

ESTUDO DA CORROSÃO POR PITE EM AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX COM VÁRIOS TEORES DE FERRITA EM MEIO CONTENDO ÍONS CLORETO EM DIFERENTES TEMPERATURAS¹

Elki Cristina de Souza^{*2}

*Sérgio Rossiti*³

*João Manuel Domingos de Almeida Rollo*⁴

Resumo

O desempenho em serviço de componentes confeccionados com aços austeno-ferríticos (duplex ou superduplex) depende fundamentalmente de sua microestrutura que é influenciada pelas condições de fabricação das peças fundidas. É de fundamental importância o controle da quantidade e da morfologia das fases austenita e ferrita que compõem a base microestrutural dos aços inoxidáveis duplex para garantir resistência à corrosão por pite e por fresta, resistência mecânica e tenacidade. As faixas de composição para os aços inoxidáveis austeno-ferríticos especificadas pelas normas internacionais são mais amplas que as permitidas pelas restrições impostas sobre os teores de ferrita e não existem levantamentos sistemáticos que relacionam a microestrutura com porcentagem de ferrita nos aços duplex definidos pelas normas usuais **ASTM** ou **DIN**. Com o intuito de controlar e avaliar o efeito da microestrutura desses aços sobre as propriedades físico-químicas, elegeu-se o aço inoxidável austeno-ferrítico superduplex ASTM A995M Gr.5A (Cr25Ni7MoN) como material de referência. Partindo-se deste material, foram fundidas amostras com quatro diferentes composições, ajustando-se o teor de ferrita numa faixa entre 35 e 60%, através do balanço da porcentagem de cromo e níquel. Foram realizados ensaios convencionais de caracterização microestrutural e de microdureza das fases e ensaios eletroquímicos em meio de água de mar sintética, a temperatura ambiente e a 78° C, investigando o efeito da temperatura na resistência à corrosão por pite destes materiais.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis austeno-ferríticos; Corrosão por pite; Curvas de polarização.

STUDY OF THE PITTING CORROSION IN DUPLEX STAINLESS STEELS WITH VARIOUS AMOUNTS OF FERRITIC IN MEDIUM CONTAINING CHLORIDE IONS AT DIFFERENT TEMPERATURES

Abstract

The performance in service of components confectioned with austenitic-ferritic stainless steels (duplex or superduplex) is dependent on its microstructure that is influenced by the manufacture conditions of the casting pieces. It is very important the control of the amount and morphology of the austenite and ferrite phases which are the microstructure of duplex stainless steels to obtain pitting and crevice corrosion resistance and mechanical resistance and tenacity. The bands of composition for austenitic-ferritic stainless steels specified by the international norms are ampler than those allowed ones by the restrictions imposed on amount of ferrite and systematic surveys do not exist to relate the microstructure with ferrite percentage in duplex steel defined by usual norms ASTM or DIN. With intention to control and to evaluate the effect of the microstructure of these steels on the properties physical-chemistry, austenitic-ferritic superduplex ASTM A995M Gr.5A was elaborated the material reference stainless steel (Cr25Ni7MoN). From this material, samples with four different compositions were prepared, adjusting the amount of ferrite between 35 and 60%, through the balance of the percentage of chromium and nickel. Microstructural conventional measurement and phases microhardness tests were made and electrochemical technique in medium of synthetic seawater at room temperature and 78° C was used to investigate the effect of the temperature in the pitting corrosion resistance for these materials.

Key words: Austenitic-ferritic stainless steels; Pitting corrosion; Polarization curves.

¹ *Contribuição técnica ao 62° Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Dra. Pesquisadora - Depto. de Eng. de Materiais, Aeronáutica e Automobilística - EESC.*

³ *Dr. Eng.º de materiais - Grupo Metal, Tietê - SP.*

⁴ *Dr. Professor associado - Depto. de Eng. de Materiais, Aeronáutica e Automobilística - EESC.*

⁵ **e-mail: elkicsouza@yahoo.com.br*

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos aços austeno-ferríticos em relação aos já existentes ou novas avaliações para sua utilização nas diferentes situações torna-se necessário para aplicações nos campos estruturais, navais e, particularmente no caso das petrolíferas, como na perfuração e produção de petróleo em plataformas *off-shore* a grandes profundidades e condições diversificadas.^[1-3] Equipamentos como vasos de pressão, reatores e tanques de armazenamento para uso em altas temperaturas ou em meio aquoso com cloretos, são fabricados com aço inoxidável de estrutura duplex. Considerando a utilização dos inoxidáveis duplex e superduplex no segmento de produtos fundidos, a maior aplicação destes materiais está na fabricação de componentes de grande responsabilidade como p.ex. bombas centrífugas e válvulas de controle de fluxo. Estas bombas e válvulas são utilizadas para transporte e controle de fluxo de produtos corrosivos, aplicados nas indústrias petrolíferas, químicas, siderúrgicas, etc. Na indústria petrolífera, estes aços são utilizados em plataformas fixas e flutuantes onde operam em profundidades até 2000m abaixo do nível do mar e também em componentes fundidos como bombas que injetam água salgada no subsolo marítimo para aumentar a pressão local, expulsando o gás e o óleo. Nestas situações, os equipamentos suportam pressões de até 350 bar, sendo susceptíveis à ação dos agentes corrosivos, como a água de mar, atuando nestes materiais como um forte eletrólito e também produtos contendo cloretos, sulfetos, gás carbônico e outros gases dissolvidos, baixo valores de pH e possivelmente bactérias.^[1,3,4] Para estes fins, os aços austeno-ferríticos devem apresentar resistência mecânica e à corrosão ao pite adequadas.

Os aços austeno-ferríticos, ou aços inoxidáveis duplex, são assim classificados pela sua microestrutura, que apresenta duas fases mais comuns que são: a ferrita (α) e austenita (γ) e denominados de inoxidáveis em função de possuírem fase com teor de Cr acima de 12% (em peso), responsável pela formação de um filme passivo de óxidos (Cr_2O_3), protegendo a liga contra a corrosão nos meios onde são aplicados.^[5,6]

Embora suas preparações seguem a rota convencional de fundição a vácuo e tratamentos térmicos, são permitidas por norma, pequenas variações e/ou adições dos elementos de liga, levando a diversas combinações nas composições dos aços. A equação (1) apresenta uma fórmula empírica para avaliar o desempenho dos aços inoxidáveis com estrutura duplex quanto à corrosão por pite,

$$\text{PREn} = \% \text{Cr} + 3,3\% \text{Mo} + 16\% \text{N} \geq 40,0 \quad (1)$$

onde os percentuais dos elementos químicos são em peso e PREn significa “*Pitting Resistance Equivalent number*”.

De acordo com Schlapfer e Weber^[7] esta soma deve ultrapassar o valor de 31 para assegurar uma boa resistência à corrosão. Segundo Charles,^[8] quando este valor ultrapassa 40, os inoxidáveis com estrutura duplex são chamados de *superduplex*. Hagen *et al.*^[9] considerando o papel do cobre e do tungstênio na resistência à corrosão por *pite*, ampliaram a fórmula para:

$$\text{PREn} = \% \text{Cr}_{\text{livre}} + 3,3(\% \text{Mo} + 0,5\text{W}) + 2(\% \text{Cu}) + 16\% \text{N} \quad (2)$$

Sendo que $\% \text{Cr}_{\text{livre}} = \% \text{Cr} - 14,5(\% \text{C})$.

Atribuiu como material de partida o aço definido pela norma ASTM A995M Gr.5A e PREn maximizado, onde neste presente trabalho limitou-se a porcentagem de fase

ferrítica entre 35 e 60%, determinada em função da razão da $Cr_{equiv.}/Ni_{equiv.}$, buscando desta forma obter a melhor relação de propriedades mecânicas e propriedades de corrosão.

Atualmente os aços inoxidáveis austeno-ferríticos substituem os inoxidáveis austeníticos principalmente nas indústrias químicas e petrolíferas, onde os componentes estão sujeitos a diversos tipos de desgaste.^[10,11] O objetivo de elaborar aços austeno-ferríticos ASTM A995M Gr.5A balanceando o teor de Cr e de Ni para se obter a porcentagem de ferrita adequada é uma interessante alternativa para avaliar os efeitos destas alterações com relação às características microestruturais e da resistência à corrosão, para utilizá-los em aplicações industriais que necessitem adequada resistência superficial. No meio circulante (líquido ou gás) a aplicação destes materiais, p.ex. em válvulas, bombas etc. a resistência à corrosão é afetada pela temperatura e também são susceptíveis à ação dos agentes corrosivos do meio onde utilizados, como a água de mar onde cloretos, sulfetos, gás carbônico e outros gases dissolvidos estão presentes.^[1] Para estes fins, os aços austeno-ferríticos necessitam de alta resistência às mais adversas condições de corrosão, desta forma, o intuito de desenvolver novos aços pode representar uma importante aplicação do aço austeno-ferrítico em meios agressivos, obtendo um grande avanço tecnológico com vantagens econômicas para a fabricação de equipamentos empregados na indústria petrolífera.

2 EXPERIMENTAL

A liga superduplex ASTM A995M Gr.5A (Cr25Ni7MoN) e as ligas com variações na porcentagem de ferrita, foram elaboradas em forno de indução industrial pertencente ao Grupo Metal, empresa localizada em Tietê - SP. A composição química foi quantificada por meio de um espectrômetro de emissão ótica marca Baird de 23 canais. Amostras das ligas foram submetidas ao tratamento térmico de solubilização a 1100 °C durante uma hora em um forno elétrico tipo mufla.

As amostras metálicas foram embutidas em resina acrílica e, para a análise metalográfica e ensaios de corrosão, foram manualmente polidas com lixa de número 80 até a 2000 e em seguida para o acabamento, utilizou-se óxido de cromo de granulação 10 µm, efetuado a limpeza com álcool etílico nos materiais durante estas etapas de polimento. As microestruturas finais dos aços foram reveladas utilizando-se o reagente químico Behara (25 mL de HCl, 3g de bifluoreto de amônia e 125 mL de H₂O destilada) no qual foi adicionado 0,2 g de metabissulfito de potássio. O ataque foi interrompido com água e álcool e em seguida os materiais foram secos com um jato de ar. As amostras foram analisadas em um microscópio óptico Leica equipado com uma câmera, acoplado a um microcomputador que coordena um sistema de aquisição de imagens. Este procedimento permite a obtenção de tamanho de grão, distribuição e porcentagem das fases presentes.

Para avaliar o efeito das fases no endurecimento do material foram feitas medidas da microdureza dos constituintes nas amostras após os tratamentos térmicos de solubilização. Utilizando-se uma carga de 100 gf, as medidas foram realizadas conforme a norma ASTM A370/94 (1995) em um microdurômetro Leica VMHT-MOT.

Experimentos eletroquímicos foram realizados após a imersão das amostras em solução de cloreto de sódio a 3%, fazendo-se levantamento dos perfis de potencial de

circuito aberto com o tempo durante 20 minutos e curvas de polarização anódica e catódica, utilizando-se uma taxa de varredura de potencial igual a 0,5 mV/s, para se caracterizar a superfície dos aços pelos valores de potenciais onde ocorrem a formação de filmes de óxidos e/ou hidróxidos sobre a superfície das amostras. Também foi avaliada a resistência à corrosão por pite em função da temperatura (Temperatura \leq 78 °C). Os experimentos eletroquímicos foram realizados utilizando-se um equipamento potenciostato/galvanostato VoltaLab modelo 402 com *software* VoltaMaster 4 acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados. As curvas de polarização e os valores de resistência ao pite foram obtidos a partir dos gráficos de potencial em função do logaritmo da densidade de corrente (E vs. $\log |i|$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microestrutura e Microdureza das Fases do Aço Inoxidável Superduplex ASTM A995M Gr.5A

Na Figura 1 está apresentada a microestrutura revelada após ataque químico, para uma estrutura duplex que é composta de duas fases: uma austenita (área clara) apresentando-se em forma alongada e orientações transversais e uma fase ferrita (fase azul escura) que é representada por uma matriz ao fundo. Pela Figura 1 é possível observar que ambas as fases, austenita e ferrita, apresentam pequenas inclusões. Também estão ilustradas as indentações de ensaios de microdureza Vickers realizados nas duas fases (Figura 1), mostrando as duas diagonais da indentação deixadas na superfície da amostra depois da remoção da carga de 100 gf aplicada pelo penetrador de diamante, na forma de uma pirâmide reta de base quadrada. As indentações mostradas na Figura 1 estão próximas nas duas fases somente para efeito ilustrativo, porém teve-se o cuidado de medir a microdureza Vickers das fases em diferentes regiões da amostra, realizando-se oito ensaios para cada fase e calculando-se a média aritmética de seus valores. A Tabela 1 apresenta os resultados de microdureza obtidos nas duas fases dos aços austeno-ferríticos e os valores da porcentagem de ferrita para quatro diferentes amostras analisadas com variações no teor desta fase. O balanceamento dos elementos de liga nos aços inoxidáveis duplex tem por objetivo controlar os teores de elementos estabilizadores de austenita, ou gamagênicos, tais como níquel, carbono, nitrogênio e de elementos estabilizadores da ferrita, ou alfa-gênicos, cromo, molibdênio e silício. Estes elementos constituem a composição química dos aços duplex, o qual possui uma estrutura lamelar com grãos alongados na direção de laminação e composta por uma matriz ferrítica com ilhas de austenita, sendo de aproximadamente 35-55% de ferrita e 45-65% de austenita.^[12]

Pela Tabela 1, nota-se para todos os materiais que a fase ferrita possui valores de dureza Vickers (Hv) poucos maiores quando comparado com a fase austenita e, para os aços duplex com porcentagem de ferrita de até 54%, nota-se um pequeno aumento de Hv das fases com o aumento da porcentagem de ferrita. Quanto à parcela de aumento de dureza relativa à quantidade de ferrita, alguns pesquisadores têm relatado^[13,14] uma diferença entre a ferrita e a austenita em torno de 20 a 30 Hv. Entretanto, Herbsleb et al.^[15] acharam praticamente a mesma microdureza na austenita e na ferrita após solubilização.

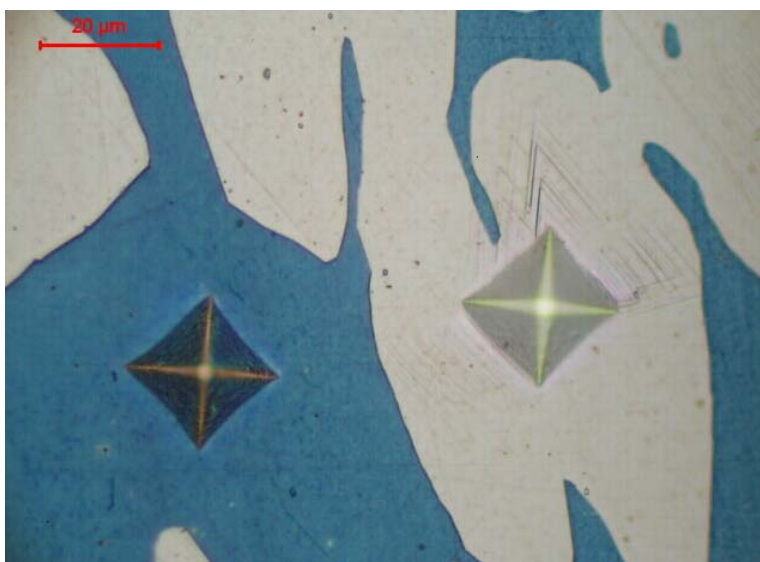


Figura 1 - Microestrutura do aço austeno-ferrítico com porcentagem de ferrita 36%. Indentação Vickers na austenita (fase clara) e na ferrita (fase azul). Ampliação 500 x.

Tabela 1. Valores de dureza Vickers das fases austenítica e ferrítica para quatro diferentes aços inoxidáveis duplex.

Aços austeno-ferríticos (% ferrita)	Microdureza das Fases, Vickers (Hv)	
	Austenita	Ferrita
36	242	283
46	267	337
54	263	347
58	246	291

3.2 Ensaios Eletroquímicos

Ensaios eletroquímicos em solução eletrolítica de NaCl 3%, foram realizados a temperatura ambiente e a quente (78 °C) a fim de se observar o comportamento dos aços duplex com diferentes porcentagens de ferrita frente a resistência à corrosão no meio contendo cloreto e a forma da corrosão em função da temperatura. As curvas de polarização potenciodinâmica obtidas para os aços inoxidáveis duplex a temperatura ambiente estão mostradas na Figura 2 e as respectivas curvas de polarização a 78 °C estão apresentadas na Figura 3. Para a obtenção das curvas de polarização a “altas” temperaturas, manteve-se a solução eletrolítica agitada para evitar a formação de bolhas no eletrodo de trabalho, evitando a desuniformidade no potencial de oxigênio. Na Tabela 2 estão apresentados os valores dos potenciais de pite (E_{pite}) e potenciais de corrosão (E_{corr}), estimados pelas Figuras 2 e 3.

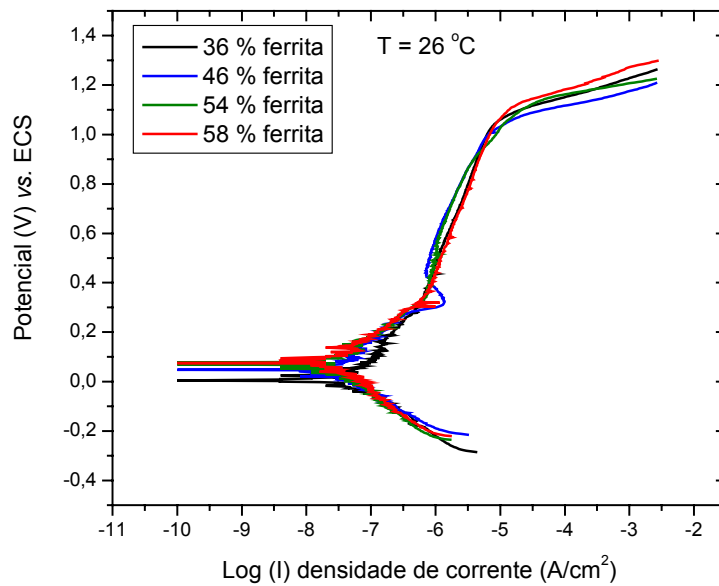


Figura 2 - Curvas de polarização catódica e anódica obtidas para os aços inoxidáveis duplex, NaCl 3%; velocidade de varredura de potencial = 0,5 mV/s, T= 26 °C.

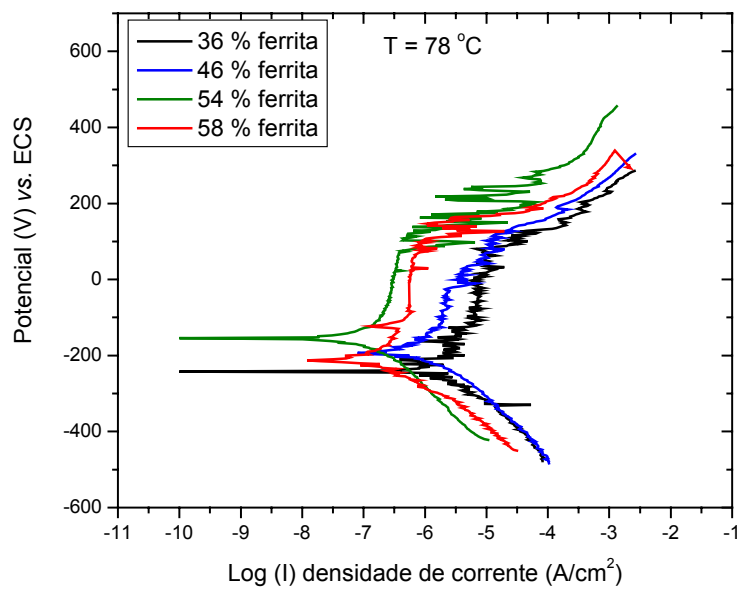


Figura 3 - Curvas de polarização catódica e anódica obtidas para os aços inoxidáveis duplex, NaCl 3%; velocidade de varredura de potencial = 0,5 mV/s, T= 78 °C.

Tabela 2 - Valores aproximados do potencial de pite (E_{pite}) e do potencial de corrosão (E_{corr}) para os quatro aços austeno-ferríticos estudados.

Aços duplex (% ferrita)	26 °C		78 °C	
	$\approx E_{\text{corr}}$ (mV _{ECS})	$\approx E_{\text{pite}}$ (mV _{ECS})	$\approx E_{\text{corr}}$ (mV _{ECS})	$\approx E_{\text{pite}}$ (mV _{ECS})
36	0	1060	-237	284
46	38	1040	-197	263
54	62	1150	-162	290
58	74	1140	-217	252

A resistência à corrosão é determinada pela capacidade que estes materiais têm de se passivar e permanecer neste estado no ambiente a que estiver exposto. Esta característica está relacionada, principalmente, aos elementos de liga presentes na composição química do aço, embora outros fatores como tamanho de grão, distribuição e morfologia de inclusões, precipitação de fases e qualidade da superfície também exerçam influência.^[16] Os mecanismos de corrosão localizada mais comuns são: corrosão por pite e corrosão sob tensão. Em geral, os aços inoxidáveis duplex apresentam bom comportamento a estes tipos de corrosão, mas não são imunes. Nos aços inoxidáveis austeníticos, assim como nos ferríticos, os elementos de liga estão distribuídos em uma única fase, fazendo com que a resistência à corrosão destes aços seja relativamente homogênea. Em aços duplex solubilizados pode ocorrer pite tanto na austenita como na ferrita: se o aço contém nitrogênio, que se apresenta na austenita, a resistência à formação por pite será maior nesta fase; em aços sem nitrogênio, a ferrita tem maior resistência à formação de pites por apresentar teores mais elevados de Cr e Mo.^[17,18] Embora a concentração dos elementos de liga seja diferente nas fases ferrita e austenita, os aços inoxidáveis duplex modernos possuem apurado balanceamento de elementos de liga em ambas as fases, conduzindo a propriedades de corrosão bastante equilibradas para as duas fases.^[3,16]

Na Figura 2, os resultados das curvas de polarização obtidas a temperatura ambiente para os aços inoxidáveis com diferentes porcentagens de fase ferrita, indicam similaridade no que diz respeito ao comportamento eletroquímico bastante estável destes materiais, com uma ampla faixa de potencial passivo, onde o potencial de pite encontrado foi de aproximadamente 1,1 V vs. ECS para todas as amostras. De fato, polarização cíclica em solução 3,5% (0,6 M) de cloreto de sódio de aços inoxidáveis duplex levam a valores de potencial de pite (E_{pite}) entre 1000 mV_{ECS} e 1200 mV_{ECS}.^[17,19] Para todas as curvas de polarização observa-se uma região que é caracterizada por um grande aumento na densidade de corrente, que é o potencial de pite (E_{pite}). A presença principalmente de íons cloreto inibe a passivação do local afetado, tendo este alta taxa de dissolução através de reação anódica; aumentando a taxa de corrosão, fazendo da corrosão por pite um processo autocatalítico.

Assim como nos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, teores elevados de cromo e adições de molibdênio e nitrogênio resultam em aumento da resistência à corrosão por pite. O filme de passivação pode ser destruído apenas localmente, em pontos de superfície, e a corrosão ocorre como pequenos furos ou pites devidos alguns fatores que promovem este tipo de corrosão, os quais compreendem: *i*) soluções de cloreto e sais oxidantes; *ii*) soluções neutras, aeradas, de cloreto e *iii*) aumento de temperatura em soluções contendo cloreto.

Em trabalhos na literatura,^[18] na determinação do potencial de pite em dois aços inoxidáveis duplex (UNS S31500 e UNS S32404, ambos sem a adição de nitrogênio), foi constatado que se o potencial de pite estiver acima de 800 mV_{ECS}, o mecanismo de nucleação de pite envolve tanto a ação de íons cloreto quanto a presença de bolhas de oxigênio, que evoluem em soluções neutras acima do potencial citado. Os pites, quando da evolução de oxigênio, nucleariam na interface tripla metal-solução-gás.

Pelos resultados apresentados na Tabela 2, nota-se um pequeno aumento no E_{corr} com o aumento da % de ferrita. O estado de superfície pode interferir nestes valores, entretanto para todas as amostras estudadas, procurou-se realizar os ensaios de polarização nas mesmas condições de acabamento superficial do eletrodo. Autores têm relatado na literatura,^[17] uma comparação da resposta à polarização em soluções contendo NaCl 0,6 M sob superfície lixada e superfície polida com sílica coloidal de aços inoxidáveis duplex e notaram apenas uma pequena influência no potencial de corrosão, não havendo no entanto, maior alteração no comportamento à polarização cíclica.

Verifica-se nas curvas de polarização obtidas a 78 °C (Figura 3), uma significativa diminuição do potencial de pite quando comparado com as curvas obtidas a temperatura ambiente. No entanto, a ocorrência de pequenos máximos de densidade de corrente anódica ao longo do trecho passivo das curvas de polarização obtidas a quente, indicam a existência de vários pontos susceptíveis a corrosão por pite, principalmente para as amostras contendo 54 e 58% de ferrita, respectivamente. Nestes materiais há uma tendência de quebra da camada passiva, sem crescimento estável dos pites formados, antes do E_{pite} . A partir de um baixo valor de potencial (em torno de 300 mV), as curvas de polarização anódicas obtidas a 78 °C, apresentam um grande aumento no valor de densidade de corrente, mostrando um processo irreversível de formação do pite.

4 CONCLUSÕES

As curvas de polarização obtidas a temperatura ambiente para todas as amostras consideradas, indicaram um comportamento eletroquímico bastante estável com uma ampla faixa de potencial na região passiva e valores similares de potencial onde ocorre a formação de pite, independentemente da porcentagem da fase ferrita presente.

A presença de íons cloreto aumenta a susceptibilidade à corrosão por pite nos aços duplex, bem como o aumento da temperatura diminui fortemente o desempenho eletroquímico destes materiais, conforme indicado pelas curvas de polarização obtidas a quente onde observou-se uma acentuada diminuição do potencial de pite em temperaturas mais elevadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPESP (proc. n°. 06/55579-0) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Gorni, A.A.; Mei, P.R. *Aços alternativos ao HY-80 sem a necessidade de aplicação de têmpera e revenido*. Metalurgia & Materiais, v.56(4), p.287-93, 2003.
- 2 Wallén, B. *Corrosion of duplex stainless steels in seawater*. Stain Steel Word 97-5th World Conference, p.59-71, 1997.
- 3 Campos, M.; Bautista, A.; Cáceres, D.; Abenojar, J.; Torralba, J.M. *Study of the interfaces between austenite and ferrite grains in P/M duplex stainless steels*. Journal of the European Ceramic Society, v.23, p.2813-19, 2003.
- 4 Francis, R.; Byrne, G.; Warburton, G. R. *Experience with Zeron 100 superduplex stainless in the process industries- Stainless Steel 99*. 6th World Conference. KCL Publishing, p.613-624, 1999.
- 5 American Society for Testing and Materials - ASTM A995/98 - *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. Anual book of ASTM Standard, Easton, 1995.
- 6 Padilha, A. F. *Materiais de Engenharia: microestrutura e propriedades*, São Paulo: Hemus, p.77-86, 1997.
- 7 Schlapfer, H.W.; Weber, J. *Austenitic-ferritic duplex steels*. Winterthur, Sulzer Brothers Limited. Technical report, 1986.
- 8 Charles, J. *Super duplex stainless steels: structure and properties*. In: Duplex Stainless Steels'91. Conf. Proc. Stainless Steel, Beaune, Les Éditions de Physique, v.1, p.151-168, 1991.
- 9 Hagen, M.; Bolliger, W.; Schoffler, W. *Influence of fluoride in choride-containing fgd-suspension on the corrosion resistance of duplex stainless steel*. Bruchsal, Sulzer Weise GmbH. Technical report, 1997.
- 10 Beloti, M.M.; Rollo, J.M.D.A.; Filho, A.I.; Rosa A.L. *In vitro biocompatibility of duplex stainless steel with and without 0.2% niobium*. Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics. v.2, p.1-6, 2004.
- 11 Filho, A.I.; Rollo, J.M.D.A.; Silva, R.V.; Martinez, G. *Alternative process to manufacture austenitic-ferritic stainless steel wires*. Materials Letters. v.59, p.1192-1194, 2005.
- 12 Nilsson, J.-O. *Super duplex stainless steels*. Materials Science and Technology, v. 8, p.685-700, 1992.
- 13 Li, J.; Riquier, Y. *σ Phase precipitation and its effect on the mechanical properties of a super duplex stainless steel*. Materials Science and Engineering, v.174A, p.149-56, 1994.
- 14 Ura, M.M.; Padilha, A.F.; Alonso, N. *Influência da fase alfa linha (α') sobre a resistência à corrosão por pite de aços inoxidáveis duplex*. In: 49^o Congresso Anual da ABM, Anais. v. VIII, p.337-49, São Paulo, 1994.
- 15 Herbsleb, G.; Schwaab, P. *Precipitation of intermetallic compounds, nitrides and carbides in AF 22 duplex steel and their influence on corrosion behavior in acids*. In: Duplex Stainless Steel Conference, ASM, v.1, p.15-40, St. Louis, 1982.
- 16 Sedriks, A. J. *Corrosion of stainless steels*. Wiley-Interscience: New York, p. 13-24, 1996.

- 17 Magnabosco, R., Franzotti, T.C., Martin-Rabello, M.L.M., Alonso-Falleiros, N. *Uso de solução aquosa (0,3M NaCl + 0,3M NaBr) para a caracterização da corrosão por pite de dois aços inoxidáveis dúplex*. In: 59º Congresso Anual da ABM, Anais. CD-room, p.435-43, São Paulo, 2004.
- 18 Alonso-Falleiros, N., Hakim, A., Wolynech, S. *Corrosion*, 55, 5 (1999): p.443.
- 19 Magnabosco, R., Magalhães, M. *Corrosão por pite de aço inoxidável dúplex UNS S31803 (SAF 2205) após rápido envelhecimento a 850 °C*. In: 60º Congresso Anual da ABM, CD-room, Belo Horizonte, 2005.