

# ESTUDO DA SUSCETIBILIDADE À CORROSÃO SOB TENSÃO DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO SOLDADO COM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO EM MEIOS CONTENDO CLORETOS <sup>1</sup>

*Andréia Elias Gutz<sup>2</sup>, Daniel Fraga Pinto<sup>3</sup>, José Antônio Nunes de Carvalho<sup>4</sup>,  
Leonardo Barbosa Godefroid<sup>5</sup>, Luiz Cláudio Cândido<sup>5</sup>*

## RESUMO

Avaliou-se a suscetibilidade de aços inoxidáveis ferríticos, do tipo AISI 409 e AISI 439, soldados com aços inoxidáveis austeníticos do tipo AISI 308 e AISI 309, quanto ao fenômeno de corrosão sob tensão (CST), em soluções aquosas contendo 3,5% em peso de NaCl, e 42% em peso de MgCl<sub>2</sub> na temperatura de ebulição (143°C). As técnicas empregadas para ensaios de CST foram: carga constante e deformação constante no eletrodo. Através de parâmetros eletroquímicos obtidos nos ensaios de polarização potenciodinâmica caracterizaram-se os sistemas eletroquimicamente. Empregaram-se metodologias da mecânica de fratura, onde se utilizaram CPs pré-trincados por fadiga, do tipo tração-compacto, C(T). Foram analisados os aspectos fractográficos dos CPs trincados por CST. Foi verificado que o material em estudo foi suscetível a CST em solução aquosa contendo 42% em peso de MgCl<sub>2</sub>, na temperatura de ebulição. Notou-se que o trincamento por CST ocorreu a partir da pré-trinca, na zona austenítica, e prosseguiu para a zona ferrítica. Análises microfractográficas indicaram que tanto na região da fratura por CST quanto na zona de arrancamento final por tração a fratura foi frágil.

**Palavras-chave:** aços inoxidáveis; corrosão sob tensão; cloretos

<sup>1</sup> 61º Congresso Anual da ABM – 6º ENEMET, Rio de Janeiro, 24 a 27 de julho de 2006

<sup>2</sup> Aluna de Iniciação Científica do Curso de Eng. Metalúrgica – DEMET/Escola de Minas/UFOP; [andrea@metalurgia.em.ufop.br](mailto:andrea@metalurgia.em.ufop.br)

<sup>3</sup> Engº Metal.; M.Sc.; [dfp1@zipmail.com.br](mailto:dfp1@zipmail.com.br)

<sup>4</sup> Engº Metal.; M.Sc.; ACESITA S.A.; [jancarvalho@acesita.com.br](mailto:jancarvalho@acesita.com.br)

<sup>5</sup> Engº 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](mailto:candido@em.ufop.br); [leonardo@demet.em.ufop.br](mailto:leonardo@demet.em.ufop.br)

## INTRODUÇÃO

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.

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.

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. 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.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Realizou-se, na empresa ACESITA S/A, a soldagem empregando-se o processo MIG (*metal inert gás*) de chapas de aços inoxidáveis do tipo AISI 409 e 439 usando como metais de enchimento aços inoxidáveis do tipo AISI 308 e 309, obtendo-se quatro combinações diferentes. A partir destas foram realizados diferentes ensaios e análises. A Tabela 4.1 apresenta a composição química dos materiais estudados. As Tabelas 4.2 e 4.3 mostram algumas propriedades mecânicas dos materiais.

Tabela 4.1- Composição química dos materiais (% peso).

AISI	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti
308	0,08	2,0	1,0	0,045	0,030	19 - 21	10 - 12	-	-
309	0,20	2,0	1,0	0,045	0,030	22 - 24	12 - 15	-	-
409	0,007	0,143	0,44	0,016	0,001	11,315	0,186	0,020	0,177
439	0,009	0,195	0,48	0,020	0,001	17,156	0,185	0,190	0,159

Para avaliar as características comportamentais eletroquímicas dos diferentes sistemas, foram realizados ensaios de polarização potenciodinâmica empregando-se um potenciostato tipo *Princeton Applied Research* – modelo 237A. As amostras, com 1 cm<sup>2</sup> 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).

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas dos materiais soldados.

<b>Aço AISI</b>	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)
<b>409 - 308</b>	355	500
<b>439 - 309</b>	391	519
<b>439 - 308</b>	403	533
<b>409 - 309</b>	389	500

$\sigma_e$  - limite de escoamento;  $\sigma_{uts}$  - limite de resistência;

Tabela 4.3 - Microdureza Vickers

<b>Aço AISI</b>	<b>MB</b>	<b>ZTA</b>	<b>ZF</b>
409 - 308	218	165	303
439 - 309	182	151	221
439 - 308	175	186	296
409 - 309	155	154	259

MB – metal base; ZTA – zona termicamente afetada; ZF – zona fundida.

Para os ensaios de corrosão sob tensão com carga constante no eletrodo, os CPs tração-compacto foram pré-trincados, a partir do entalhe, em uma máquina servo-hidráulica, MTS de 10 ton., de acordo com a norma ASTM E 1820-01. O fator de intensidade de tensão no vértice da trinca,  $K_1$ , foi calculado de acordo com a Equação 1:

$$K_1 = \frac{P f\left(\frac{a}{W}\right)}{B\sqrt{W}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = f(\alpha) = \frac{(2 + \alpha)(0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4)}{(1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}}$$

onde,  $K_1$  – fator de intensidade de tensão, segundo o modo trativo de deformação;  
 P – carga; B – espessura; W – largura; a – Comprimento de trinca;  $f(a/W)$  – Fator geométrico (*compliance*).

Assim, por exemplo, para carga aplicada na máquina de 58,23 kgf (aproximadamente 80% do limite de escoamento), onde através da haste (braço) da mesma multiplica-se por um fator de 10 vezes, e transformando-se para Newton, tem-se  $K_1 \cong 68\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 (a,b) apresenta microfratografias dos CPs que foram ensaiados em tração, obtidas no MEV, destacando-se o aspecto dúctil da fratura, através da presença de *dimples*. Os CPs romperam na região do metal base, evidenciando a boa qualidade da solda.

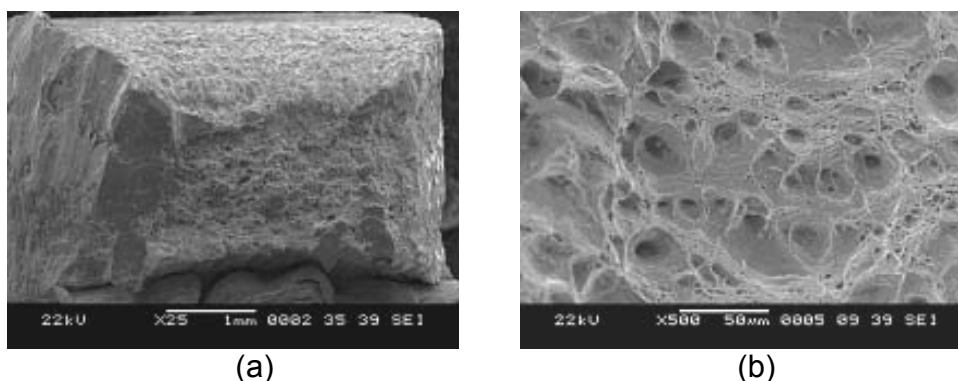
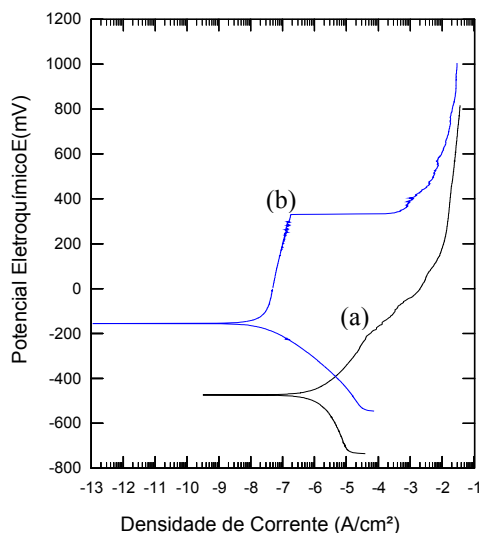


Figura 1 - Microfratografias de CPs de aço AISI 409 soldado com aço AISI 308 ensaiados em tração. Fratura dúctil, presença de *dimples*; MEV: (a) 25X e (b) 500X.

A partir de ensaios de polarização potenciodinâmica, puderam-se caracterizar os diferentes sistemas através do levantamento de parâmetros eletroquímicos. A Figura 2 mostra, curvas de polarização potenciodinâmica para os aços inoxidáveis do tipo AISI 409 e 439, respectivamente. Nota-se que o aço inoxidável AISI 439 teve o melhor desempenho, pois possui maior teor de elementos de liga, particularmente, o cromo.



Figuras 2 - Curvas de polarização potenciodinâmica; 0,166 mV/s; T = 20°C; sistema: aço inoxidável AISI 409 (a) e AISI 439 (b) em soluções aquosas contendo 3,5% NaCl.

Foram realizados ensaios de deformação constante no eletrodo nas quatro combinações de aços inoxidáveis ferríticos soldados com aços inoxidáveis austeníticos. Estes ensaios foram realizados com soluções aquosas contendo 42% (peso) de  $MgCl_2$  na temperatura de ebulição (aproximadamente  $143^\circ C$ ). A Figura 3 apresenta CPs que foram submetidos aos ensaios de CST; verificou-se que em aproximadamente 200 horas de ensaio os CPs não apresentaram trincamento.



Figura 3 - Corpos-de-prova de aço inoxidável ferrítico (AISI 439) soldado com metal de enchimento de aço inoxidável austenítico (AISI 308); em soluções aquosas contendo 42% $MgCl_2$  ( $143^\circ C$ ).

A partir da máquina de aplicação de carga constante, fizeram-se ensaios de CST em sistemas constituídos de aços inoxidáveis ferríticos soldados com aços inoxidáveis austeníticos em meios contendo altas concentrações de cloretos, por exemplo, 42% (peso) de  $MgCl_2$ , na temperatura de ebulição ( $\cong 143^\circ C$ ). Empregou-se o ensaio de carga constante por aproximar-se mais das condições reais. Verificou-se que com uma carga de 95% do limite de escoamento dos materiais, todos os CPs tiveram evolução da trinca por corrosão sob tensão. Para estas condições, o tempo médio para a propagação de trincas foi de aproximadamente 48 horas, até o término do ensaio, em todos os materiais. A Figura 4 (a,b,c,d) mostra alguns CPs trincados por CST.



(a)



(b)

Figura 4 - CPs do tipo tração-compacto, ensaiados em soluções aquosas contendo 42% $MgCl_2$  ( $143^\circ C$ ), observa-se a evolução da trinca por CST;  $K_I = 68 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ; (a) aço AISI 409 soldado com aço AISI 309; (b) AISI 409/AISI 308 (ruptura completa); (c) AISI 409/AISI 309; AISI 409/AISI 308.

A Figura 5 mostra fotomicrografias de um CP que sofreu CST. Observou-se que os CPs apresentaram trincamento, com trincas principais, finas e agudas partindo diretamente dos entalhes dos CPs.

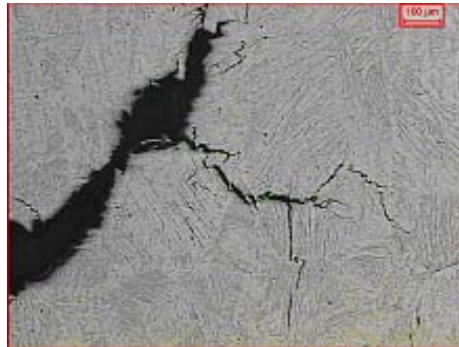


Figura 5 - Fotomicrografia de um CP (aço AISI 409) trincado por CST na região do cordão de solda (metal de adição: AISI 308). Nota-se a trinca principal e suas ramificações; 100X. Reativo: Vilela.

A Figura 6 mostra claramente a região de fratura e trincamento no aço austenítico (ZF); observa-se, também, a região do aço ferrítico (ZTA).



Figura 6 - Fotomicrografia de um CP trincado por CST. Nota-se que a trinca principal está na região do aço inoxidável austenítico (cordão de solda); 50X. Reativo: Vilela.

A Figura 7 (a,b) mostra as 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 10 ton., 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.

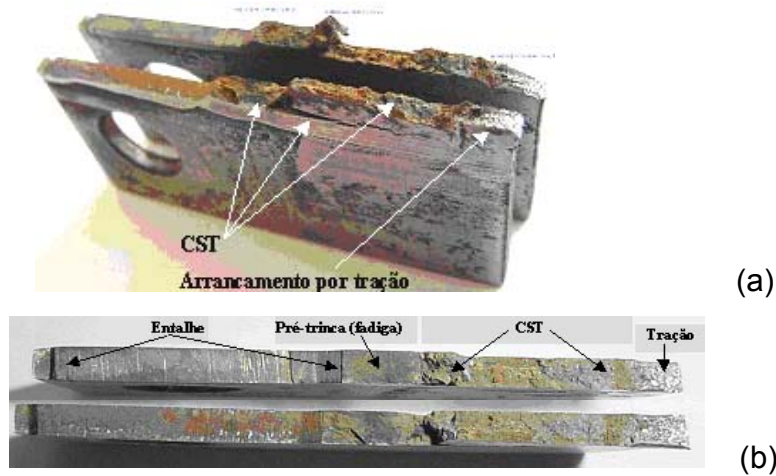


Figura 7 - Macrofotografias de CPs trincados por CST; carga constante; (a) e (b) sistema: aço AISI 409/AISI 308 em soluções aquosas contendo 42%  $MgCl_2$  ( $143^\circ C$ ). Notam-se os aspectos frágeis da fratura por CST e por tração.

A Figura 8 (a,b,c) apresenta microfractografias de CPs trincado por CST, obtida no microscópio eletrônico de varredura (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.

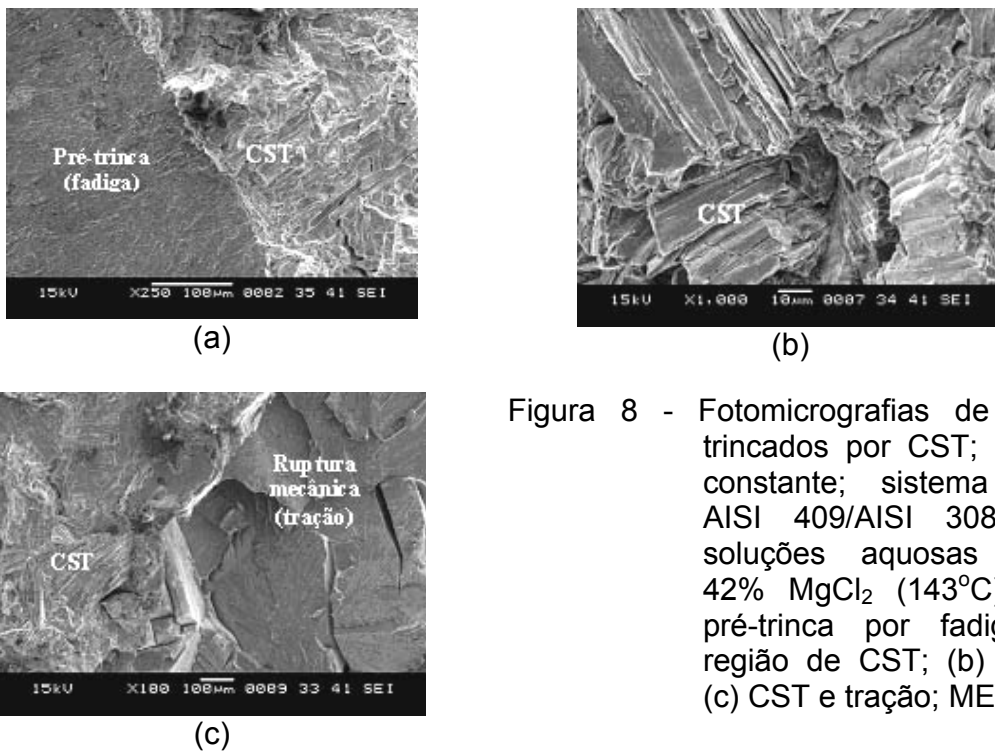


Figura 8 - Fotomicrografias de CPs trincados por CST; carga constante; sistema aço AISI 409/AISI 308 em soluções aquosas com 42%  $MgCl_2$  ( $143^\circ C$ ); (a) pré-trinca por fadiga e região de CST; (b) CST; (c) CST e tração; MEV.

Para avaliar se a trinca por CST desenvolvida na região do metal de enchimento de aço inoxidável austenítico, evolui ou não no metal base (aço inoxidável ferrítico), foram confeccionados CPs do tipo tração-compacto, produzidos com aço inoxidável ferrítico, e soldados até praticamente a metade do CP com aço inoxidável austenítico. A Figura 9 (a,b) mostra CPs deste tipo ensaiados sob carga constante. Nota-se que o trincamento ocorreu na região austenítica e propagou-se na zona ferrítica. No entanto, em alguns CPs em função do baixo nível de carregamento nos ensaios, os CPs não sofreram CST, mas as regiões mais tensionadas sofreram maior ataque corrosivo. Isto pode ser visto na Figura 10.

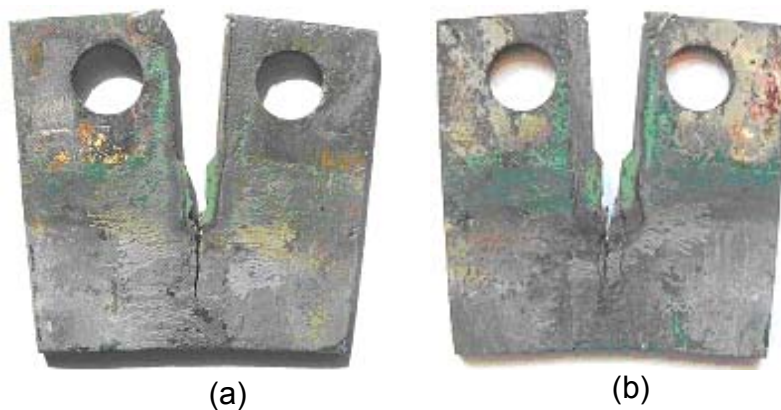


Figura 9 - Corpos-de-prova ensaiados sob carga constante; nota-se que os trincamentos ocorreram nas regiões austenítica (ZF) e ferrítica (zona de ligamento do CP); soluções aquosas contendo 42%  $MgCl_2$  ( $143^\circ C$ ).



Figura 10 - Corpo-de-prova ensaiado sob tensão; neste caso o CP não sofreu CST, mas sim ataques na região ferrítica (MB e ZTA), principalmente, na zona de ligamento do CP; soluções aquosas contendo 42%  $MgCl_2$  ( $143^\circ C$ ).

A Figura 11 (a,b,c,d) apresenta trincas desenvolvidas por CST na região da ZF (aço inoxidável austenítico) e evolução na ZTA e MB (aço inoxidável ferrítico).



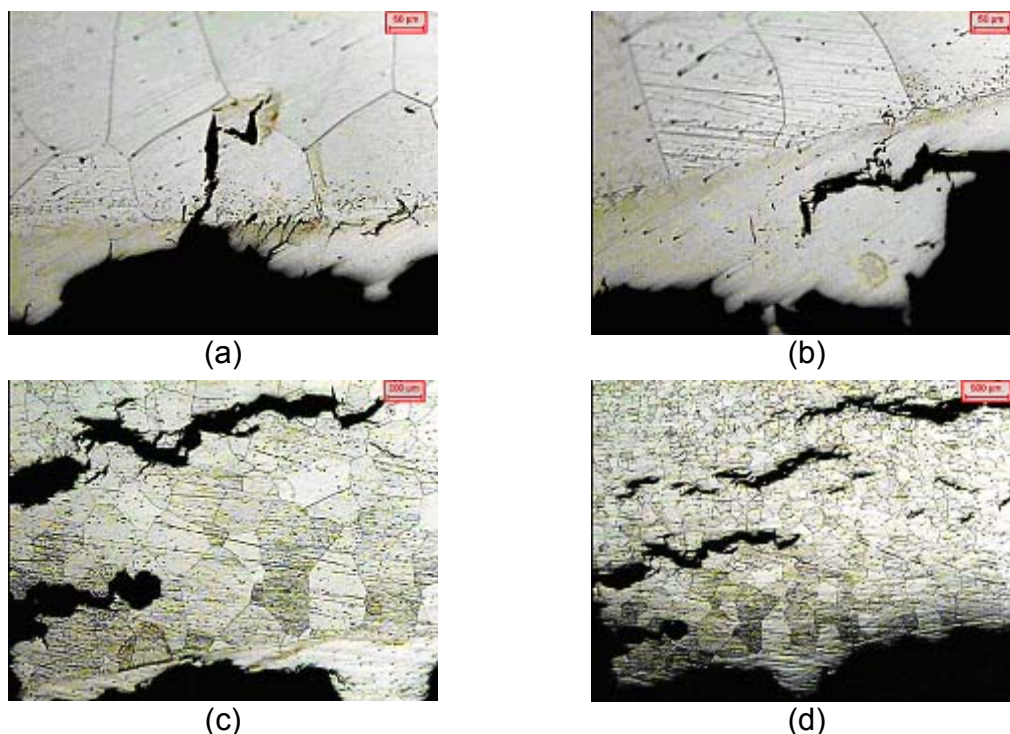


Figura 11 - Fotomicrografias de CPs trincados por CST; evolução de trincas na ZF (aço inoxidável austenítico): (a) e (b); para a ZTA e MB (aço inoxidável ferrítico): (c) e (d). Aumentos: 200X (a), (b); 50X (c); 25X (d). Ataque: Vilela.

## CONCLUSÕES

- Observou-se, através de ensaios de polarização potenciodinâmica, que o aço AISI 439 tem melhor comportamento em relação à corrosão quando comparado com o aço AISI 409, por possuir maior teor de elementos de liga, particularmente, o cromo.
- Nos CPs de aços AISI 409 e 439 soldados ensaiados em CST sob deformação constante do eletrodo não se notou o aparecimento de trincas na região tracionada, em soluções aquosas contendo 42% (peso)  $MgCl_2$ , em ebulição. Este fato, provavelmente, é decorrente do sistema de aplicação de carga do ensaio, onde o efeito do meio na desestabilização do filme é muito importante. Normalmente, o trincamento por CST ocorre em aços inoxidáveis austeníticos.
- Através dos ensaios de carga constante no eletrodo, ficou evidenciado que os aços inoxidáveis ferríticos soldados com metal de enchimento de aços inoxidáveis austeníticos trincaram por CST, em soluções aquosas com 42% (peso)  $MgCl_2$  em ebulição. Notou-se claramente o trincamento em níveis de cargas próximos do limite de escoamento do material, onde o tempo de trincamento foi relativamente curto. Para estes casos, notou-se, também, o efeito da ramificação de trincas.

- As trincas por CST, através de carga constante, propagaram-se nas regiões austeníticas e ferríticas nos aços;
- Análises microfractográficas mostraram que o tipo de fratura foi frágil, com o desenvolvimento de facetas de clivagem. Isto ocorreu para a região de CST e também na zona de arrancamento final por tração no CP.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a ACESITA/Grupo Arcelor e a Fundação Gorceix pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do trabalho.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] WAINER, E., BRANDI, S.D., MELLO, F.D.H., Soldagem Processos e Metalurgia, Editora Edgard Blocher Ltda., 1992, 492p.
- [2] CÂNDIDO, L.C., Notas de Aulas, Disciplinas: MET 227 (Corrosão e Proteção de Metais); MET 230 (Tecnologia e Metalurgia de Soldagem); MET 410 (Aços Especiais – I), UFOP.
- [3] JONES, R.H., Stress-Corrosion Cracking – Materials Performance and Evaluation, AWSM International (Ohio), 1992, 448 p.
- [4] CHAWLA, S.L.; GUPTA, R.K., Materials Selection for Corrosion Control, Editora Materials Park: ASM International, 508p. 1995.
- [5] GENTIL, V., Corrosão, Livros técnicos e científicos editora, 1996, 345p.
- [6] CÂNDIDO, L. C. Tese de Doutorado. PPGEMM – UFMG, 1996.
- [7] ACESITA/Grupo Arcelor. Curso sobre Aços Inoxidáveis. 2000.
- [8] MODENESI, P.J., Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis, SENAI/ACESITA, 100p., 2001.
- [9] GODEFROID, L.B. Fundamentos de Mecânica de Fratura. UFOP, 1995.