	Amperagem		
316/316	GTAW	N.A. (autógena)		CC ⁻	80 A	12 - 13 V	20,5 cm/min
444/316	GTAW	ER 316L	1,6 mm	CC ⁻	80 A	12 - 13 V	12,5 cm/min

2.4 Preparação dos Corpos de Prova para Ensaio de Corrosão

Os corpos de prova foram usinados de modo a diminuir a espessura de 16,8 mm para aproximadamente 7,0 mm com a finalidade de reduzir sua massa. Em seguida, executou-se a proteção das faces que não entram em contato com o produto de corrosão durante a operação do equipamento, e isto foi alcançado através do jateamento e pintura (com aplicação de uma demão de primer como fundo, e acabamento com uma demão de epoxi) e aplicação de resina sobre a região pintada dos corpos de prova. A Figura 1 mostra o corpo de prova após esse processo.

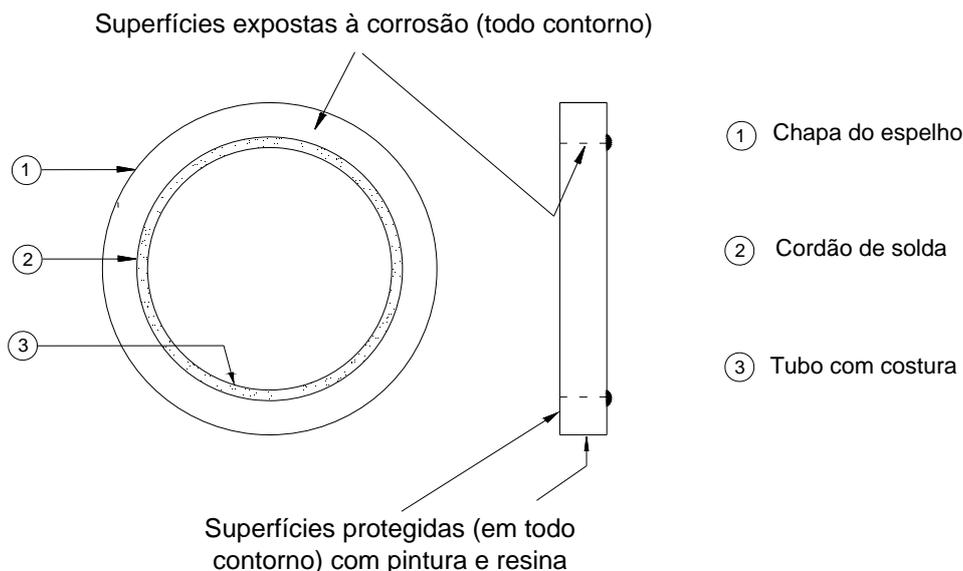


Figura 1. Esboço da junta tubo-espelho preparada para ensaios de perda de massa por imersão.

2.5 Ensaio de Perda de Massa por Imersão

Os ensaios de perda de massa foram realizados conforme ASTM G-31:04⁽¹³⁾ nas soluções de 0,5 M ácido sulfúrico (H₂SO₄) e 0,5 M ácido clorídrico (HCl), nas temperaturas mínima e máxima de operação do equipamento, 50°C e 90°C. A perda de espessura uniforme em função do tempo de imersão foi determinada durante um período de uma (1) hora para os ensaios em ácido sulfúrico e em duas (2) horas para os ensaios em ácido clorídrico, e os resultados foram tratados de forma a fornecer a taxa de corrosão em mm/ano (milímetros por ano), segundo a Equação 1:

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

onde:

K: 8,76x10⁴ (constante);

W: perda de massa (g);

A: Área (cm²);

T: duração do ensaio (horas);

ρ: densidade (g/cm³).

Após os ensaios de perda de massa por imersão foram realizados ensaios macrográficos com a finalidade de se observar o processo corrosivo na superfície da junta tubo-espelho, analisando separadamente os metais de base (espelho e tubo), o metal de solda bruto de fusão e a zona termicamente afetada pelo calor (do espelho e do tubo).

3 RESULTADOS

3.1 Avaliação da Corrosão em 0,5 M H₂SO₄

Os resultados dos ensaios de perda de massa por imersão em ácido sulfúrico (0,5 M H₂SO₄) são apresentados na Figura 2, e os valores dos rótulos de cada reta representam a taxa de corrosão obtida. Observa-se que o aumento da taxa de corrosão é proporcional à temperatura, e nota-se uma influência maior da temperatura sobre a junta 444/316. Destaca-se ainda que a taxa de corrosão de

ambas as juntas inicia-se em um valor aproximado na temperatura de 50°C, entre 7 mm/ano à 9 mm/ano, e com o aumento da temperatura há um crescimento da taxa de corrosão mais acentuado da junta 444/316.

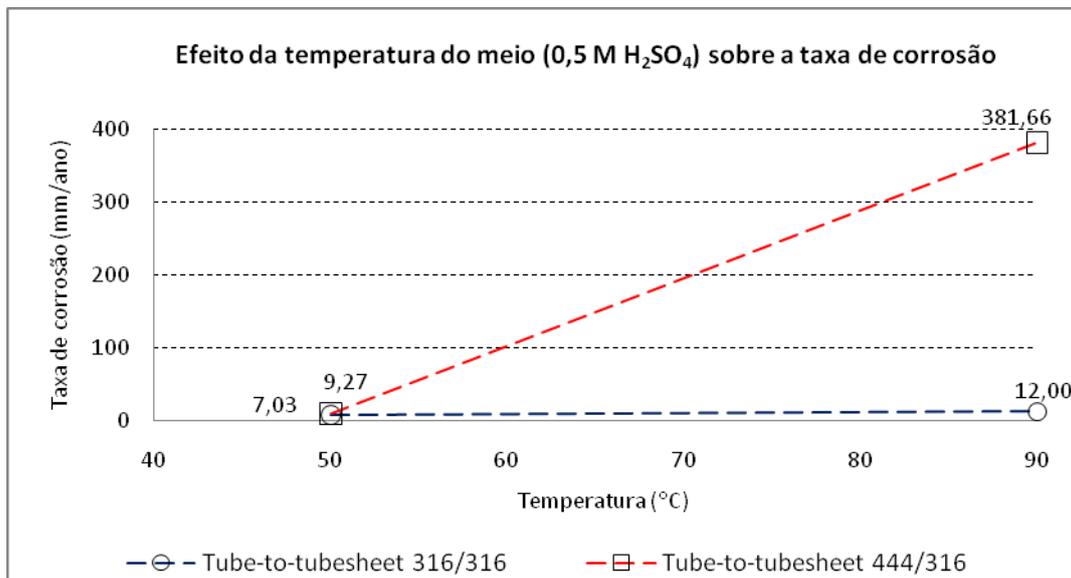


Figura 2. Variação da taxa de corrosão em 0,5 M H₂SO₄ com a temperatura.

A avaliação da junta tubo-espelho 316/316 por macrografia após os ensaios de perda de massa por imersão indica que não há alteração da forma de atuação dos mecanismos de corrosão sob a junta soldada com a variação da temperatura, apenas o processo corrosivo torna-se mais severo. Observou-se que houve um comprometimento da camada passiva, evidenciada pela superfície rugosa e opaca das faces da junta soldada. Com isto, o processo corrosivo atuou através dos mecanismos de corrosão uniforme em todas as faces da junta, entretanto, com indícios de atuação preferencial na ZTA do tubo (baseado no aspecto visual da junta). Observou-se também que ocorreu corrosão localizada no codão de solda, geralmente próximo da margem da solda com o tubo. A atuação conjunta desses mecanismos de corrosão tornou-se mais severo com o aumento da temperatura, iniciando com uma taxa de corrosão de 7,03 mm/ano a 50°C e chegando a valores de 12,00 mm/ano a 90°C. A Figura 3 apresenta as macrografias da junta 316/316 em 0,5 M H₂SO₄.

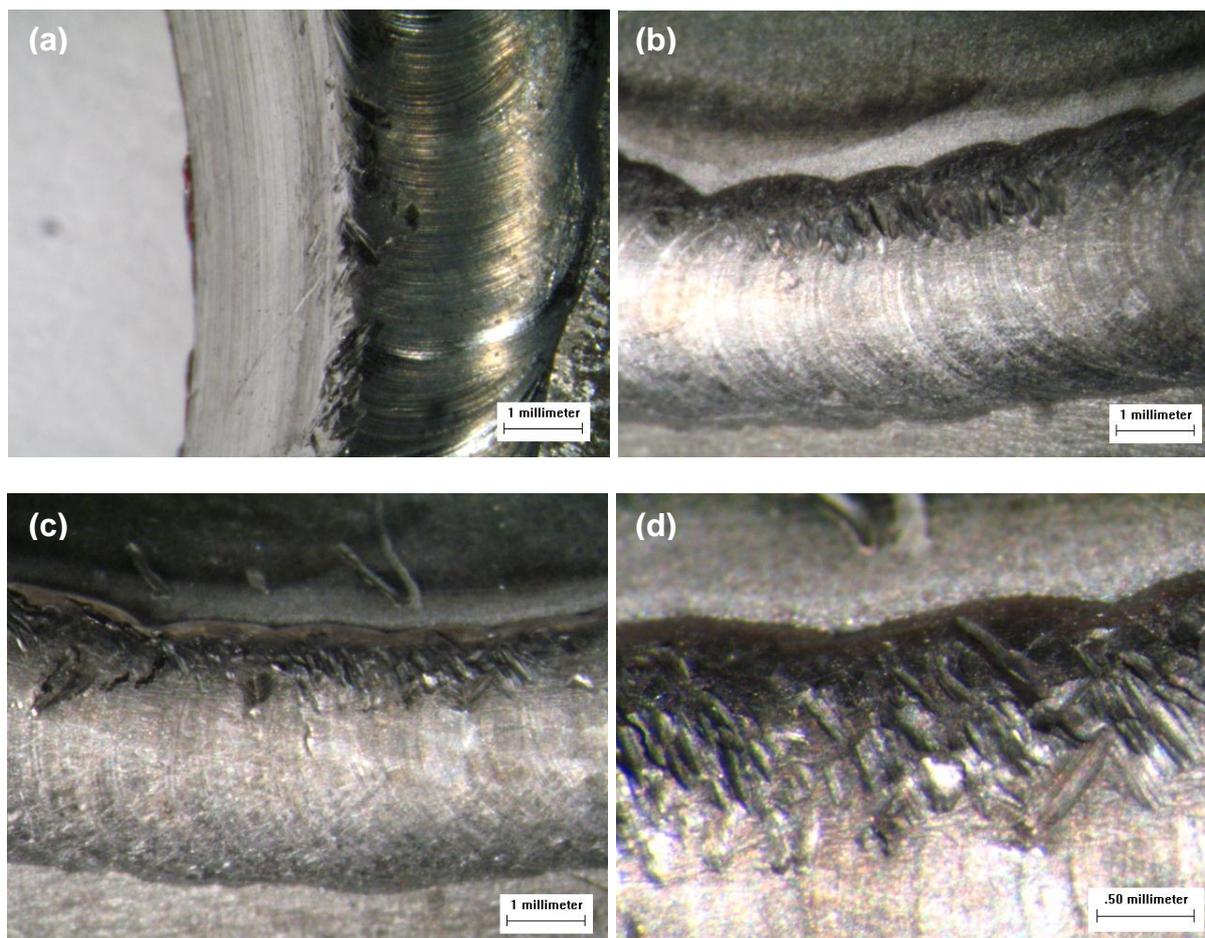


Figura 3. Ensaio macrográfico da junta tubo-espelho soldada 316/316 em 0,5 M H₂SO₄ mostrando a corrosão localizada no cordão de solda e o ataque preferencial da ZTA do tubo pela corrosão uniforme. Em (a) e (b) a 50°C; (c) e (d) a 90°C.

Com uma taxa de corrosão de 9,27 mm/ano nos ensaios a 50°C, a junta tubo-espelho 444/316 obteve um desempenho de perda de massa semelhante à junta 316/316. Na avaliação metalográfica por macrografia não foi identificada ocorrência de corrosão localizada na junta 444/316, sendo que apenas o aspecto visual do corpo de prova apresentou-se opaco e rugoso, como pode ser observado na Figura 4a.

No ensaio a 90°C a junta 444/316 apresentou um grande aumento da taxa de corrosão, com valores de 381,66 mm/ano. A corrosão uniforme tornou-se mais severa nessa temperatura, e com maior atuação na face do tubo AISI 444 do que no cordão de solda ou na face do espelho AISI 316L. Ainda, percebe-se que na ZTA da margem da solda com o tubo há uma maior atuação da corrosão uniforme, observado na Figura 4b. Observou-se a ocorrência de corrosão localizada no cordão de solda, geralmente próximo à margem do tubo. E foi registrada a nucleação de uma trinca transversal sob o cordão de solda. A Figura 4 apresenta as macrografias da junta 444/316 em H₂SO₄.

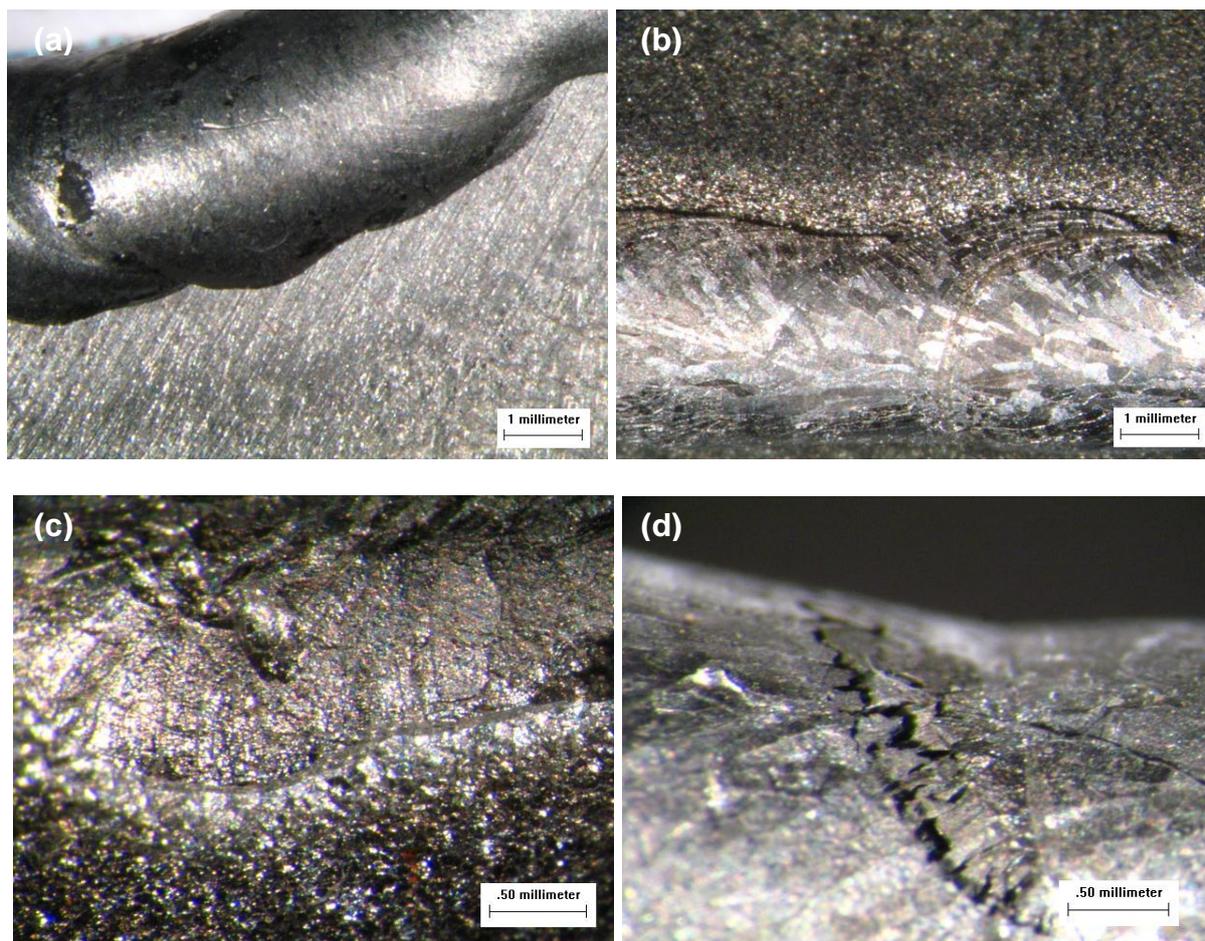


Figura 4. Ensaio macrográfico da junta tubo-espelho soldada 444/316 em 0,5 M H_2SO_4 mostrando em (a) o aspecto superficial da junta soldada a 50°C; (b) o aspecto superficial da junta soldada a 90°C; (c) corrosão localizada no cordão de solda no ensaio a 90°C; (d) trinca transversal no cordão de solda no ensaio a 90°C.

3.2 Avaliação da Corrosão em 0,5 M HCl

A solução de ácido clorídrico (0,5 M HCl) resultou em diferentes desempenhos para as juntas tubo-espelho soldadas, principalmente quando comparados aos desempenhos em H_2SO_4 . A Figura 5 apresenta os valores da taxa de corrosão das juntas soldadas, representada pelos rótulos de cada reta. Percebe-se que as duas juntas sofreram uma considerável influência da temperatura para o aumento da taxa de corrosão, conforme pode-se observar na Figura 5. E a taxa de corrosão da junta 444/316 apresentou um acréscimo maior em função da temperatura do que a junta 316/316.

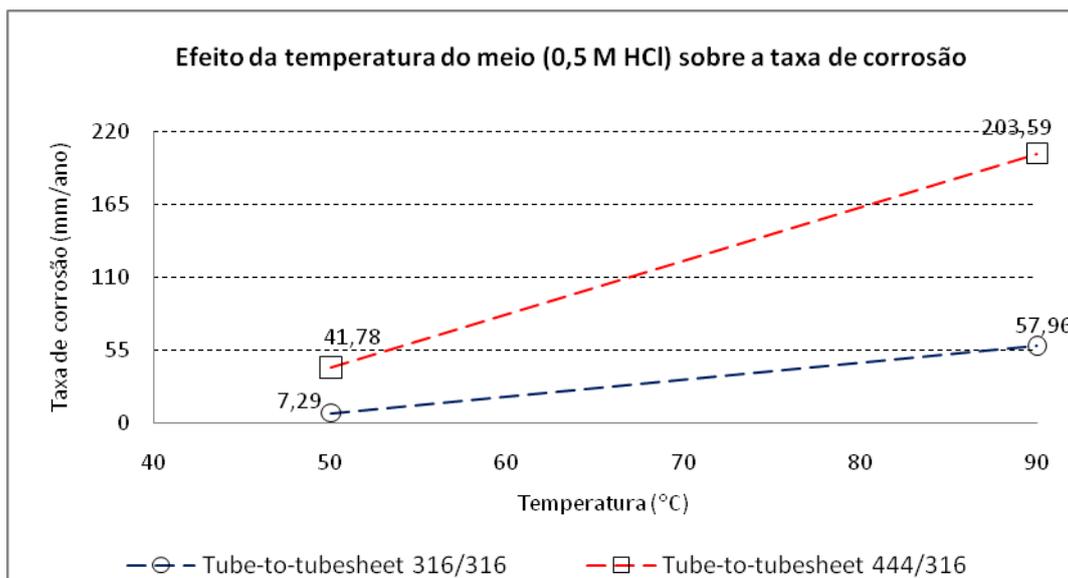


Figura 5. Variação da taxa de corrosão em 0,5 M HCl com a temperatura.

Com base na taxa de corrosão de 7,29 mm/ano a 50°C e nos resultados do ensaio macrográfico após o teste de perda de massa por imersão, observa-se que na junta 316/316 atuaram simultaneamente os mecanismos de corrosão uniforme e localizada. Com o comprometimento da camada passiva, a perda de massa pela corrosão uniforme resultando no aspecto visual opaco e rugoso da junta soldada. Observou-se também que ocorreu um ataque corrosivo preferencial no cordão de solda, próximo a margem do cordão de solda com o tubo.

A junta 316/316 apresentou um significativo aumento da taxa de corrosão em função da temperatura, chegando a valores de 57,96 mm/ano a 90°C. Os mecanismos de corrosão observados foram os mesmos que aqueles a 50°C, entretanto, com maior severidade. O aspecto visual da chapa do espelho e do tubo após os ensaios evidencia uma semelhança no acabamento (opaco e rugoso), indicando que a corrosão uniforme atuou igualmente em todas as faces dos metais de base, e ocorreu uma corrosão preferencial na ZTA (em ambos os lados). A Figura 6 mostra as macrografias da junta 316/316 em 0,5 M HCl.

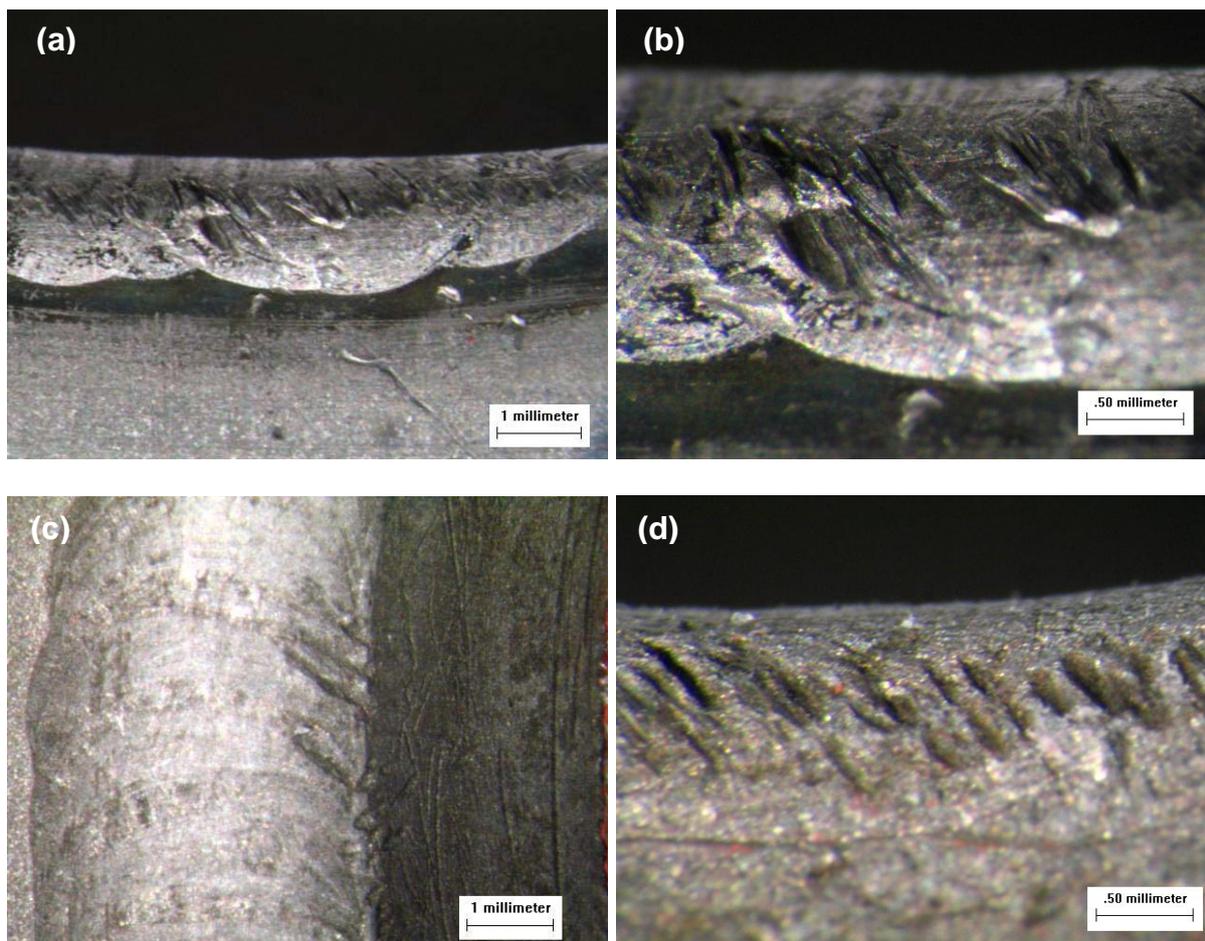


Figura 6. Ensaio macrográfico da junta tubo-espelho soldada 316/316 em 0,5 M HCL. (a) e (b) Corrosão localizada no cordão de solda no ensaio a 50°C; (c) e (d) Processo corrosivo na margem da solda com o tubo a 90°C.

A junta tubo-espelho 444/316 apresentou uma taxa de corrosão a 50°C de 41,78 mm/ano, com uma atuação concentrada da corrosão uniforme no tubo AISI 444. Na Figura 7a é possível observar o metal de base do espelho (AISI 316L), o cordão de solda (metal de adição AWS ER316L) e o metal de base do tubo (AISI 444), e fica evidente a corrosão uniforme mais severa ocorrendo no tubo. De modo geral, o mecanismo de corrosão que prevalece é o uniforme, com o aspecto visual opaco e rugoso da superfície do corpo de prova. Entretanto, em poucos pontos foi observada a corrosão localizada do cordão de solda próximo à margem da solda com o tubo, como mostra a Figura 7b.

No ensaio a 90°C a junta 444/316 apresentou uma taxa de corrosão de 203,59 mm/ano, um aumento menor do que o obtido em H₂SO₄ e função da temperatura. Os mecanismos de corrosão mantiveram-se iguais aos observados nos ensaios a 50°C, diferenciando-se pela maior perda de massa devido à atuação mais efetiva da corrosão uniforme. A corrosão localizada também foi observada com maior frequência e extensão, sempre ocorrendo no cordão de solda. A Figura 7 apresenta as macrografias da junta 444/316 em 0,5 M HCl.

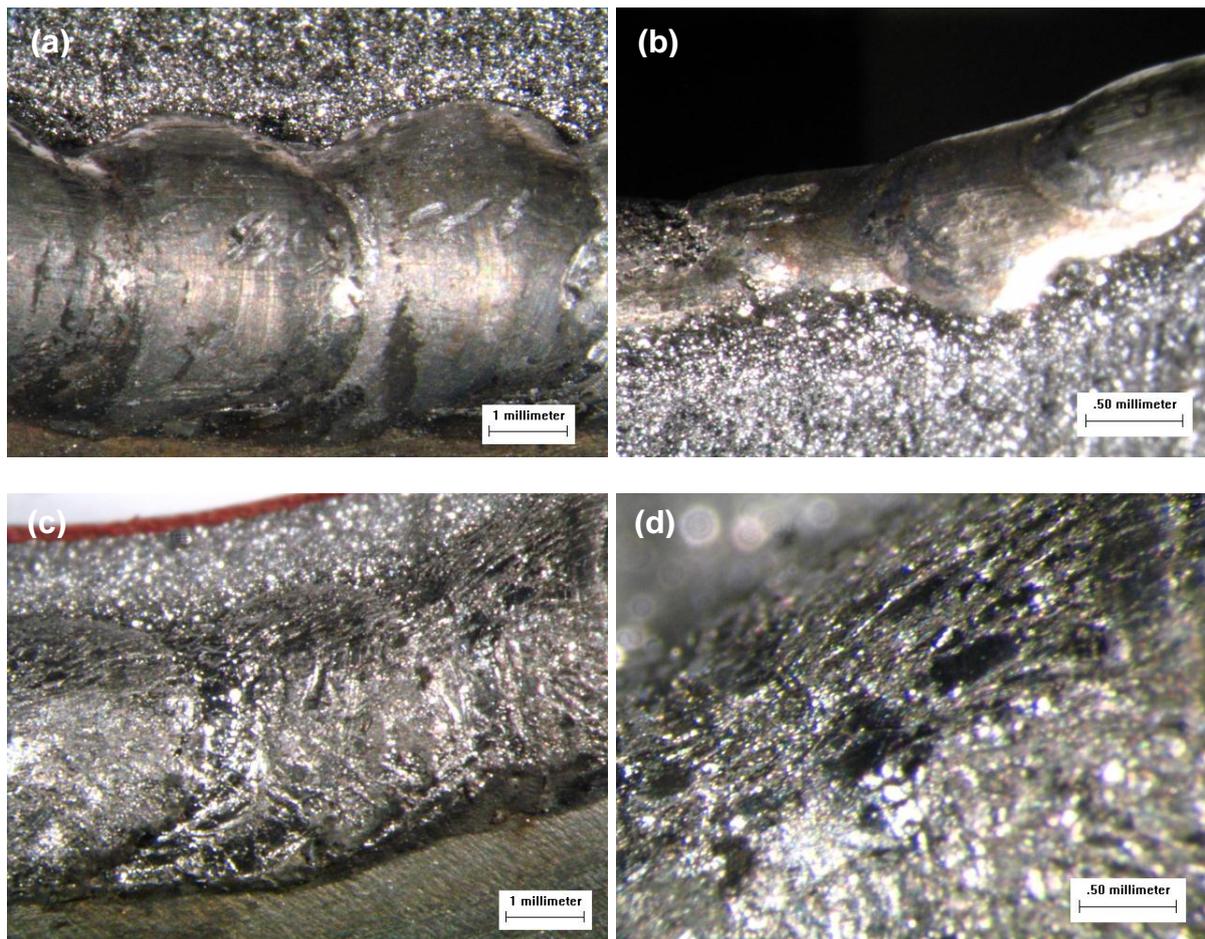


Figura 7. Ensaio macrográfico da junta tubo-espelho soldada 444/316 em 0,5 M HCL, sendo (a) atuação da corrosão uniforme nos metais de base (chapa do espelho e tubo) e no metal de solda; (b) Observação da corrosão localizada; (c) e (d) aumento da frequência e extensão da corrosão localizada.

4 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O fundamento das conclusões partiu de uma análise sistemática referente ao desempenho de cada tipo de junta tubo-espelho produzida e avaliada para as condições experimentais desse trabalho. Desse modo, temos que:

- O desempenho da junta 444/316 foi satisfatório a 50°C considerando-se que os ensaios foram conduzidos em condições extremas de concentração do meio corrosivo utilizado. A junta 444/316 obteve um desempenho semelhante à junta 316/316 em H₂SO₄, com a vantagem de não ser evidenciado mecanismo de corrosão localizada. E em HCl, foi obtida uma taxa de corrosão maior para a junta 444/316, com os mesmos mecanismos de corrosão para ambas as juntas;
- Para a temperatura de 90°C a junta 444/316 apresentou um desempenho muito inferior à junta 316/316, com taxas de corrosão bem maiores, destacando um considerável aumento em função da temperatura, a corrosão preferencial do tubo de aço inoxidável AISI 444 e de sua ZTA, com a formação de trinca transversal no cordão de solda;
- A corrosão preferencial da ZTA do tubo em ambas as ligas pode ser relacionada à energia de soldagem, visto que o tubo de espessura de 1,2 mm sofre mais com o ciclo térmico de soldagem do que a chapa do espelho de

espessura de 16,8 mm. Deve-se considerar também a presença de tensões no local, oriundas do processo de solidificação do cordão de solda. Como o flange causa restrição durante a contração e é bem mais espesso espera-se que essa região do tubo, próxima ao cordão, concentre as maiores tensões.

Concentradores de vinhaça fabricados atualmente com a junta 316/316 não apresentam danos por corrosão significativos, e desse modo, o próximo passo para a avaliação de desempenho da junta 444/316 é um teste de campo, realizado através da troca de poucos tubos pela liga AISI 444 nos estágios do equipamento que trabalham a 50°C. Para as temperaturas mais elevadas, recomenda-se manter a junta 316/316.

A realização de ensaios de corrosão eletroquímicos pode acrescentar informações de desempenho da junta tubo-espelho soldada que suportarão decisões mais concretas a respeito da aplicação proposta.

Outra recomendação para trabalho futuro trata-se do uso do processo de soldagem TIG orbital com a finalidade de redução da energia de soldagem aplicada na junta tubo-espelho, de modo a buscar menores alterações microestruturais, menores tensões residuais, e assim minimizar a fragilização da ZTA.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos técnicos do SMM/EESC/USP, à empresa Citrotec pela confecção das amostras e à FAPESP pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 ROBERGE, P.R. Handbook of corrosion engineering. New York: McGraw-Hill, 2000. 332-369p.
- 2 SCHVARTZ, C. Tratamento da vinhaça: biodigestão anaeróbica. In: Workshop Tecnológico sobre vinhaça. 2007, Jaboticabal, São Paulo
- 3 CASH, G.A.; HOPE, G.A.; SCHWEINSBERG, D.P. Localized corrosion of high alloy steels in cane jugar juice. Corrosion Science, v.33, n. 5, p. 751-764, 1992.
- 4 SEDRIKS, A.J. Corrosion of stainless steel. 2.ed. New York: John Wiley, 1996. 435p.
- 5 GENTIL, V. Corrosão. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- 6 METALS HANDBOOK. Corrosion. 9.ed. American Society for Metals (ASM), v.13, 1987.
- 7 MARSHALL, P. Austenitic stainless steels: microstructure and mechanical properties. England: Elsevier, 1984.
- 8 FOLKHARD, E. Welding metallurgy of stainless steel. New York, Springer-Verlag, 1988. 279p.
- 9 BOTTON, T. Estudo comparativo em meio ácido e em meio contendo cloreto dos aços inoxidáveis UNS S44400, S30403 e S31603, obtidos por laminação a quente. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- 10 STEIGERWALD, R.F.; DUNDAS, H.D.; REDMOND, R.D.; DAVISON, R.M. The physical metallurgy of Fe-Cr-Mo ferritic stainless steels. In: Stainless steel, n. 77, Edited by R.Q.BARR, Climax Molybdenum Company, p. 57-76, 1978.
- 11 THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME IX – Welding and brazing qualifications. New York, 2010.
- 12 METALS HANDBOOK. Welding, brazing and soldering. 9.ed. American Society for Metals (ASM), v.6, 1993.
- 13 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G-31. Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals. Philadelphia, 2004.