

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TENSÃO DE CARREGAMENTO NA CORROSÃO SOB TENSÃO DE UM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S31803 EM SOLUÇÕES AQUOSAS CONTENDO ÍONS CLORETOS¹

Filipe Henrique Andrade Silva²
Henrique Meckler Santos²
José Carlos de Lacerda³
Luiz Cláudio Cândido⁴
Leonardo Barbosa Godefroid⁴
Ricardo Augusto Faria⁵

Resumo

O trincamento por corrosão sob tensão (CST) ocorre, geralmente, em materiais metálicos que apresentam características passivantes, em ambientes corrosivos específicos, em níveis de carregamento inferiores ao limite de escoamento do material. Por exemplo, os aços inoxidáveis austeníticos e duplex, podem sofrer CST, quando carregados ou por tensão residual, a partir de um determinado tempo. Este fenômeno de corrosão é muito localizado, onde a perda de material é desprezível, e pode gerar fraturas catastróficas. Quanto maior o nível de carregamento maior é a tendência de ramificação de trincas. Este trabalho estudou as características comportamentais de um aço inoxidável duplex do tipo "2205" (UNS S31803), com aproximadamente 50% de ferrita e 50% de austenita, em corpos de prova planos, com espessura de 1,81mm, laminado a frio e recozido a 1060°C, submetidos a ensaios de CST, com carga constante (sistema de "peso morto"), em solução aquosa contendo 42% MgCl₂, a 143°C, no potencial de corrosão. Foram realizados ensaios com diferentes níveis de carregamento (60, 50 e 40% do limite de escoamento do aço). Quanto maior a carga aplicada no corpo de prova (eletrodo), maior a intensificação do trincamento, portanto, menor tempo de ruptura do material. Devido ao mecanismo que ocorre no vértice da trinca, por dissolução anódica, a fratura resultante, embora o material tenha comportamento mecânico dúctil, foi totalmente frágil, indicando presença de facetas de clivagem, com marcas de "rios".

Palavras-chave: Aço UNS S31803; Cloretos; Corrosão sob tensão.

EVALUATION OF THE EFFECT OF LOADING STRESS OF STRESS CORROSION CRACKING IN A DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S31803 IN AQUEOUS SOLUTIONS CONTAINING CHLORIDE IONS

Abstract

The stress corrosion cracking (CST) generally occurs in metallic materials that exhibit passivating characteristics, in corrosive environments and specific load levels below the yield strength of the material. For example, austenitic and duplex stainless steels may undergo CST, when loaded or by residual stress from a given time. This phenomenon is very localized corrosion, where the material loss is negligible, and can generate catastrophic fractures. The higher the load level greater is the tendency to crack branching. This study examined the behavioral characteristics of a duplex stainless steel type "2205" (UNS S31803), with approximately 50% ferrite and 50% austenite in specimens plans, with thickness of 1.81 mm, cold-rolled and annealed at 1060 ° C, tested for CST, with constant load system ("dead weight") in aqueous solution containing 42% MgCl₂ at 143 ° C, at the corrosion potential. Tests were performed with different loading levels (60, 50 and 40% of the yield strength of steel). The higher the load applied to the specimen (electrode), the greater intensification of cracking therefore shorter break material. Due to the mechanism that occurs at the apex of the crack by anodic dissolution, the resulting fracture, although the material is ductile mechanical behavior was totally brittle, indicating the presence of cleavage facets, with marks of "rivers".

Key words: UNS S31803 steel; Chlorides; Stress corrosion cracking.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Aluno de Iniciação Científica do Curso de Engenharia Metalúrgica; UFOP. Ouro Preto, MG, Brasil. filipehs@gmail.com; henrique_meckler@hotmail.com.*

³ *Engenheiro mecânico. Membro da ABM; Doutorando da Redemat; Prof. Dep. Eng. Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira. Itabira, MG, Brasil. jlacerda@unifei.edu.br.*

⁴ *Engenheiro metalurgista. Membro da ABM; Prof. Dep. Eng. Metalúrgica e de Materiais/Escola de Minas/UFOP. Ouro Preto, MG, Brasil. leonardo@demet.em.ufop.br; candido@em.ufop.br.*

⁵ *Engenheiro metalurgista. Doutor em Engenharia de Materiais. Pesquisador do Centro de Pesquisas da Aperam South América. Timóteo, MG, Brasil. ricardo.faria@aperam.com.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex com taxa de ferrita/austenita na proporção 1:1 têm sido identificados como materiais de boa resistência à corrosão em vários meios aquosos. A proporção de microestrutura acima referida está associada à composição de elementos estabilizadores da austenita (Ni, C, N, Mn e Co) e da ferrita (Cr, Mo, Ti, Nb e W).⁽¹⁾ Alto conteúdo de Cr com a presença de Mo e N confere ao material uma alta resistência à corrosão por pites em meios contendo cloretos. A suscetibilidade dos aços inoxidáveis duplex à corrosão sob tensão é afetada pelos elementos de liga, tensão aplicada, microestrutura e meio.⁽²⁾

A proporção de ferrita/austenita nos aços inoxidáveis duplex, além da composição de elementos de liga acima citada, depende também da temperatura de solubilização. A solidificação do material se inicia com a ferrita e no decorrer do processo de resfriamento a austenita vai se formando e aumentando de volume nos contornos de grão da ferrita primária. Abaixo de aproximadamente 1000°C tende a formar a precipitação de intermetálicos.^(2,3)

Consideráveis mudanças no limite de resistência e alongamento do aço inoxidável duplex UNS S31803 são observadas em função da variação da temperatura de recozimento do material. Temperaturas de recozimento entre 850 e 1050°C proporcionam um significativo aumento no limite de resistência e um gradual decréscimo no alongamento devido ao fenômeno da precipitação. A melhor combinação de limite de resistência e alongamento para o referido aço inoxidável é obtida com tratamento térmico de recozimento em torno de 1050°C, conforme pode ser observado na Figura 1. A diminuição de resistência observada a partir de 1050°C pode ser atribuída ao aumento da fração de ferrita em relação à austenita.⁽⁴⁾

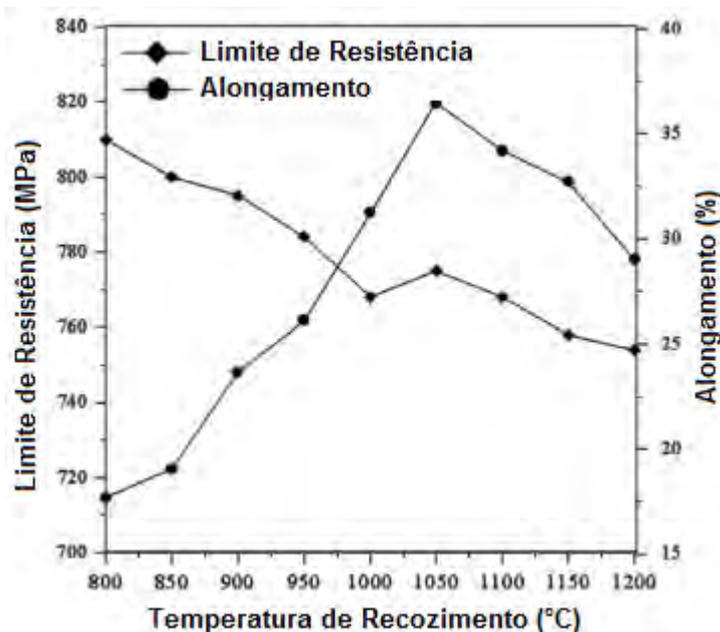


Figura 1 – Efeito da temperatura de recozimento no limite de resistência e alongamento do aço inoxidável UNS S31803.⁽⁴⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado utilizando-se amostras de chapas de aço inoxidável duplex do tipo UNS S31803, com espessura de 1,81mm, laminadas a frio e solubilizadas a 1060°C. O material foi caracterizado com auxílio de análises químicas e metalográficas, ensaios eletroquímicos (polarização cíclica).

Para as análises metalográficas utilizou-se um microscópio da marca Pantec acoplado a uma câmera de vídeo e captura de imagens e ao *software* Umias 2006. As amostras foram embutidas, desbastadas e lixadas até a lixa de granulometria 1200 e polidas com alumina de 1µm e pasta de diamante. Para revelação da microestrutura utilizou-se o reativo Behara.

Os ensaios de polarização foram realizados com auxílio de um potenciostato PAR (*Princeton Applied Research*) - modelo 273A acoplado a um computador e a uma célula eletroquímica plana com três eletrodos: eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS); contra-eletrodo de platina e eletrodo de trabalho (corpo de prova). Os ensaios foram conduzidos segundo as Normas: ASTM G5-82⁽⁵⁾ e ASTM G61-86.⁽⁶⁾ A preparação das amostras seguiu a Norma ASTM G1-81.⁽⁷⁾

Os corpos de prova foram confeccionados segundo a Norma ASTM E-466/95,⁽⁸⁾ conforme se apresenta na Figura 2.

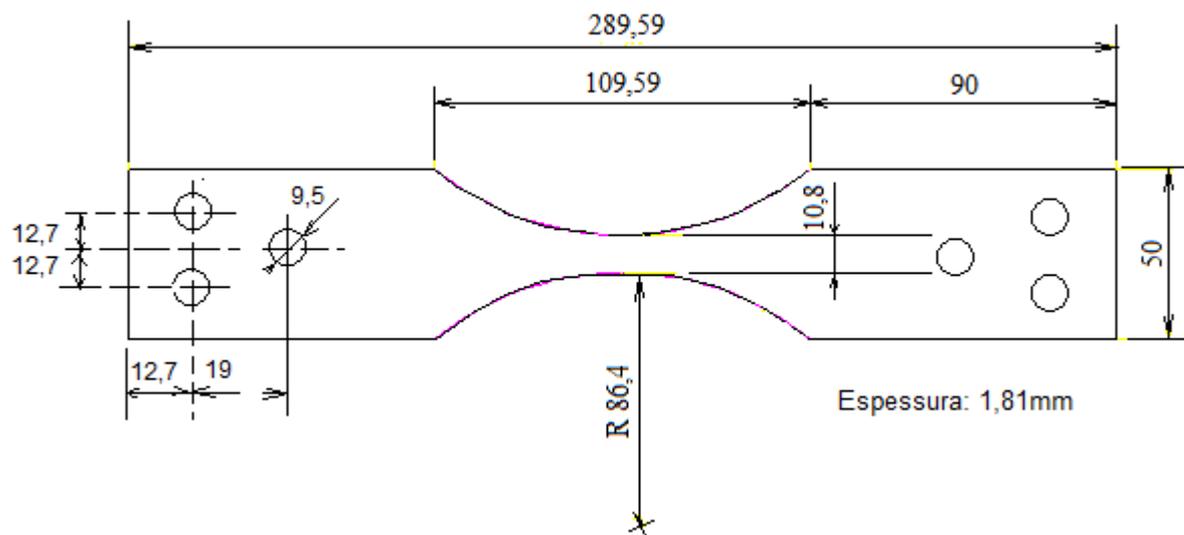


Figura 2 – Corpo de prova para ensaio de corrosão sob tensão.

Os corpos de prova foram obtidos por corte com jato de água de alta pressão e a região do empescoçamento do corpo de prova, na face onde houve o corte, foi lixada até a lixa de granulometria 600, seguida de desengraxamento com acetona e álcool.

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de corrosão sob tensão com carga constante em solução aquosa contendo 42% MgCl₂, a 143°C, no potencial de corrosão do sistema. Para abrigar o corpo de prova no meio corrosivo nas condições citadas, foi utilizada uma célula de vidro ligada a um condensador com refrigeração a água e um sistema de aquecimento com resistência elétrica, todos adaptados à uma máquina de corrosão sob tensão com carga constante. Na Figura 3 apresenta-se uma imagem do sistema citado na realização do ensaio de corrosão sob tensão.



Figura 3 – Sistema para ensaios de corrosão sob tensão com carga constante em meio aquoso a quente; as setas indicam as hastes para aplicação de cargas trativas.

3 RESULTADOS

Na Tabela 1 apresenta-se a composição química do aço inoxidável UNS S31803. A Figura 4 apresenta imagem da microestrutura da amostra do aço UNS S31803 no estado solubilizado a 1060°C. A ferrita é a matriz escura e a austenita apresenta-se como ilhas claras. A imagem foi obtida na superfície da espessura da chapa na direção de laminação.

Tabela 1 - Análise química (% em massa) do aço UNS S31803

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	V	P	Nb	N ₂	Outros
0,02	22,40	5,36	3,04	1,83	0,31	0,20	0,06	0,03	0,04	0,15	0,03

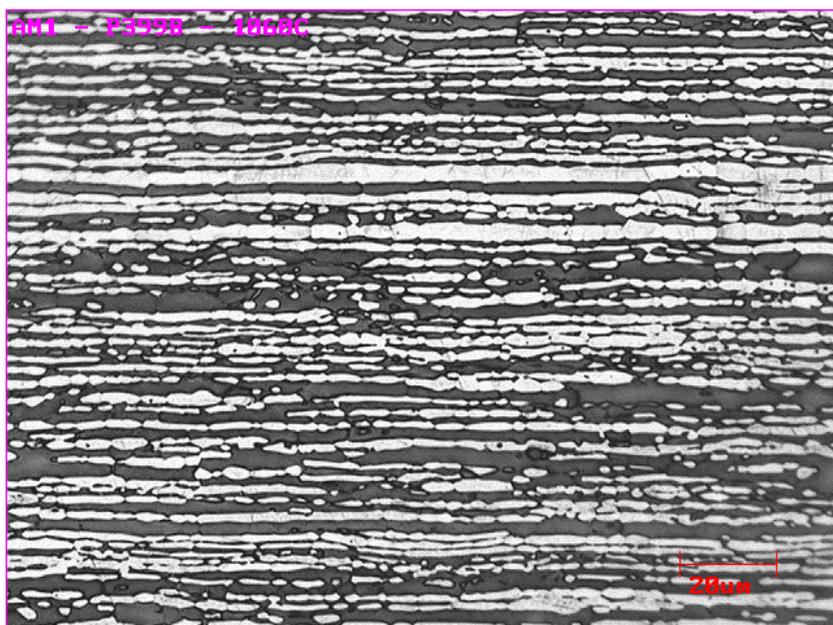


Figura 4 - Fotomicrografia do aço inoxidável duplex UNS S31803 solubilizado a 1060°C; ataque: Behara.

Na Figura 5 apresenta-se a curva obtida no ensaio de polarização cíclica do aço inoxidável duplex UNS S31803 em solução aquosa 3,5% (massa) NaCl a 1,67mV/s na temperatura ambiente. Observa-se que o material tem propensão à repassivação quando é feito a reversão no potencial do eletrodo.

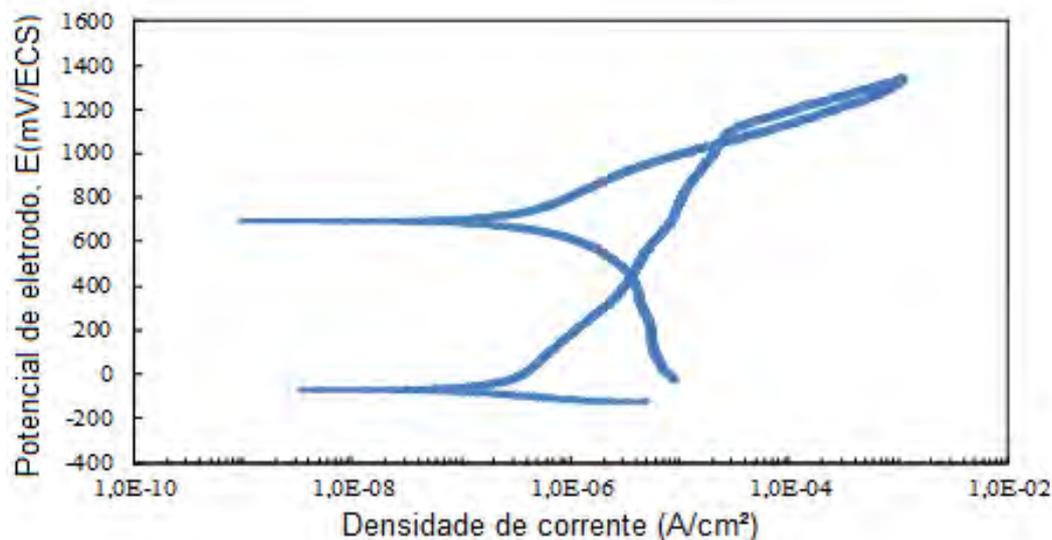


Figura 5 - Curva de polarização cíclica; aço inoxidável UNS S31803; solução aquosa 3,5% (massa) NaCl; 1,67mV/s; temperatura ambiente.

No gráfico da Figura 6 apresentam-se os resultados dos tempos de fratura dos corpos de prova submetidos a corrosão sob tensão com três cargas constantes em solução aquosa de MgCl₂ a 42% na temperatura de 143°C.

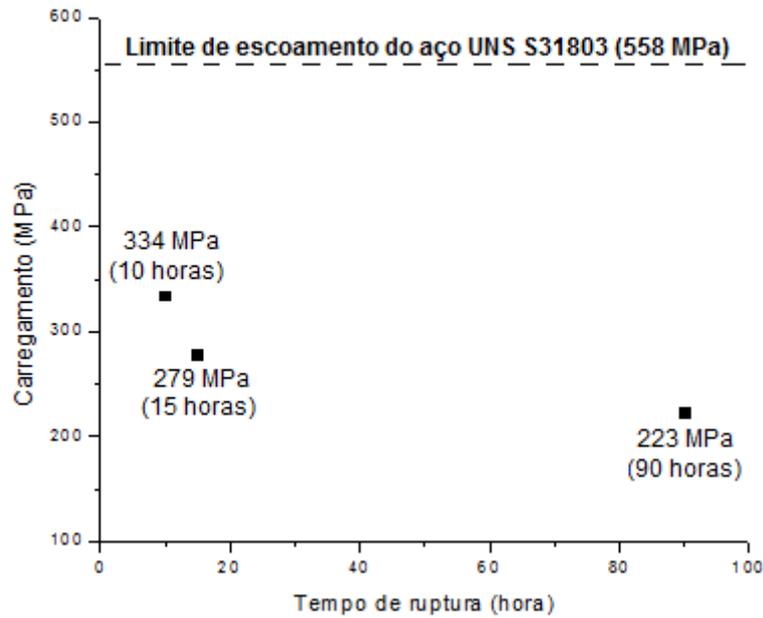


Figura 6 – Tempo de fratura dos corpos de prova submetidos à corrosão sob tensão sob carga constante; 42% MgCl₂ (T = 143°C).

Na Figura 7 apresentam-se imagens microfratográficas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de corrosão sob tensão. Nota-se a presença de trincas secundárias, bem agudas, típicas do fenômeno de CST, e próximas da região da fratura do corpo de prova.

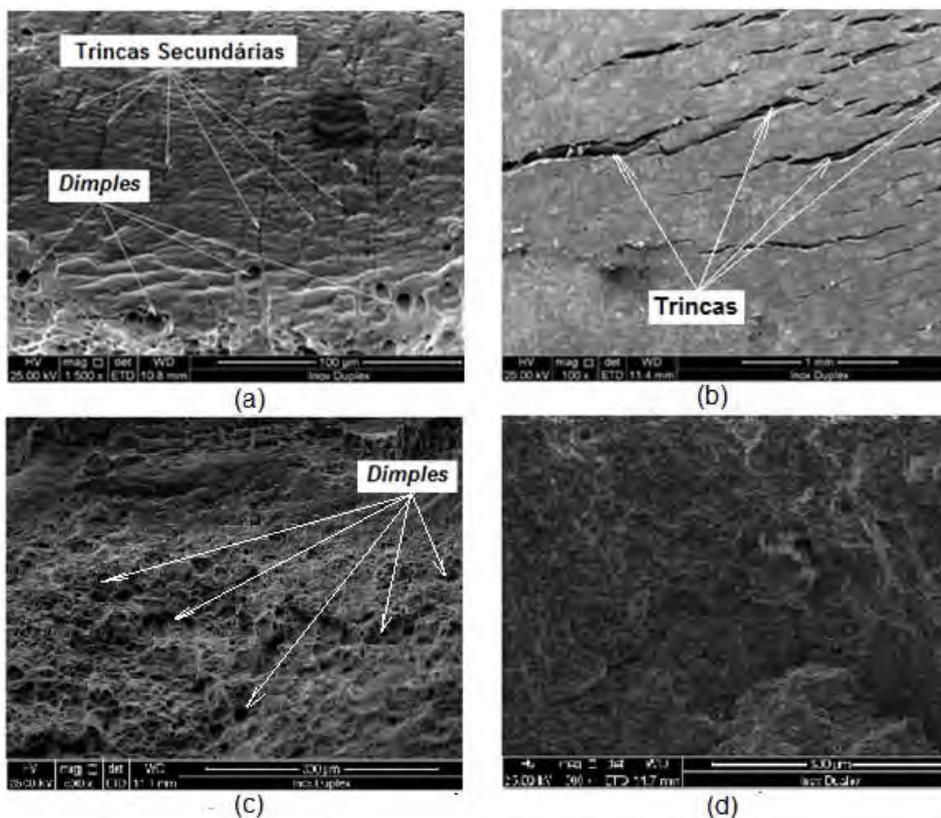


Figura 7 – Microfratografias de um corpo de prova ensaiado por corrosão sob tensão; sistema aço UNS S31803/42% MgCl₂: (a) seção da fratura; 1.500X; (b) superfície da chapa, próximo da fratura; 100X; (c) região de fratura dúctil; 500X; (d) região de fratura pelo efeito da CST ;500X; MEV.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme apresentado na Tabela 1, o aço inoxidável UNS S31803 apresenta cromo, molibdênio e nitrogênio na sua constituição. Estes elementos conferem resistência à corrosão por pites. E ainda, o fato da liga possuir teor de carbono inferior a 0,03% (massa) apresenta alta resistência à corrosão intergranular.

Na análise metalográfica da Figura 1 identifica-se a presença apenas de ferrita e austenita com porcentagem aproximada de cada uma das fases igual a 50%.

Nos ensaios de polarização cíclica pôde-se observar que o aço UNS S31803 foi capaz de reconstituir o filme passivo, conforme pode-se observar na Figura 5. Houve o cruzamento da curva reversa com a curva inicial, em um potencial superior ao potencial de corrosão (E_{corr}), na região de passivação.⁽⁹⁾ Os elevados potenciais de pite e também a pequena energia para a repassivação dos pites formados, mostraram que o material tem grande resistência a este tipo de corrosão, o que pode ser atribuído à presença do cromo, molibdênio e nitrogênio. Resultado semelhante foi encontrado por Magnabosco.⁽¹⁰⁾

Nos ensaios de corrosão sob tensão, como pode ser constatado no gráfico da Figura 6, os tempos de ruptura dos corpos de prova aumentaram não linearmente em função do aumento dos três carregamentos correspondentes a 60, 50 e 40% do limite de escoamento do material.

Na fratura do material submetido a corrosão sob tensão, Figura 7a, verifica-se a existência de duas regiões: uma, primeira, na qual a fratura se propagou pelo efeito combinado da tensão e do meio corrosivo e a outra onde a ruptura ocorreu subitamente por ação apenas da tensão, quando esta se tornou naquela localidade superior ao limite de resistência do material. Na Figura 7c e 7d apresentam-se com mais destaque, respectivamente, a primeira e a segunda região mencionada na Figura 7a. Assim, destaca-se a transição da fratura por CST (plana com aspecto frágil) e a ruptura mecânica final do material, quando a trinca principal atingiu o tamanho crítico, portanto, o nível de carregamento foi equivalente à tenacidade à fratura do material, gerando a ruptura dúctil com presença de *dimples*. Somente na primeira região mencionada evidencia-se a existência de trincas secundárias na fratura o que pode ser atribuído ao fenômeno de dissolução seletiva da ferrita e consequente ruptura da austenita.⁽¹¹⁾ Na segunda região, onde se predomina a existência de *dimples*, coerentemente não se observa a incidência de trincas secundárias, confirmando o exposto relativo à inexistência da ação corrosiva nesta região como causa da fratura.

Na Figura 7b, onde se apresenta imagem da região da superfície da chapa nas proximidades da fratura também são evidenciadas diversas trincas bem maiores que aquelas ocorridas na fratura, conforme mostrado na Figura 7a. Este aspecto indica que a nucleação de trincas por CST ocorre em vários pontos dos CPs, especialmente em regiões com maiores intensidades de tensão. E ainda, embora seja desenvolvida uma trinca principal que levará à fratura do material, como o fenômeno ocorre por dissolução anódica nas pontas de trincas, outras trincas também evoluirão, mas serão desenvolvidas mais lentamente, caracterizando-se como secundárias.

5 CONCLUSÕES

- O aço inoxidável UNS S31803, solubilizado a 1060°C, em análise micrográfica, apresentou microestrutura bifásica de austenita-ferrita na proporção aproximada de 50%;
- De acordo com a curva de polarização cíclica, o material analisado sofre corrosão por pites em meio contendo cloretos porém com favorável repassivação;
- Quando submetido à corrosão sob tensão o aço estudado sofre fratura, após um determinado tempo, quando submetido a carregamento inferior ao seu limite de escoamento em solução aquosa contendo 42% MgCl₂ (T = 143°C);
- Há aumento não linear do tempo de ruptura do material submetido à corrosão sob tensão na medida em que se diminui o carregamento aplicado;
- As análises macro e microfratográficas indicaram que os corpos de prova ensaiados por CST fraturam-se fragilmente, por dissolução anódica, e de maneira dúctil na ruptura mecânica final.

REFERÊNCIAS

- 1 Santos, N. B; Nunes, F. C; Matos, T. F; Salustiano, A. Z; Mota, R. O. Aços inoxidáveis duplex e superduplex: Aspectos de metalurgia física, soldagem e corrosão. In: 62^o Congresso ABM. Vitória-ES. 1997.
- 2 Tsai, Wen-Ta; Chen, Ming-Shan. Stress corrosion cracking behavior of 2205 duplex stainless steel in concentrated NaCl solution. Corrosion Science. v. 42, n. 3, p. 545-559. 2000.
- 3 Tavares, S. S. M; Terra, V. F; Pardal, J. M; Fonseca, M. P. C. Influence of the microstructure on the toughness of a duplex stainless steel UNS S31803. Journal of Materials Science. v. 40, p. 145-154. 2005.
- 4 Badji, R; Bouabdallah, M; Cacroix, B; Kahloun, C; Belkessa, B, Maza, H. Phase transformation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds. Materials Characterization. v. 59, p. 447-453. 2008.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). Standard reference method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements: G5, Philadelphia - USA, 1982.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). Standard test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron- Nickel or Cobalt Based Alloys G61, Philadelphia – USA, 1986.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens: G1, Philadelphia - USA, 1981.
- 8 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). Metals Test Methods and Analytical Procedures: Metals – Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Testes; Metallography. v. 03.01. 1998.
- 9 Araújo, C. R. Estudo do comportamento anódico do aço inoxidável ABNT 304, com filme de interferência, em NaCl 3,5% e FeCl₃.6H₂O 6% p/v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.
- 10 MAGNABOSCO, R. Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF2205). Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- 11 Lo, I-Hsuang; Tai, Wen-Ta. Effect of selective dissolution on fatigue crack initiation in 2205 duplex stainless steel. Corrosion Science. v. 49, p. 1847-1861. 2007.