

# INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO METAL DE ADIÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO SOB TENSÃO DE JUNTAS SOLDADAS DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 444

PEDRO DUARTE ANTUNES <sup>a</sup>, EDMILSON OTONI CORRÊA <sup>b</sup>, RAFAEL MARCOS CORTEZ <sup>c</sup>, ANDREAS NASCIMENTO <sup>d\*</sup>

<sup>a</sup> Materiais para Engenharia. M.Sc.; UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá Itajubá – MG. Brasil.

<sup>b</sup> Eng<sup>o</sup> Mecânico. M.Sc.; D.Sc.; UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá Itajubá – MG. Brasil.

<sup>c</sup> Eng<sup>o</sup> Mecânico. IMBEL – Indústria de Materiais Bélicos do Brasil Itajubá – MG. Brasil.

<sup>d</sup> Eng<sup>o</sup> Petróleo. Institute of Mining and Petroleum Engineering Mining University of Leoben - Austria

\* andreas.nascimento@gmail.com

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi investigar a influência do metal de adição sobre as propriedades mecânicas e sobre a susceptibilidade à fissuração por corrosão sob tensão (CST) de juntas soldadas do aço inoxidável ferrítico AISI 444 em solução de  $MgCl_2$ . Dois tipos de metal de adição de aço inoxidável austenítico (E309L e E316L) foram usados, com o intuito de se produzir juntas soldadas com zonas fundidas de diferentes composições químicas. Para avaliar a susceptibilidade das juntas à CST foram realizados testes sob carga constante seguido da caracterização microestrutural dos corpos de prova testados. Os resultados de tração e dureza mostraram que a junta soldada com o metal de adição E309L apresentou limite de resistência à fratura superior ao encontrado na junta soldada com o metal de adição E316L. Testes de CST mostraram que a interface entre o metal de solda e a zona termicamente afetada (ZTA) foi a região mais susceptível à fissuração. Os resultados mostraram também que a junta do aço 444 soldada com o eletrodo E309L apresentou melhor resistência à CST. Isto pode ser atribuído a presença de uma rede de ferrite delta descontínua presente no metal de solda, a qual atuou como uma barreira à propagação de fissuras da zona fundida para a zona de ligação e ZTA do aço 444.

**Palavras-chave:** Aço AISI 444, Juntas Soldadas, Corrosão Sob Tensão (CST).

## EFFECT OF WELD METAL CHEMISTRY ON MECHANICAL PROPERTIES AND ON THE SUSCEPTIBILITY OF AISI 444 STEEL WELDMENTS TO THE STRESS CORROSION CRAKING

**ABSTRACT:** The aim of this study was to investigate the influence of the filler metal chemical composition on the mechanical properties and on the susceptibility to stress corrosion cracking (SSC) of ferritic stainless steel AISI 444 weldments in  $MgCl_2$ . Two types of filler metal of austenitic stainless steel (E316L and E309L) were used. To evaluate the SCC susceptibility of weldments, constant load tests and metallographic examinations in tested SSC specimens were conducted. The tensile and hardness tests showed that the welded joints with the filler metal E309L presented mechanical properties superior with relation to welded joints E316L. SSC results showed that the ZTA/fusion zone interface was the most susceptible to SSC. Results also showed that the 444 weldments using E309L electrode presented the best SSC resistance. This may be attributed to the presence of a discontinuous delta-ferrite network in the matrix, which acted as a barrier to cracks propagation from the fusion zone to the interface zone and HAZ of AISI 444 steel.

**Keywords:** Stainless Steel AISI 444, Weldments, Stress Corrosion Cracking

## 1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis ferríticos têm sido muito utilizados em diversas aplicações industriais que envolvem trocas térmicas devido à sua elevada resistência à corrosão sob tensão (CST) combinada com sua boa condutividade térmica <sup>(1)</sup>.

Nesse sentido, a ArcelorMittal Inox Brasil desenvolveu o aço inoxidável ferrítico AISI 444 que pode ser aplicado em diversas situações, com destaque para a indústria de açúcar e álcool. De acordo com Carvalho *et. al.* <sup>(2)</sup>, com a utilização do aço inoxidável AISI 444 para a fabricação de diversos equipamentos, houve uma redução de mais de 50% nos gastos

com manutenção e um aumento de durabilidade destes, superior em até 20 vezes quando comparados com equipamentos similares em aço carbono.

Segundo Machado *et. al.* <sup>(3)</sup>, o aço inoxidável ferrítico AISI 444 é também muito utilizado na indústria de petróleo por reunirem boas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e boa resistência a corrosão.

Por outro lado, o reparo de equipamentos desgastados de aço inoxidável ferrítico por soldagem torna-se um problema à medida que os mesmos apresentam uma soldabilidade limitada devido ao crescimento de grão exagerado na ZTA após soldagem.

A fim de contornar este problema, diversos estudos de técnicas e consumíveis para a soldagem de aços inoxidáveis ferríticos com aços inoxidáveis austeníticos têm sido realizados; com o objetivo de aliar a elevada resistência à CST e boa condutividade térmica dos aços inoxidáveis ferríticos à boa soldabilidade apresentada pelos aços inoxidáveis austeníticos, geralmente susceptíveis à CST<sup>(1)</sup>.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o efeito do metal de adição nas propriedades mecânicas e na susceptibilidade à corrosão sob tensão de aços ferríticos AISI 444 soldados utilizando metal de adição de aços inoxidáveis austeníticos (AISI 316L e AISI 309L), em meios contendo cloreto de magnésio.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 444 de 3mm de espessura foram utilizadas como metal base. Os metais de adição utilizados foram arames sólidos com espessura de 1,2 mm dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 309L e AISI 316L. A Tabela 1 apresenta as composições químicas das chapas de aço inoxidável AISI 444 e dos aços inoxidáveis austeníticos usados como metais de adição.

As chapas do aço inoxidável AISI 444 com dimensões de 130 x 70 mm, chanfradas em V, foram soldadas pelo processo de soldagem MIG (*Metal Inert Gas*), usando como metais de adição aos aços inoxidáveis do tipo 309L e 316L.

**Tabela 1.** Composição química nominal dos aços inoxidáveis utilizados

Aço Inoxidável	Composição (% em peso)							
	C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	P	Ti+Nb
AISI 444	0,025	17,50	1,75	1,00	1,00	0,030	0,040	0,80
E316L	0,02	19,50	2,8	11,7	1,7	1,0	0,02	-
E309L	0,03	23,05	0,1	13,0	0,8	0,75	-	-

Fonte: ACESITA/AS.

Os parâmetros de soldagem utilizados para ambos os metais de adição estão apresentados na Tabela 2.

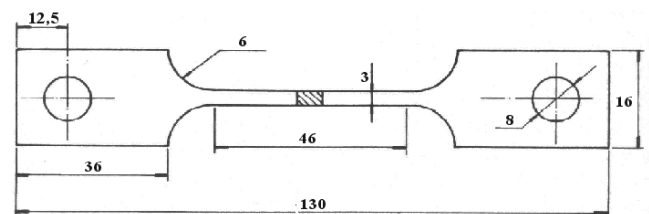
**Tabela 2.** Parâmetros de soldagem.

Parâmetros de Soldagem	
Corrente (A)	125,0
Voltagem (V)	20,0
Aporte Térmico (kJ/cm)	5,0
Velocidade de Soldagem (cm/min)	30,0
Velocidade de Alimentação do Arame (m/min)	4,0
Gás de Proteção	C25 (Ar 25%CO <sub>2</sub> )

As análises microestruturais foram realizadas por meio de um microscópio óptico e MEV. Ensaios de dureza Vickers foram realizados para determinação do perfil de dureza dos corpos de prova soldados.

O ensaio de corrosão sob tensão foi realizado num dispositivo com carregamento tipo carga constante utilizando corpos de prova de tração sem entalhe soldados transversalmente ao seu eixo. A geometria do corpo de prova utilizado no ensaio CST é mostrada na figura 1. Na sua preparação e utilização foram observados os procedimentos padronizados pelas normas ASTM G58 e ASTM E8.

O tempo necessário para ocorrência da fratura foi o parâmetro adotado para avaliar a susceptibilidade à fissuração por corrosão sob tensão dos corpos de prova soldados.

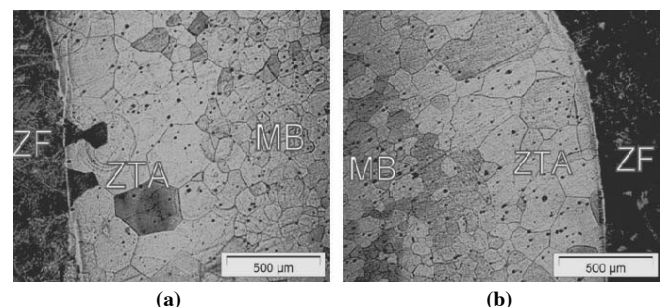


**Fig. 1.** Dimensões dos corpos de prova em milímetros.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização Microestrutural das Juntas Soldadas

A Figura 2 apresenta as microestruturas das juntas soldadas com o metal de adição E316L e E309L respectivamente. Em ambas as figuras, pode-se observar claramente o crescimento de grão na ZTA.



**Fig. 2.** Microestrutura da junta soldada com metal de adição: a) E316L e b) E309L. Ataque: Água Régia.

Segundo Oliveira e Faria <sup>(4)</sup>, a forma mais utilizada de controlar esse crescimento de grão é através da adição de estabilizantes (Ti, Nb) e do controle da energia de soldagem, de forma que quanto menor a energia de soldagem menor é o crescimento de grão.

Medidas de tamanho de grão realizadas na ZTA mostraram que o crescimento de grão foi praticamente idêntico nos dois casos. Isto indica que a diluição e a velocidade de resfriamento de ambas as juntas soldadas foram pouco influenciadas pela diferença de composição química entre os metais de adição, mostrando-se mais dependentes da energia de soldagem (5,0 KJ/cm para ambas)

As Figuras 3a e 3b apresentam microestruturas da zona fundida (ZF) das juntas soldadas com o metal de adição E316L e E309L respectivamente. Pode ser observado na ZF com metal de adição E316L (figura 3a) que a ferrite delta (fase escura) se apresenta em maior quantidade e em uma rede relativamente contínua. Por outro lado, na ZF com metal de adição E309L (Figura 3b), a ferrite delta se apresenta em menor quantidade e de forma mais descontínua.

A presença de ferrite delta em menor quantidade e de forma descontínua no metal de adição E309L pode ser atribuída à maior presença de Ni (estabilizador de austenite) na composição de metal de adição, o que reduz a formação de ferrite delta na interface austenite-ferrite no final da solidificação. Por outro lado, a presença de maior quantidade de ferrite delta e de forma relativamente contínua no metal de adição 316L pode ser atribuída à maior presença de Mo (forte estabilizador de ferrite) na composição do metal de adição; o que aumenta a formação de ferrite delta na interface austenite-ferrite no final da solidificação.

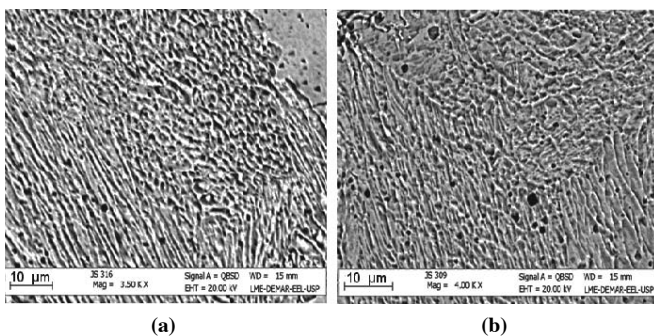


Fig. 3. Microestrutura da ZF com o metal de adição a) E316L e b) E309L. Ataque: Água Régia

Cabe ressaltar que quando a ferrite delta se forma de maneira contínua após a solidificação do metal de solda, esta contribui mais efetivamente para a propagação de fissuras CST no contorno de grão ferrítico.

Portanto, comparando as duas microestruturas das zonas fundidas, observa-se que o metal de adição E309L apresenta uma microestrutura menos susceptível à CST em relação ao metal de adição E316L uma vez que uma rede de ferrite delta descontínua dificulta a propagação de fissuras ao longo dos contornos de grão.

### 3.2. Resultados de Tração

As figuras 4a e 4b mostram os resultados de tração para ambas as juntas.

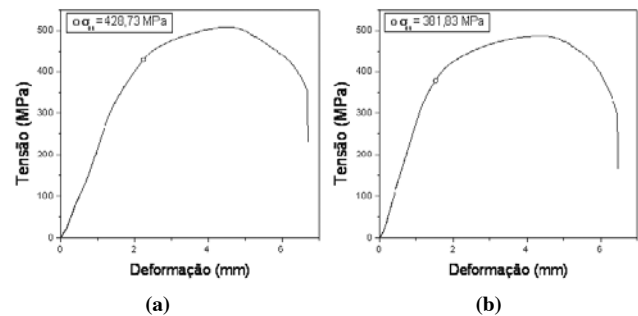


Fig. 4. Ensaio de tração mecânica realizados nas juntas soldadas com os metais de adição: a) E309L e b) E316L.

As fraturas dos corpos de prova, para ambas as juntas soldadas, ocorreram sempre na zona termicamente afetada (ZTA), o que pode ser atribuído ao crescimento de grão nesta região<sup>(7)</sup>. Pode-se observar também pelas figuras que a tensão de escoamento e o limite de resistência a tração da junta soldada com metal de adição E316L se mostraram inferiores em relação às juntas soldadas com o metal de adição E309L.

### 3.3. Dureza das Juntas Soldadas

A Figura 5 apresenta o perfil de dureza das juntas soldadas usando os metais de adição estudados. Observa-se que os valores de dureza para ambas as juntas foram bastante similares, sendo o máximo valor encontrado foi de 220 HV. Considerando que a dureza máxima requerida para aços inoxidáveis austeníticos a para evitar a CST é de 250 HV, de acordo com a NACE MR0175 <sup>(8)</sup>, ambas as juntas podem ser classificadas como aceitáveis.

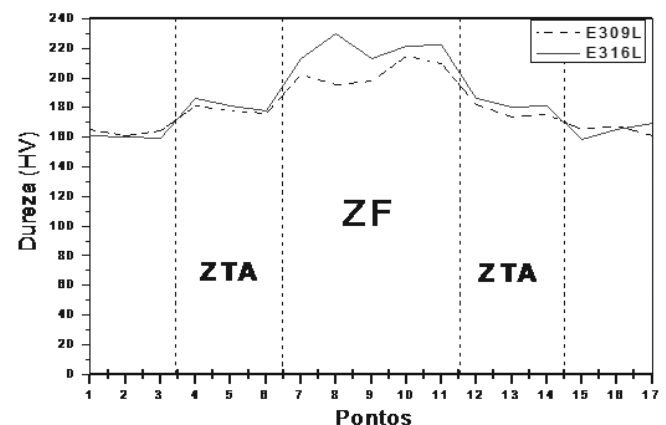


Fig. 5. Perfil de dureza do Aço AISI 444 soldado com os metais de adição E309L e E316L.

Pode ser observado também que os valores de dureza na zona fundida da junta soldada com o metal de adição E316L foram superiores àqueles encontrados na junta com metal de adição E309L. Isto pode ser atribuído principalmente à presença de Mo em maior quantidade no metal de adição E316L.

### 3.4 Resultados dos testes CST

Os ensaios de corrosão sob tensão foram realizados inicialmente utilizando-se uma tensão equivalente a 80% da tensão de escoamento do aço AISI 444 (325 MPa) e temperatura de 140°C. Nesta condição de ensaio, não houve a fissuração por CST dos corpos de prova após tempos de exposição acima de 200 horas.

De acordo com Pinto <sup>(1)</sup>, para tensões abaixo de 80% do limite de escoamento, os corpos de prova apresentam um tempo de

fratura bastante superior em relação a níveis de tensão mais altos. Isto se deve ao fato de que em tensões mais altas, o efeito do encruamento do corpo de prova é mais pronunciado sobre a fissuração por corrosão sob tensão.

Em seguida, foram realizados ensaios utilizando-se 90% da tensão de escoamento (365 MPa) e uma temperatura de 145°C. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 3. O tempo médio de ensaio foi de 113,15 horas para uma temperatura média de 145°C.

**Tabela 3.** Resultados obtidos nos ensaios de corrosão sob tensão.

M.A	Ident. CPS	T (°C)	pH Solução	Aspecto	Tensão (% $\sigma_{es}$ )	Local Fratura	Tempo para Fratura (h)
E309L	B7	140	≈ 4,0	-	80	-	< 200 - ã rompeu
E316L	A9	140	≈ 4,0	-	80	-	< 200 - ã rompeu
E316L	A3	145	≈ 4,0	DU/FR	90	ZTA/ZF	82,25
E316L	A4	145	≈ 4,0	FR	90	ZTA	80,50
E309L	B3	145	≈ 4,0	FR	90	ZTA/ZF	146,45
E309L	B6	145	≈ 4,0	FR	90	ZTA/ZF	143,35

Os resultados mostraram que as juntas soldadas com o metal de adição E309L foram significativamente mais resistentes à fissuração por CST em relação às juntas soldadas com o metal de adição E316L.

#### 3.4.1 Caracterização Microestrutural

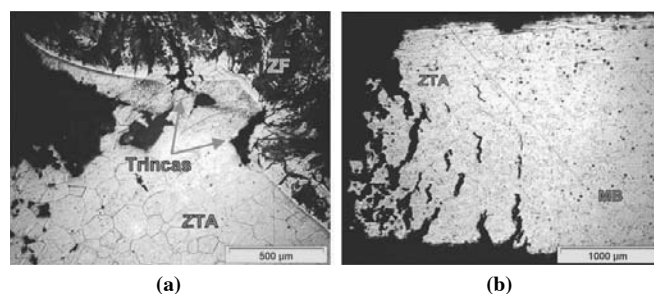
As Figuras 6a e 6b mostram microestruturas das juntas soldadas com os metais de adição estudados. Em ambas as juntas aparecem fissuras na ZTA e zona de ligação. A avaliação microestrutural juntamente com os resultados dos ensaios CST indicam que a zona de ligação (interface entre o metal de solda e ZTA) é a região mais susceptível ao fissuração por CST. De maneira geral, todas as amostras apresentaram fissuras nesta região, sendo que, na sua maioria, esta fissuração levou à ruptura dos corpos de prova.

As microestruturas sugerem também que a fissura iniciou-se no metal de solda de aço inoxidável austenítico (mais susceptível a CST) próximo à zona de ligação e propagou-se na direção da zona de ligação e da ZTA do aço ferrítico AISI 444.

Portanto, a maior resistência à CST da junta soldada de aço AISI 444 usando metal de adição E309L pode ser atribuída a presença de uma rede descontínua de ferrite delta no contorno de grão da austenite; que dificultou a propagação da fissura nucleada no metal de adição para a zona de ligação e ZTA do aço AISI 444.

É importante ressaltar também que, embora o aço AISI 444 seja praticamente imune à CST na condição não soldada, o mesmo passa a apresentar susceptibilidade quando unido com aços austeníticos. Isto, provavelmente, se deve ao fato de que: (1) elementos (Cr, C, Ni, etc) provenientes do metal de adição migram para a zona termicamente afetada durante a

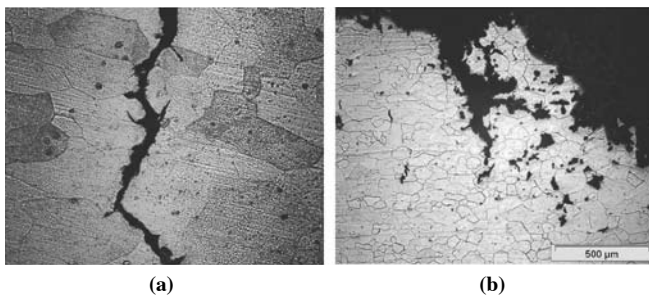
soldagem e (2) a ZTA está sujeita a ciclos térmicos rápidos na soldagem. O efeito combinado destes dois fenômenos acarreta a precipitação de partículas de segunda fase nesta região, as quais constituem pontos preferenciais de ataque (ver figuras 8c e 8d)).



**Fig. 6.** Fissuras (trincas) de Corrosão sob tensão a) na zona de ligação da junta soldada com o metal de adição E309L e b) na ZTA da junta soldada com o metal de adição E316L. Microscopia Ótica. Ataque eletrolítico: Ácido Oxálico.

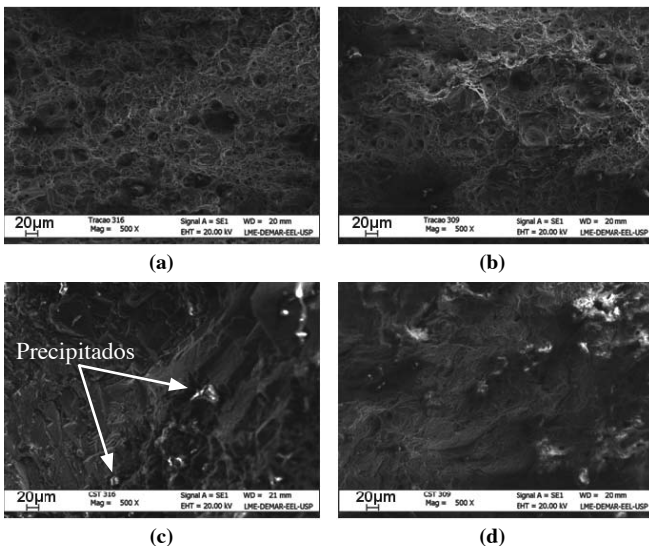
As análises metalográficas mostraram também que a morfologia das fissuras se revelou mista com fissuras intergranulares e fissuras transgranulares e algumas apresentando ramificações. As mesmas ocorreram sempre na direção perpendicular à tensão aplicada, o que também as caracterizam como fissuras de corrosão sob tensão.

A Figura 7 (a) mostra uma fissura intergranular que ocorreu na zona termicamente afetada. Vale ressaltar que a região da ZTA está sujeita a precipitação de carbonetos, o que pode resultar em heterogeneidade composicional na região dos contornos de grão, tornando essas áreas anódicas em relação ao restante do grão, e por conseguinte, acelerando o desenvolvimento de fissuras intergranulares <sup>(9)</sup>. Na Figura 7 (b) pode-se observar várias fissuras com morfologias transgranulares.



**Fig. 7.** Fissura: a) Intergranular de CST desenvolvida na junta soldada com o metal de adição E309L. Aumento: 200 x; b) Transgranulares de CST desenvolvida na junta soldada com o metal de adição E309L. Microscopia Ótica. Ataque eletrolítico: Ácido Oxálico.

As Figuras 8a a 8d apresentam a superfície de fratura de dois corpos de prova submetidos a ensaios de tração e dois corpos de prova submetidos a ensaios de CST. Nos corpos de prova de tração (Figuras 8a e 8b), pode notar a presença de “dimples” em todas as amostras, caracterizando-se o aspecto dúctil da fratura.



**Fig. 8.** Microfratografias de CPs ensaiados por: a) Tração Mecânica – Metal de adição E316L; b) Tração Mecânica – Metal de adição E309L; c) CST – Metal de adição E316L; d) CST – Metal de adição E309L.

Como os rompimentos durante os ensaios de tração ocorreram na ZTA do aço AISI 444, já se esperava o aspecto dúctil, por tratar-se de um aço inoxidável ferrítico que normalmente apresenta este tipo de fratura.

Na Figura 8c e 8d são apresentadas as superfícies de fratura das duas juntas soldadas rompidas por CST. Pode-se observar claramente o aspecto frágil da fratura através de facetas de clivagem e “marcas de rios”, em função do fenômeno da corrosão sob tensão. Pode-se notar também a presença significativa de precipitados na superfície de fratura das juntas rompidas por CST; o que não se observa nos corpos de prova rompidos por tração.

Análises de energia dispersiva revelaram que estes precipitados são provavelmente carbonetos  $M_{23}C_6$  e/ou  $M_7C_3$ .

#### 4. CONCLUSÃO

A partir das análises e observações feitas, pode-se concluir que:

- A microestrutura da ZTA, no que se refere ao tamanho de grão não foi afetada pelo tipo de eletrodo empregado para a soldagem;
- Nos ensaios de tração e dureza Vickers, as juntas soldadas com o metal de adição E309L apresentaram propriedades mecânicas consideravelmente superiores às juntas soldadas com o metal de adição E316L;
- A partir dos ensaios de corrosão sob tensão em soluções aquosas de cloreto de magnésio ficou evidenciado que todos os corpos de prova fissuraram por CST, principalmente para níveis de carregamento próximos do limite de escoamentos da junta;
- O eletrodo E309L apresenta-se como o metal de adição mais indicado para uso nas soldas de reparo a serem realizadas em equipamentos compostos de aço inoxidável ferrítico AISI 444 sujeitos à CST. A microestrutura formada por uma rede de ferrite delta descontínua dificulta a propagação de fissuras do metal de adição para a zona de ligação e ZTA do aço AISI 444.
- A formação da ferrite delta distribuída de forma contínua na zona fundida das juntas soldadas com o metal de adição E316L contribuíram para a maior susceptibilidade à corrosão sob tensão dessas juntas. O efeito maléfico da ferrite aparentemente não depende somente da sua quantidade, mas também da sua morfologia.

#### AGRADECIMENTOS

À CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- [1] PINTO, D. F. Comportamento em Corrosão Sob Tensão de um Aço Inoxidável Ferrítico AISI 444 Soldado com Aço Inoxidável Austenítico AISI 316LSi, em Meios Contendo Cloretos. 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2006.
- [2] CARVALHO, J. A. N.; BÁLSAMO, P. S.; ANDRADE, J. R.; SREEKUMAR, K. Tubos de aço P444A para Aquecimento de Caldo em Usinas de açúcar. 2002. 17 f, Relatório Técnico – Acesita S/A, 2002.
- [3] MACHADO, J. P. S. E.; SILVA, C. C.; SANT’ANA, H. B.; FARIAS, J. P. Estudo da Sensitização Causada pelo Ciclo Térmico de Soldagem no Aço Inoxidável Superferrítico AISI 444. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2005.

- [4] OLIVEIRA, T. R.; FARIA, R. A. Metalurgia da Soldagem dos Aços Inoxidáveis Ferríticos. In: SEMINÁRIO INOX 2000. 4º, 2000, São Paulo. p.85-92.
- [5] GUIMARÃES, R. F.; MIRANDA, H. C.; FARIAS J. P. Avaliação do Desempenho do Aço AISI 444 para Aplicação como “Lining” em Torres de Destilação. Ceará, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2008.
- [6] SILVA, C. C.; FARIAS, J. P.; MIRANDA, H. C.; GUIMARÃES, R. F.; MENEZES, J. W. A.; NETO, M. A. M. Microstructural characterization of the HAZ in AISI 444 ferritic stainless steel welds. *Materials Characterization*. Brazil, Federal University of Ceará. v.59. p. 528–533. 2008.
- [7] SEDRIKS, A.J. Corrosion of stainless steel, 2.ed. USA: John Wiley Sons Inc, 1996. p. 47-53.
- [8] LOGAN, H. L. Stress Corrosion”. In: NACE Basic Corrosion Course, Anton de Brasunas, 11a ed., chapter 10, June, Houston, Texas. 1990.
- [9] BARBOSA, R. P. Efeito do Tipo de Metal de Adição e do aporte Térmico na Corrosão Sob Tensão de Juntas Soldadas de Aço Inoxidável Austenítico AISI 304. 1995. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1995.
- [10] ŁABANOWSKI, J. Stress corrosion cracking susceptibility of dissimilar stainless steels welded joints. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Gdansk, Poland. v. 20. p. 1-2. January-February 2007.
- [11] VIEIRA, D.H.; PINTO, D.F.; CARVALHO, J.A.N.; BÁLSAMO, P.S.S.; GODEFROID, L.B.; CÂNDIDO, L.C. Estudo do Fenômeno de Corrosão em Juntas Soldadas de Aços Inoxidáveis. In: 60º Congresso Anual da ABM. Julho/2005, Belo Horizonte. p. 3. 2005.