Copyright 2010, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Influência de concentradores geométricos de tensão na corrosão sob tensão do aço AISI 304 em meios contendo cloretos

Thiago Martins Teixeira Braga[1], Luiz Cláudio Cândido[2]

Abstract

The study of stress corrosion cracking (SCC) phenomenon has become very common because of the drastic consequences that it may cause. The SCC does not show clear signs as a general corrosion due to the fact that it is a localized corrosion. This study evaluated the influence of geometric stress concentrator (notches) on the behavior of AISI 304 steel in SCC tests in chlorinated media. The results of tests on specimens with and without notch were compared. It was observed that specimens with notch suffered SCC in a shorter time when compared with specimens without notches. It was also observed that the higher the load the less time required for the development of SCC.

Key words: stress corrosion cracking; notch; stainless steel; chlorides

Resumo

O estudo do fenômeno corrosão sob tensão (CST) tem se tornado muito comum devido às drásticas conseqüências que este pode causar. Por ser uma corrosão localizada a CST não apresenta sinais claros e evidentes como numa corrosão generalizada. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de concentradores geométricos de tensão (entalhes) no comportamento de um aço do tipo AISI 304 em ensaios de CST em meios cloretados. Foram comparados resultados de ensaios realizados em corpos de prova (CPs) com e sem entalhe. Observou-se que CPs com entalhe sofreram CST em tempo menor quando comparados com os CPs sem entalhes. Observou-se também que quanto maior a carga menor o tempo necessário para o desenvolvimento da CST.

Palavras-chave: corrosão sob tensão; entalhe; aço inoxidável; cloretos

[1] Mestrando em Engenharia de Materiais – REDEMAT/UFOP
[2] Dr. Engenheiro Metalurgista – DEMET/REDEMAT/UFOP

Introdução

Os aços inoxidáveis geralmente apresentam alta resistência à corrosão uniforme em diversos meios. Entretanto, quando a película passivante, responsável pela proteção da liga, é rompida e não regenerada, inicia-se um processo corrosivo. Este tipo de degradação ocorre em condições de corrosão localizada (por pites, por corrosão sob tensão e de forma intergranular). É comum a exposição destes materiais a meios agressivos aliados a solicitações mecânicas, o que pode levar a uma fratura prematura e imprevisível, devido ao fenômeno de CST.

O estudo da influência de concentradores geométricos de tensão na CST dos aços inoxidáveis em meios cloretados é extremamente importante, uma vez que a presença destes no material acelera o processo de CST.

A CST é um fenômeno de corrosão localizada que ocorre quanto uma liga passivável está sujeita a uma tensão trativa relativamente baixa (inferior ao limite de escoamento) exposta a um meio corrosivo específico durante um determinado tempo(1). Para que ocorra a CST devem existir três condições simultaneamente. A liga suscetível, um ambiente agressivo específico e alguma componente de tensão trativa, seja ela residual ou aplicada externamente. Ainda sim é necessário um tempo para que o fenômeno se desenvolva.

Independente do mecanismo de propagação de trinca sempre ocorrerá uma concentração de tensão na ponta (vértice) da trinca, o que acarretará em certa deformação plástica dessa região. Isso acentuará a ação corrosiva tendo como conseqüência a fratura mecânica do material(2).

Três estágios dividem o processo de CST: estágio de indução, que é definido como sendo o tempo de exposição no meio corrosivo antes da nucleação da primeira trinca (este período é menor em CPs entalhados, uma vez que os entalhes favorecem a nucleação de trincas), estágios de iniciação ou nucleação de trinca e de propagação até a fratura do material(3).

O mais preocupante é o fato de que as trincas causadas por CST podem iniciar e propagar sem evidências macroscópicas podendo causar catástrofes.

A iniciação e propagação de uma trinca podem surgir a partir de tensões aplicadas externamente ao material ou a partir de tensões residuais geradas por tratamentos térmicos, soldagem e conformação mecânica, associadas a um meio corrosivo. A corrosão por pite e a corrosão intergranular causam uma descontinuidade da superfície do material, podendo provocar também o processo de iniciação de trinca(4).

O trincamento por CST em ambientes contendo cloretos foi inicialmente notada em aços inoxidáveis. Por isso estes materiais recebem uma maior atenção em pesquisas e desenvolvimento. Ensaios de corrosão utilizando soluções de cloreto de magnésio como ambiente corrosivo foram os primeiros a serem adotados. Esta condição é utilizada por ser altamente severa (42% $MgCl_2$, 143°C)(5), e normatizada. Posteriormente, outros meios foram sendo testados, entre eles o HCl concentrado (pH ≅ 0,00), que promove o desenvolvimento do fenômeno de CST no material na temperatura ambiente.

A partir do ensaio de CST com carga constante é possível obter a tensão que um material pode suportar durante o serviço sem sofrer CST, propor um intervalo de inspeção para a confirmação de que o material não sofrerá trincamento por CST, ou ainda avaliar a influência metalúrgica no material e mudanças de meio ambiente na CST(5,6). E ainda, pode-se avaliar a influência de concentradores de tensão utilizando-se corpos de prova entalhados. Normalmente, este ensaio é realizado submetendo-se CPs a diferentes níveis de carga medindo-se o tempo de falha do material em determinado ambiente.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o comportamento do aço AISI 304, em corpos de prova com e sem concentrador geométrico de tensão, usando a técnica de carga constante em meios cloretados (HCl com pH aproximadamente 0,00 à temperatura ambiente).

Metodologia/Resultados/Discussão

A Tabela 1 apresenta a composição química do material analisado. Verifica-se que o aço é um do tipo inoxidável austenítico (18/8).

Além da caracterização química e metalográfica da liga foram feitos ensaios mecânicos de tração. O limite de escoamento do material encontrado foi de 511 ± 3,27MPa. Macro e microfratograficamente foi possível verificar o comportamento dúctil do aço ensaiado com fratura do tipo "taça-cone" e, em análises com microscopia eletrônica de varredura, constatou-se presença de "dimples", característicos desta fratura.

As curvas de polarização potenciodinâmica obtidas neste trabalho para o aço AISI 304 são apresentadas na Figura 1(a,b). Os meios utilizados nos ensaios foram: HCl 1M (pH aproximadamente 0,00) e NaCl 3,5 (% massa). Nota-se maior agressividade para a solução em HCl em relação à com 3,5% NaCl em função do menor potencial de corrosão, maior densidade de corrente, portanto, maior taxa de corrosão e não passivação da liga no meio extremamente ácido.

Na Figura 2 está representado um esquema de como é realizado o ensaio de carga constante. A Figura 3 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios de CST.

Foram realizados ensaios em dois tipos de CPs, com e sem entalhes, utilizando HCl concentrado (pH aproximadamente 0,00) como meio corrosivo. As cargas adotadas para os ensaios foram 100, 95, 75 e 60% do σ_{ys} (limite de escoamento) para CPs sem entalhes e 75, 60 e 30% do σ_{ys} para CPs entalhados. O nível de carregamento para CPs com entalhe foi diminuído em função da menor resistência do material ao meio. Os ensaios foram realizados por um período máximo de 1000 horas ou até o rompimento do CP.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos para os ensaios em CPs sem entalhe. Observou-se na condição com 75% do σ_{ys}, após o período de 1000 horas, o material apresentou apenas trincas por CST sem ruptura. Na condição com 60% do σ_{ys} o CP não apresentou nenhum sinal de trincamento.

A Figura 4(a,b,c) apresenta os CPs fraturados ensaiados por CST. Nota-se o surgimento de trincas ao longo de toda a parte útil dos CPs. Observa-se também o alongamento que o material sofreu após o ensaio (Figura 3(d)), em relação ao CP no estado de entrega.

Segundo Nishimura[6,7], ensaios com carga constante e deformação lenta, utilizando meios cloretados com pH próximos de 0,00 para um aço do tipo AISI 304 à temperatura em torno de 80ºC, o tempo de ruptura dos CPs foi muito menor (algo entre 15 e 150 min).

A Figura 5 ilustra microfratograficamente os CPs correspondentes à Figura 4. Nota-se presença de trincas agudas no material. Na Figura 5(b) verifica-se que as superfícies laterais do CP apresentam trincas secundárias, resultado da degradação do material por CST. Schvartzman et al.[8] observaram um comportamento semelhante para um aço AISI 316 que sofreu CST, no entanto a 303°C, em um meio corrosivo que simula um ambiente de reator nuclear do tipo PWR.

Os resultados dos ensaios realizados com CPs entalhados estão apresentados na Tabela 3. A Figura 6(a,b,c) apresenta a microfratografia de um CP entalhado fraturado sob tensão. Observa-se o aspecto frágil da fratura com facetas de clivagem, características do fenômeno de CST. Nesse caso, diferente dos CPs lisos, o trincamento e a fratura ocorreram

na região do entalhe em função da maior concentração de tensão e, por conseguinte, instabilidade da camada passiva.

Assim como ocorreu nos CPs sem entalhe, nos ensaios com CPs entalhados também foi observado que quanto maior a carga aplicada, menor o tempo de duração do ensaio. Verificou-se também que os corpos de prova com o entalhe sofreram CST em um tempo menor de ensaio. Isso indica que a presença de entalhes favorece o desenvolvimento do fenômeno, assim como pites ou outros concentradores de tensão.

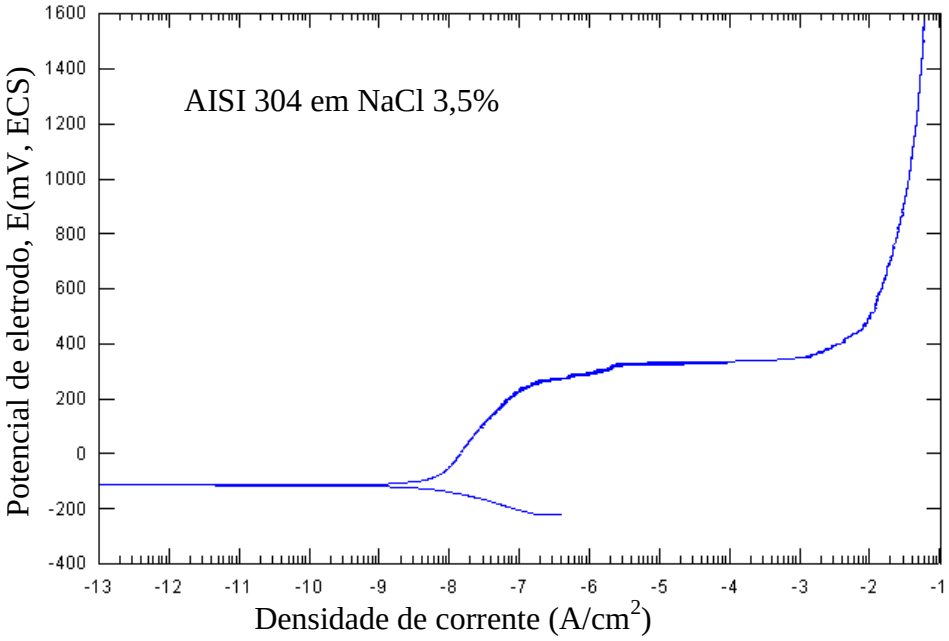
A Figura 7(a,b) destaca microfratograficamente o trincamento por CST no material ao longo do ensaio, durante 1000 horas, mas que não promoveu a ruptura do CP. Assim, verifica-se que a combinação carga e meio corrosivo são fundamentais para a ocorrência da CST, mas que o efeito da carga é marcante na redução do tempo de ruptura aliado ao efeito da desestabilização da camada passiva pelos íons cloreto[(4)].

Conclusões

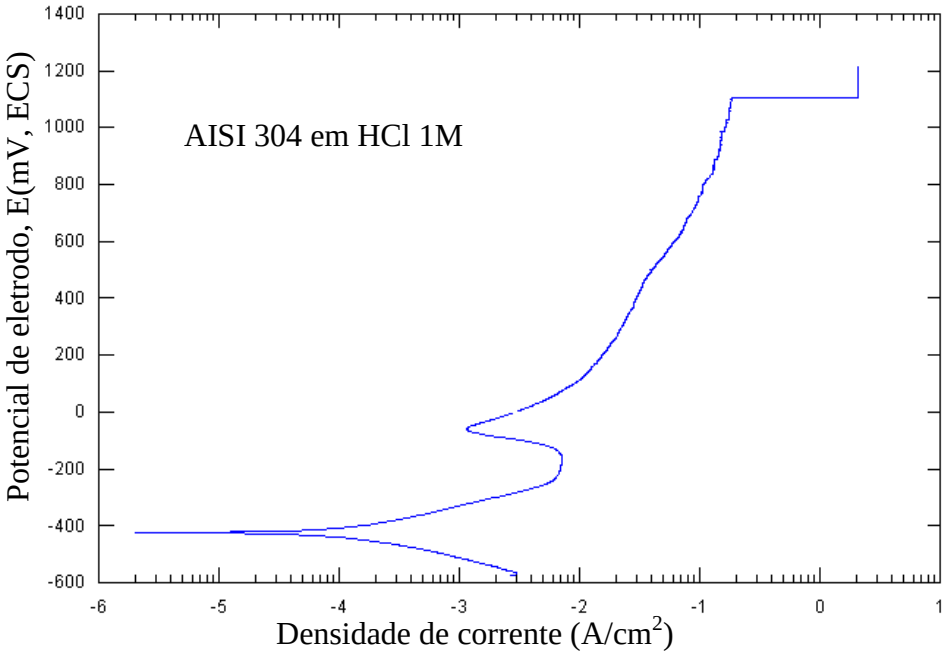
- A presença de um concentrador geométrico de tensão (entalhe) torna o material mais suscetível à CST acelerando o desenvolvimento do fenômeno;
- Existe uma relação direta da carga aplicada durante o ensaio com a taxa de corrosão determinando que quanto maior esta carga, menor o tempo de resistência do material à CST;
- Os ensaios de polarização potenciodinâmica do sistema: aço AISI 304/1M HCl (pH $\cong$ 0,00), na temperatura ambiente, indicaram que esse meio é muito mais agressivo que em soluções aquosas contendo 3,5% (peso) de NaCl;
- A fratura dos CPs ensaiados sob carga constante foi caracterizada como frágil devido a presença de facetas de clivagem, embora o material tenha comportamento dúctil mecanicamente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à REDEMAT e CAPES pela bolsa de estudos do mestrando e a FAPEMIG pelo apoio financeiro para a participação no evento.



(a)



(b)

Figura 1 – Curvas de polarização potenciodinâmica obtidas para o aço AISI 304 à temperatura ambiente: (a) em NaCl 3,5 (% massa); (b) em HCl 1M (pH ≅ 0,00).

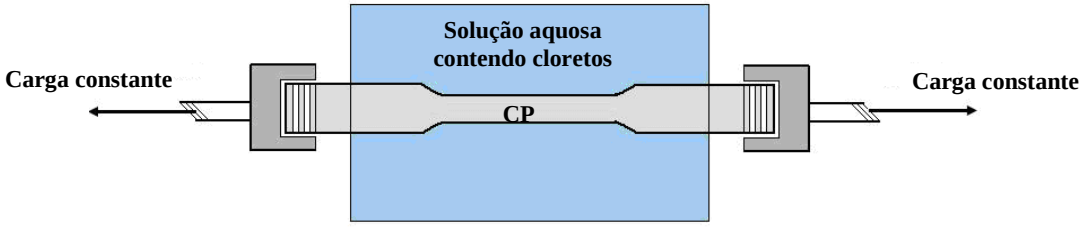
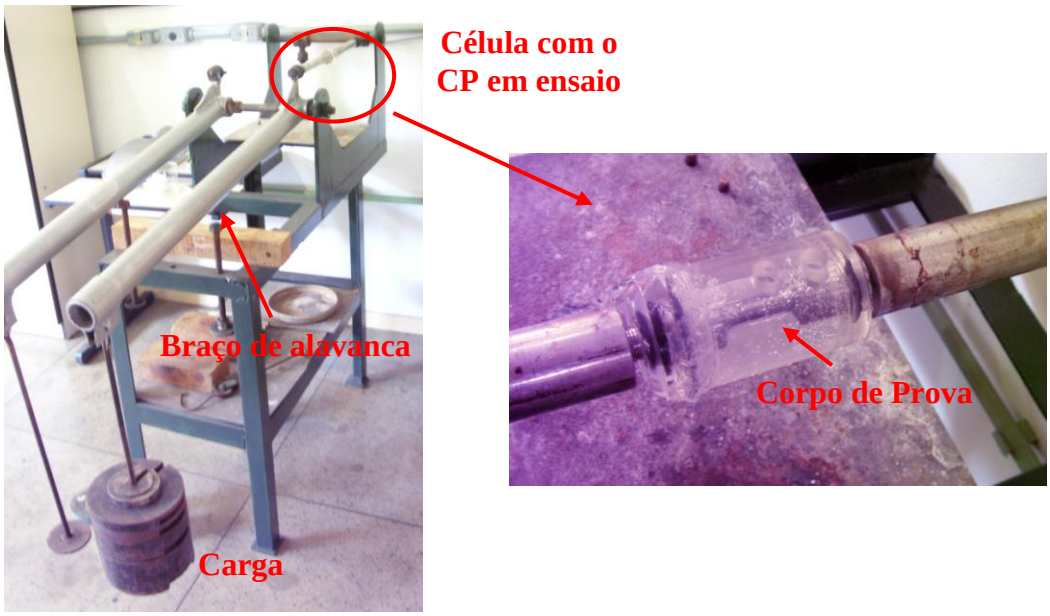
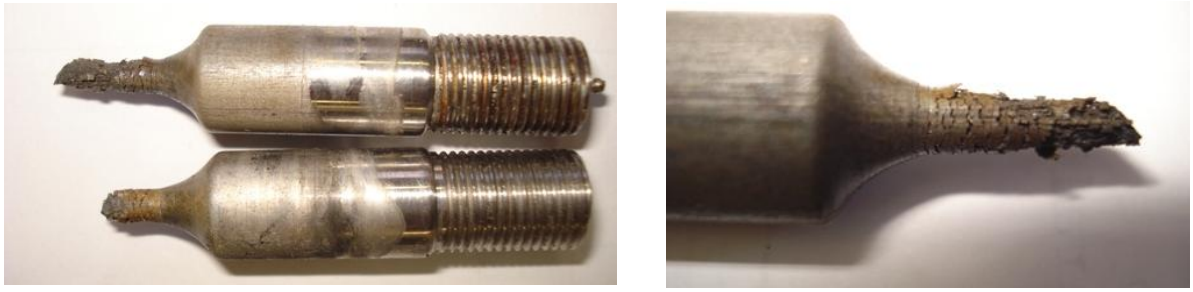


Figura 2 – Desenho esquemático do ensaio de CST com carga constante.



(a) (b)

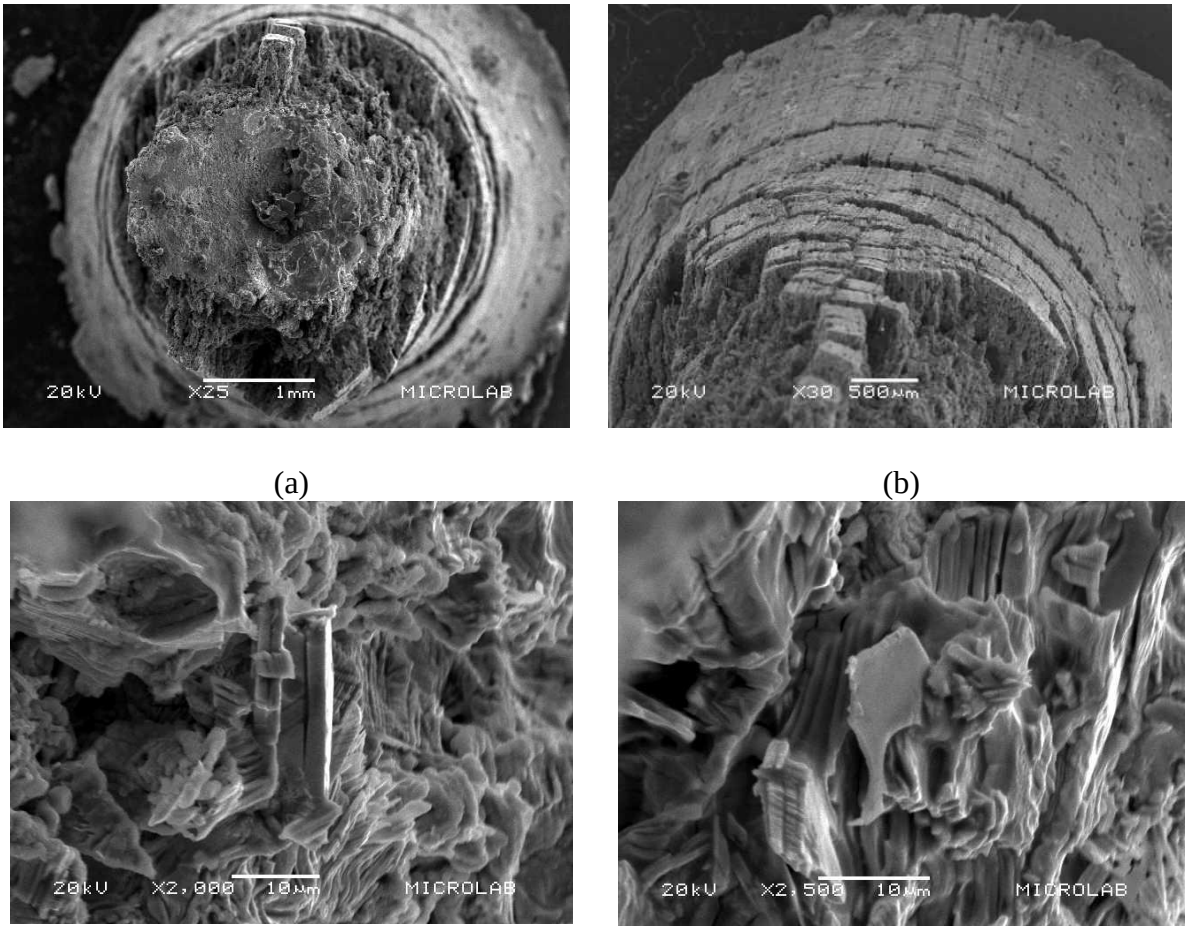
Figura 3 – (a) Equipamento utilizado para os ensaios de CST; (b) CP dentro da célula imerso em HCl 1M (pH ≅ 0,00).



(a) (b)

(c) (d)

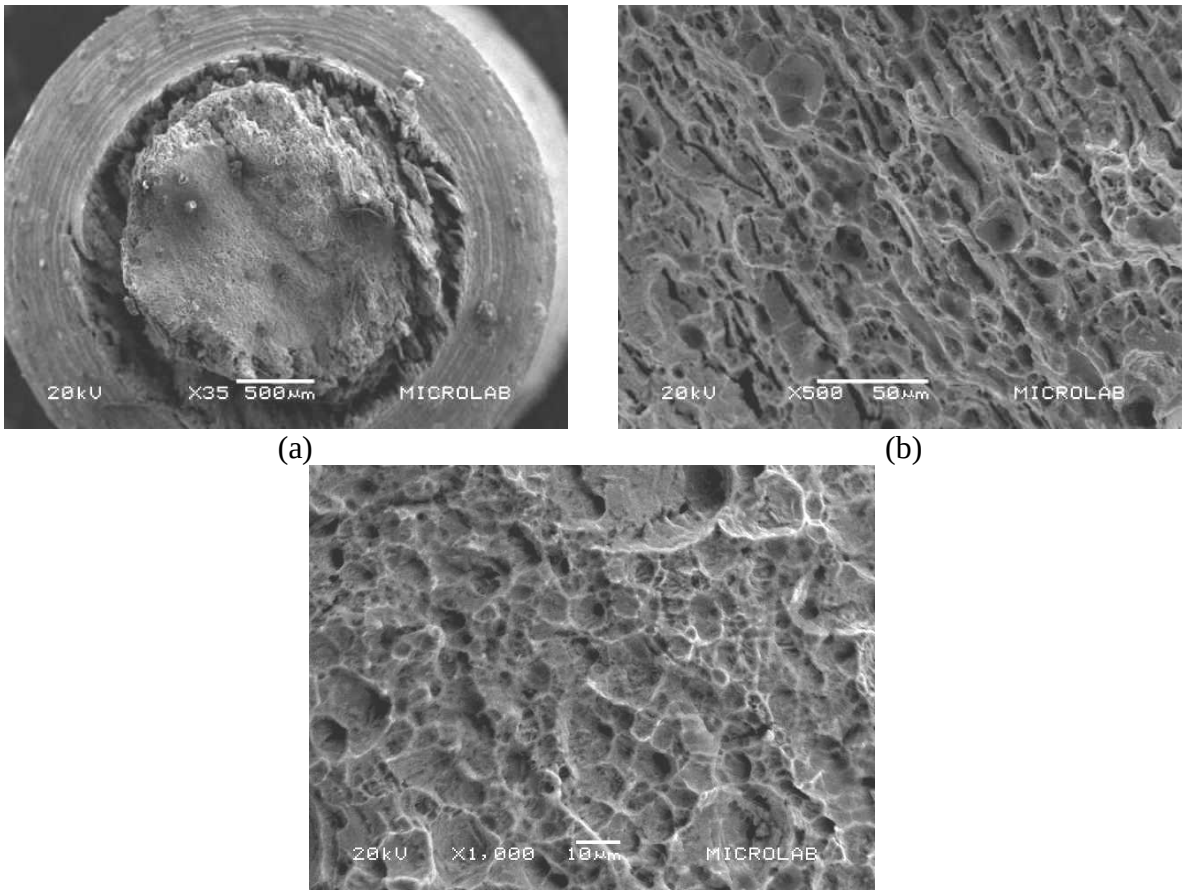
Figura 4 – Macrofratografia de CPs sem entalhe de aço AISI 304 ensaiado em CST em HCl, pH ≅ 0,00, na temperatura ambiente; (d) comparação do mesmo CP ensaiado com um CP sem ensaiar.



(a) (b)

(c) (d)

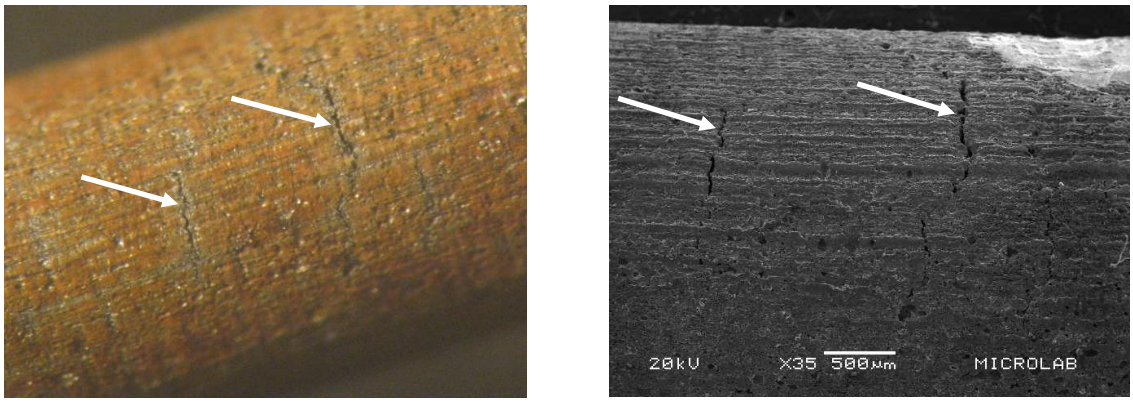
Figura 5 – Microfratografia de CP de aço AISI 304 ensaiado em CST em HCl, pH ≅ 0,00, na temperatura ambiente; regiões: (a) frontal - 25X; (b) lateral - 30X; (c) 2000 X e (d) 2500 X. MEV.



(a) (b)

(c)

Figura 6 – Idem à Figura 4, mas com CPs entalhados; (a) 35X; (b) 500X; (c) 1000X; MEV.



(a) (b)

Figura 7 – Corpo de prova trincado após 1000 horas de ensaio; sistema: aço AISI 304 ensaiado em CST em HCl, pH ≅ 0,00, na temperatura ambiente; (a) 16X (lupa); (b) 35X (MEV).

Tabela 1 – Composição química (% massa) do aço AISI 304 analisado.

Cr	Ni	Mn	Si	C	P	S	Mo	Cu	Mg	Fe
18,284	8,377	1,319	0,275	0,055	0,027	0,005	0,030	0,097	0,016	71,330

Tabela 2 – Ensaios de CST com carga constante em CPs sem entalhe de aço AISI 304 em HCl (pH ≅ 0,00) na temperatura ambiente.

CP liso	Peso (N)	σ(MPa)	σ/σ_{ys}	Tempo de ruptura (h)
01	329	290	0,60	NT
02	437	385	0,75	T^*
03	549	485	0,95	388
04	583	515	1,00	348

σ = tensão aplicada; σ_{ys} = limite de escoamento; NT = não trincou; T^* = trincamento em 1000h

Tabela 3 – Resultados obtidos nos ensaios em CP com entalhe.

CP entalhado	Peso (N)	σ(MPa)	σ/σ_{ys}	Tempo de Ruptura (h)
01	183	153	0,30	170
02	329	290	0,57	97
03	329	290	0,57	100
04	437	385	0,75	60
05	437	385	0,75	71

σ = tensão aplicada; σ_{ys} = limite de escoamento

Referências bibliográficas

1 - CHAWLA, S.L.; GUPTA, R.K. **Materials Selection for Corrosion Control**; Ed. ASM International, 1995.

2 – BROWN, B. F. **A preface to the problem of stress corrosion cracking**. Symposium presented Special Technical Publication – STP 518. Stress corrosion cracking of metals – a tate of the art, ASTM, Philadelphia, Pa., p.3-15, 1983.

3 – KRUGER, J. **Failure by stress corrosion cracking current approaches toward failure prediction**. Apud YAHALOM, J.: ALADJEM, A stress corrosion cracking. Freund, cap.1, p. 6-35, 1980.

4 – CÂNDIDO, L. C. **Corrosão sob tensão de aços inoxidáveis duplex, em soluções aquosas contendo cloretos em ebulição, através de diferentes técnicas experimentais**. Tese de Doutorado – UFMG, 1996, 207p.

5 – JONES, R. H., RICKER, R.E. **Mechanisms of Stress-Corrosion Cracking**. In: JONES, R. H. Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation. Ohio. ASM International, 1993.

6 – NISHIMURA, R. **Characterization and perspective of stress corrosion cracking of austenitic stainless steels (type 304 and type 316) in acid solutions using constant load method.** Corrosion Science 49 (2007) 81–91.

7 – NISHIMURA, R., MAEDA, Y. **SCC evaluation of type 304 and 316 austenitic stainless steels in acidic chloride solutions using the slow strain rate technique.** Corrosion Science 46 (2004) 769–785.

8 – SCHVARTZMAN, M. M., QUINAN, M. A. D., CAMPOS, W. R. C. **Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel AISI 316L HAZ in PWR Nuclear Reactor Environment**. Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14, No. 3, p.228-237, Jul/Set 2009.

9 - DAVIS, J. R. ASM **Specialty Handbook**: Stainless Steels. 2ª Ed. Ohio: ASM International, 1996.