

ESTUDO DO FENÔMENO DE CORROSÃO EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS¹

David Hebert Vieira²
Daniel Fraga Pinto³
José Antônio Nunes de Carvalho⁴
Paulo Bálsamo⁵
Leonardo Barbosa Godefroid⁶
Luiz Cláudio Cândido⁶

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 MgCl₂ 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 MgCl₂, na temperatura de ebulição. 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 arrancamento final por tração a fratura foi frágil.

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

¹ Contribuição técnica para o 60º Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte

² Eng^o Metalurgista – Escola de Minas/UFOP – Companhia Ferroeste; david@ferroeste.com.br

³ Eng^o Metal.; mestrando REDEMAT; dfp1@zipmail.com.br

⁴ Eng^o Metal.; M.Sc.; ACESITA/Arcelor; jancarvalho@acesita.com.br

⁵ Eng^o Mecânico.; M.Sc.; D.Sc; ACESITA/Arcelor; pbalsamo@acesita.com.br

⁶ 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

Com o avanço tecnológico mundialmente alcançado, os custos de corrosão evidentemente se elevam, tornando-se um fator de grande importância a ser considerado para evitar ou minimizar futuros processos corrosivos, tendo em vista que custos com corrosão envolvem cifras astronômicas.

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 testes 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 susceptível. 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 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 1 apresenta a composição química dos materiais estudados.

Tabela 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 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).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio de Tração

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.

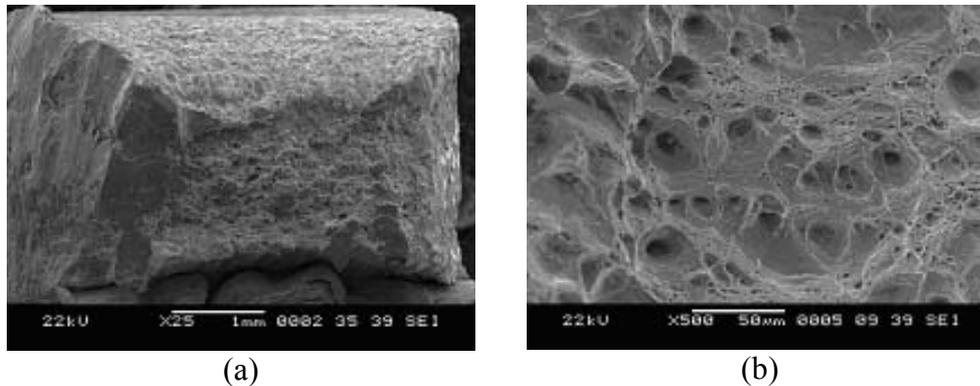


Figura 1. Microfratografias de CPs de aço AISI 409 soldado com aço AISI 308 ensaiados em tração. Fratura dúctil, presença de *dimples*; MEV: (a) 25X e (b) 500X.

Ensaio de Polarização

A partir de vários ensaios de polarização, puderam-se caracterizar os diferentes sistemas através do levantamento de parâmetros eletroquímicos. A Figura 2 mostra, por exemplo, 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.

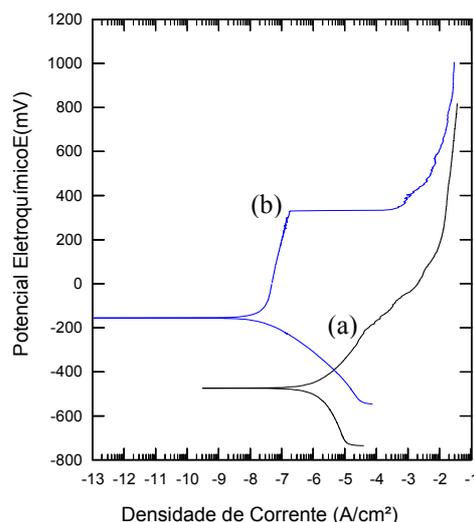


Figura 2. Curvas de polarização potenciodinâmica; 0,166 mV/s; T = 20°C; sistema: aço inoxidável AISI 409 (a) e AISI 439 (b) em soluções aquosas contendo 3,5% NaCl.

Ensaio de Corrosão sob Tensão

Foram realizados ensaios de deformação constante 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 corpos-de-prova 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% $MgCl_2$ ($143^\circ C$); não ocorreu trincamento durante aproximadamente 200 horas de ensaio.

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. A Figura 4 mostra um CP dentro da célula sendo ensaiado. 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 5 (a,b,c,d) mostra alguns CPs trincados por CST.



Figura 4. CP do tipo tração-compacto, de aço AISI 409 soldado com aço AISI 308, sendo ensaiado em soluções aquosas contendo 42% $MgCl_2$ ($143^\circ C$); $K_1 = 68 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

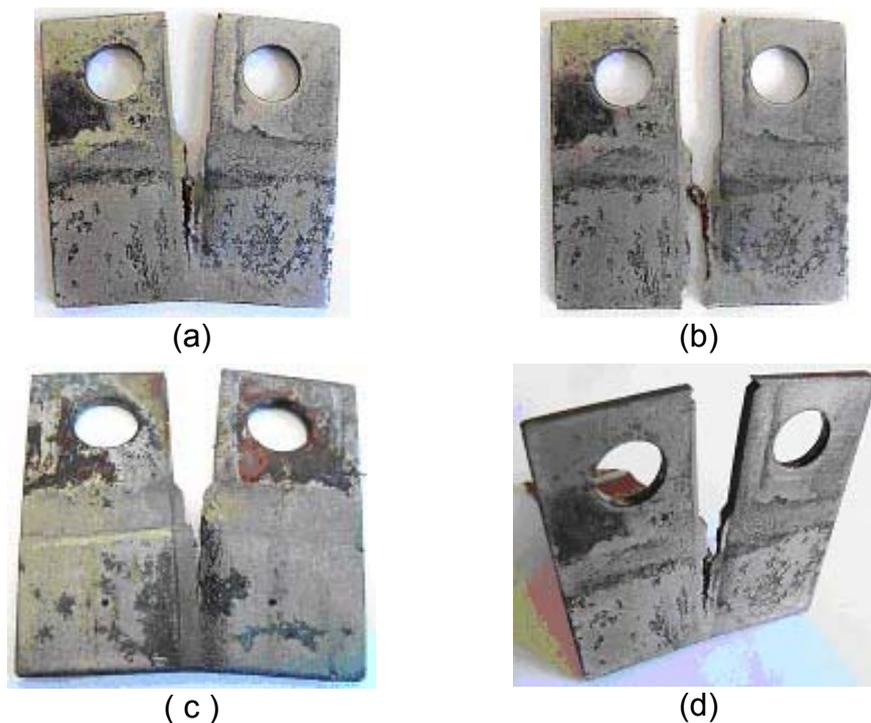


Figura 5. CPs do tipo tração-compacto, ensaiados em soluções aquosas contendo 42% $MgCl_2$ (143°C), observa-se a evolução da trinca por CST; $K_I = 68 \text{ MPa}\sqrt{m}$; (a) aço AISI 409 soldado com aço AISI 309; (b) AISI 409/AISI 308 (ruptura completa); (c) AISI 409/AISI 309; AISI 409/AISI 308.

A Figura 6 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.

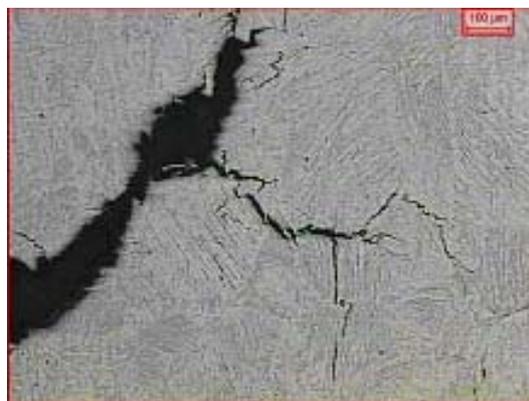


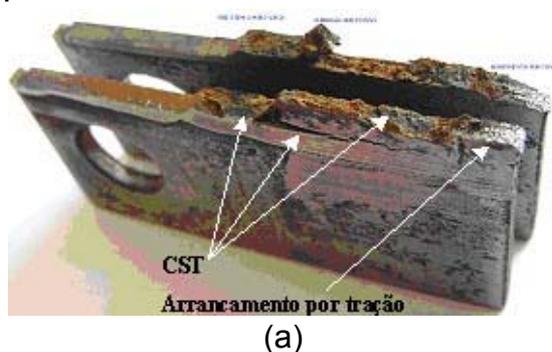
Figura 6. Fotomicrografia de um CP (aço AISI 409) trincado por CST na região do cordão de solda (metal de adição: AISI 308). Nota-se a trinca principal e suas ramificações. Reativo: Vilela.

A Figura 7 mostra claramente a região de fratura e trincamento no aço austenítico (ZF); observa-se, também, a região do aço ferrítico (ZTA).

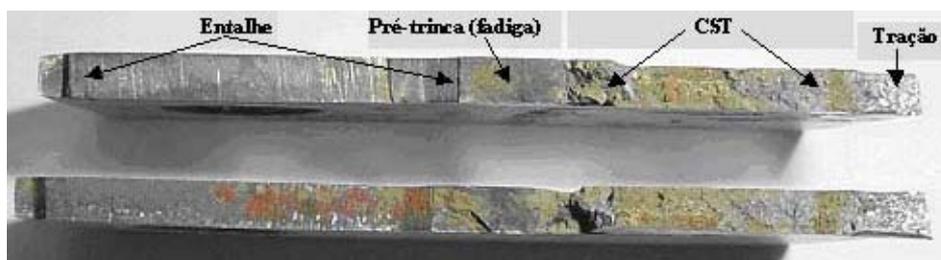


Figura 7. Fotomicrografia de um CP trincado por CST. Nota-se que a trinca principal está na região do aço inoxidável austenítico (cordão de solda). Reativo: Vilela.

A Figura 8 (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.



(a)



(b)

Figura 8. 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°C). Notam-se os aspectos frágeis da fratura por CST e por tração.

A Figura 9 (a,b,c,d) 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.

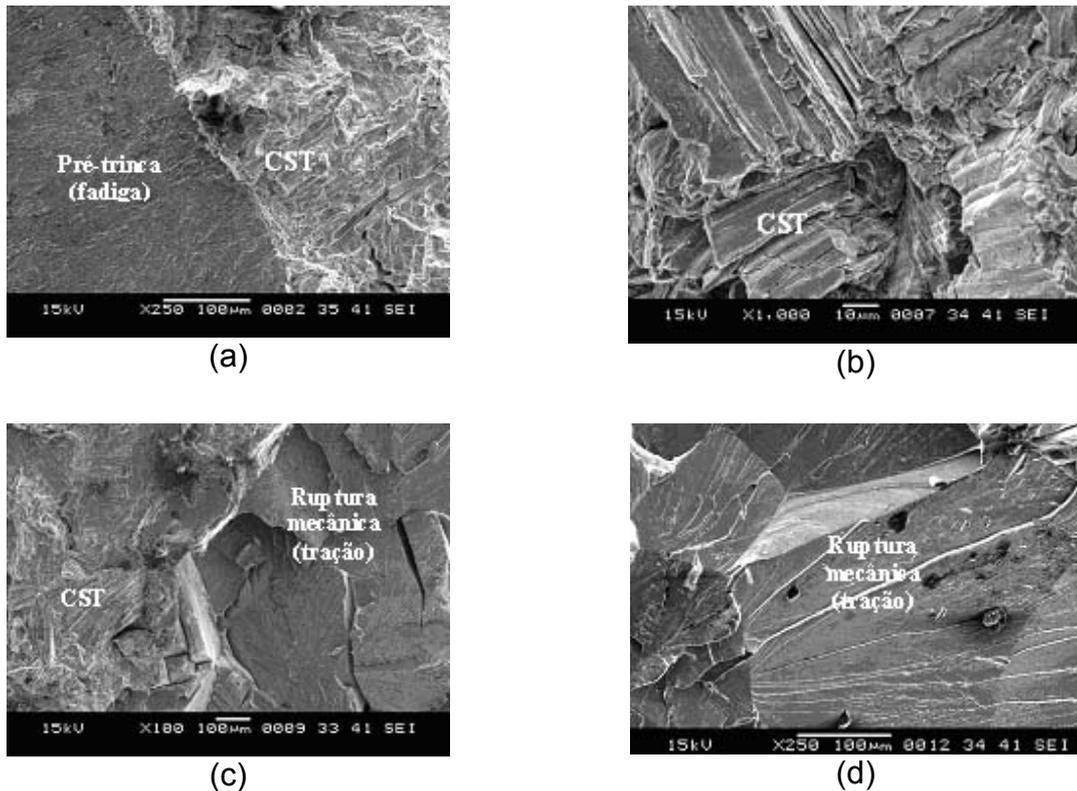


Figura 9. Fotomicrografias de CPs trincados por CST; carga constante; sistema aço AISI 409/AISI 308 em soluções aquosas com 42% $MgCl_2$ (143°C); (a) pré-trinca por fadiga e região de CST; (b) CST; (c) CST e tração; (d) tração. Notam-se fraturas frágeis na região de CST e no rompimento por tração (facetadas de clivagem); MEV.

Para avaliar se a trinca por CST desenvolvida na região do metal de enchimento de aço inoxidável austenítico, evoluiu 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 10 mostra um dos CPs de aço AISI 409 que foi posteriormente preenchido com metal de adição do tipo AISI 308 pronto para ser pré-trincado por fadiga e posteriormente ensaiado em CST.



Figura 10. CP tração-compacto, metal base (incluindo a zona de ligamento) de aço AISI 409, metal de enchimento de aço AISI 308.

A Figura 11 (a,b) mostra CPs, do tipo da Figura 10, ensaiados sob tensão em 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 12.



Figura 11. Corpos-de-prova correspondentes à Figura 10 ensaiados sob tensão; 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 12. Corpo-de-prova correspondente à Figura 11 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 13 (a,b,c,d) apresenta as trincas desenvolvidas por CST na região da ZF (aço inoxidável austenítico) e evolução na ZTA e MB (aço inoxidável ferrítico). Pretende-se em trabalhos futuros pesquisar mais sobre este aspecto de desenvolvimento e propagação de trincas por CST em aços inoxidáveis ferríticos soldados com metal de enchimento de aços inoxidáveis austeníticos.

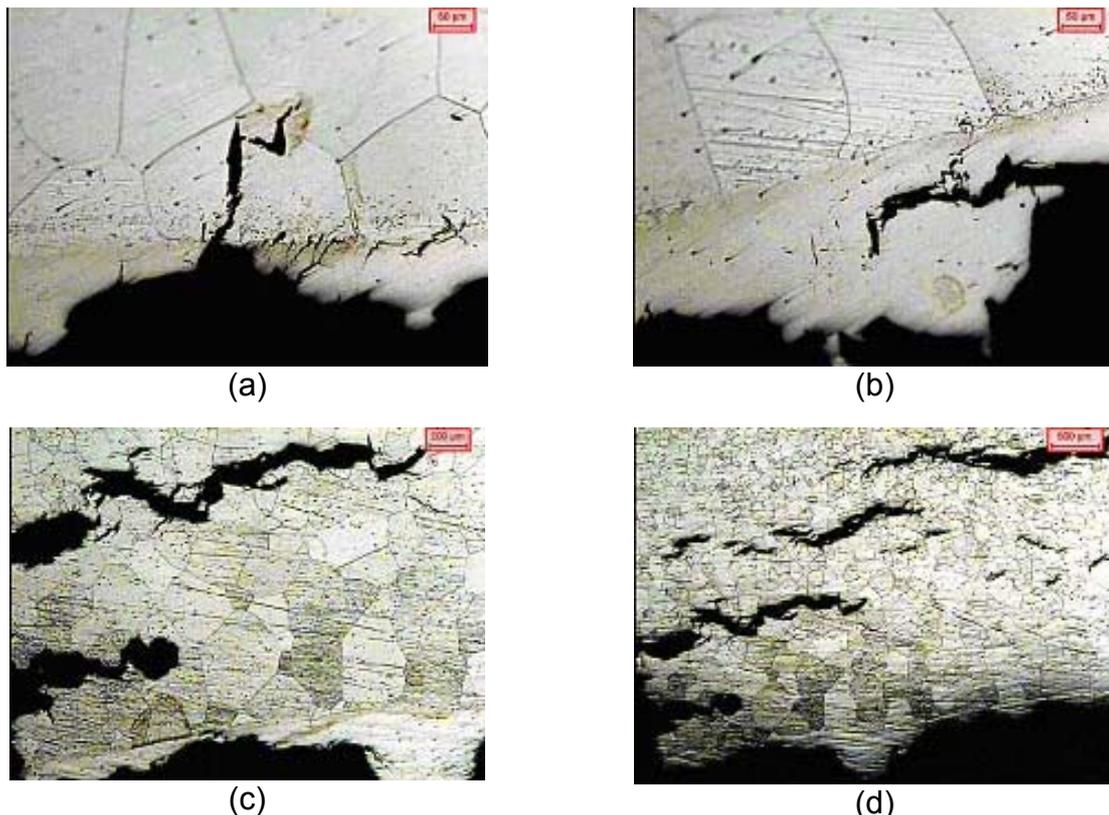


Figura 13. Fotomicrografias de CPs trincados por CST correspondentes à Figura 11; evolução de trincas na ZF (aço inoxidável austenítico): (a) e (b); para a ZTA e MB (aço inoxidável ferrítico): (c) e (d). Aumentos: 200X (a), (b); 50X (c); 25X (d). Ataque: Vilela.

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. Notou-se também que a combinação que utilizou como metal base o aço AISI 409 e como metal de enchimento o aço AISI 308, não respondeu bem ao dobramento, rompendo na região da interface entre os dois aços. Nos corpos-de-prova 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. Normalmente, este fenômeno 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 corrosão sob tensão, 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.

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.

STUDY OF THE PHENOMENON OF CORROSION IN STAINLESS STEELS WELDS¹

*David Hebert Vieira²
Daniel Fraga Pinto³
José Antônio Nunes de Carvalho⁴
Paulo Bálsamo⁵
Leonardo Barbosa Godefroid⁶
Luiz Cláudio Cândido⁶*

Abstract

The behavior in stress corrosion cracking (SCC) of ferritic AISI 409 and AISI 439 stainless steels welded with austenitic stainless steels of the type AISI 308 and AISI 309 was evaluated. Aqueous solutions containing 3.5 weight% of NaCl, 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 potentiodynamic polarization. Precracked compact type –C(T)s – 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 42 weight% MgCl₂. It was noticed 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 Congress of ABM, 07/25/05 to 07/28/05 - Belo Horizonte

² Eng^o Metalurgista – Escola de Minas/UFOP – Companhia Ferroeste; david@ferroeste.com.br

³ Eng^o Metal.; mestrando REDEMAT; dfp1@zipmail.com.br

⁴ Eng^o Metal.; M.Sc.; ACESITA/Arcelor; jancarvalho@acesita.com.br

⁵ Eng^o Mecânico.; M.Sc.; D.Sc; ACESITA/Arcelor; pbalsamo@acesita.com.br

⁶ 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