

ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO LOCALIZADA DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO TIPO 18Cr-8Ni EM ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL COM ELEVADO CICLO DE CONCENTRAÇÃO¹

José Antônio da Cunha Ponciano Gomes²

Elizabete Regina Caruso Leão³

Resumo

A necessidade de se racionar o uso de água em operações industriais é uma tendência geral, que tem feito com que as condições operacionais existentes em circuitos de resfriamento industriais se tornem mais severas. Esta maior agressividade da água se dá, principalmente, em consequência do aumento do fator de concentração da água no circuito, que leva a teores de cloreto mais elevados. Uma das alternativas para se atenuar esse aumento de corrosividade é a substituição do aço carbono por materiais mais resistentes, apresentando-se como uma primeira alternativa o uso de aços inoxidáveis austeníticos convencionais. O objetivo deste trabalho é determinar o comportamento de um aço inoxidável austenítico do tipo 18Cr-8Ni, quando empregado em trocadores de calor de sistemas de refrigeração industrial com elevado fator de concentração. Foram avaliadas as susceptibilidades à corrosão por pite e à corrosão sob tensão. O estudo foi realizado através de ensaios de tração sob baixa taxa de deformação (BTD), ensaios de polarização anódica e espectroscopia de impedância eletroquímica, em solução contendo 1000 ppm de cloreto nas temperaturas ambiente e de 60° C, com pH ajustado. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura que ocorre nos permutadores é um fator crítico na redução da resistência à corrosão localizada do material, nas condições de estudo, limitando a sua aplicação nas condições pretendidas.

Palavras-chave: Corrosão sob tensão; Corrosão por pite; Aço inoxidável; Água de refrigeração.

STUDY OF LOCALIZED CORROSION RESISTANCE OF TYPE 18Cr-8Ni SS IN INDUSTRIAL COOLING WATER WITH ELEVATED CONCENTRATION CYCLE

Abstract

The need to ration the use of water in industrial operations is a general trend that is making the existing operating conditions in industrial cooling circuits to become more severe. This aggressiveness of the water is due, mainly, to the increase in the concentration factor of the water in the circuit, which leads to higher levels of chloride. One of the alternatives to mitigate the increase of corrosion is the replacement of carbon steel by more resistant material, presenting the use of conventional austenitic stainless steels itself as a first alternative. The objective of this study is to determine the behavior of a 18Cr-8Ni austenitic stainless steel, when used in heat exchangers of industrial cooling water systems with high concentration factor. It was evaluated the susceptibility to both pitting and stress corrosion cracking. The study was conducted through slow strain rate test, anodic polarization and electrochemical impedance spectroscopy, in a solution containing 1000 ppm of chloride at the temperatures of 23 °C and 60 °C, with pH adjusted. The results showed that the temperature increase that occurs in the heat exchanger is a critical factor in reducing the corrosion resistance of the material, under the conditions of the study, limiting its application for the intended purpose.

Key words: Stress corrosion cracking; Pitting corrosion; Stainless steel; Cooling water.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Dsc., Professor associado – UFRJ/COPPE /PEMM*

³ *Dsc., Engenheira de equipamentos – PETROBRAS/ENGENHARIA/SEQUI*

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho teve como objetivo ampliar o conhecimento sobre a corrosão do aço inoxidável austenítico S30400, visando à sua aplicação na fabricação de trocadores de calor para uso em sistemas de água de refrigeração. É de conhecimento geral que as principais formas de corrosão dos aços inoxidáveis são a corrosão sob tensão (CST) e a corrosão por pite, que, devido aos seus grandes potenciais de danos, têm sido foco de inúmeras pesquisas em todo o mundo. Estes tipos de corrosão ocorrem em determinados ambientes, sendo, portanto, a resistência do material dependente da estabilidade da camada passiva de óxido formada na superfície, no meio considerado.

Nos sistemas semi-abertos de refrigeração industrial, que são os sistemas abertos com recirculação de água, a água é reutilizada nos equipamentos de troca térmica ciclicamente. Para que isto aconteça, são utilizadas torres de refrigeração, onde o calor absorvido pela água, através de permutadores de calor existentes no sistema, é dissipado. A perda de calor por evaporação em torres de refrigeração ocasiona, contudo, um aumento na concentração de sais presentes na água, até determinado valor limite de ciclo de concentração – definido como a razão entre a concentração de um determinado sal presente na água de refrigeração e a concentração deste mesmo sal na água de reposição. Ao ser atingido este limite, é feita uma purga parcial da água do sistema de refrigeração, sendo iniciado novo ciclo com a admissão de nova quantidade de água de reposição.

Os sistemas de refrigeração semi-abertos com recirculação, originalmente projetados para operação com ciclos de concentração moderados – com fatores variando de 3 a 5, normalmente – vêm sofrendo aumentos significativos destes valores, face a exigências econômicas de otimização de produção, aliadas à forte pressão mundial sobre a utilização sustentável dos recursos hídricos. Estas mudanças resultaram, todavia, em prejuízos associados a expressivos aumentos nos processos corrosivos de equipamentos de troca térmica. Nessas circunstâncias, portanto, os valores adotados para as variáveis de trabalho, como a temperatura de 60°C e a concentração de cloreto de 1.000 ppm, refletem as situações reais de operação para sistemas de resfriamento com ciclo de concentração elevado, que no caso deste trabalho é igual a 10. As avaliações foram feitas, portanto, não apenas na temperatura ambiente, como é comum em avaliações de processo corrosivo em sistemas de resfriamento, mas também em uma temperatura correspondente à temperatura no interior dos permutadores de calor.

É importante ressaltar a limitação encontrada para a abordagem deste tema, devido à existência de alguns poucos exemplos de pesquisas sobre a susceptibilidade à corrosão localizada de aços inoxidáveis em meio diluído de cloreto e temperaturas inferiores a 100°C - caso em que se enquadra este trabalho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

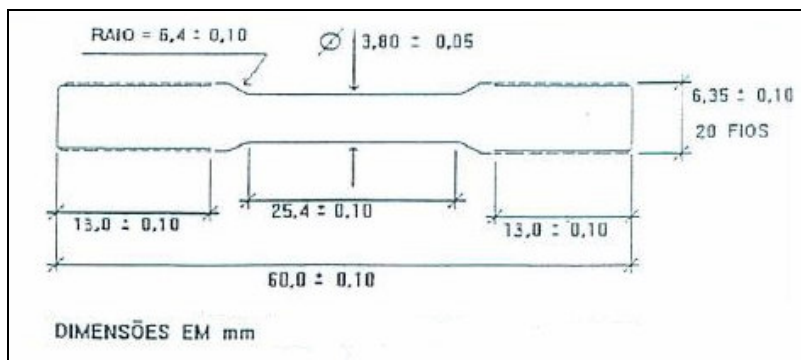
2.1 Materiais

O material utilizado neste trabalho foi o aço inoxidável austenítico UNS S30400, cuja composição química encontra-se na Tabela 1. A amostra foi adquirida sob a forma de barra de seção circular, na condição deformada a frio.

Tabela 1. Composição Química

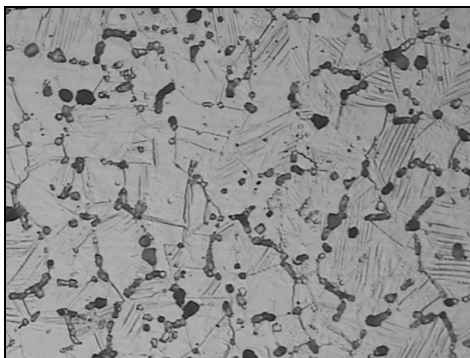
MATERIAL	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu
S30400	0,055	1,67	0,036	0,025	0,45	18,45	8	0,05	0,11

Para a determinação das propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de tração em máquina universal de tração com capacidade de até 100 KN, marca Emic, modelo DL 10000. Os ensaios foram efetuados em temperatura ambiente e de acordo com a norma ASTM-E 8/E 8M, 2008,⁽¹⁾ utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos usinados para as dimensões indicadas na Figura 1. Na Tabela 2 encontram-se os valores médios obtidos em dois ensaios de tração realizados. Nesta mesma tabela, são apresentados os valores das mesmas propriedades mecânicas, transcritos do certificado de matéria prima do material.

**Figura 1.** Corpo-de-prova de tração.**Tabela 2.** Propriedades mecânicas do aço UNS S30400

MATERIAL	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)		LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)		DEFORMAÇÃO FINAL (%)	
	Ensaio	Certificado	Ensaio	Certificado	Ensaio	Certificado
UNS S30400	774	682,19	908	823,13	38	37,14

Foi realizada análise metalográfica do material para caracterização microestrutural, utilizando-se ataque eletrolítico em solução 10 % $H_2C_2O_4$ (ácido oxálico) com tensão de 3 V e tempo de 1 minuto. A microestrutura consiste de uma fase austenítica única, onde se observam maclas de recozimento, conforme mostrado nas Figuras 2, com aumento de 500 vezes.

**Figura 2.** Micrografia do aço inoxidável S30400. Ataque eletrolítico, solução 10 % $H_2C_2O_4$, 500X.

2.2 Solução de Ensaio

A solução de ensaio usada neste trabalho foi preparada com água destilada e cloreto de sódio (NaCl) – na concentração de 1.000 ppm de cloreto. O pH da solução foi ajustado no valor de 7, usando-se solução de (NaOH) 0,1M.

2.3 Métodos Experimentais

2.3.1 Polarização anódica

O comportamento anódico do material foi avaliado na solução referenciada no item 2.2. As curvas de polarização anódica foram levantadas empregando-se um potenciostato AUTOLAB acoplado a um microcomputador. Os ensaios foram realizados em célula eletroquímica convencional, constituída de um recipiente de vidro com capacidade de 500 ml e de uma tampa de acrílico com furos onde foram fixados os corpos-de-prova, o eletrodo de referência (de calomelano saturado) e um contra-eletrodo de platina. Todas as varreduras anódicas, realizadas a taxa de 1 mV/s, foram iniciadas a partir dos potenciais de corrosão nas soluções de ensaio, estabelecidos após uma hora de imersão. As temperaturas adotadas para os ensaios, de 23°C e 60±1°C, referem-se às máximas e mínimas temperaturas de operação normalmente empregadas em sistemas de água de refrigeração industrial. O aquecimento das soluções de ensaio foi realizado utilizando-se banho-maria microprocessado marca Quimis, modelo Q215 S2, com controlador eletrônico e indicador digital de temperatura e precisão de ± 0,5°C. Para as medidas feitas nas soluções de ensaio na condição aquecida, os corpos-de-prova foram imersos em solução na temperatura de ensaio. Todos os ensaios foram realizados em triplicatas para se garantir a reprodutibilidade dos resultados. A Figura 3 apresenta o aparato de ensaio.

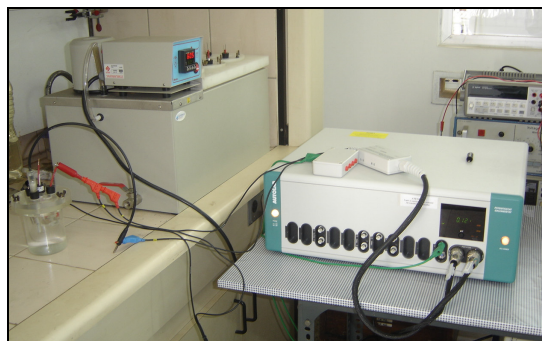


Figura 3. Aparato de ensaio: célula eletroquímica, banho-maria e Autolab.

2.3.2 Espectroscopia de impedância eletroquímica

Para a realização dos ensaios de impedância eletroquímica utilizaram-se os mesmos dispositivos de ensaio ilustrados na Figura 3, empregando-se, neste caso, o módulo FRA (Frequency Response Analyser) do potenciostato Autolab mencionado no item anterior. Os diagramas de impedância eletroquímica foram obtidos a uma taxa de aquisição de 10 pontos por década, com amplitude de perturbação de 0,01 V, no intervalo de frequência de 1 KHz a 100 mHz. Todos os ensaios foram realizados nos potenciais de circuito aberto dos materiais, após tempo de imersão de 1 hora, na solução de ensaio. As medidas foram realizadas em regime estático. As temperaturas de ensaio foram as mesmas adotados para os

ensaios de polarização, ou seja: 23°C e 60±1°C. Igualmente para aqueles ensaios, a imersão dos corpos-de-prova nas soluções de ensaio aquecidas foi feita após estabelecida a temperatura de ensaio. Todas as curvas foram levantadas, no mínimo, três vezes, para cada condição de ensaio adotada.

2.3.3 Preparação dos corpos-de-prova

A preparação dos corpos-de-prova, usados nos métodos de ensaio acima citados, foi feita utilizando-se pequenas amostras dos materiais embutidas em resina nas quais foram soldados contatos elétricos, conforme mostra a Figura 4. Todos os corpos-de-prova utilizados foram lixados até a lixa de granulometria 600, lavados com água destilada e álcool e secos com jato de ar quente. O valor da área das amostras usadas nos ensaios foi de 0,42 cm.

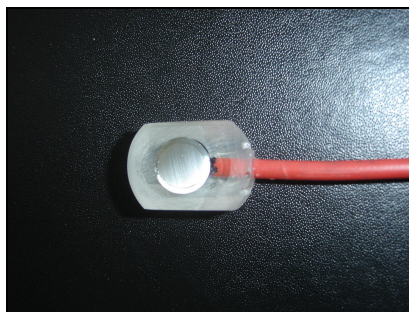


Figura 4. Corpo-de-prova para ensaios de polarização e impedância eletroquímica.

2.3.4 Ensaios de tração sob baixa taxa de deformação (BTD)

Esta técnica foi empregada com o objetivo de se determinar a susceptibilidade à corrosão sob tensão do material em estudo em solução sintética de refrigeração industrial. Com este fim, foi utilizada a solução descrita no item 2.2. A título de comparação, foram realizados ensaios de tração ao ar, usando-se a mesma taxa de deformação para os ensaios realizados em solução. Nos ensaios de tração lenta foram utilizados corpos-de prova conforme Figura 1, com acabamento final de lixa de granulometria 600. Todos os ensaios – ao ar ou em solução – foram realizados à taxa de deformação de aproximadamente $9 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Segundo estudos já realizados para o aço inoxidável UNS S304000 em solução aquosa de 1M NaCl acidificada, a taxa de deformação adotada permite a observação dos efeitos da corrosão sob tensão.⁽²⁾ Os demais parâmetros estabelecidos para os ensaios em solução foram:

- i- Potencial de circuito aberto;
- ii- Valor de pH ajustado para 7;
- iii- Aeração natural das soluções;
- iv- Temperaturas de 23°C e 60 °C.

Foram realizados, no mínimo, três ensaios de tração lenta para cada condição de ensaio, garantindo-se, desta maneira, a reprodutibilidade dos resultados.

3 RESULTADOS

3.1 Corrosão sob Tensão

O estudo da susceptibilidade à corrosão sob tensão (CST) do aço inoxidável S30400 foi efetuado através de ensaios de tração realizados à taxa de deformação de $9 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, nas condições descritas no item 2.3.4. A técnica de tração sob baixa taxa de deformação (BTD) se comprova um método eficaz no estudo da propagação

de trincas por corrosão sob tensão. De acordo com a norma ASTM G 129-00, 2006,⁽³⁾ o tempo de fratura e a deformação total são dois dos possíveis parâmetros utilizados na análise da susceptibilidade à CST. Estes parâmetros, assim como a análise da morfologia das fraturas dos corpos-de-prova, serão apresentados neste item, servindo para comparação do comportamento do material em corrosão, nas condições de estudo.

3.1.1 Ensaios de tração BTB

A Figura 5 apresenta as curvas tensão versus deformação para o aço inoxidável S30400, obtidas em ensaios de tração BTB realizados ao ar e em solução de 1.000 ppm de cloreto nas duas temperaturas de estudo. É evidente, nos resultados destes ensaios, a diferença na resposta do material quando exposto à temperatura de 60°C, relativamente ao comportamento observado nas demais condições. A expressiva perda de utilidade do material, à temperatura de 60 °C, está quantificada a seguir.

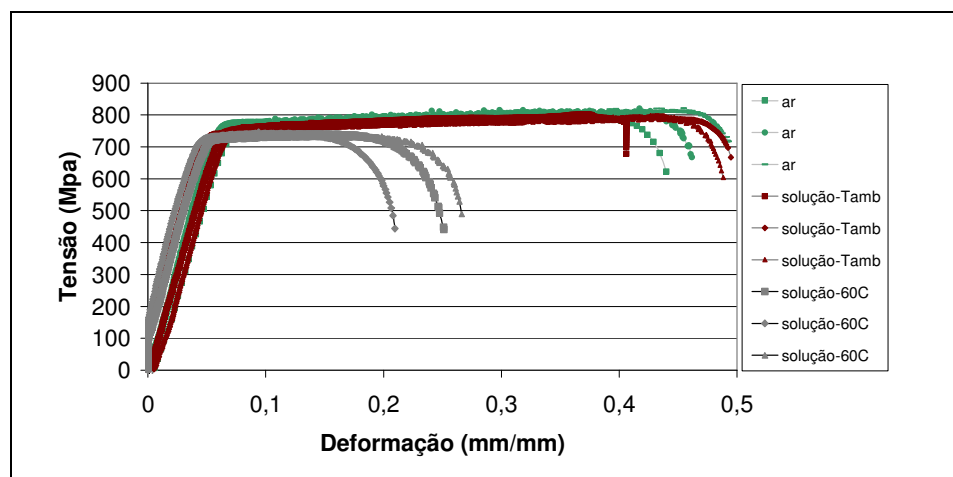


Figura 5. Ensaio de tração BTB para o aço inoxidável UNS S30400

Os resultados obtidos nos ensaios de tração BTB do aço tipo 304, expressos pelos parâmetros tempo de ruptura (T_{total}) e deformação total (ϵ_{final}) e ainda pelos valores de resistência à tração (σ_t) e potencial de corrosão (E_{corr}), estão sumarizados na Tabela 3. Os valores de potenciais expressos nesta tabela referem-se à média dos valores obtidos para os três corpos-de-prova, utilizados para cada condição de ensaio, no momento da fratura. Para todas as demais variáveis, os valores apresentados são também os valores médios obtidos nos três ensaios realizados por condição de ensaio.

Tabela 3: Propriedades do aço tipo 304 em ensaio BTB

MEIO	ϵ_{final} (média, %)	T_{total} (média, h)	σ_t (média, MPa)	E_{corr} (média, mV)	OBS
AR	46,4	10	811	-	-
Sol.1/T.amb	45,6	10,2	793	-267	-
Sol.1/60 °C	24	5,7	739	-250	CST

3.1.2 Fractografia

As Figuras 6 A/B/C, a seguir, apresentam as imagens das superfícies laterais dos corpos-de-prova de aço inoxidável UNS S30400 após ensaios BTB, obtidas por elétrons secundários através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). As fractografias apresentadas nas Figuras A e B, referentes aos corpos-de-prova em ensaio ao ar e em solução de 1.000 ppm de cloreto à temperatura ambiente, respectivamente, mostram aspectos de fratura dútil, conforme se evidencia pela presença de estrição na região da fratura e pela ausência de trincas secundárias. Na Figura 6 C, entretanto, observam-se microtrincas secundárias – inclinadas e perpendiculares com relação ao eixo de carregamento – incidentes na região “a” do corpo-de-prova fraturado no ensaio de tração BTB, realizado em solução de 1.000 ppm de cloreto na temperatura de 60 °C.

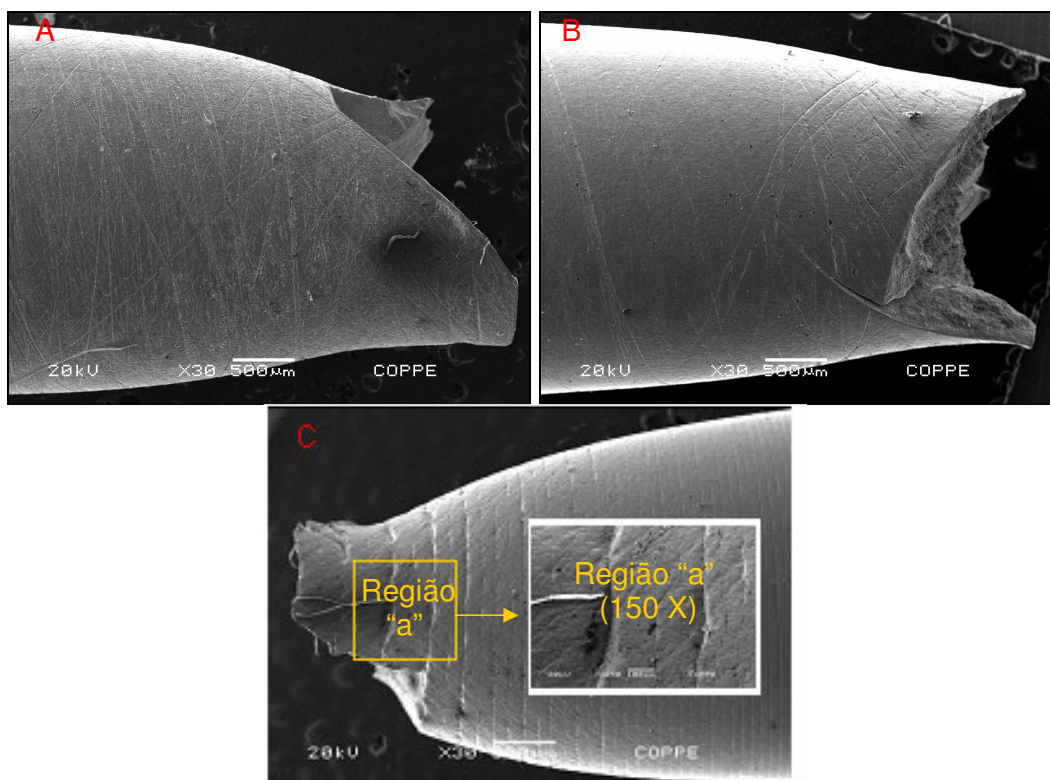


Figura 6. (A) Vista lateral do cp fraturado em ensaio de tração BTB ao ar. MEV, 30x. (B) Idem, em solução de 1.000 ppm Cl^- , pH 7 e 23 °C. MEV, 30x. (C) Idem, 60 °C. MEV, 30x.

3.2 Corrosão por Pite

3.2.1 Polarização anódica

O estudo da susceptibilidade à corrosão por pites, efetuado através dos ensaios de polarização anódica, objetivou analisar a resposta do material em estudo em meio de cloreto, de acordo com o método descrito no item 2.3.1.

Na Figura 7, encontram-se as curvas de polarização anódica (potencial versus densidade de corrente) do aço inoxidável UNS S30400 em solução de 1.000 ppm de cloreto, obtidas nas temperaturas ambiente e de 60 °C. Observa-se a tendência à redução dos valores de potencial de pite nos ensaios realizados à temperatura mais elevada, os quais variaram de 236 mV_{ECS} a 299 mV_{ECS} , enquanto a variação registrada nos ensaios realizados à temperatura ambiente foi de

368 mV_{ECS} a 558 mV_{ECS}. A elevação da temperatura causou ainda aumento na densidade de corrente de passivação média de aproximadamente uma ordem, conforme se verifica na Tabela 4.

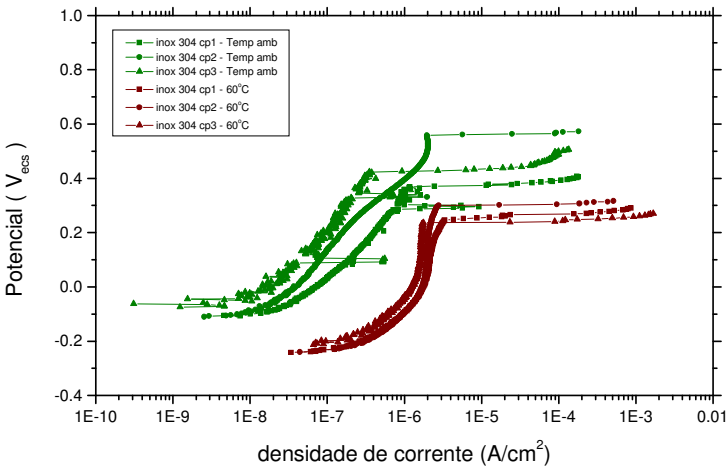


Figura 7. Polarização anódica do aço inoxidável UNS S30400 em solução de 1.000 ppm de cloreto, a temperatura ambiente e de 60°C

Na Tabela 4 encontram-se todos os valores de potencial de pite, densidade de corrente de passivação e faixa de potencial de passivação obtidos das curvas de polarização da Figura 7.

Tabela 4. Valores de E_{pite}, I_{pass médio} e ΔE do aço inoxidável UNS S30400 em solução de 1.000 ppm Cl⁻ à temperatura ambiente e de 60 °C

	UNS S30400	E _{pite} (mV _{ecs})	I _{pass médio} (A/cm ²)	ΔE (mV _{ecs})
Temperatura ambiente	cp 1	368	5,1 x 10 ⁻⁷	458
	cp 2	558	6,1 x 10 ⁻⁷	642
	cp 3	423	1,5 x 10 ⁻⁷	464
	Média	449	4,2 x 10⁻⁷	521
Temperatura de 60 °C	cp1	244	1,7 x 10 ⁻⁶	459
	cp2	299	1,6 x 10 ⁻⁶	512
	cp3	236	1,2 x 10 ⁻⁶	412
	Média	259	1,5 x 10⁻⁶	461

3.2.2 Espectroscopia de impedância eletroquímica

A resistência à corrosão foi também estudada por meio de ensaios de impedância eletroquímica, realizados de acordo com o método descrito no item 2.3.2. Nesta técnica não estacionária, estuda-se a resposta da interface metal-solução a uma perturbação em potencial, através da variação de corrente com o tempo. Esta variação se dá em função dos diferentes processos que ocorrem na interface. Os dados obtidos nestes ensaios são apresentados na forma dos diagramas de Nyquist e de Bode.

A Figura 8, a seguir, apresenta os diagramas relativos aos ensaios de impedância eletroquímica do aço inoxidável tipo 304, em meio de cloreto, realizados nas duas temperaturas de estudo. Como pode ser observado nos diagramas de Nyquist, todos os espectros de impedância mostram arcos capacitivos únicos que não interceptam a abscissa em nenhum ponto no intervalo de frequência avaliado.

Estes resultados sugerem que o material apresenta elevados valores de resistência de polarização, característicos de superfícies passivadas. Observa-se, contudo, que o filme passivo torna-se mais protetor para os ensaios realizados à temperatura ambiente. Para os ensaios realizados à temperatura de 60°C, os diagramas de Nyquist apresentam maior tendência ao fechamento de arco, com diminuição dos valores de impedância, tanto da parte real quanto da imaginária, comparativamente aos ensaios realizados à temperatura ambiente. Os perfis dos diagramas de Bode correspondentes confirmam os menores valores de impedância obtidos para os ensaios realizados à temperatura mais elevada, para toda a faixa de frequência estudada.

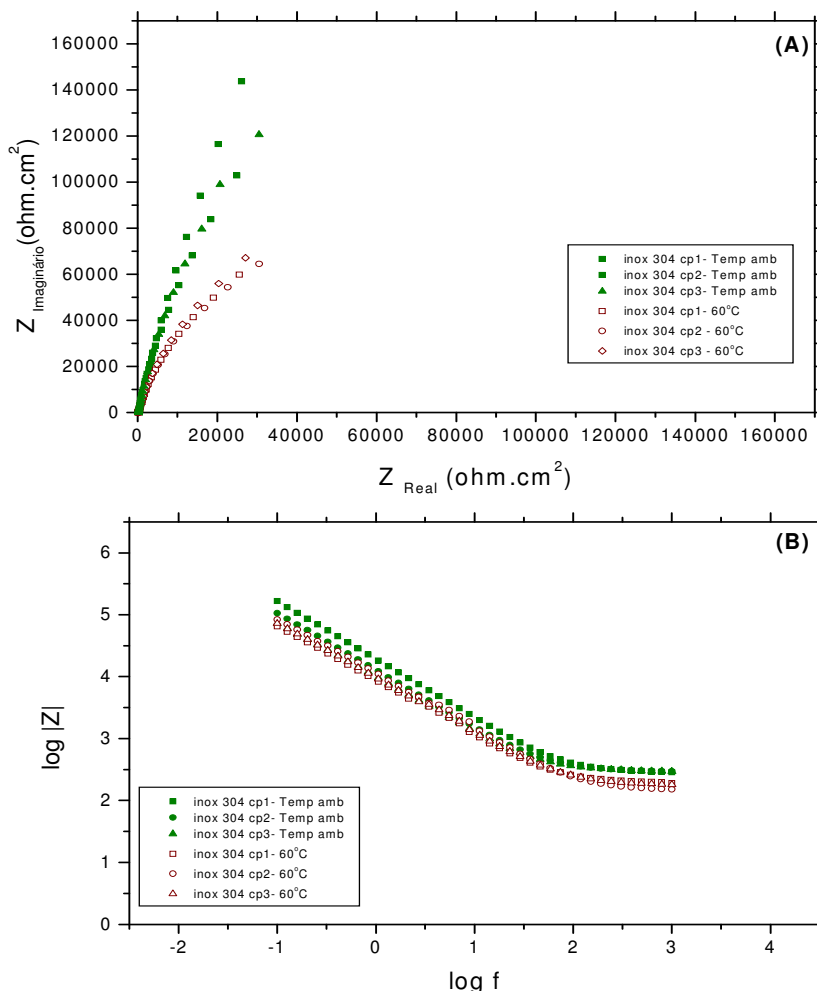


Figura 8. Aço inoxidável UNS S30400 em solução de 1.000 ppm de Cl⁻. Temperatura ambiente e de 60°C. (A) Diagrama de Nyquist. (B) Diagrama de Bode

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de tração BTD do aço inoxidável S30400, expressos pelos parâmetros tempo de ruptura (T_{total}) e deformação total (ϵ_{final}), apresentados no item 3.1, revelaram que a susceptibilidade à CST do aço tipo 304 é fortemente influenciada pela temperatura de ensaio. Os valores de ϵ_{final} e T_{total} sofreram queda de 47% e 44%, respectivamente, com relação aos valores registrados à temperatura ambiente, o que caracteriza a severidade do processo de

CST. A ocorrência da CST é confirmada pela incidência de microtrincas secundárias perpendiculares e inclinadas em relação ao eixo de carregamento, nas superfícies circunferenciais dos corpos-de-prova fraturados nos ensaios em solução de cloreto à temperatura de 60°C.

O efeito da temperatura é o fator preponderante, também, na susceptibilidade à corrosão por pite do aço tipo 304 em solução de 1.000 ppm de cloreto, de acordo com o resultado obtido com a técnica de polarização anódica. A influência da temperatura é notada pelo decréscimo nos valores de potencial de pite com o aumento da temperatura para 60°C. O valor médio da redução de potencial, considerando-se os três ensaios realizados em cada temperatura de estudo, foi de 190 mV_{ECS}, conforme se verifica na Tabela 4. Os valores da densidade de corrente de passivação média ($I_{\text{pass médio}}$) aumentaram com a elevação da temperatura na solução de cloreto, conforme se vê na tabela em referência, confirmando-se a influência negativa da temperatura na corrosão por pite do material.

Os ensaios de impedância eletroquímica corroboram a influência do aumento da temperatura na propensão à corrosão por pite do material. Nas figuras 8 A/B, observam-se os diagramas de Nyquist e Bode, obtidos para as duas temperaturas de ensaio na solução de cloreto, através dos quais se verificam os maiores valores de impedância registrados à temperatura ambiente, comparativamente aos ensaios realizados a 60°C. A influência da temperatura reside, fundamentalmente, na alteração da cinética de crescimento do filme passivo, de acordo com Szklarska-Smialowska.⁽⁴⁾ Para temperaturas baixas, o crescimento do filme ocorre com taxas logarítmicas lentas, atingindo uma espessura limitada. Com o aumento da temperatura, o crescimento se dá a taxas mais rápidas, resultando em filmes mais espessos, porém, menos protetores do que aqueles formados à temperatura ambiente. A composição do filme passivo, por outro lado, também é dependente da temperatura, além de outras variáveis, como o meio, o potencial e o tempo, podendo alterar sobremaneira a resistência da camada passiva.⁽⁴⁾ Nota-se ainda a correspondência entre as técnicas de polarização e de impedância na detecção da influência da temperatura na resistência à corrosão do material.

5 CONCLUSÃO

I- A corrosão por pite do aços UNS S30400 é intensificada nos ensaios de polarização realizados à 60 °C. Foi observado que o aumento da temperatura provocou redução no valor do potencial de pite;

II- Foi observado ainda o efeito negativo do aumento da temperatura na passivação do material estudado, através dos resultados obtidos nos ensaios de impedância eletroquímica. Isto se deve, provavelmente, às alterações da cinética de crescimento do filme passivo na superfície metálica, que modificam, por sua vez, a estrutura dos óxidos formados;

III- A corrosão sob tensão do aço UNS S30400 em solução de 1000 ppm de cloreto é fortemente dependente da temperatura. Para a temperatura de 60 °C, em ensaio de tração realizado com taxa de deformação de $9 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, o material apresentou mecanismos de dano associados à CST. À temperatura ambiente, não foi evidenciada sensibilidade da liga ao eletrólito.

REFERÊNCIAS

- 1 ASTM-E 8/E 8M – 08; Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, Estados Unidos, 2008.
- 2 BASTOS, I. N., PONCIANO, J. A. G., CANDIDO, L. C. Comportamento em corrosão sob tensão do sistema aço inoxidável austenítico em soluções aquosas contendo cloretos. In: Seminário Brasileiro de Aço Inoxidável, 6,1999, SP.
- 3 ASTM G 129-00, Standard Practice for Slow Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking, ASTM International, Estados Unidos, 2006.
- 4 SZKLARSKA-SMIALOWSKA, S. Pitting Corrosion of Metals. NACE, 1986.
- 5 LEÃO, E.R.C. Estudo do Comportamento de Aços Inoxidáveis Austeníticos e Austeno-Ferríticos em Sistemas de Resfriamento Industrial com Elevado Ciclo de Concentração. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008. 265 p. Tese – COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.