

Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Avaliação da corrosão por pites em um aço inoxidável supermartensítico em meio contendo íons cloreto e tiosulfato.

Débora R. Lopes^a, Mônica M. A. M. Schwartzman^b, Wagner R. C. Campos^c, Letícia P. Alves^d

Abstract

In corrosion tests simulating the oil and gas extraction conditions, an alternative to the use of H₂S, a toxic and corrosive gas, is the use of nontoxic substances that can produce H₂S *in situ*, for example, sodium thiosulfate. In this study we compared the electrochemical behavior of stainless steel Super 13Cr in medium containing 35 and 190 g/L of sodium chloride. A characterization of the formed pits at 150 °C was performed in medium containing 35 g/L of sodium chloride. It was also compared to the steel electrochemical behavior in medium containing 190 g/L of sodium chloride and sodium thiosulphate at different concentrations (10⁻³ and 10⁻¹ mol/L). For this purpose, we used the cyclic potentiodynamic polarization techniques, optical microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometry. It was concluded that the increase of NaCl concentration in the medium led to a significant reduction in the pitting potential and the extent of the passivation region to Super 13Cr steel. It can also be concluded that the addition of thiosulfate led to an increase in the corrosion potential indicating a more noble steel behavior. However, steel was not passivated in medium containing 10⁻¹ mol/L of thiosulfate ions.

Keywords: Thiosulfate, sodium chloride, supermartensitic steel, electrochemical techniques.

Resumo

Em ensaios de corrosão que simulam as condições encontradas na extração de óleo e gás, uma alternativa ao uso do H₂S, um gás tóxico e corrosivo, é a utilização de substâncias não tóxicas que possam gerar H₂S no meio, como por exemplo, tiosulfato de sódio. Neste trabalho foram comparados os comportamentos eletroquímicos do aço supermartensítico 13Cr (Super 13Cr) em meios desaerados contendo 35 e 190 g/L de cloreto de sódio e também o comportamento eletroquímico do aço em meio contendo 190 g/L de cloreto de sódio e diferentes teores de tiosulfato de sódio (10⁻³ e 10⁻¹ mol/L). Para tal, foram empregadas as técnicas de polarização anódica potenciodinâmica cíclica, microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de energia dispersiva. Concluiu-se que o aumento da concentração de NaCl no meio provocou uma redução significativa no potencial de pite e na extensão da região de passivação para o aço Super 13Cr e que a adição de tiosulfato levou a um aumento do potencial de corrosão indicando um comportamento mais nobre do aço neste meio. Entretanto, o aço não se passivou no meio contendo 10⁻¹ mol/L de íons tiosulfato.

Palavras-chave: Tiosulfato, cloreto de sódio, aço supermartensítico, técnicas eletroquímicas.

^a Química - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN)

^b Doutora, Engenheira Química - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN)

^c Doutor, Engenheiro Mecânico - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN)

^d Engenheira Química - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN)

Introdução

O fenômeno da corrosão acompanha a indústria petrolífera desde a descoberta do petróleo como fonte de energia até os dias atuais. O ambiente de extração de petróleo e gás em águas profundas apresenta alta salinidade, baixo teor de oxigênio e gases corrosivos como o dióxido de carbono (CO₂) e o sulfeto de hidrogênio (H₂S) (1, 2). A presença de H₂S torna o ambiente mais propício à corrosão localizada podendo causar falhas do material devido à corrosão sob tensão (3). Na busca de soluções vantajosas no campo de desenvolvimento industrial, as companhias de petróleo procuram materiais que apresentem menores custos e que satisfaçam as necessidades de resistência mecânica e de resistência à corrosão. Dessa forma, uma nova classe de aço inoxidável martensítico que combina uma composição química com menores teores de carbono, adições de níquel e molibdênio, chamado de supermartensítico (dentre eles o aço inoxidável supermartensítico 13Cr ou Super 13Cr), foi introduzida na indústria de petróleo e gás (1, 4). Porém, o manuseio de misturas gasosas contendo H₂S, utilizadas para simular as condições existentes em campos de produção de petróleo e gás em águas profundas, deve ser realizado em laboratórios com instalações especiais, devido ao fato desse gás ser tóxico e inflamável (5). Estas instalações possuem custo elevado o que impede que muitos pesquisadores possam realizar ensaios de corrosão em ambientes contendo H₂S. Uma alternativa ao uso do H₂S é a utilização de substâncias não tóxicas que possam gerar H₂S no meio. Tsujikawa e colaboradores (6) propuseram a utilização de íons tiosulfato em substituição ao H₂S nos estudos da corrosão localizada nos aços inoxidáveis ferríticos, duplex e austeníticos. Outros autores vêm utilizando o íon tiosulfato para substituir o uso do H₂S em ensaios de corrosão sob tensão em aços carbono e inoxidáveis (7, 8, 9). Os íons tiosulfato são metaestáveis e se reduzem formando H₂S na superfície do metal, esta reação é espontânea no potencial de circuito aberto dos aços carbono e inoxidáveis. Neste trabalho foi comparado o comportamento eletroquímico do aço supermartensítico Super 13Cr em meio contendo 35 e 190 g/L de cloreto de sódio, concentração de oxigênio dissolvido $\leq 10^{-2}$ mg/L de O₂, pH 4,0 e realizada caracterização dos pites formados em meio contendo 35 g/L de cloreto de sódio à 150 °C. Foi comparado também o comportamento eletroquímico do aço em meio contendo 190 g/L de cloreto de sódio e diferentes teores de tiosulfato de sódio (10⁻³ e 10⁻¹ mol/L). Para tal, foram empregadas as técnicas de polarização anódica potenciodinâmica cíclica, microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de energia dispersiva.

Metodologia

Foram utilizadas amostras de aço Super 13Cr, na condição “como recebido”, retiradas de um tubo com dimensões de 244,00 mm de diâmetro e 13,84 mm de parede. A composição química nominal do aço é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química nominal do material estudado.

Composição Química (% massa)									
C	Cr	Ti	Ni	Mn	P	S	Si	Mo	Fe
< 0,03	11,5	0,15	5,5	0,30	< 0,025	0,010	0,10	1,5	Bal.

Os ensaios eletroquímicos para avaliação da corrosão por pites foram realizados em dois diferentes meios:

- Solução especificada na norma NACE TM 0177/2005 (10) (solução de teste C) contendo diferentes concentrações de cloreto de sódio (NaCl) - Soluções contendo 35 g/L e 190 g/L de cloreto de sódio, 0,4 g/L de acetato de sódio (CH₃COONa), teor de oxigênio dissolvido $\leq 10^{-2}$ mg/L e pH 4,0 \pm 0,1 (ajustado com ácido acético).
- Solução especificada na norma NACE TM 0177/2005 (10) (solução de teste C) com adição de tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃) - Soluções contendo 190 g/L de cloreto de sódio, 0,4 g/L de acetato de sódio, teor de oxigênio dissolvido $\leq 10^{-2}$ mg/L, teores de 10^{-1} e 10^{-3} mol/L de tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃) e pH de 4,0 \pm 0,1.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados pelo menos em triplicata à temperatura de 24 \pm 3 °C. Para cada ensaio a superfície de análise foi lixada até acabamento superficial de granulometria #360. Para a realização desses ensaios foi empregado o potenciostato/galvanostato Metrohm Autolab PGSTAT 12 acoplado a um microcomputador com o software General Purpose Electrochemical System (GPES[®]) para controle e aquisição de dados. Os ensaios foram conduzidos em uma célula eletroquímica convencional com montagem de três eletrodos, utilizando-se um eletrodo de referência de Ag/AgCl (saturado), eletrodo auxiliar de platina (Pt) e um eletrodo de trabalho (amostra do material em estudo). O eletrodo de referência usado nos ensaios eletroquímicos foi aferido de acordo com o procedimento elaborado por Da Silva et. al. (11). Após o ensaio a amostra foi lavada com água destilada, seca com álcool etílico e jato de ar quente.

Para a realização dos ensaios de caracterização dos pites a 150 °C as amostras foram imersas no meio contendo 35 g/L de cloreto de sódio em autoclave de aço inoxidável 316L. A temperatura foi mantida a 150 °C e a pressão em 3 Bar. O tempo de exposição foi de 30 e 60 dias. Após este período, as amostras foram retiradas, lavadas em água destilada e secadas. Observou-se a morfologia dos pites formados na superfície das amostras em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e para determinação dos microconstituintes existentes utilizou-se a técnica de espectrometria de energia dispersiva (EDS).

Resultados e discussão

Na Figura 1 pode-se observar as curvas representativas de OCP nos meios contendo 35 g/L e 190 g/L de NaCl. Observa-se que a variação do OCP é similar para os dois meios mostrando uma tendência ao aumento do potencial eletroquímico com a formação de uma película de óxido na superfície do material e que o material no meio contendo 35 g/L de NaCl apresenta um comportamento mais nobre, porém o valor do OCP não foi significativamente superior (diferença entre as duas condições de 15 mV).

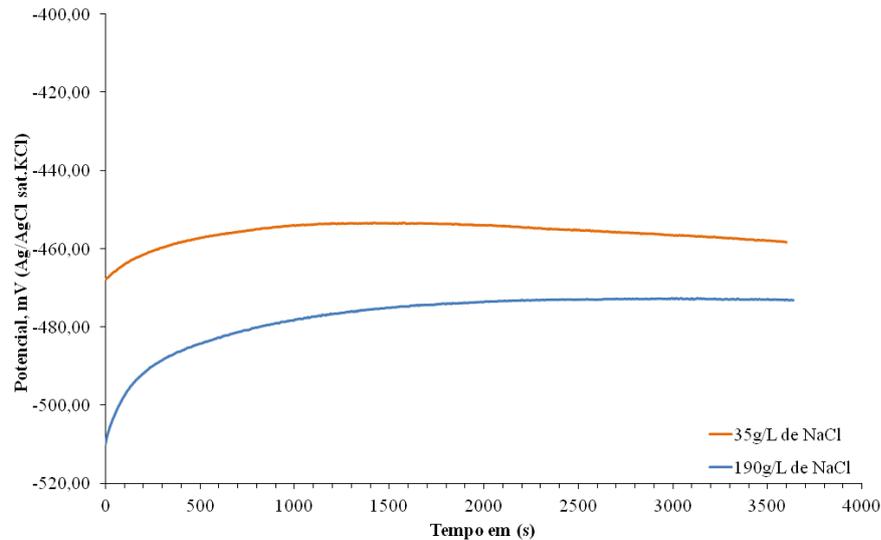


Figura 1. Curvas de potencial de circuito aberto - OCP do aço Super 13Cr versus o tempo, obtidas em meios contendo 35g/L e 190g/L de NaCl à temperatura de 24 ± 3 °C.

Na Figura 2 são mostradas as curvas de polarização anódica potenciodinâmica obtidas após a estabilização do OCP. Verifica-se que o aço Super 13Cr apresentou comportamento ativo passivo nos dois meios estudados, que houve a formação de pites metaestáveis na região próxima ao potencial de pite, evento comum observado em aços inoxidáveis em meios contendo íons cloreto descritos em trabalhos como (1, 4, 9, 13). Nota-se também que no meio contendo 190 g/L de NaCl ocorreu a formação de uma primeira região passiva no potencial de cerca de -350 mV e posteriormente a formação de uma segunda região passiva (em potencial próximo a -100 mV). Pode-se observar que a influência do aumento do teor de íons cloreto no meio no comportamento eletroquímico do material se traduziu principalmente pelo deslocamento da curva, no meio contendo 190g/L de NaCl, para densidades de corrente maiores e para menores valores de potenciais indicando a ocorrência de um processo de corrosão localizada mais expressiva.

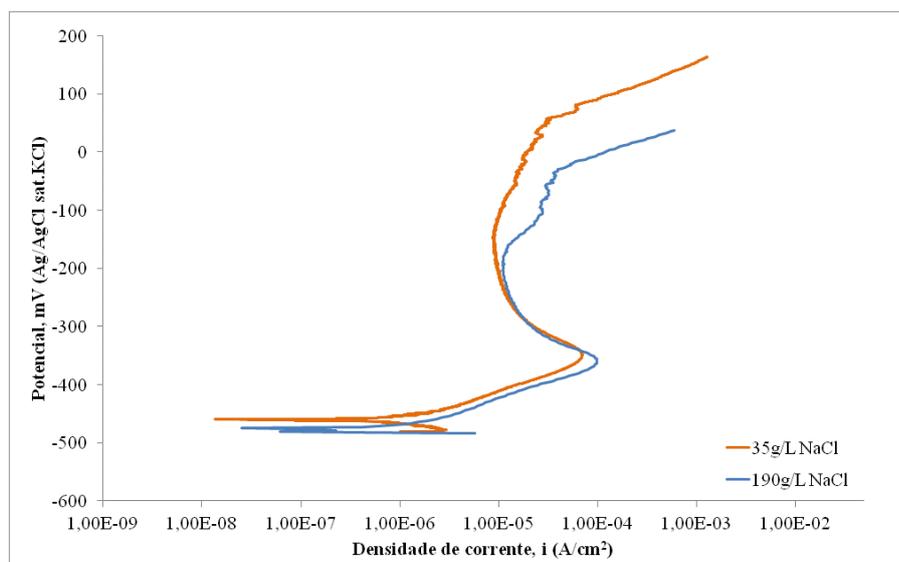


Figura 1. Curvas de polarização potenciodinâmica do aço Super 13Cr obtidas em meios contendo 35g/L e 190g/L de NaCl à temperatura de 24 ± 3 °C.

Na Tabela 2 são apresentados alguns parâmetros eletroquímicos obtidos nas curvas de polarização anódica potenciodinâmica para as condições estudadas. Verifica-se que o potencial de pite e a extensão da camada passiva diminuíram quando o teor de íons cloreto no meio foi aumentado.

Tabela 2. Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização anódica potenciodinâmica em meio contendo 35g/L e 190g/L de NaCl.

Concentração de NaCl	E_{corr} (mVAg/AgCl)	i_{pass} (μ A/cm ²)	E_{pite} ou E_{trans} (mVAg/AgCl)	ΔE_{pass} (mVAg/AgCl)
35g/L	-462,27 ± 4,64	9,34 ± 0,66	63,35 ± 2,76	370,65 ± 2,76
190g/L	-473,75 ± 1,34	14,40 ± 1,97	-36,77 ± 3,11	322,04 ± 6,54

Na Figura 3 são apresentadas micrografias típicas obtidas após os ensaios em meios contendo 35 g/L e 190 g/L de NaCl. No meio contendo 35 g/L de NaCl não foram observados pites na superfície da amostra após os ensaios potenciodinâmicos, por microscopia ótica. No meio contendo 190 g/L de NaCl foram observados pites isolados que podem ter sido originados do rompimento do filme protetor causado pela penetração de íons cloreto, ou devido a variáveis metalúrgicas, tais como contornos de grãos, presença de impurezas e inclusões.

De acordo com McCaffert (12) o potencial de pite não é o único parâmetro que deve ser utilizado para avaliar a resistência à corrosão por pites, outro parâmetro importante é a densidade de pites (número por unidade de área). Os pites observados na condição contendo 190 g/L de NaCl estão afastados entre si e grande parte da superfície se encontra passiva o que favorece o aumento da velocidade de propagação dos pites.

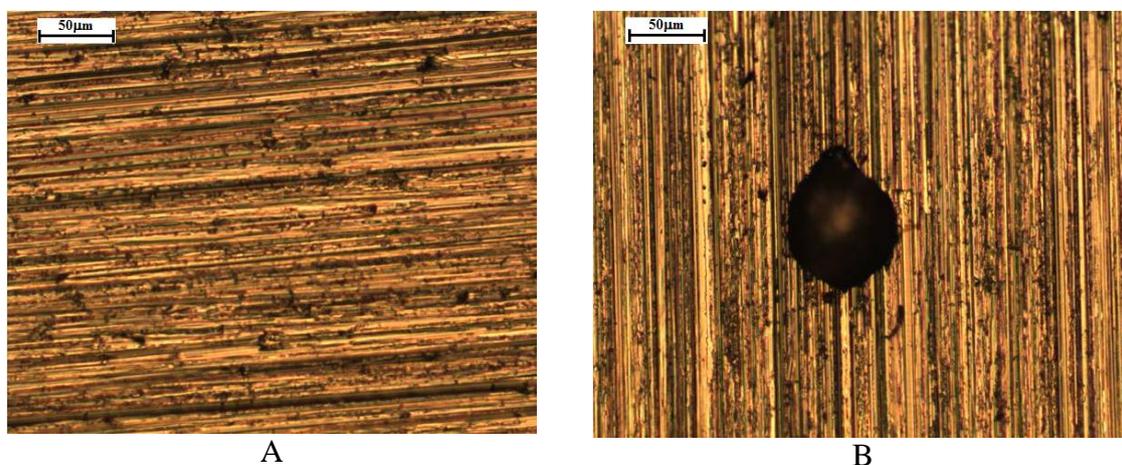


Figura 2. Micrografias do aço inoxidável 13Cr. (A) após ensaio em meio contendo 35g/L de NaCl, (B) após ensaio em meio contendo 190g/L de NaCl. Aumento de 200x.

Tendo em vista que no meio contendo 35 g/L de NaCl não foram observados pites na superfície da amostra após os ensaios potenciodinâmicos, as amostras foram imersas neste meio, à 150 °C, para caracterização mais detalhada dos pites formados na superfície do aço Super 13Cr, com tempos de exposição por 30 e 60 dias.

Na Figura 4 são mostradas as fotografias das amostras do aço Super 13Cr após ficarem imersas durante 30 e 60 dias em meios contendo 35 g/L de NaCl. Identifica-se que a amostra, após a exposição por 30 dias, apresentou coloração dourada, mas sem a presença de pites

visíveis a olho nu e, após a exposição por 60 dias, apresentou coloração escura e alguns pites visíveis a olho nu.

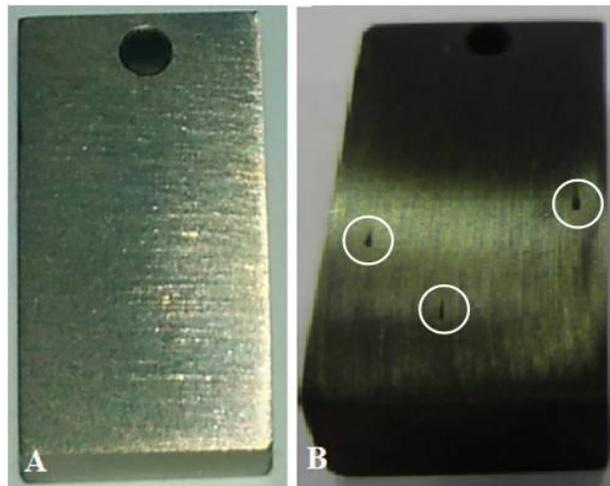


Figura 4. Amostras do aço Super 13Cr após ensaio em autoclave a 150°C, em meios contendo 35g/L de NaCl, por (A) 30 dias e (B) 60 dias.

As micrografias obtidas por MEV da superfície das amostras aço Super 13Cr após ficarem 30 e 60 dias em contato com a solução contendo 35 g/L de NaCl são apresentadas na Figura 5. Pode-se observar que os pites formados na amostra após exposição por 30 dias têm maior largura e menor profundidade que os pites formados na amostra após exposição por 60 dias, sugerindo um aumento de sua penetração com o tempo. Sugere-se que ocorreu corrosão intergranular ou que trincas foram nucleadas na região próxima ao pite.

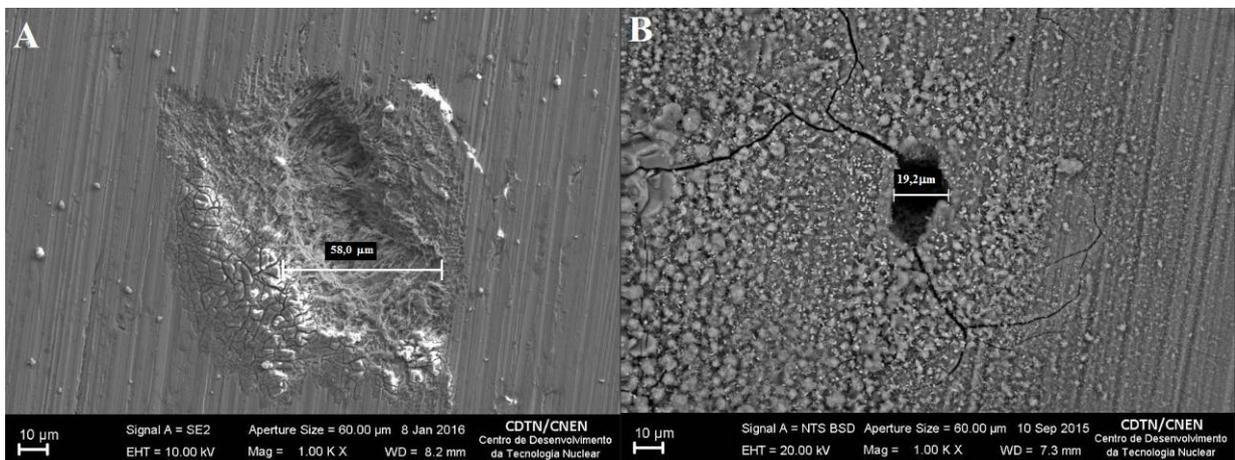


Figura 5. Micrografias do aço Super 13Cr após ensaio em autoclave a 150°C em meios contendo 35g/L de NaCl (A) 30 dias e (B) 60 dias.

Foi realizado um mapeamento por EDS (Figura 6) na região de um dos pites formados na amostra exposta durante 60 dias em meio contendo 35 g/L de NaCl, e observado que ocorreu um aumento da concentração de ferro (Fe) em seu interior e ao seu redor.

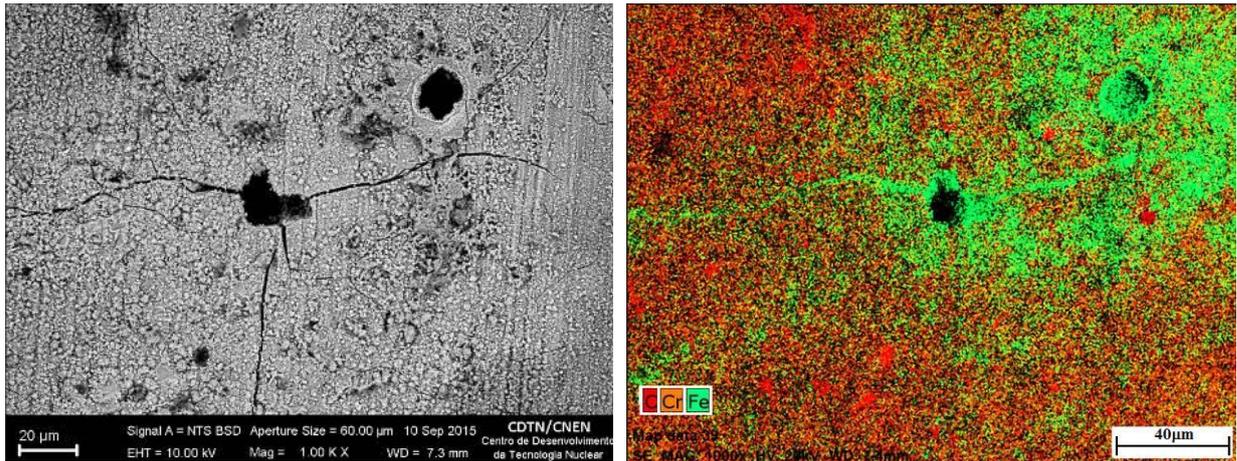


Figura 6. Micrografias e mapa por EDS do aço Super 13Cr após ensaio em autoclave a 150°C em meio contendo 35g/L de NaCl.

Nas micrografias obtidas no MEV das amostras expostas por 60 dias no meio contendo 35 g/L de NaCl foi possível visualizar os cristais formados no interior e na superfície dos pites (Figura 7). Observa-se que existem duas principais faixas de cristais de tamanhos bem definidos: menores cobrindo uniformemente a superfície e significativamente maiores distribuídos sobre os demais.

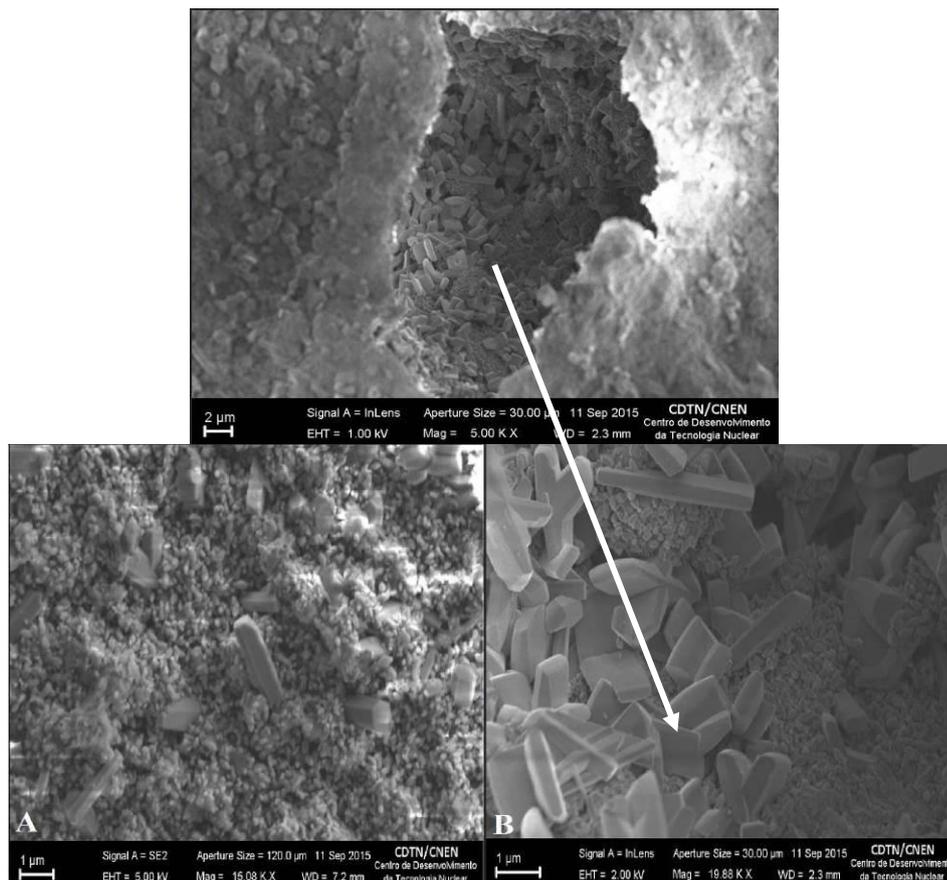


Figura 7. Micrografias do aço Super 13Cr após ensaio em autoclave a 150°C em meios contendo 35g/L de NaCl, por 60 dias, (A) área externa do pite, (B) área interna do pite.

Na análise por EDS apresentada na Figura 8 pode-se observar que os cristais maiores são constituídos de ferro (Fe) e os cristais menores são constituídos de cromo (Cr).

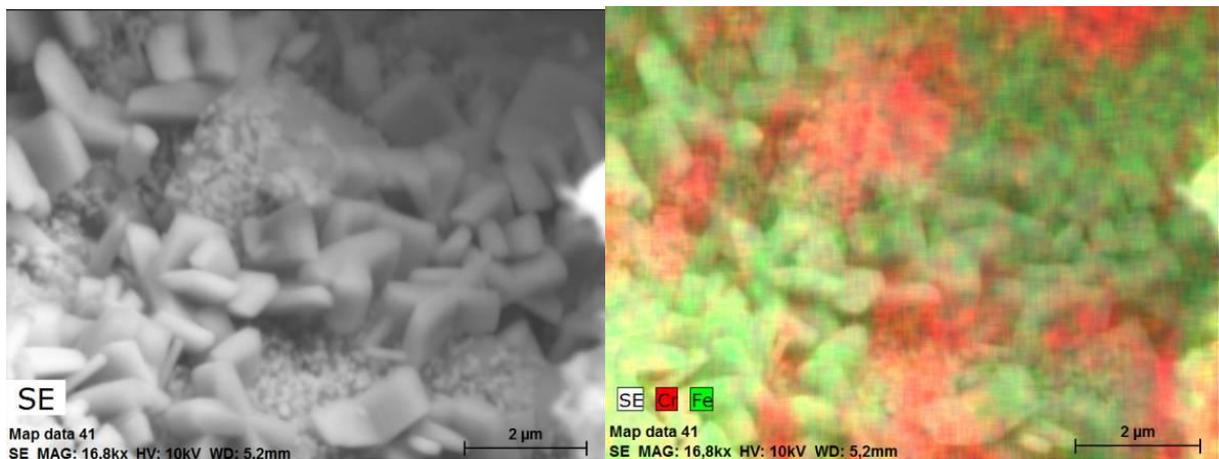


Figura 8. Micrografias e mapa por EDS do aço Super 13Cr após ensaio em autoclave a 150°C em meio contendo 35g/L de NaCl, por 60 dias.

Na Figura 10 são mostradas as curvas de OCP versus tempo do aço Super 13Cr em meios contendo 190 g/L de NaCl, teor de oxigênio dissolvido $\leq 10^{-2}$ mg/L de O_2 e tiosulfato de sódio nas concentrações de 10^{-3} mol/L e 10^{-1} mol/L. Observa-se que os potenciais iniciais foram similares (cerca de -540 mV) e que aumentaram significativamente com o tempo quando os meios continham íons tiosulfato. O tempo necessário para se chegar à estabilidade do OCP foi diferente para cada condição estudada. O período de tempo necessário para o potencial se estabilizar diminuiu com o aumento do teor de tiosulfato adicionado, sendo que no meio com 10^{-1} mol/L de tiosulfato a estabilização ocorreu em aproximadamente 4800 segundos e no meio contendo 10^{-3} mol/L de tiosulfato foi de 10800 segundos.

É também mostrado na Figura 9 que no meio sem adição de tiosulfato de sódio o potencial estabilizou em um valor significativamente menor e mais rapidamente (OCP = -480 mV em 1500 segundos) em comparação com os meios contendo tiosulfato, indicando a influência da adição do tiosulfato na tendência termodinâmica a corrosão do aço. Observa-se que, nos meios contendo íons tiosulfato, inicialmente os valores do OCP mantiveram-se constantes até cerca de 500 segundos, e que após esse intervalo, ocorreu uma elevação do potencial continuamente com o tempo até a sua estabilização. Segundo Azambuja (13) esse aumento pode ser atribuído a um processo de formação e espessamento de uma camada de produto de corrosão na superfície do aço que aumenta a sua resistência à corrosão.

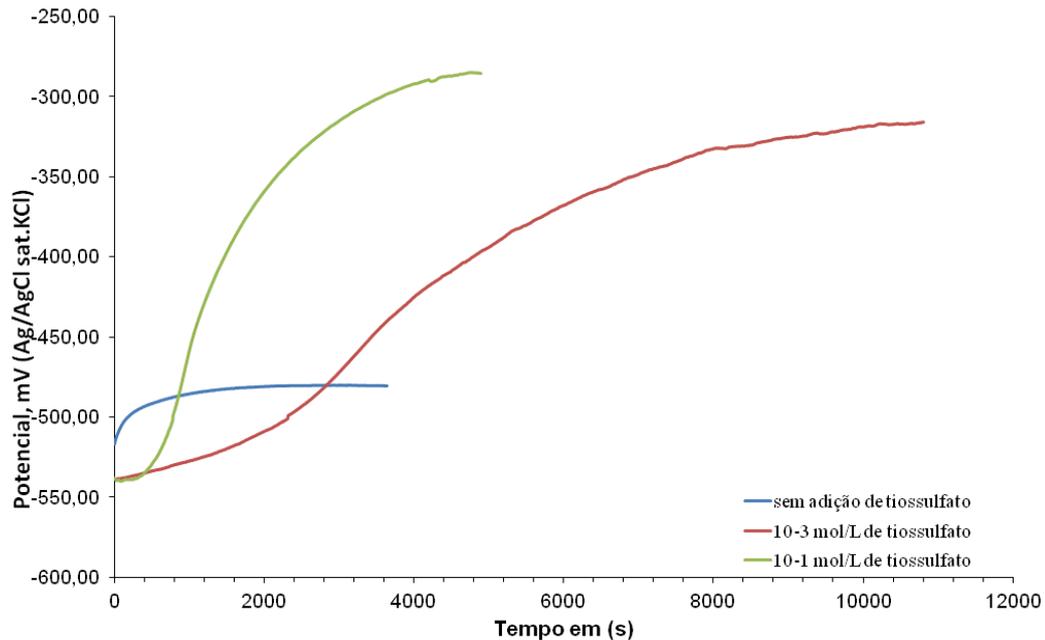


Figura 9. Curvas de potencial de circuito aberto - OCP do aço Super 13Cr versus o tempo obtidas em meios contendo 190g/L de NaCl sem adição de tiosulfato de sódio e com adição de 10^{-3} mol/L e 10^{-1} mol/L de tiosulfato de sódio, à temperatura de 24 ± 3 °C.

Na Figura 10 são apresentadas curvas típicas de polarização potenciodinâmica obtidas para os meios contendo 190 g/L de NaCl e diferentes concentrações de tiosulfato de sódio após a estabilização do OCP. Nota-se que o potencial de corrosão elevou com o aumento da concentração de tiosulfato de sódio e que potencial de pite nos meios sem adição de íons tiosulfato e com adição de 10^{-3} mol/L de íons tiosulfato são similares. Porém, no meio no qual foi adicionado 10^{-1} mol/L de tiosulfato de sódio o aço não teve comportamento passivo. Newman (14), em seu estudo do efeito do enxofre na corrosão por pites de aço inoxidável, mostra que não há evidências de que o tiosulfato e outros ânions de enxofre possuam ação na quebra da camada passiva do aço inoxidável, sugerindo que a atuação do tiosulfato ocorre apenas após o evento de quebra da camada passiva aumentando a estabilidade e o tempo de vida do pite formado e não interferindo na frequência da nucleação dos pites. O comportamento do aço Super13Cr é compatível com a avaliação de Newman (14), pois o rompimento do filme passivo e a formação de pites ocorreram em potenciais similares nos meios contendo somente NaCl e com adição de 10^{-1} mol/L de íons tiosulfato à solução de 190 g/L NaCl.

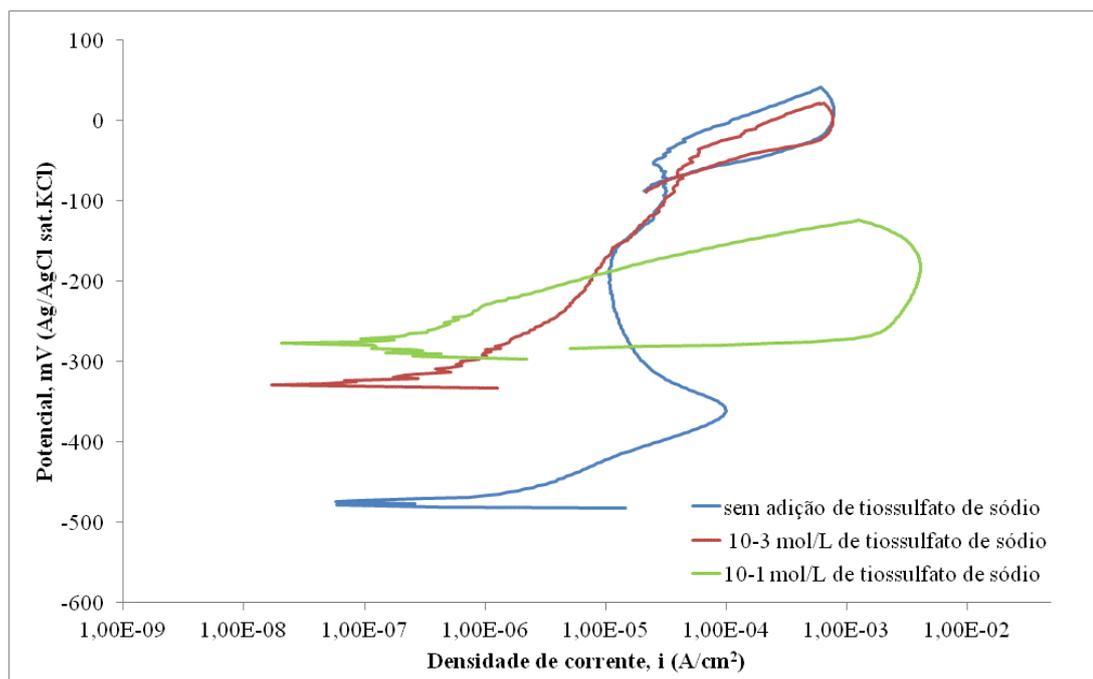


Figura 10. Curvas de polarização potenciodinâmica anódica cíclica do aço Super 13Cr obtidas em meios contendo 190g/L de NaCl sem adição de tiosulfato de sódio e com adição de 10^{-3} mol/L e 10^{-1} mol/L de tiosulfato de sódio, à temperatura de 24 ± 3 °C.

Os parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização anódica potenciodinâmica em meios contendo 190 g/L de NaCl sem adição de tiosulfato de sódio e com adição de 10^{-3} mol/L e 10^{-1} mol/L de tiosulfato de sódio são mostrados na Tabela 3. A adição de tiosulfato ao meio elevou significativamente o potencial de corrosão fazendo com que o aço tivesse um comportamento mais nobre.

Tabela 3. Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização anódica potenciodinâmica em meios contendo 190g/L de NaCl sem adição de tiosulfato de sódio e com adição de 10^{-3} mol/L e 10^{-1} mol/L de tiosulfato de sódio.

Concentração de íons tiosulfato	E_{corr} (mVAg/AgCl)	i_{pass} (μ A/cm ²)	$E_{píte}$ ou E_{trans} (mVAg/AgCl)	E_{prot} (mVAg/AgCl)
Sem adição	$-473,75 \pm 1,34$	$14,40 \pm 1,97$	$-36,77 \pm 3,11$	$-64,46 \pm 13,27$
10^{-3} mol/L	$-324,50 \pm 9,51$	$11,83 \pm 1,79$	$-43,01 \pm 12,14$	$-67,29 \pm 11,84$
10^{-1} mol/L	$-287,25 \pm 8,69$	-	-	-

Nas micrografias representativas obtidas após os ensaios em meios contendo 190 g/L de NaCl com e sem adição de tiosulfato de sódio (Figura 11), após a estabilização do OCP, verifica-se que, nos meios contendo 10^{-3} mol/L de tiosulfato de sódio e sem adição de tiosulfato de sódio foram observados pites isolados de dimensões na ordem de 80 μ m. Os pites encontrados no meio contendo 10^{-1} mol/L de tiosulfato de sódio têm dimensões na ordem de 150 μ m.

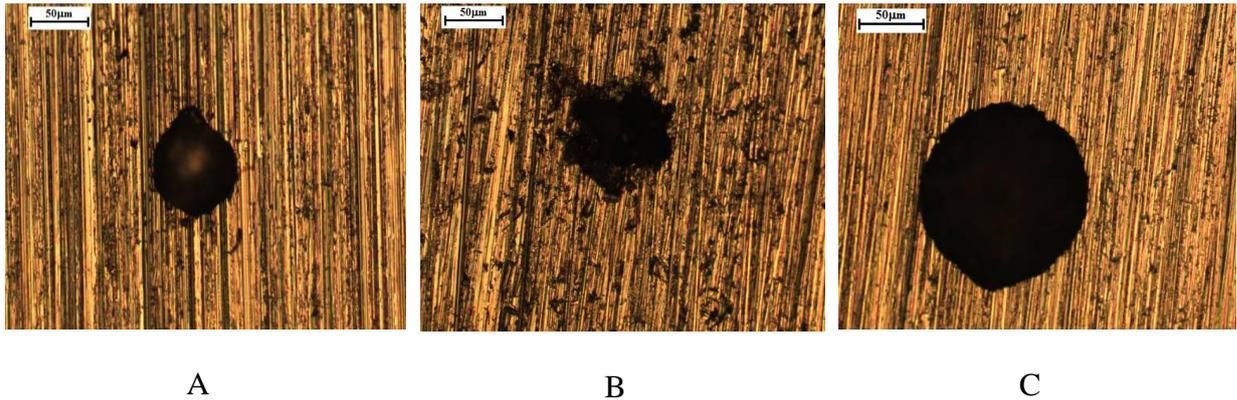


Figura 11. Micrografias do aço inoxidável 13Cr, após ensaio em meio contendo 190g/L de NaCl. (A) sem adição de íons tiosulfato, (B) com adição de 10^{-3} mol/L de íons tiosulfato, (C) com adição de 10^{-1} mol/L de íons tiosulfato. Aumentos de 500X.

Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo do comportamento frente à corrosão por pites do aço inoxidável Super 13 Cr, em ambiente similar ao da extração de óleo e gás em águas profundas por meio de técnicas eletroquímicas. Entre as conclusões obtidas pode-se citar:

O aumento da concentração de íons cloreto pode provocar um maior número de eventos de quebra da camada passiva aumentando a probabilidade da formação de um pite estável. No meio contendo 35 g/L de NaCl após a exposição por 30 dias foram observados pites com maior diâmetro e menor profundidade que os pites observados após 60 dias de imersão. Uma das possíveis explicações é a ocorrência de repassivação das áreas menos atacadas na borda do pite e uma concentração das reações de oxidação na parte interna do pite provocando um aumento da profundidade com o aumento do tempo.

A adição de tiosulfato levou a um aumento do potencial de corrosão indicando um comportamento mais nobre do aço neste meio. Observou-se que o rompimento do filme passivo e a formação de pites ocorreram em potenciais similares nos meios contendo somente NaCl e com adição de 10^{-3} mol/L de íons tiosulfato à solução de 190 g/L NaCl sugerindo que o tiosulfato não possui ação na quebra da camada passiva do aço inoxidável.

Referências bibliográficas

- (1) ANSELMO, N. *et al.* Corrosion behavior of supermartensitic stainless steel in aerated and CO₂ saturated synthetic seawater. **Materials Science and Engineering: A**, v. 428, n. 1, p. 73-79, 2006.
- (2) NEŠIĆ, S. Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines—A review. **Corrosion Science**, v. 49, n. 12, p. 4308-4338, 2007.
- (3) BELTRAO, R. L. C. *et al.* SS: Pre-salt Santos basin-Challenges and New Technologies for the Development of the Pre-salt Cluster, Santos Basin, Brazil. In: **Offshore Technology Conference**. Offshore Technology Conference, 2009.
- (4) MESQUITA, T. J. *et al.* Corrosion and metallurgical investigation of two supermartensitic stainless steels for oil and gas environments. **Corrosion Science**, v. 81, p. 152-161, 2014.
- (5) LIU, M.; WANG, J. Q.; KE, W. Effect of temperature and H₂S concentration on corrosion of X52 pipeline steel in acidic solutions. **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications, p. 589-596, 2013.
- (6) TSUJIKAWA, S. *et al.* Alternative for evaluating sour gas resistance of low-alloy steels and corrosion-resistant alloys. **Corrosion**, v. 49, n. 5, p. 409-419, 1993.
- (7) CHEN, Y. Y.; LIOU, Y. M.; SHIH, H. C. Stress corrosion cracking of type 321 stainless steels in simulated petrochemical process environments containing hydrogen sulfide and chloride. **Materials Science and Engineering: A**, v. 407, n. 1, p. 114-126, 2005.
- (8) BALLESTEROS, A. F; PONCIANO, J. A. C; BOTT, I. S. Susceptibilidade de juntas soldadas circunferenciais de aço API 5L X80 à corrosão sob tensão e à fragilização por hidrogênio. **Tecnol. Metal. Mater. Miner**, v. 6, n. 3, p. 147-152, 2010.
- (9) ZANOTTO, F. *et al.* Stress corrosion cracking of LDX 2101® duplex stainless steel in chloride solutions in the presence of thiosulphate. **Corrosion Science**, v. 80, p. 205-212, 2014.
- (10) NACE Standard TM0177-96. **Laboratory testing of metals for resistance to specific forms of environmental cracking in H₂S environments**. NACE International, 1996.
- (11) DA SILVA, A. I.; ARAÚJO FILHO, H. C.; SILVA, R. C. Testes de desempenho de eletrodos: eletrodos de referência. **Quim. Nova**, v. 23, p. 512, 2000.
- (12) MCCAFFERTY, E. **Introduction to corrosion science**. Springer Science & Business Media, 2010.
- (13) AZAMBUJA, D. S.; MARTINI, E; MÜLLER, I. L. Corrosion behaviour of iron and AISI 304 stainless steel in tungstate aqueous solutions containing chloride. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 14, n. 4, p. 570-576, 2003.
- (14) NEWMAN, R. C. 2001 WR Whitney Award Lecture: Understanding the Corrosion of Stainless Steel. **Corrosion**, v. 57, n. 12, p. 1030-1041, 2001.