

Edvan Almeida



Olandir Vercino Correa



Renato Altobelli Antunes

FILMES DE ÓXIDO ARTIFICIALMENTE PRODUZIDOS PARA AUMENTO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇOS EMPREGADOS PARA TRANSPORTE DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

| Edvan Almeida de Souza Filho, Olandir Vercino Correa
e Renato Altobelli Antunes |

Neste estudo, os resultados mostram que é possível obter uma superfície mais estável frente à corrosão para aços utilizados na fabricação de tubulações para a indústria de petróleo e gás natural empregando a voltametria cíclica. No entanto, o desafio, na prática, seria levar este conceito para as estruturas de grande porte utilizadas nas aplicações reais.

ABSTRACT

The present study aims at investigating the technical feasibility of employing artificially formed oxide films to improve the corrosion resistance of high-strength low alloy (HSLA) steels traditionally employed for oil and gas transmission pipelines. The oxide films were formed by cyclic voltammetry using API 5L X80 steel specimens as substrates. The results showed that the corrosion resistance of the films strongly depends on the potential conditions of the voltammetry tests. The thickness of the oxide layer was identified as the main responsible for the different corrosion behavior observed at each condition of film growth. Both the general corrosion and pitting corrosion of the API 5L X80 steel could be improved with the treatment conducted in this work.

RESUMO

O desempenho frente à corrosão dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), normalmente empregados para a fabricação de dutos para transporte de petróleo e gás natural, pode ser modificado pela formação de filmes de óxido artificialmente produzidos pela técnica de voltametria cíclica. No presente trabalho, filmes anódicos foram produzidos por voltametria cíclica sobre o aço API 5L X80, o qual é utilizado para este tipo de aplicação. O efeito

da presença destes filmes sobre resistência à corrosão do aço foi avaliado por meio de curvas de polarização potenciodinâmica. O comportamento eletroquímico foi correlacionado com a morfologia dos filmes anódicos, utilizando microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que os filmes anódicos produzidos por voltametria cíclica podem melhorar a resistência à corrosão por pite e uniforme do aço API 5L X80. O desempenho do filme frente à corrosão depende do potencial aplicado para seu crescimento durante a voltametria cíclica.

Palavras-chave: Filme anódico; aço API 5L X80; corrosão; voltametria cíclica

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, com a descoberta de novos campos de petróleo no pré-sal localizado na bacia de Santos, a indústria petrolífera terá um impulso no fornecimento/ desenvolvimento de materiais. A produção de aços para tubulações utilizadas no transporte de petróleo e gás natural se insere neste contexto. Este método de transporte é um dos mais eficientes, pois permite a passagem de grandes quantidades de materiais a baixo custo.

Estas estruturas são projetadas para evitar falhas decorrentes da alta pressão, efeitos térmicos e degradação ambiental [1]. Mais de metade das fontes de hidrocarbonetos do mundo estão localizadas em áreas remotas e dependem de dutos para alcançar as regiões em que os produtos serão processados [2]. O desenvolvimento de aços do tipo ARBL (alta resistência e baixa liga) para tubulações levou à fabricação de produtos seguros e, ao mesmo tempo, econômicos para o transporte de petróleo e gás [3]. A evolução desta tecnologia permite que a indústria petrolífera alcance reduções significativas de custo pela redução da espessura das tubulações e possibilidade de aumento da pressão de operação [4]. O aço API 5L X80 é tipicamente utilizado nestas aplicações [5]. Este aço do tipo ARBL obedece às normas da API (American Petroleum Institute), apresentando excelentes propriedades mecânicas (resistência e tenacidade), em função do controle rigoroso de composição química, processo de fabricação (laminação controlada) e microestrutura final [6].

O ambiente em que estas tubulações operam é considerado agressivo para os aços ARBL, tanto do ponto de vista mecânico (altas pressões, vibrações que podem levar à fadiga) quanto do ponto de vista químico (presença de espécies agressivas como Cl^- , NCO_3^- , solos com diferentes valores de pH, CO_2 , H_2S [7,8]).

Referência de Qualidade em Produtos Químicos



O equilíbrio perfeito entre a tradição e a inovação em Produtos Químicos para Galvanoplastia e Química em geral.

Distribuidor exclusivo
 PROQUIGEL
 Cianeto de Sódio para galvanoplastia



"RESIMAPI"
 PRODUTOS QUÍMICOS
 INDÚSTRIA E COMÉRCIO

São Paulo 11 2799-3088 Arujá 11 4655-3522
 Paraná 41 3082-8262 Caxias do Sul 54 3202-1178/79/80

Consulte-nos:
 resimapi@resimapi.com.br

www.resimapi.com.br

KLINTEX

Alta tecnologia aliada à preservação do meio ambiente

NANOTECNOLOGIA aplicada ao Tratamento de superfícies

Nanotex ZR16 (nova geração) aplicado a multi-metais nas mesmas condições operacionais.

- Aço Carbono
- Alumínio
- Galvanizado



KLINTEX
 INSUMOS INDUSTRIAIS LTDA

Telefone: 51 3406.0100
 klintex@klintex.com.br

www.klintex.com.br

Especificamente, o fenômeno da corrosão sob tensão fraturante (CST) destas estruturas é considerado um dos principais problemas de segurança para sua operação [9]. Diversos autores estudaram o comportamento de aços da classe API frente a este fenômeno, em uma variedade de meios [10,11]. Existem relatos de que a maior parte dos casos de falha por CST de tubulações construídas com os aços da classe API ocorre sob uma condição de pH elevado, a qual é associada com uma solução concentrada de carbonato/bicarbonato de pH aproximadamente igual a 9,5 [12,13]. Neste ambiente, os aços para dutos podem formar uma camada passiva [14]. Na presença de íons Cl^- ocorre a quebra desta camada e a formação de pites. A corrosão por pite é considerada a primeira etapa do mecanismo de corrosão sob tensão fraturante nos aços para dutos [15]. Sendo assim, o aumento da resistência à corrosão por pite destes aços é essencial para garantir um desempenho seguro em serviço. Alguns estudos mostram que a presença de filmes de óxido sobre a superfície destes aços tem uma influência relevante sobre seu comportamento de corrosão [16,17]. Neste sentido, o objetivo do trabalho aqui apresentado foi avaliar o efeito de filmes anódicos produzidos por voltametria cíclica sobre a resistência à corrosão do aço API 5L X80. Esse aço é utilizado na fabricação de dutos de transporte de óleo e gás natural. O comportamento eletroquímico foi correlacionado com a morfologia dos filmes anódicos, utilizando microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

O material metálico avaliado neste trabalho foi o aço API 5L X80, cuja composição química nominal é mostrada na Tabela 1. O material foi gentilmente doado pela Usiminas na forma de chapa laminada a quente com espessura de 16 mm.

2.2 Preparação das amostras

Os corpos de prova foram confeccionados utilizando uma cortadora metalográfica da marca ERIOS modelo Labcut 250B. A chapa foi cortada em pequenas amostras, deixando uma área de aproximadamente 60 mm^2 para ser exposta ao eletrólito durante os testes

eletroquímicos. As amostras foi unido um fio de cobre de 4 mm de diâmetro com uma cola condutiva a base de prata. Depois, as amostras foram embutidas com resina epóxi de cura a frio. A preparação superficial das amostras consistiu em lixamento mecânico com sequência de lixas de grana 80, 200, 400, 600 e 1200. Após o processo de lixamento as amostras foram polidas utilizando como abrasivo uma suspensão de alumina com granulometria de 6 μm . Após o processo de polimento, as amostras foram lavadas com detergente neutro, água deionizada e desengorduradas com álcool isopropílico, sendo, então, secas em fluxo de ar quente.

2.3 Ensaios eletroquímicos

2.3.1 Crescimento dos filmes anódicos por voltametria cíclica

Para o crescimento dos filmes anódicos durante os ensaios de voltametria cíclica foi utilizada uma solução consistindo de 1,64 M de NaCl, 0,018 M de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0,055 M de CaCl_2 e 0,77 M de CH_3COOH em temperatura ambiente. Foi utilizado um arranjo experimental convencional de três eletrodos, sendo um eletrodo de referência de calomelano saturado, um fio de platina como contra-eletrodo e as amostras do aço API 5L X80 como eletrodos de trabalho. Todos os potenciais mencionados no texto são dados em relação ao eletrodo de calomelano saturado. As curvas voltamétricas foram obtidas a partir do potencial de circuito aberto (PCA), seguindo na direção anódica (potenciais mais positivos) até um potencial de reversão (Erev). Em seguida foram realizadas varreduras no sentido catódico, sendo o eletrodo polarizado catodicamente até o potencial final correspondente ao valor do PCA. Vários experimentos foram realizados, empregando diferentes potenciais de reversão, formando assim filmes anódicos sob condições distintas de varredura. Os potenciais de reversão empregados foram de +0,25 V, +0,50 V, +1,0 V, +1,5 V e +2,0 V. A velocidade de varredura foi de 20 $\text{mV} \cdot \text{s}^{-1}$ para todas as condições. Foram feitos seis ciclos de polarização para cada condição. Foram testadas três amostras para cada condição, a fim de verificar a reprodutibilidade dos resultados. Utilizou-se um potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT 100 para as medidas.

Tabela 1. Composição química nominal do aço API 5L X80 empregado neste trabalho.

Massa (%)	C	Mn	Si	P	S	Nb	Al	Cr	V
	0,040	1,750	0,200	0,020	0,002	0,065	0,025	0,110	0,025

2.3.2 Avaliação da resistência à corrosão

A resistência à corrosão das amostras do aço API 5L X80 submetido às diferentes condições de tratamento para formação dos filmes anódicos, conforme descrito na seção 2.3.1, foi avaliada por meio de curvas de polarização potenciodinâmica. O eletrólito empregado foi uma solução consistindo de 0,05 M de Na_2CO_3 , 0,10 M de NaHCO_3 e 0,10 M de NaCl em temperatura ambiente. Foi utilizado um arranjo experimental convencional de três eletrodos, sendo um eletrodo de referência de calomelano saturado, um fio de platina como contra-eletrodo e as amostras do aço API 5L X80 como eletrodos de trabalho. Todos os potenciais mencionados no texto são dados em relação ao eletrodo de calomelano saturado. As curvas foram obtidas na faixa de potenciais entre -300 mV em relação ao PCA até +1,0 V, com taxa de varredura de 1 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$. Para comparação dos resultados foram também testadas amostras que não sofreram o tratamento por voltametria cíclica para formação dos filmes anódicos. Utilizou-se um potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT 100 para as medidas.

2.4 Caracterização morfológica

A morfologia e a espessura dos filmes anódicos formados por voltametria cíclica foram avaliadas empregando microscopia óptica (microscópio Olympus) e microscopia eletrônica de varredura (microscópio HITACHI TM3000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Crescimento dos filmes anódicos por voltametria cíclica

Os voltamogramas obtidos para as amostras do aço API 5L X80 submetidos às diferentes condições de potencial para crescimento dos filmes anódicos são

mostrados na Figura 1. Observa-se que as condições de crescimento com potenciais de reversão (Erev) de +0,25 V e +0,50 V não apresentaram a formação de um pico de corrente no sentido de varredura anódica em seus voltamogramas. Por outro lado, as amostras submetidas ao crescimento de filme com potenciais de reversão de +1,0 V, +1,5 V e +2,0 V apresentaram um pico de corrente no sentido de varredura anódica, correspondendo à redução da densidade de corrente para valores de potencial específicos. Observa-se, ainda, que a redução da corrente no sentido de varredura anódica foi mais acentuada para as amostras cujo crescimento do filme foi obtido nos potenciais de reversão de +1,5 V e +2,0 V.

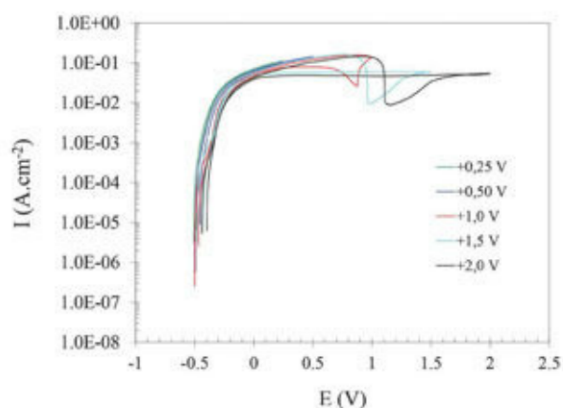


Figura 1. Voltamogramas das amostras do aço API 5L X80 submetidas a diferentes condições de crescimento dos filmes anódicos.

Estes resultados sugerem que a formação do filme anódico não foi efetiva para as condições de Erev de +0,25 V e +0,50 V. Além disso, a variação de corrente observada para a varredura do sentido anódico nas amostras com Erev de +1,0 V, +1,5 V e +2,0 V sugerem

Superação Exemplo Tradição

Em pré e pós tratamento
a Quimidream tem
a melhor solução

1.3 terço

▲ Desengraxantes químicos em geral ▲ Decapantes ácidos inibidos ▲ Refinadores para fosfato de zinco ▲ Aditivos auxiliares ▲ Completa linha de processos de fosfatização para: pintura, alumínio, trefila, deformação a frio e oleamento ▲ Processos nanoparticulados base zircônio para pintura ▲ Cromatizantes, como base para pintura em superfícies de alumínio e suas ligas ▲ Passivadores isentos de cromo VI, como selagem para camadas fosfatizadas, pré-pintura ▲ Cobreadores químicos ▲ Óleos protetivos desaguadores ou não ▲ Lubrificantes ▲ Lubrificantes base bissulfeto de molibdênio dispersível em água, para deformações mecânicas à frio ▲ Coagulantes de tinta (paint kill) ▲ Removedores de tintas ecológicos ▲ Produtos para ETE, entre outros.

Produtos Químicos Quimidream Ltda.
Av. Marco, 620 - Chácara Marco - 06419-000 - Barueri - SP
Vendas: 11 4161.8555 | Fax: 11 4161.3272 | vendas@quimidream.com.br
www.quimidream.com.br



Desde 1977

que os filmes com espessuras mais altas devem ter sido obtidos para as duas últimas condições, pois foram as que apresentaram maior redução da densidade de corrente durante a varredura anódica.

3.2 Caracterização morfológica

Imagens de superfície das amostras foram obtidas por meio de microscopia óptica. As micrografias são apresentadas na Figura 2. Apenas as micrografias correspondentes às amostras cujos filmes anódicos foram obtidos com os potenciais de reversão de +0,25 V e +1,5 V são apresentadas. As micrografias correspondentes às amostras obtidas com as demais condições de potenciais foram omitidas, pois são muito semelhantes às duas micrografias mostradas na Figura 2. Uma imagem do aço sem a presença dos filmes anódicos também é mostrada para comparação.

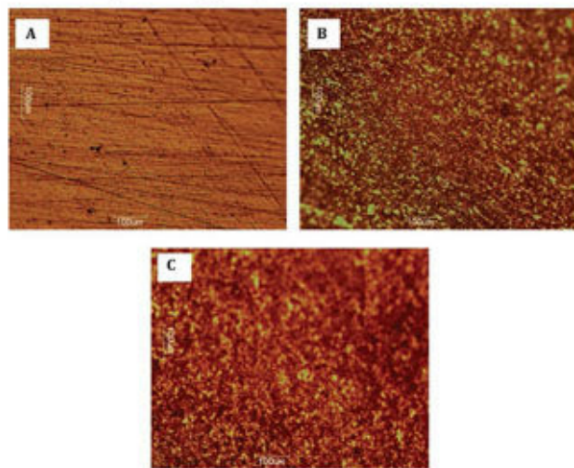


Figura 2. Micrografias mostrando a superfície do aço API 5L X80 nas seguintes condições: a) como lixado, sem filme anódico; b) filme anódico produzido com potencial de reversão de +0,25 V; c) filme anódico produzido com potencial de reversão de +1,5 V.

Na amostra sem filme são observadas apenas as marcas produzidas pelas etapas de lixamento durante sua preparação superficial. Para as amostras submetidas à voltametria cíclica para formação dos filmes anódicos é possível observar a modificação superficial decorrente deste tratamento, apresentando uma superfície mais rugosa resultante do crescimento do filme de óxido, distribuída ao longo de toda a superfície da amostra. Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da seção transversal das amostras submetidas às diferentes condições de crescimento de filme são mostradas na Figura 3.

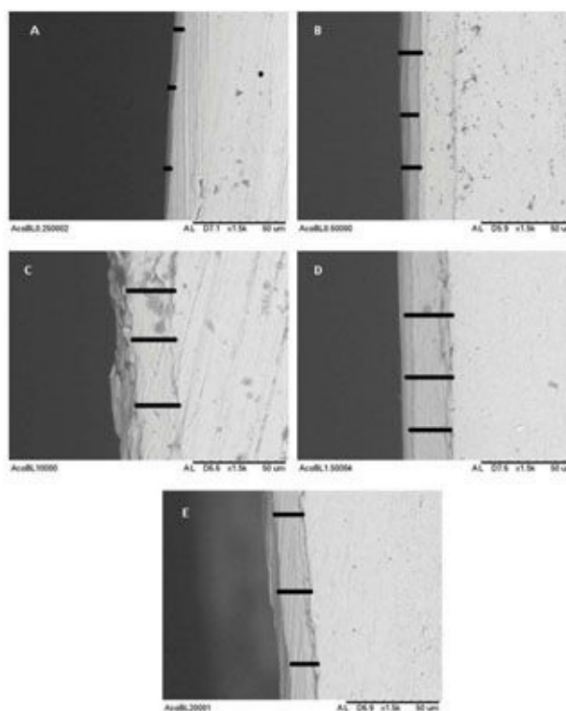


Figura 3. Imagens de MEV da seção transversal das amostras do aço API 5L X80 submetido às diferentes condições de potencial de reversão (E_{rev}) para crescimento dos filmes anódicos: a) +0,25 V; b) +0,50 V; c) +1,0 V; d) +1,5 V; e) +2,0 V.

As imagens mostram que há um aumento de espessura mais significativo a partir do potencial de reversão de +1,0 V. Entretanto, não há um incremento perceptível entre este potencial e o potencial de +2,0 V. Aparentemente, o filme produzido com o potencial de +1,0 V se apresenta menos compacto do que aqueles obtidos com os potenciais de +1,5 V e +2,0 V. Os filmes obtidos com os potenciais de reversão de +0,25 V e +0,50 V são menos espessos. Estes resultados apoiam as considerações feitas a partir da análise dos voltamogramas mostrados na Figura 1, sugerindo que os filmes obtidos com os potenciais de +1,5 V e +2,0 V podem apresentar um bom desempenho frente à corrosão, em função de sua espessura e compactação.

3.3 Avaliação da resistência à corrosão

Curvas de polarização potenciostática das amostras do aço API 5L X80 submetidas às diferentes condições de crescimento do filme anódico são mostradas na Figura 4. Uma curva correspondente ao aço sem filme também é mostrada para comparação. Os parâmetros eletroquímicos obtidos a partir das curvas mostradas na Figura 4 são apresentados na Tabela 2. São mostrados os valores de potencial de corrosão (E_{corr}) e densidade de corrente de corrosão (i_{corr}).

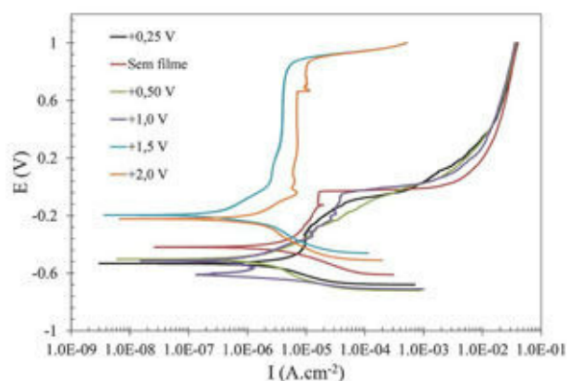


Figura 4. Curvas de polarização potenciodinâmica do aço API 5L X80 sem filme e submetido às diferentes condições de crescimento do filme anódico.

As amostras com crescimento de filme de óxido nas condições de +1,5 V e +2,0 V apresentaram um aumento no potencial de corrosão em relação à amostra sem filme. Nas amostras ensaiadas nas condições +0,25 V,

+0,50 V e +1,0 V o potencial de corrosão ficou abaixo da amostra sem filme. Houve uma diminuição mais acentuada dos valores de I_{corr} para as amostras com filmes obtidos a +1,5 V e +2,0 V, o que é associado com uma redução da taxa de corrosão do material com estes tratamentos.

A tendência à passivação foi mais caracterizada nas amostras em que a formação do filme ocorreu a +1,5 V e +2,0 V, as quais apresentaram uma grande região de passivação no ensaio de polarização, sendo o potencial de passivação definido como o potencial onde a densidade de corrente se torna aproximadamente constante. Esta região, chamada de região passiva, representa o caráter nobre e protetor do sistema analisado. A corrente correspondente a este potencial é a densidade de corrente de passivação, permanecendo praticamente constante devido à possível formação do filme passivo de óxido. Na varredura anódica, o potencial continua a aumentar até um limite em que a densidade

Tabela 2. Parâmetros eletroquímicos obtidos a partir das curvas de polarização mostradas na Figura 4.

Condição	Sem filme	+0,25 V	+0,50 V	+1,0 V	+1,5 V	+2,0 V
E_{corr} (V)	-0,42	-0,53	-0,49	-0,51	-0,19	-0,22
I_{corr} ($\mu A.cm^{-2}$)	1,36	0,58	0,63	0,57	0,24	0,50

ACESSÓRIOS E PEÇAS DE REPOSIÇÃO EUROGALVANO
EXCELENCIA E CONFIABILIDADE

EUROGALVANO DO BRASIL LTDA
| Peças Genuínas |

++ 55 51 3396 6262
AV. CARLOS S. FILHO, Nº6945
INDUSTRIAL NORTE - CAMPO BOM - RS
eurogalvano@eurogalvano.com.br
WWW.EUROGALVANO.COM.BR

PRODUTOS E SOLUÇÕES PARA GALVANOPLASTIA

Linha completa de aditivos de alta performance para tratamento de superfície.

AGILIDADE NA PRODUÇÃO + PODER DE ACABAMENTO = **ECONOMIA** = SATISFAÇÃO DO CLIENTE

Pensou Tratamento de Superfície? Pensou...

TRAVISS

ASSISTÊNCIA TÉCNICA QUÍMICOS ESPECIALIZADOS

PRODUTOS ECOLOGICAMENTE CORRETOS

TRAVISS
Dissolvedos
TRAVISS
NÍQUEL
TRAVISS
PRATA
TRAVISS
OURO
TRAVISS
COBRE
TRAVISS
ESTANHO

GALVANOTEKNOLOGIA

TRAVISS
GALVÃO TECNOLOGIA

WWW.TRAVISS.COM.BR
Conheça nossa linha completa de produtos
11 3991-9590

de corrente não é mais constante, apresentando um aumento com o incremento do potencial aplicado. É nestas condições de potencial e de corrente que o filme passivo sobre a amostra é rompido, ou seja, o processo de dissolução/corrosão se inicia acarretando o aumento de corrente, formando-se um pite. A curva da amostra sem filme apresentou de forma acentuada a quebra de passivação, observando-se o potencial de pite por volta de $-0,07$ V. A amostra com o filme obtido no potencial de reversão de $+1,0$ V também apresenta este tipo de comportamento e um potencial de pite muito próximo ao observado para a amostra sem filme. As amostras cujos filmes foram obtidas com os potenciais de $+0,25$ V e $+0,50$ V, por sua vez, não apresentaram uma região passiva muito bem definida, mostrando um aumento gradual da densidade de corrente com o incremento do potencial aplicado. É interessante ressaltar, ainda, que o aumento acentuado da densidade de corrente próximo ao potencial aplicado de $1,0$ V, o qual foi observado para as amostras cujos filmes anódicos foram obtidos nos potenciais de $+1,5$ V e $+2,0$ V deve ser devido à reação de evolução do oxigênio, a qual ocorre tipicamente neste próximo a este potencial [18] e não à corrosão por pite. A fim de verificar a presença de pites após o ensaio de polarização foram obtidas micrografias por microscopia óptica das amostras polarizadas. As imagens são mostradas na Figura 5.

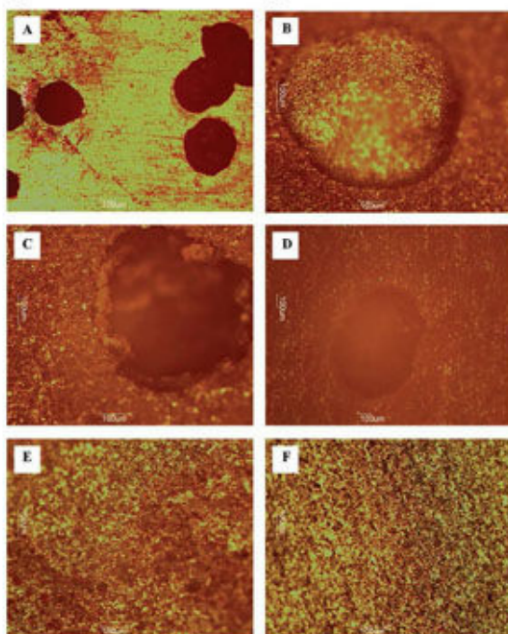


Figura 5. Micrografias de amostras do aço API 5L X80 após ensaios de polarização: a) sem filme; b) filme com potencial de reversão de $+0,25$ V; c) filme com potencial de reversão de $+0,50$ V; d) filme com potencial de reversão de $+1,0$ V; e) filme com potencial de reversão de $+1,5$ V; f) filme com potencial de reversão de $+2,0$ V.

Observa-se a presença de pites na amostra sem filme e nas amostras com filmes obtidos nos potenciais de $+0,25$ V, $+0,50$ V e $+1,0$ V. As amostras com filmes obtidos a $+1,5$ V e $+2,0$ V apresentaram uma superfície muito semelhante àquela observada antes do ensaio de polarização, com ausência de pites ou sinais de corrosão generalizada, confirmando seu bom desempenho frente à corrosão.

4. CONCLUSÕES

Os ensaios de polarização mostraram que os filmes produzidos por voltametria cíclica podem aumentar a resistência à corrosão localizada (por pite) e também uniforme (diminuindo I_{corr} e aumentando E_{corr}) do aço API 5L X80, dependendo das condições de potencial empregadas no ensaio. Este resultado está diretamente relacionado à espessura e compactação do filme formado. Os potenciais mais indicados para a formação do filme de óxido, segundo os resultados obtidos são de $+1,5$ V e $+2,0$ V. Potenciais mais baixos ($+0,25$ V, $+0,50$ V e $+1,0$ V) produziram filmes pouco espessos (a $+0,25$ V e $+0,50$ V) e defeituosos (a $+1,0$ V). Deste modo, a formação de um filme passivo artificialmente produzido pode ter um efeito benéfico sobre o comportamento de corrosão sob tensão dos aços API 5L X80, pois inibe a corrosão por pite. É importante ressaltar, no entanto, que o efeito benéfico neste trabalho não elimina a necessidade de eventuais técnicas complementares para proteção contra a corrosão, tais como o uso de inibidores e proteção catódica. No entanto, os resultados mostram que é possível obter uma superfície mais estável frente à corrosão para os aços utilizados para fabricação de tubulações na indústria e petróleo e gás natural, empregando uma técnica simples como a voltametria cíclica. O desafio de ordem prática seria levar este conceito para as estruturas de grande porte utilizadas nas aplicações reais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a USIMINAS pela doação das amostras utilizadas neste trabalho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SÁNCHEZ, F.J.; MISHRA, B.; OLSON, D.L. Magnetization effect on hydrogen absorption in high-strength steels and its implications. *Scripta Materialia*, v. 53, p. 1443-1448, 2005.
- [2] HASHEMI, S.H. Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 86, p. 533-540, 2009.

- [3] ZHANG, C.; CHENG, Y.F. Corrosion of welded X100 pipeline steel in a near-neutral pH solution. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 19, p. 843-840, 2010.
- [4] XUE, H.B.; CHENG, Y.F. Electrochemical corrosion behavior of X80 pipeline steel in a near-neutral pH solution. *Materials and Corrosion*, v. 61, p. 756-761, 2010.
- [5] ZHU, W.C.; LENG, W.H.; ZHANG J.Q.; CAO, C.N. Decreasing pitting susceptibility of passive films on X70 pipeline steel in NaCl solutions by illumination. *Acta Metallurgica Sinica*, v. 19, p. 91-97, 2006.
- [6] ZHAO, M.-C.; YANG, K.; SHAN, Y. The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 335, p. 14-20, 2002.
- [7] NIU, L.; CHENG, Y.F. Corrosion behavior of X70 pipe steel in near-neutral pH solution. *Applied Surface Science*, v. 253, p. 8626-8631, 2007.
- [8] LIU, Z.Y.; LI, X.G.; DU, C.W.; ZHAI, G.L.; CHENG, Y.F. Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment. *Corrosion Science*, v. 50, p. 2251-2257, 2008.
- [9] LIU, Z.; LI, X.; ZHANG, Y.; DU, C.; ZHAI, G. Relationship between electrochemical characteristics and SCC of X70 pipeline steel in an acidic soil simulated solution. *Acta Metallurgica Sinica*, v. 22, p. 58-64, 2009.
- [10] ZHANG, L.; LI, X.; DU, C.; HUANG, Y. Effect of applied potentials on stress corrosion cracking of X70 pipeline steel in alkali solution. *Materials and Design*, v.30, p. 2259-2263, 2009.
- [11] SONG, F.M. Predicting the mechanisms and crack growth rates of pipelines undergoing stress corrosion cracking at high pH. *Corrosion Science*, v. 51, p. 2657-2674, 2009.
- [12] TANG, X.; CHENG, Y.F. Localized dissolution electrochemistry at surface irregularities of pipeline steel. *Applied Surface Science*, v. 254, p. 5199-5205, 2008.
- [13] LI, M.C.; CHENG, Y.F. Corrosion of the stressed pipe steel in carbonate-bicarbonate solution studied by scanning localized electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta*, v. 53, p. 2831-2836, 2008.
- [14] PARKINS, R.N.; ZHOU, S. The Stress Corrosion Cracking of C-Mn Steel in CO₂-HCO₃⁻-CO₃²⁻ Solutions. I: Stress Corrosion Data. *Corrosion Science*, v. 39, p. 159-173, 1997.
- [15] VAN BOVEN, G.; CHEN, W.; ROGGE, R. The role of residual stress in neutral pH stress corrosion cracking of pipeline steels. Part I: pitting and cracking occurrence. *Acta Materialia*, v. 55, p. 29-42, 2007.
- [16] ZHANG, Y.S.; ZHU, X.M.; LIU, M.; CHE, R.X. Effects of anodic passivation on the constitution, stability and resistance to corrosion of passive film formed on an Fe-24Mn-4Al-5Cr alloy. *Applied Surface Science*, v. 222, p. 89-101, 2004.
- [17] HERNÁNDEZ-ESPEJEL, A.; DOMÍNGUEZ-CRESPO, M.A.; CABRERA-SIERRA, R.; RODRÍGUEZ-MENESES, C.; ARCE-ESTRADA, E.M. Investigations of corrosion films formed on API-X52 pipeline steel in acid sour media. *Corrosion Science*, v. 52, p. 2258-2267, 2010.
- [18] McCafferty, E. *Introduction to corrosion science*, Springer, New York, 2010. ■

Edvan Almeida de Souza Filho

Aluno de graduação em Engenharia de Materiais na
Universidade Federal do ABC
edvan.filho@aluno.ufabc.edu.br

Olandir Vercino Correa

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/
CNEN-SP), Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais
(CCTM)
ovcorrea@ipen.br

Renato Altobelli Antunes

Universidade Federal do ABC (UFABC)
renato.antunes@ufabc.edu.br



Corantes e Produtos Químicos para Anodização



www.cpacorantes.com.br



- | Desengraxantes
- | Fosqueadores
- | Desoxidante
- | Aditivo para Anodização
- | Supressor de gases
- | Selagens
- | Antiespumante
- | Corantes
- | Solução estabilizada para Eletrocoloração
- | Aditivo para Eletrocoloração

11 4055.3621 | 11 4109.6769

Rua Piratininga, 126
Diadema | SP | 09990-020

CLARIANT
Distribuidor autorizado