

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO NA SUSCEPTIBILIDADE A CORROSÃO SOB TENSÃO DE JUNTAS SOLDADAS DISSIMILARES DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 310S E AÇO DUPLEX 2304

Thiago Amaro Vicente, thiagofis@hotmail.com¹
Edmilson Otoni Correa, ecotoni@unifei.edu.br¹
Leonardo Albergaria de Oliveira, leonardoeng1@hotmail.com¹
Livio de Carvalho Valeriano, liviovaleriano@yahoo.com.br¹
Flávio Amaury de Freitas Matos, flavioeme@yahoo.com.br
Reginaldo Pinto Barbosa, rpbarbosa@aperam.com²

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG 37500-903

²Praça 1º de maio, s/n, centro, Timoteo, MG

Resumo: O objetivo deste estudo foi investigar a influência da composição química do metal de adição sobre a microestrutura e a resistência a corrosão sob tensão (CST) de juntas dissimilares de aço inoxidável austenítico 310S e aço inoxidável duplex 2304 em meio contendo cloreto de magnésio ($MgCl_2$). Dois tipos de eletrodos sendo um destes de aço inoxidável austenítico E309L e um outro de aço inoxidável duplex 2209 foram usados a fim de se produzir zonas fundidas de diferentes composições químicas destas juntas soldadas dissimilares. Para avaliar a resistência a CST e a microestrutura das juntas soldadas, foram realizados testes de corrosão sob tensão sob carga constante e análises metalográficas e fractográficas, antes e após o ensaio CST. Os resultados dos testes CST mostraram que a região com menor resistência a CST foi a zona de ligação entre a zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA) e na ZTA no lado do metal base 2304 das junta dissimilares; para ambos os metais de adição testados. Os resultados de CST mostraram também que as juntas soldadas com o metal de adição de aço duplex 2209 foram mais resistentes ao trincamento por CST em relação às juntas soldadas com o metal de adição 309L. A menor resistência a CST da junta dissimilar com metal de adição de aço 309L pode ser atribuída a presença de redes de ferrita delta semi-contínuas na ZF que atuaram como sítios de nucleação e propagação de trincas de corrosão sob tensão em direção a ZTA do aço duplex 2304 de menor resistência a corrosão e tenacidade devido a presença de fases secundárias (mais provavelmente fase sigma). Por outro lado, a maior resistência a CST da junta com metal de adição 2209 se deve a ausência de ferrita delta na zona fundida. A ferrita delta atua como anodo e é atacada preferencialmente em relação à austenita nos aços inoxidáveis.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis, juntas dissimilares, corrosão sob tensão, microestrutura.

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável austenítico 310S é o material mais comumente usado para a fabricação de componentes que irão trabalhar permanentemente em temperaturas elevadas tais como permutadores de calor, ganchos de tubos, queimadores, fornos, etc, e que, em muitos casos, está em contato com algum tipo de meio corrosivo. Este aço tem uma boa resistência mecânica e a corrosão provocada por gases e sais fundidos e apresenta uma boa conformabilidade e uma boa soldabilidade. No entanto, possui alta susceptibilidade a corrosão sob tensão.

O trincamento por corrosão sob tensão é um processo de corrosão local, o qual é caracterizado pela nucleação e propagação lenta de trincas no material sob a ação simultânea de tensões de tração e um meio corrosivo específico Bauernfeind *et al.* (2004). Em geral, a formação de trincas de corrosão sob tensão ocorre em valores de tensão abaixo da tensão de escoamento do material e tipicamente abaixo da tensão de projeto e limite de fadiga de um componente estrutural Boven *et al.* (2007).

Devido a isto, a resistência à corrosão sob tensão é um dos requisitos mais importantes a serem considerados quando da realização de soldas para fabricação ou reparo de componentes envolvendo aços inoxidáveis austeníticos. A corrosão sob tensão, por sua vez, é fortemente influenciada pelas transformações microestruturais indesejáveis que ocorrem durante a soldagem ou durante o tratamento térmico pós-soldagem dos componentes Sui *et al.* (1996).

A fim de mitigar este problema, o movimento em direção ao uso dos aços inoxidáveis duplex, de estrutura austenítica-ferrítica, em substituição total ou parcial dos aços inoxidáveis austeníticos, é cada vez mais crescente. Assim, atualmente, em vários casos práticos de fabricação ou reparo de equipamentos, se faz necessária a união destes dois aços de tal forma a combinar a resistência à corrosão em altas temperaturas dos aços austeníticos 310S com a superior resistência a corrosão por pitting e a corrosão sob tensão dos aços duplex. Entretanto, de acordo com Linton (2004), as presenças da fase sigma, fase chi e/ou nitretos de cromo em juntas soldadas de aço duplex podem produzir o decréscimo da resistência ao pitting e da resistência à corrosão sob tensão destes aços.

Para exemplificar, durante a fabricação de tanques e dutos para transporte químico em temperaturas altas, a soldagem dissimilar entre aços inoxidáveis austeníticos e duplex é praticamente inevitável e devido a isto, certos problemas podem surgir na junta soldada quando da realização da soldagem. Dependendo dos parâmetros de soldagem e do metal de adição a ser utilizado para confecção da junta dissimilar, a mesma poderá apresentar uma maior ou menor susceptibilidade à corrosão sob tensão.

Portanto, este trabalho tem por objetivo investigar a influência da composição química do metal de adição sobre a microestrutura e a resistência a corrosão sob tensão (CST) de juntas dissimilares de aço inoxidável austenítico 310S e aço inoxidável duplex 2304 em meio contendo cloreto. A seleção correta do metal de adição pode constituir-se numa prática eficiente de se eliminar ou minimizar a ocorrência de CST quando da realização de soldas dissimilares durante a fabricação e o reparo de equipamentos da indústria de extração de petróleo, petroquímica e nuclear.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de avaliar a susceptibilidade à corrosão sob tensão de juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável austenítico 310S e duplex 2304 por cloretos; foram realizadas soldagens pelo processo MIG convencional para preenchimento de juntas de chapas de aço inoxidável AISI 310S e de aço duplex 2304 de dimensões 70 x 255 mm x 4 mm, chanfradas em V, utilizando material de adição de duas composições químicas diferentes. Os metais de adição utilizados foram arames sólidos de 1,2 mm de diâmetro de aço inoxidáveis austenítico AISI 309L e de aço inoxidável duplex 2209. A Tabela (1) mostra a composição química dos metais de base e metais de adição utilizados.

Tabela 1. Composição química (% em peso) dos metais de adição e dos metais base

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N
AISI 310S	0,08	2,00	1,50	25,00	20,50	-	-
UNS 32304	0,02	1,36	0,39	22,23	3,61	0,31	0,11
ER2209	0,03	1,47	0,57	22,50	9,20	3,12	0,14
E309L	0,03	0,69	0,96	24,00	13,00	0,75	-

Foram utilizados os mesmos parâmetros de soldagem para ambos os metais de adição. Estes valores foram selecionados dentro da faixa usualmente empregada pelo fabricante em soldas de componentes sujeitos à corrosão sob tensão. A Tabela (2) mostra os parâmetros de soldagem adotados.

Tabela 2. Principais parâmetros de soldagem

Vazão de gás (l/min)	Tensão (Volts)	Corrente (Ampere)	Velocidade de soldagem (m/min)	Vel. de Al. Arame (m/min)
14	19	122	0,35	4

Foram realizadas medições de dureza Vickers com carga de 10 Kgf em cada um dos corpos de prova soldados. As medidas foram tomadas a uma distância de 2 mm da face superior da superfície soldada, em sua seção transversal. A distância entre duas medidas consecutivas feitas sobre uma horizontal era de 1 mm sendo que, nas proximidades da linha de fusão, as mesmas foram executadas a 0,5 mm de distância. Em cada amostra foram realizadas 20 medições.

O ensaio de corrosão sob tensão (CST) foi realizado no dispositivo com carregamento tipo carga constante utilizando corpos de prova de tração sem entalhe soldados transversal e longitudinalmente ao seu eixo. A preparação e utilização dos corpos de prova observaram os procedimentos padronizados pelas normas ASTM G58 e ASTM E8. A partir das chapas soldadas transversalmente foram retirados 10 corpos de prova para cada metal de adição estudado. Mostram-se esquematicamente na Fig. (1), as dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de CST.

O banco de teste constituiu-se de um dispositivo de aplicação de carga por um sistema de peso morto, o que conferiu boa uniformidade e repetibilidade de carga. O corpo de prova foi acondicionado numa cuba de vidro para mantê-lo submerso na solução de teste. A cuba, por sua vez, foi acoplada a um condensador de refluxo, constituindo um circuito fechado. Como solução de ataque corrosivo, foi utilizado uma solução aquosa de cloreto de magnésio (43%) conforme norma ASTM G36. A temperatura de trabalho nos ensaios foi de 145 ± 2 °C, equivalente à temperatura de ebulição de uma solução de cloreto de magnésio com concentração de 43%. A figura 2 mostra o dispositivo usado para os testes de corrosão sob tensão.

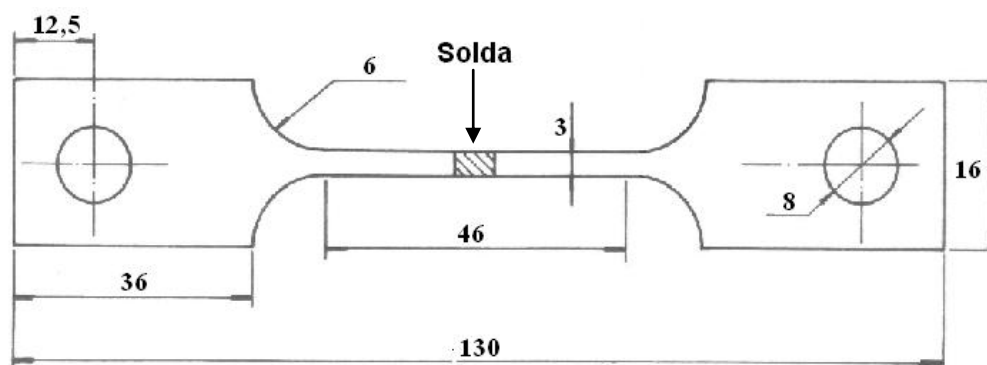


Figura 1. Geometria e dimensões do Corpo de prova CST (dimensões em mm)



Figura 2. Dispositivo para ensaio CST carga constante

A tensão aplicada axialmente ao eixo do corpo de prova foi de 250 MPa, correspondente à aproximadamente 80% do limite de escoamento 0,2% do corpo de prova soldado. De cada corpo de prova fraturado foi removido uma amostra de 20 mm de comprimento para realização de ensaios metalográficos via microscopia ótica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Dureza das juntas soldadas

Conforme a norma NACE MR0175 Logan (1990), uma dureza máxima de 250 HV é requerida para aços austeníticos a serem utilizados em componentes, de forma a evitar o trincamento por corrosão sob tensão em meios contendo ácido sulfídrico (H_2S). Nenhuma correlação entre a dureza das juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável austenítico e a sua susceptibilidade à CST por cloretos foi relatada, mas os autores acreditam que o valor máximo de 250 HV também possa ser aplicado a estas soldas.

As Figuras (3) e (4) apresentam os perfis de dureza Vickers das soldas realizadas. As durezas foram medidas horizontalmente na seção transversal das amostras e a 2 mm da superfície. O valor máximo de dureza encontrado foi de 223 HV; o que classifica as juntas soldadas como aceitáveis, de acordo com os critérios adotados pela NACE. Pode ser observado também que o perfil de dureza da junta praticamente não se altera com a variação do metal de adição indicando a pouca influência dos mesmos e a maior influência da energia de soldagem na dureza da junta.

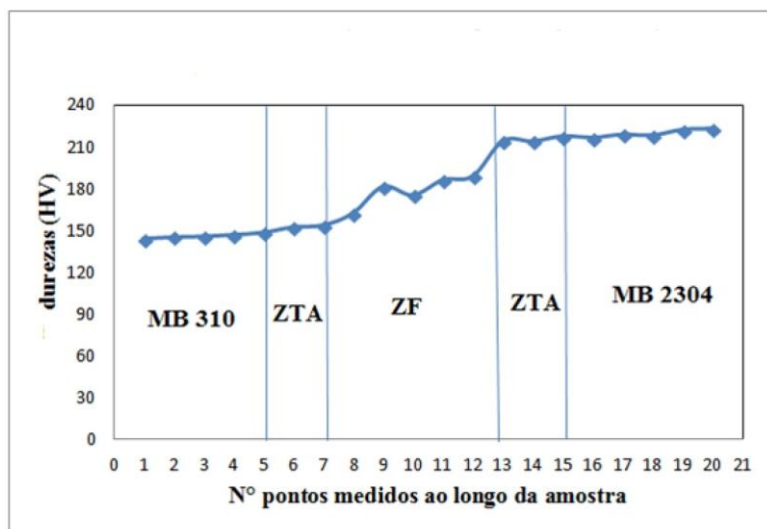


Figura 3. Perfil de dureza da junta dissimilar com metal de adição do aço austenítico E309L

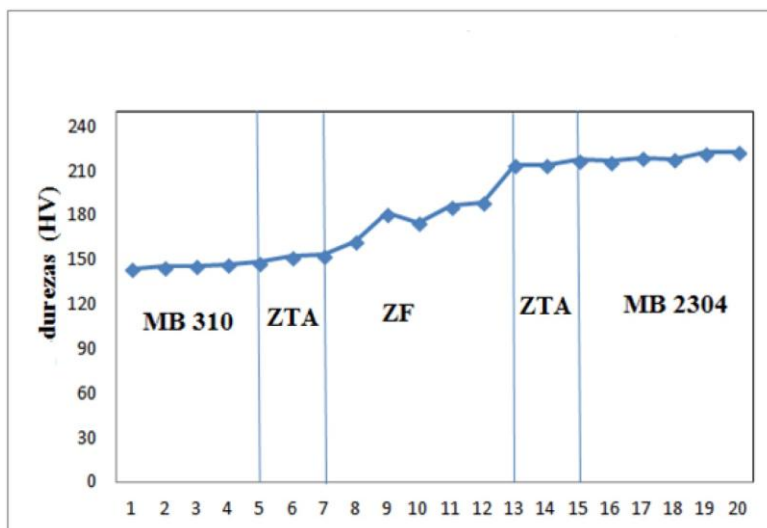


Figura 4. Perfil de dureza da junta dissimilar com metal de adição do aço duplex 2209

3.2. Corrosão sob tensão

O tempo necessário para ocorrência da fratura completa do corpo-de-prova foi o parâmetro adotado para avaliar a susceptibilidade ao trincamento por corrosão sob tensão da junta dissimilar de aço inoxidável 310S e aço duplex 2304. A Tabela (3) mostra os valores médios de tempo e temperatura de ensaio para os dois metais de adição.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de CST

Metal de adição	ER2209	E309L
Tempo de ensaio (min)	213 ± 4	73 ± 5
Temperatura (°C)	140	140

Pode-se observar pela tabela que o tempo mínimo para ocorrência da fratura completa dos corpos de prova soldados com o eletrodo ER2209 é aproximadamente 3 vezes superior ao máximo tempo verificado para os corpos de prova soldados com o eletrodo E309L; ou seja, as soldas utilizando metal de adição AWS ER2209 são consideravelmente mais resistentes ao trincamento por CST do que aquelas com metal de adição AWS ER 309L. Por outro lado, os testes CST também mostraram que a fraturas dos corpos de prova, para ambos os metais de adição, ocorreram predominantemente na ZTA do lado do metal base do aço duplex 2304 (veja Figuras 5 e 6) indicando que esta região foi a mais suscetível ao trincamento por CST.

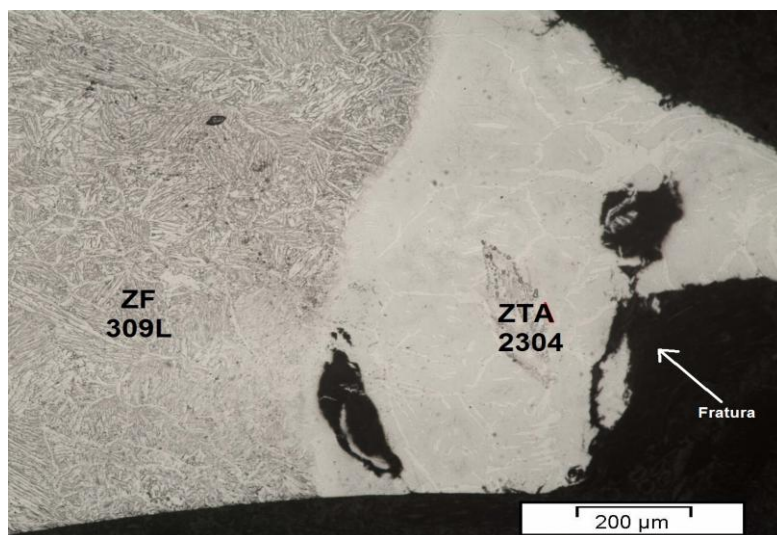


Figura 5. Fratura e trincas transgranulares na ZTA do metal base 2304 após ensaio de CST. Junta soldada com metal de adição E309L.

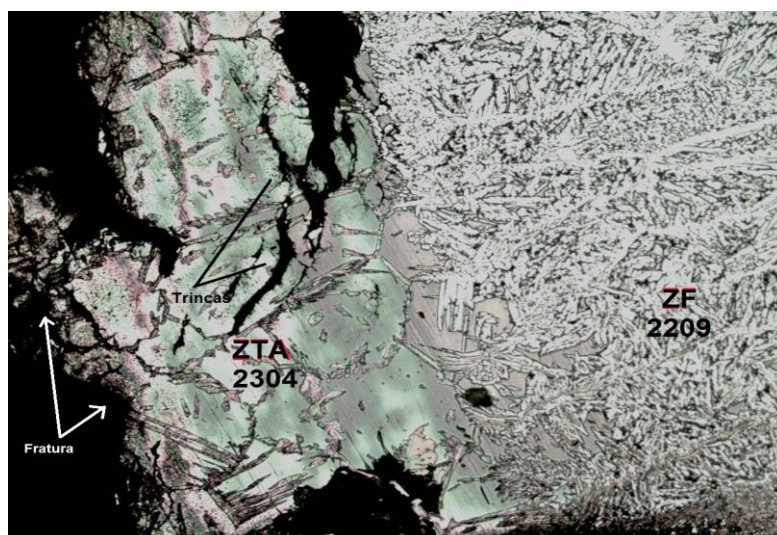


Figura 6. Fratura e trincas transgranulares na ZTA do metal base 2304 após ensaio de CST. Junta soldada com metal de adição 2209

A maior susceptibilidade a CST desta região para ambos os metais de adição utilizados pode ser atribuída à presença da(s) fase(s) Chi (χ) e /ou Sigma (σ) na zona de ligação e ZTA do metal base 2304 conforme indicado pelo resultado de difração de Raios X mostrado na Figura 7. De acordo com Silva *et al* (2008), estas fases são formadas por ferro e cromo em temperaturas entre 800 e 1000 °C e podem conter uma certa quantidade de molibdênio. Estas fases são frágeis e diminuem consideravelmente a tenacidade e a resistência à corrosão da ZTA, facilitando a nucleação e propagação de trincas CST.

Além disso, de acordo com Labanowski (2006), o alto teor de Cr e o baixo teor de Ni presente no metal base de aço duplex 2304 somada ao reaquecimento do material durante soldagem tendem a aumentar a quantidade de ferrita delta (FN) na ZTA destes aços, facilitando assim, por transformação eutetóide, a formação de fases secundárias tais como a fase Chi e fase Sigma, além de austenita secundária (Voronenko, 1997 e Jiang *et al*, 2003). Isto está em concordância com o resultado de difração de Raios X mostrado na figura 7, onde se observa claramente o pico da fase ferrita com intensidade bem maior do que o da fase austenita. É importante ressaltar que em aços duplex sem soldagem as intensidades destas fases são mais próximas, uma vez que a proporção de austenita e ferrita é mantida em 50:50.

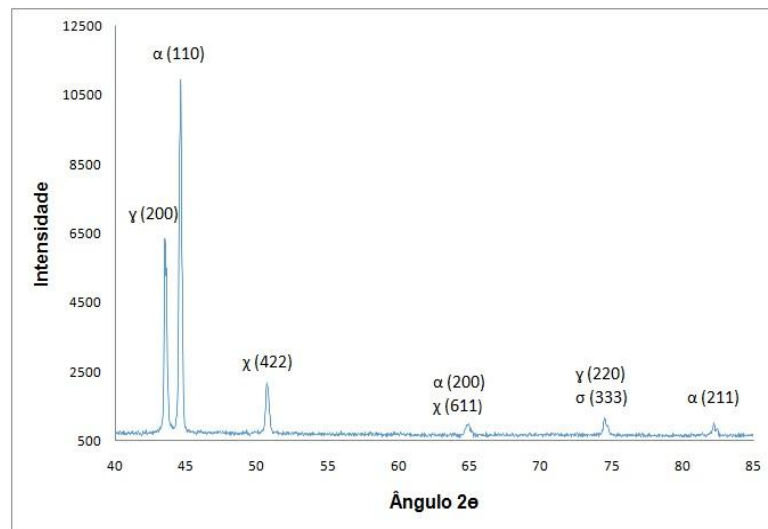


Figura 7. Difratograma da ZTA do aço duplex 2304

No entanto, é importante investigar o motivo pela qual as juntas soldadas com metal de adição de aço E309L apresentaram menor resistência a CST (tempo de fratura menor), uma vez que para estas juntas, a região mais susceptível também foi a ZTA do lado do metal base do aço duplex 2304.

As avaliações microestruturais indicam fortemente que, além da presença da(s) fase(s) *Chi* e *Sigma*, na zona de ligação e ZTA do metal base 2304, que tornou esta região mais susceptível ao trincamento por CST, a presença de redes semi-contínuas de ferrita delta na zona fundida do aço 309L foram fundamentais para a menor resistência a CST da junta com este metal de adição, conforme mostrado nas figuras (8) e (9). De acordo com Solari (1983), a ferrita delta atua como ânodo (mais ativa eletroquimicamente) e, por isto facilita o desenvolvimento das trincas de CST ao longo dos seus contornos, protegendo a austenita que age como cátodo. Desta forma, é razoável afirmar que trincas de CST, formadas na zona fundida do aço E309L (mais susceptível), se propagaram na direção da ZTA do aço duplex 2304 e se somaram às trincas formadas na ZTA do aço duplex. A partir daí, as trincas se propagaram através dos grãos ferríticos de modo predominantemente transgranular até a ruptura final (veja figuras 8 e 9).

Outra possível razão para a menor resistência a CST da junta com metal de adição de aço E309L, e que carece de maior investigação, é a ocorrência em maior grau de corrosão galvânica nesta junta em relação à junta com metal de adição de aço 2209.

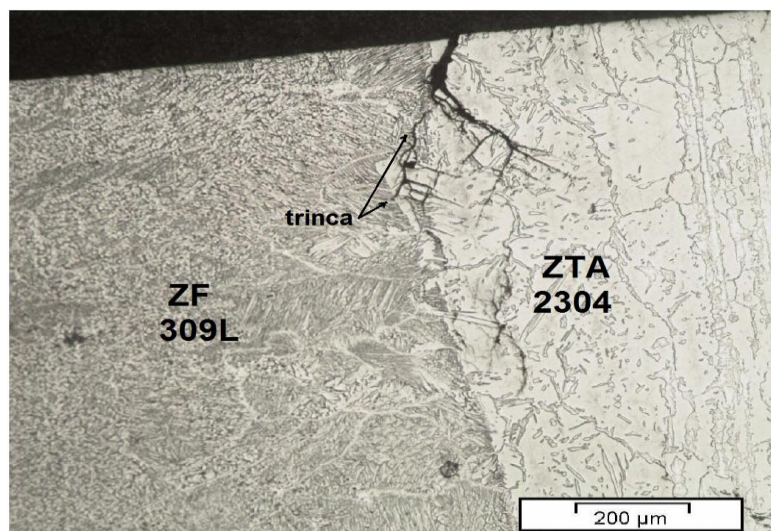


Figura 8. Microestrutura da ZF com metal de adição E309L. Nota-se a presença de trinca CST na ZF em direção a ZTA do aço duplex 2309.

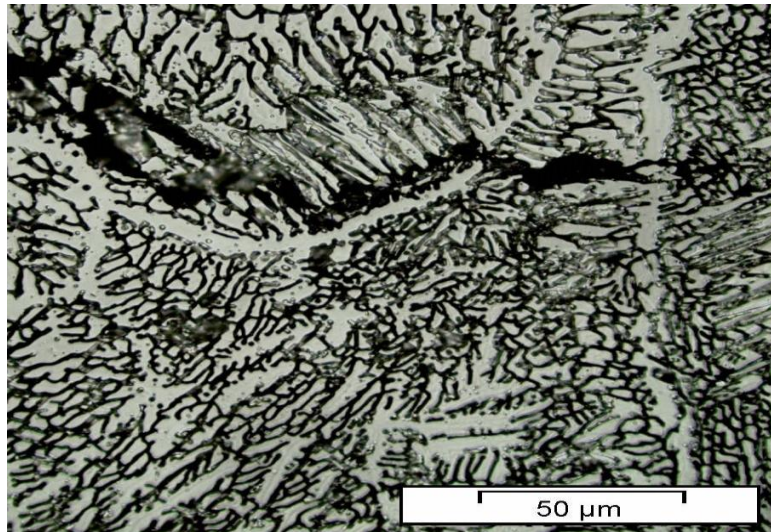


Figura 9. Microestrutura da ZF com metal de adição E309L. Nota-se claramente a rede de ferrita delta e a propagação da trinca entre os seus contornos

A microestrutura da figura 10 mostra que na ZTA do metal base 310S para ambos os metais de adição, houve a ocorrência de trincas CST, porém em menor grau do que o observado na ZTA do metal base 2304. Isto pode ser atribuído a ausência de fases deletérias na ZTA deste aço e ao seu maior teor de cromo; o que aumenta a sua resistência a corrosão sob tensão e a corrosão galvânica. A partir da figura 10 também é possível observar claramente que, quando da utilização do metal de adição E309L, também ocorre a iniciação da trinca na zona fundida e a sua propagação para a ZTA do aço 310S, tal como mencionado, confirmando o mecanismo de propagação de trincas CST mencionado anteriormente.

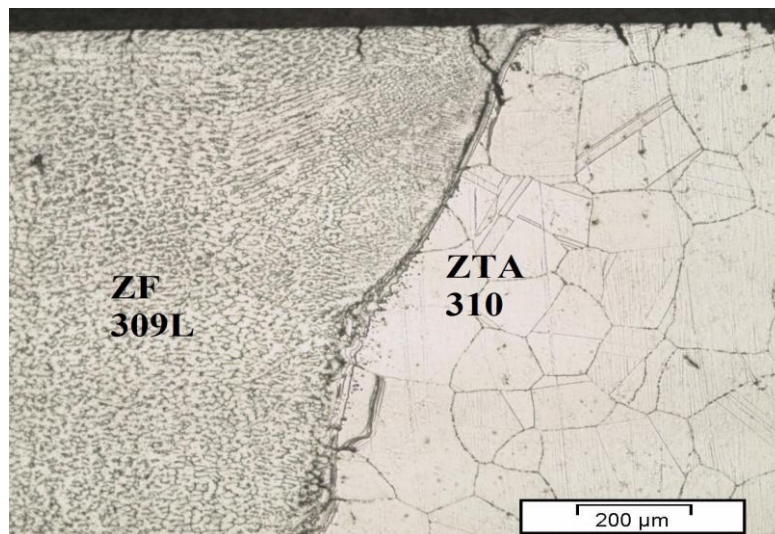


Figura 10. Presença de poucas trincas de CST no lado do metal base 310S.

4. CONCLUSÕES

- 1) Os resultados de dureza mostraram que nenhuma das juntas soldadas, apresentou dureza máxima acima daquela recomendada pela NACE para componentes sujeitos a corrosão sob tensão.
- 2) A região da junta dissimilar que se mostrou mais susceptível a CST, para ambos os metais de adição, foi a zona de ligação e ZTA do aço inoxidável duplex 2304. Isto é devido a estes aços formarem nesta região fases deletérias Chi e/ou Sigma que diminuem a resistência a corrosão e a tenacidade desta região, aumentando a susceptibilidade à corrosão sob tensão.
- 3) A junta dissimilar utilizando metal de adição de aço inoxidável duplex 2209 se mostrou mais resistente a CST do que a junta dissimilar utilizando metal de adição de aço inoxidável austenítico 309L. Isto pode ser atribuído a presença simultânea de redes de ferrita delta semi-contínuas na zona fundida do metal 309L e a presença de fases deletérias na ZTA do aço duplex 2304. O mesmo não ocorreu para a junta com metal de adição de aço

2209 uma vez que estes aços, dada a composição, não formam redes de ferrita delta na ZF, as quais facilitam a propagação de trincas CST pelos contornos de grão da ferrita.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e a FAPEMIG pelo apoio financeiro que proporcionou a realização deste trabalho

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bauernfeind, D., Romotowski, J., Haberl, J., Mori, G., Bernauer, J. and Saller, G., 2004, "Stress Corrosion Cracking of Highly Alloyed Austenitic Stainless Steels in Chloride Media", University of Leoben, Austria, 8p
- Boven, G.V., Chen, W. and Rogge, R., 2007, "The Role of Residual Stress in Neutral pH Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels - Part I: Pitting and Cracking Occurrence", Acta Materialia, Vol. 55, pp. 29-42
- Silva, C.C., Farias, J.P., Miranda, H.C., Guimaraes, R.F., Menezes, J.W.A, Neto, M.A.M. Microstructural characterization of the HAZ in AISI 444 ferritic stainless steel, Materials characterization, 59, 528-533, 2008.
- Solari, M., 1983, "Guia para Soldadura de los Aceros Inoxidables Duplex", La Plata, Argentina, 44p.
- Sui, G., Charles, E.A. and Congleton, J., 1996, "The Effect of Delta-ferrite Content on the Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in a Sulphate Solution", Corrosion Science, Vol. 38, n. 5, pp. 687-703
- Linton, V.M., Jaycock, N.J., Thomsen, S.J., Klumpers, A., 2004, "Failure of a superduplex stainless steel reaction vessel. Engineering Failure Analysis, v.11, p.243-256
- Logan, H.L., 1990, "Stress Corrosion". In: NACE Basic Corrosion Course, Anton deS Brasunas, 11a ed., chapter 10, June, Houston, Texas.
- Voronenko, B.I., 1997, "Austenitic-ferritic stainless steels: a state-of-the-art review. Metal Science and Heat treatment, v. 39, n.9-10, p.428-437.
- Jiang, Z.I., Chen, X.Y., Huang, Liu, X.Y., 2003, Grain refinement of Cr₂₅Ni₅Mo_{1.5} duplex stainless steel by heat treatment, Heat Treatment, v.A363, p.263-267.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho"

INFLUENCE OF FILLER METAL CHEMISTRY ON THE SUSCEPTIBILITY OF DISSIMILAR STAINLESS STEEL WELDMENTS TO THE STRESS CORROSION CRACKING

Thiago Amaro Vicente, thiagofis@hotmail.com¹

Edmilson Otoni Correa, ecotoni@unifei.edu.br¹

Leonardo Albergaria de Oliveira, leonardoeng1@hotmail.com¹

Livio de Carvalho Valeriano, liviovaleriano@yahoo.com.br¹

Flávio Amaury de Freitas Matos, flavioeme@yahoo.com.br

Reginaldo Pinto Barbosa, rpbarbosa@aperam.com²

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG 37500-903

²Praça 1º de maio, s/n, centro, Timoteo, MG

Abstract. The aim of this work was to study the influence of the filler metal chemistry on austenitic stainless steel(310S) and duplex(2304) dissimilar weldments stress corrosion cracking (SCC) in boiling MgCl₂ solution. Two types of filler metals wire consumable electrodes (ER2209 and E309L) were used in this study to produce weldment fusion zones of different chemical compositions and the welds. The SCC and microstructural results showed that ER2209 filler metal was the most suitable to use in dissimilar weldments submitted to stress corrosion problems. The dissimilar weldment using filler metal of austenitic stainless steel E309L was more susceptible to stress corrosion cracking (lower time of fracture) due to the combined presence of sigma/Chi phases in the ZTA of duplex 2304, where the fractures occurred, and semi-continuous delta ferrite net in the 309L fusion zone.

Keywords dissimilar weldments, Stress corrosion cracking, microstructural characterization