

SUSCETIBILIDADE À CORROSÃO SOB TENSÃO DE AÇO AISI 444 SOLDADO PELO PROCESSO MIG, COM METAL DE ADIÇÃO DE AÇO AISI 316LSi, EM MEIOS CONTENDO CLORETOS¹

Daniel Fraga Pinto²
José Antonio Nunes de Carvalho³
Paulo Sérgio de Sairre Bálamo⁴
Leonardo Barbosa Godefroid⁵
Luiz Cláudio Cândido⁵

Resumo

Avaliou-se a suscetibilidade de um aço inoxidável ferrítico do tipo AISI 444 soldado com o aço inoxidável austenítico do tipo AISI 316LSi, pelo processo MIG, quanto ao fenômeno de corrosão sob tensão (CST), em soluções aquosas contendo 1M HCl, pH \cong 0,0 à temperatura ambiente e 42% em peso de MgCl₂, pH \cong 4,0 na temperatura de ebulição (143°C). As técnicas empregadas para os ensaios de CST foram: carga constante e deformação constante no eletrodo. Através de parâmetros eletroquímicos obtidos nos ensaios de polarização potenciodinâmica, caracterizou-se o sistema eletroquimicamente. Empregaram-se metodologias da mecânica de fratura, onde foram utilizados corpos-de-prova (CPs) do tipo em U, para os ensaios sob deformação constante no eletrodo e do tipo tração-compacto C(T), pré-trincados por fadiga na zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda parcial para os ensaios sob carga constante no eletrodo. Foram analisados os aspectos fractográficos dos CPs trincados por CST. Verificou-se que o material em estudo é suscetível a CST nos dois meios corrosivos estudados. Notou-se que o trincamento por CST ocorre a partir da pré-trinca, na zona austenítica, e prossegue para a zona ferrítica. Análises microfractográficas indicaram que, tanto na região da fratura por CST, quanto na zona de ruptura mecânica final por tração a fratura foi frágil.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis; Juntas soldadas; Corrosão sob tensão

STRESS CORROSION CRACKING OF STAINLESS STEEL AISI 444 WELDED BY MIG PROCESS, WITH AISI 316LSi, IN ENVIRONMENT CONTAINING CHLORIDES

Abstract

The behavior in stress corrosion cracking (SCC) of ferritic stainless steel AISI 444 welded by MIG process with austenitic stainless steel AISI 316LSi was evaluated. Aqueous solutions containing 1M HCl, pH \cong 0,0 at room temperature and 42 weight% of MgCl₂ at the boiling temperature (143°C) have been employed. The experiments included constant load and constant deformation of the electrode. The systems have been electrochemically characterized through parameters obtained using potenciodynamic polarization. Methodologies of the fracture mechanic were applied where U-bend specimens and precracked compact type - C(T) - specimens have been used. Their fractographic aspects after SCC were analyzed. It was verified that the material in study was SCC susceptible in aqueous solution containing HCl, pH \cong 0,0 at room temperature and 42 weight% MgCl₂. It was observed that the cracks start from the precrack in the austenitic area and it continues inside the ferritic area.

Key words: Stainless steels; Welding; Stress corrosion cracking.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Eng^o Metal.; mestrando REDEMAT; dfp1@zipmail.com.br

³ Eng^o Metal.; M.Sc.; ACESITA S.A.; jancarvalho@acesita.com.br

⁴ Eng^o Mecânico.; M.Sc.; D.Sc.; ACESITA S.A.; pbalsamo@acesita.com.br

⁵ Eng^o Metal.; M.Sc.; D.Sc.; Membro da ABM; Prof. Adjunto; Grupo de Estudos sobre Fratura de Materiais; Dep. Eng. Metalúrgica e de Materiais – Escola de Minas/UFOP; candido@em.ufop.br; leonardo@demet.em.ufop.br

INTRODUÇÃO

Os problemas de corrosão são freqüentes e ocorrem nas mais variadas atividades. A necessidade de redução de custos e aumento da vida útil de componentes estruturais tem dado impulso às pesquisas básicas e aplicadas neste campo, tratando ou modificando os materiais para melhorar seu desempenho principalmente sob o aspecto de corrosão, segundo Chawla⁽¹⁾ e Gentil.⁽²⁾

Dentro da engenharia de materiais, destaca-se o desenvolvimento de técnicas e consumíveis para soldagem de aços inoxidáveis ferríticos com aços inoxidáveis austeníticos, objetivando aliar a elevada resistência à corrosão sob tensão e boa condutividade térmica dos aços inoxidáveis ferríticos à boa soldabilidade apresentada pelos aços inoxidáveis austeníticos.

Nos últimos anos, os aços inoxidáveis têm recebido considerável atenção por uma série de razões tais como: elevada resistência à corrosão e razões econômicas, ou seja, substituição de ligas caras por alternativas mais baratas e de maior vida útil, elevada resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas.

Os ensaios de corrosão sob tensão em juntas soldadas com aplicação de mecânica de fratura como ferramenta são métodos comumente usados para avaliar o comportamento do material quando, aliado ao meio corrosivo, tem-se tensões residuais ou aplicadas e um material suscetível. Pesquisas estão sendo feitas no sentido de se entender melhor o comportamento da junta soldada em aços inoxidáveis em meios agressivos submetidos a esforços externos e, desta forma, viabilizar o desenvolvimento de técnicas e consumíveis para soldagem de aços inoxidáveis dentro dessas condições.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Realizou-se, na empresa ACESITA S/A, a soldagem empregando-se o processo MIG (*Metal Inert Gas*) de chapas de aços inoxidáveis do tipo AISI 444 e, como metal de enchimento, aço inoxidável do tipo AISI 316LSi. As Tabelas 1 e 2 apresentam a composição química dos materiais estudados.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável ferrítico AISI 444 (metal base), (% peso).

C	Cr	Mo	Nb	Ti	Ni	Mn	Cu
0,009	17,68	1,81	0,17	0,14	0,2	0,14	0,039
V	Al	Co	Si	P	S	N ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)
0,048	0,009	0,028	0,36	0,027	0,002	118	40

Tabela 2. Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 316LSi (metal de adição), % peso.

C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	P	S
0,020	17,5	2,8	12,2	1,7	1,0	0,020	0,007

Para avaliar as características eletroquímicas dos sistemas, foram realizados ensaios de polarização potenciodinâmica empregando-se um potenciostato tipo *Princeton Applied Research* – modelo 237A. As amostras, com 1 cm² de área, foram lixadas até a granulometria número 600 e desengraxadas. Os ensaios foram realizados em uma célula eletroquímica do tipo plana, com 3 eletrodos, em condições aeradas e na temperatura ambiente. Para os ensaios de corrosão sob

tensão, utilizou-se a técnica de carga constante com corpo-de-prova (CP) do tipo tração-compacto, C(T), e a de deformação constante do eletrodo (CP em U). Os meios corrosivos utilizados foram soluções aquosas de $MgCl_2$, 42% em peso à temperatura de $143^\circ C$ (temperatura de ebulição), $pH \cong 4,0$ e também soluções aquosas de ácido clorídrico (HCl, 1M) a um pH próximo de zero à temperatura ambiente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 (a,b,c,d) mostra fotomicrografias apresentando algumas características microestruturais da junta soldada. Pode-se observar as três zonas principais: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB).

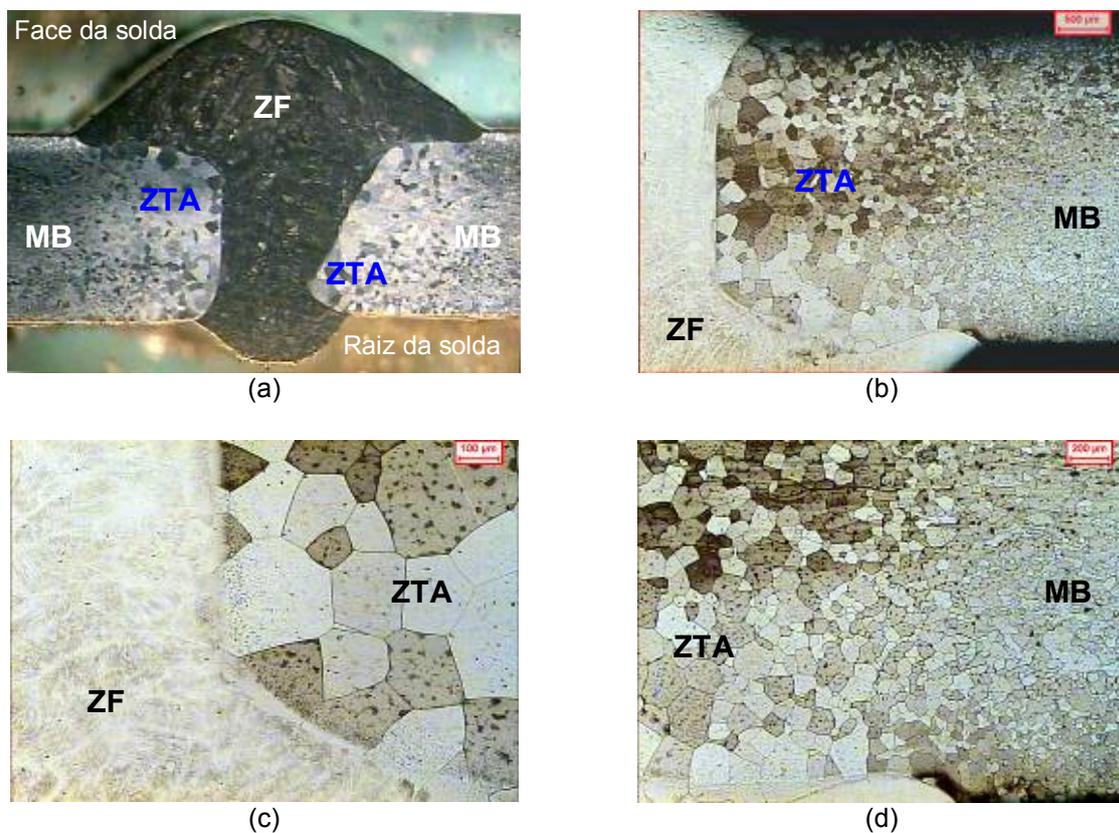


Figura 1. Junta soldada do aço inoxidável ferrítico AISI 444 soldado com o consumível austenítico AISI 316LSi; Reativo: Villela; (a) vista frontal da junta (10X); (b) micrografia mostrando as três zonas (25X); (c) interface entre ZF e ZTA (100X); (d) interface entre ZTA e MB (50X).

Pode-se observar, a partir da Figura 1, um aumento do tamanho de grão na ZTA. Oliveira e Faria⁽³⁾ destacam que a maneira mais utilizada para controlar este tamanho de grão, além dos estabilizadores (Ti, Nb), é através da energia de soldagem. Quanto menor o seu valor, menor é o tamanho de grão resultante. Isto se deve a menor aporte térmico cedido à peça a ser soldada. Portanto, é aconselhável soldar com uma menor energia de soldagem possível para obtenção de grãos menores e uma ZTA com propriedades mecânicas adequadas.

A energia de soldagem, função dos parâmetros de soldagem foi calculada e o valor obtido foi de $5,6 \text{ kJ/cm}$. Brandi e Faria⁽⁴⁾ consideram valores de energia da ordem de

5kJ/cm como sendo baixos, enquanto valores da ordem de 8 kJ/cm são considerados altos.

Ensaio de polarização

A partir de vários ensaios de polarização, pôde-se caracterizar o sistema através do levantamento de parâmetros eletroquímicos. A Figura 2 apresenta as curvas de polarização para os dois aços ferríticos estudados por Vieira *et al.*,⁽⁵⁾ comparando-os com o aço AISI 444, do presente trabalho.

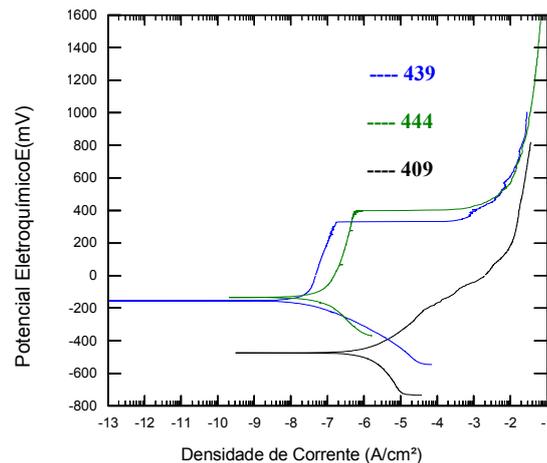


Figura 2. Curvas de polarização potenciodinâmica; 0,166 mV/s; T = 20°C; sistemas: aço inoxidável AISI 444, AISI 439 e AISI 409 em soluções aquosas contendo 3,5% NaCl.

Nota-se que o aço 409 apresentou um comportamento pior do ponto de vista eletroquímico. Isto se deve, principalmente, pelo fato deste apresentar menor teor de elementos de liga em sua composição química, principalmente o cromo.

Ensaio de Corrosão sob Tensão

A Figura 3 (a,b,c) apresenta fotografias de CPs ensaiados em soluções contendo ácido clorídrico.

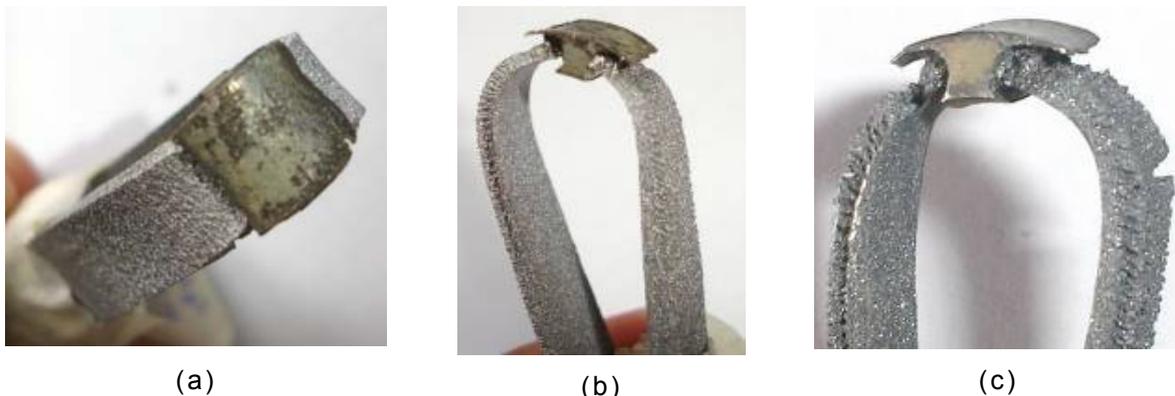


Figura 3. CPs ensaios sob tensão com deformação constante no eletrodo em HCl, pH \cong 0,0; temperatura ambiente; sistema: AISI 444/ AISI 316LSi.

Nota-se na Figura 3 um ataque superficial bastante intenso na região do metal base (aço ferrítico) que, ao longo do ensaio, adquiriu uma coloração escura, resultado da

severidade do meio corrosivo resultando, inclusive, em perda de massa da ordem de 23% em peso para os CPs pesados antes e após os ensaios.

Contudo, não ficou evidenciada, nos CPs, a presença de trincamento por CST na região austenítica (zona fundida) quando analisados com instrumentos óticos como lupas e microscópio ótico para um tempo de ensaio de, aproximadamente, 1.000 horas conforme recomendação da norma ASTM G30-79.⁽⁶⁾

A Figura 4 apresenta fotografias de CPs ensaiados em soluções contendo cloreto de magnésio, $MgCl_2$. Estes ensaios também tiveram a duração de 1.000 horas conforme recomendação da norma.

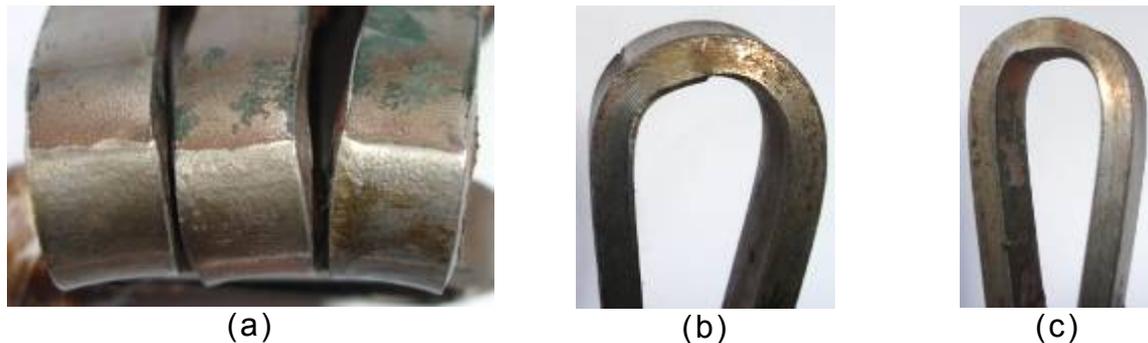


Figura 4. CPs ensaiados sob tensão com deformação constante no eletrodo em $MgCl_2$, $pH \cong 4,0$ e $T \cong 143^\circ C$; sistema: AISI 444/ AISI 316LSi.

Os CPs foram analisados com auxílio de instrumentos óticos onde pôde-se observar que estes não apresentaram trincamento por CST tanto na região do austenítico (metal de adição) quanto na região do ferrítico (metal base) dentro das condições do ensaio. Normalmente, o trincamento por CST ocorre em aços inoxidáveis austeníticos dentro dessas condições de acordo com os resultados encontrados por Paula⁽⁷⁾ e Cândido,^(8,9) que realizaram ensaios em condições semelhantes.

A partir da máquina de aplicação de carga constante, fizeram-se ensaios de CST em sistemas constituídos de um aço inoxidável ferrítico AISI 444 soldado com aço inoxidável austenítico AISI 316LSi em meios contendo altas concentrações de cloretos. Empregou-se o ensaio de carga constante por aproximar-se mais das condições reais.

A Figura 5 mostra macrofotografias de CPs tipo tração-compacto, trincados por corrosão sob tensão e que foram rompidos mecanicamente em uma máquina de tração na região final de ligamento do mesmo. Nota-se a partir do entalhe a pré-trinca por fadiga, gerada numa máquina servo-hidráulica MTS de 10t, a região de CST e finalmente o arrancamento em tração. As regiões de CST e rompimento mecânico por tração variaram em função do nível de carregamento que o material foi solicitado.

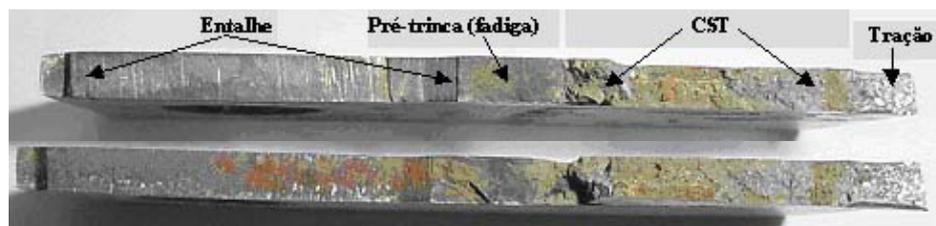


Figura 5. Macrofotografias de CPs trincados por CST; carga constante; sistema: aço AISI 444/AISI 316LSi em soluções aquosas contendo 42% $MgCl_2$ ($143^\circ C$). Notam-se os aspectos frágeis da fratura por CST e por tração.

A Figura 6 apresenta CPs ensaiados sob tensão com pré-trinca no cordão de solda (região austenítica), na ZTA (região ferrítica) e no cordão de solda parcial.

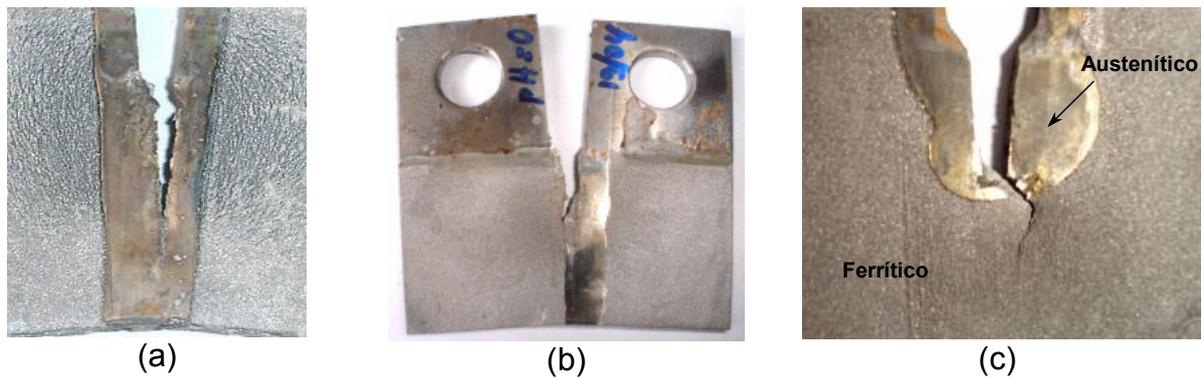


Figura 6. CPs trincados por CST em HCl, $\text{pH} \cong 0,0$ e temperatura ambiente; (a) evolução da trinca por CST na ZF; $K_I \cong 85\text{MPa}\sqrt{m}$; (b) evolução da trinca por CST na região da ZTA; $K_I \cong 74\text{MPa}\sqrt{m}$; (c) evolução da trinca por CST da região austenítica para a região ferrítica; $K_I \cong 77\text{MPa}\sqrt{m}$; sistema: AISI 444/ AISI 316LSi.

A Figura 7 (a,b,c,d) apresenta microfratografias de um CP trincado por CST, obtidas em um MEV, destacando-se o aspecto frágil da fratura, através de facetas de clivagem, em função do fenômeno de CST. Observa-se que o CP, rompido mecanicamente em tração, apresentou fratura completamente frágil, onde deveria ser dúctil por se tratar de um aço inoxidável austenítico que normalmente apresenta este tipo de fratura.

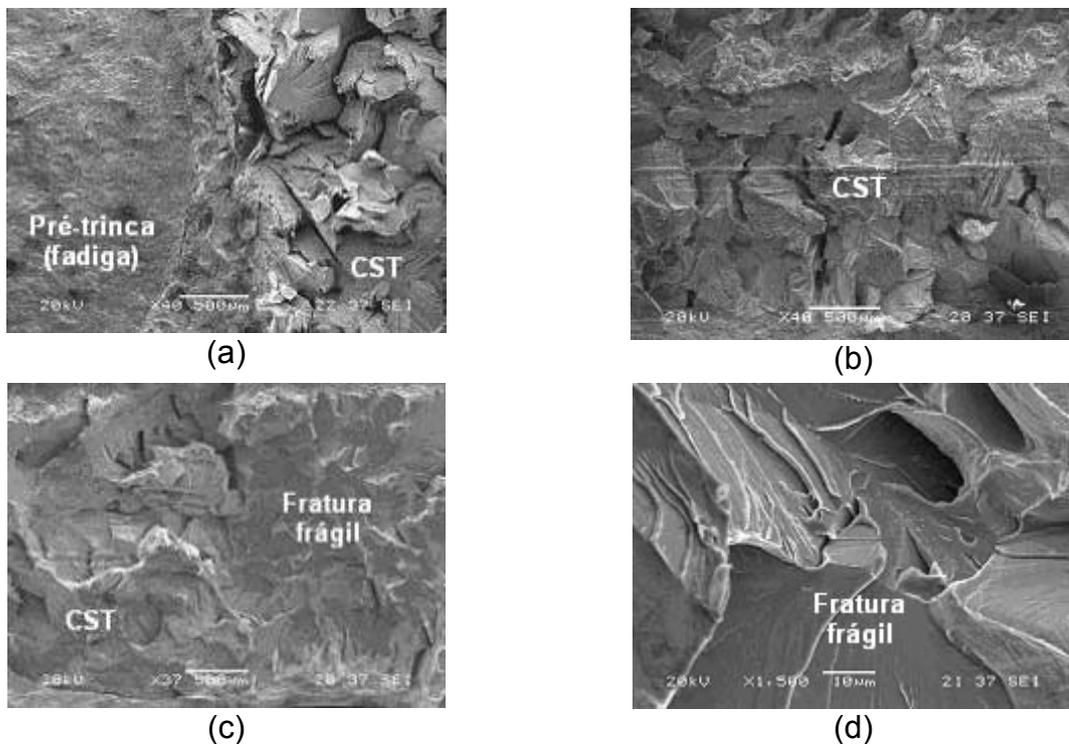


Figura 7. Microfratografias de CPs trincados por CST; carga constante; sistema aço AISI 444/AISI 316LSi em soluções aquosas com HCl, $\text{pH} \cong 0,0$ à temperatura ambiente; (a) pré-trinca por fadiga e região de CST (40X); (b) CST (40X); (c) CST e tração (37X); (d) tração (1500X); MEV.

Todos os CPs ensaiados dentro dessas condições apresentaram características de fratura frágil na região de ruptura mecânica por tração. Suspeita-se que a origem dessa fragilidade, nessa região, pode estar relacionada com o metal de enchimento utilizado, pois se trata de um material que possui em sua composição química um teor relativamente alto de silício (1%) que, apesar de melhorar a fluidez do metal de enchimento durante a operação de soldagem, pode estar promovendo, como efeito maléfico, a fragilidade do material na região soldada.

Curva Fator de Intensidade de Tensão versus Tempo de Fratura

Os ensaios de CST empregando-se carga constante no eletrodo foram realizados para vários níveis de carregamento. Em função desse nível de carregamento e do tamanho de trinca presente no material, foram calculados, a partir das relações matemáticas oriundas da mecânica de fratura, os respectivos valores do fator de intensidade de tensão para o modo I de carregamento, K_I . A Figura 8 mostra a curva fator de intensidade de tensão inicial, K_I , versus tempo. Nota-se que a medida que o nível de carregamento diminui o tempo para fratura aumenta. Abaixo de um determinado valor de K_I , não ocorre propagação de trinca por CST. Esse valor é denominado de fator de intensidade de tensão limiar, K_{ICST} .

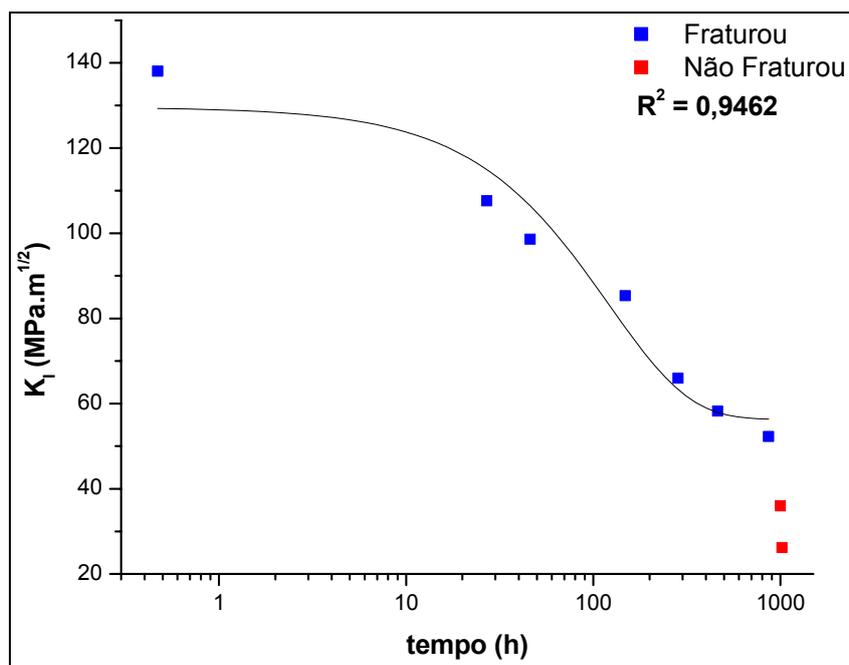


Figura 8. Curva K_I versus tempo de fratura; sistema: aço inoxidável ferrítico AISI 444 soldado com o consumível austenítico AISI 316LSi em solução contendo 1M HCl, pH \cong 0,0; temperatura ambiente.

CONCLUSÕES

- Ao contrário de outros tipos de uniões de aços inoxidáveis ferríticos soldados com aços inoxidáveis austeníticos, a combinação AISI 444/AISI 316LSi não apresentou ruptura durante a etapa de dobramento para os ensaios sob deformação constante no eletrodo;
- Nos CPs ensaiados em CST sob deformação constante no eletrodo, não se notou o aparecimento de trincas na região tracionada para um tempo de ensaio de 1.000 horas. Isso ocorreu tanto em meio contendo HCl, pH \cong 0,0, na

temperatura ambiente, quanto em meio contendo 42% em peso $MgCl_2$, $pH \cong 4,0$, em ebulição ($143^\circ C$). Normalmente esse fenômeno ocorre para aços inoxidáveis austeníticos;

- A partir dos ensaios de CST sob carga constante realizados em CPs tipo tração-compacto com pré-trinca na ZF, ZTA e no cordão de solda parcial, ficou evidenciado que estes trincaram por CST em soluções aquosas contendo cloretos principalmente para níveis de carregamento próximos do limite de escoamento do material, onde o tempo de trincamento foi relativamente curto;
- Os ensaios de CST sob carga constante em CPs tipo tração-compacto com cordão de solda parcial mostraram que as trincas por CST propagaram-se nas regiões austeníticas e ferríticas nos aços;
- Ficou evidenciado, a partir de CPs submetidos a ruptura puramente mecânica por tração, o comportamento frágil na região da ZF onde, em princípio, este deveria ser dúctil por se tratar de um aço inoxidável austenítico que normalmente apresenta este tipo de comportamento. Suspeita-se que a origem dessa fragilidade pode estar relacionada com o alto teor de silício;
- Análises microfratográficas mostraram que o tipo de fratura foi frágil com o desenvolvimento de facetas de clivagem. Isto ocorreu para região de CST e também na zona de arrancamento final por tração nos CPs;
- A partir da curva K_I versus tempo de fratura, o valor estimado de K_{ICST} para a solda de aços AISI 444/AISI 316LSi, em solução contendo 1M HCl, $pH \cong 0,0$, na temperatura ambiente foi de $50MPa\sqrt{m}$.

REFERÊNCIAS

- 1 CHAWLA, S.L.; GUPTA, R.K., Materials Selection for Corrosion Control, Editora Materials Park: ASM International, 508p. 1995.
- 2 GENTIL, V., Corrosão, Livros técnicos e científicos editora, 1996, 345p.
- 3 OLIVEIRA, T. R.; FARIA, R. A. Metalurgia da Soldagem dos Aços Inoxidáveis Ferríticos. In: SEMINÁRIO INOX 2000. 4º, 2000, São Paulo. p.85-92.
- 4 FARIA, R.A.; BRANDI, S. D. Avaliação das Propriedades Mecânicas e de Corrosão por Pite do Aço Inoxidável Ferrítico Tipo 444 Soldado pelo Processo MIG. 1999. 13 folhas. Relatório Técnico – Acesita S/A, 1999.
- 5 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. Livro de Resumos, 2005. p. 3.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Recommended Practice for Making and Using U-Bend Stress Corrosion Test Specimens, Designação: G30-79, p.860-868, 1979.
- 7 PAULA, L.W. Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão de um Aço Inoxidável Austenítico do Tipo ABNT 304 em Soluções Aquosas, Neutras e Acidificadas, Contendo Cloretos. 2000. 84p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, REDEMAT/UFOP, 2000.
- 8 CÂNDIDO, L. C. Tese de Doutorado. PPGEMM – UFMG, 1996.
- 9 CÂNDIDO, L.C.; NOLASCO, V. Avaliação comportamental em Corrosão Sob Tensão de um Aço Inoxidável Austenítico, em Meios Contendo Cloretos na Temperatura Ambiente. In: XX Congresso Brasileiro de Corrosão, 2000, p.01-09.