

ESTUDO DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA DOS AÇOS CARBONO ASTM SA 516 Gr. 70, INOXIDÁVEL ASME SA 240 TP 317 L E AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX EM AMBIENTE DE H₂SO₄ 0,5M¹

Carlos Roberto Araújo²
 José Rubens Gonçalves Carneiro³
 André Bragança Carvalho França⁴
 Gabriela Diniz França⁵
 Célia de Araújo Figueiredo⁶
 Vanessa Freitas de Cunha Lins⁷
 Leonardo José Dutra Silva⁸

Resumo

Os vasos de pressão são recipientes, que podem estar sujeitos à chama, e são feitos para armazenar fluidos sob pressão interna ou externa em diferentes temperaturas; são utilizados em indústrias químicas, petroquímicas, papel e celulose, dentre outras. Em geral, os vasos de pressão são construídos em aço carbono; entretanto, também podem ser usados os aços inoxidáveis na condição de cladeado por explosão ou laminação. A seleção do material se baseia em diversos parâmetros tais como fluido de trabalho, pressão, temperatura, e resistência ao meio corrosivo, tal como H₂S_(g), H₂SO_{4(aq)}, H_{2(g)}, CO_{2(g)}, ao qual o material será exposto. O objetivo do presente trabalho é avaliar a resistência à corrosão dos aços carbono ASTM SA 516 Gr.70, inoxidável austenítico ASME SA 240 TP 317L e inoxidável duplex em solução aquosa 0,5 mol/L H₂SO₄, não aerado, à temperatura de 22 °C. Foram realizados ensaios de levantamento de curva de evolução do potencial de corrosão com o tempo, curvas de polarização potenciodinâmica e diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica. Os resultados experimentais obtidos pela espectroscopia de impedância eletroquímica evidenciam um controle cinético de transferência de elétrons como mecanismo de reação eletroquímica para o aço inoxidável ASME SA 240 TP 317L. Em relação ao aço carbono ASTM SA 516 Gr.70, o controle do processo corrosivo, também, é cinético com transferência de elétrons seguido de adsorção superficial; para o aço inoxidável duplex tem-se mecanismo de cinética de transferência de elétrons seguido de difusão iônica. A partir das curvas de polarização potenciodinâmica, foram obtidos valores de resistência a polarização (R_P), potencial de corrosão (E_{corr}) e taxa de corrosão (R_{corr}) para os aços estudados. O aço inoxidável ASME SA 240 TP 317L e o aço inoxidável duplex mostraram-se resistentes ao meio corrosivo, adquirindo caráter passivo (de 0 a 950 mV), enquanto que o aço SA 516 Gr.70 apresenta pseudopassivação característica em solução 0,5 mol/L H₂SO₄.

Palavras-chave: Corrosão eletroquímica; Aço inoxidável austenítico; Aço carbono; Aço inoxidável duplex.

STUDY OF ELECTROCHEMICAL CORROSION OF CARBON STEEL ASTM SA 516 Gr 70, ASME SA 240 TP 317 STAINLESS STEEL STAINLESS LE DUPLEX IN ENVIRONMENT H₂SO₄ 0,5 M

Abstract

Pressure vessels are containers for storing fluids under external or internal pressure at different temperatures, used in chemical, petrochemical, pulp and paper industries, among others. In general, the pressure vessels are made of carbon steel, however, stainless steel clad over carbon steel can also be used. Cladding can be done by explosive welding or roll welding. The material selection is based on various parameters such as working fluid, pressure, temperature, and resistance to corrosive environment to which the material is exposed as, for example, H₂S_(g), H₂SO_{4(aq)}, H_{2(g)}, CO_{2(g)}. The objective of this study is to evaluate the corrosion resistance of carbon steel SA 516 Gr.70, austenitic stainless steel ASME SA 240 TP 317L and duplex stainless steel in non-aerated corrosive H₂SO₄ 0,5 mol/L, containing natural dissolved oxygen. Electrochemical tests were carried out comprising open circuit potential measurements, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy. The experimental results obtained by electrochemical impedance spectroscopy of stainless steel ASME SA 240 TP 317L showed a kinetic control of electron transfer in two-step mechanism for the electrochemical reaction. Regarding carbon steel SA 516 Gr.70, the control of the corrosion process is also kinetic electron transfer, but in a single step. From the polarization curves, the polarization resistance (R_P), the corrosion potential (E_{corr}) and the corrosion rate (R_{corr}) were obtained for the studied steels. The stainless steel ASME SA 240 TP 317L stainless steel and duplex stainless steel proved resistant to the corrosive medium, acquiring passive character (0 to 950 mV), while the SA 516 Gr.70 steel corrodes continuously in the corrosive medium H₂SO₄ 0.5 mol/L.

Key words: Electrochemical corrosion; Austenitic stainless steel; Carbon steel; Duplex stainless steel.

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

² Engenheiro Metalurgista, M. Sc., Prof. PUC Minas (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais), MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, D. Sc., Prof. PUC Minas, MG, Brasil.

⁴ Graduando do Curso de Engenharia Mecânica, PUC Minas, MG, Brasil.

⁵ Graduando do Curso de Engenharia Metalúrgica, PUC Minas, MG, Brasil.

⁶ Engenheira Química, D. Sc., Pesquisadora, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁷ Engenheira Química, D. Sc., Professora, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil.

⁸ Graduando do Curso de Engenharia Mecânica, PUCMG Técnico Mecânico na FIAT - Fiat Chrysler America Latina, Betim, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A superfície de ferro e aço, em aplicações industriais pode ser encontrada em muitas formas, variando de metal exposto a metal oxidado em diferentes graus. Investigações recentes têm enfatizado a natureza da superfície do metal nos processos de corrosão. Uma descrição precisa da superfície não só ajuda a identificar o processo e mecanismo de corrosão, mas, também, ajuda na seleção dos materiais adequados para esta função.⁽¹⁾

Atualmente, com o crescimento da economia mundial, investimentos nas áreas de exploração e refino do petróleo são necessários para atender à crescente demanda gerada pelo crescimento populacional. O projeto pré-sal deve ampliar a capacidade de produção e colocar o Brasil num cenário de destaque no mercado de exploração e produção de petróleo.

A resistência à corrosão deve ser levada em consideração para especificação do material utilizado no projeto e construção dos equipamentos de processo. Para a fabricação de componentes de equipamento, e para a construção de instalações industriais para a produção de ácidos, produtos químicos, e os seus derivados, é importante fazer a seleção adequada dos materiais utilizados. Os aços carbono são os mais utilizados por apresentarem boa resistência mecânica, baixo custo e boa soldabilidade. Pode-se utilizar, também, aço inoxidável austenítico ou duplex, que possuem boa resistência à corrosão por pite.

Os aços inoxidáveis (contendo 18Cr-8Ni) são materiais de engenharia usados em vários ramos da indústria devido às suas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão em elevadas temperaturas. Contudo, a precipitação de compostos intermetálicos nos contornos de grão afetam esta resistência;⁽²⁾ ademais, a corrosão intergranular dos aços inoxidáveis austeníticos tem sido explicada pela teoria de redução do cromo em torno do contorno de grão.^(3,4)

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem boa resistência à corrosão em diferentes ambientes e podem atender a situações nas quais o aço carbono revele desempenho insatisfatório.⁽⁵⁾

Os aços inoxidáveis duplex são ligas bifásicas, contendo ferrita (α) + austenita (γ), com porcentagem volumétrica das fases em 50%, possuem alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão. Estes também podem ser utilizados na construção de vasos de pressão; no entanto, o custo destes materiais é consideravelmente superior ao custo dos demais materiais citados.

Aparentemente, o ácido sulfúrico é produzido mais do que quaisquer outros produtos químicos em todo o mundo. Ele é usado direta ou indiretamente em quase todos os setores industriais. É utilizado principalmente para a produção de produtos químicos e os seus derivados, em decapagem do aço e outros metais, em fabricação de fertilizantes, corantes, pigmentos, drogas, explosivos, detergentes sintéticos, rayon e outros produtos têxteis, refino de petróleo e na produção de borrachas.

Os processos de corrosão estão diretamente relacionados a possíveis falhas dos materiais. Nas instalações de refino de petróleo e nas petroquímicas, cerca de 50% das falhas de materiais estão creditadas à corrosão. Logo, se observa a importância da correta seleção dos materiais que compõem os vasos de pressão.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dos aços carbono ASTM SA 516 Gr.70, inoxidável austenítico ASME SA 240 TP 317L e inoxidável duplex frente à

corrosão eletroquímica em solução aquosa 0,5 mol/L H₂SO₄, não aerado, à temperatura ambiente.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Análise Química e Metalográfica do Material

Os materiais utilizados nessa pesquisa são chapas laminadas à quente de aço carbono ASME SA 516 Gr.70, chapa de aço inoxidável ASME SA 240 TP 317L e tubo de aço inoxidável duplex de diâmetro de 200 mm. A análise química foi realizada em corpos-de-prova de dimensões 50x50 mm em espectrômetro óptico de emissão. O aço inoxidável duplex foi recebido, seccionado em torno convencional na seção transversal em comprimento de 12 mm no sentido longitudinal.

As amostras para ensaio metalográfico foram cortadas na direção perpendicular à laminação, fresadas e preparadas em lixas com granulometrias de 180, 220, 320, 400, 500, 600, 1.000 e 1.200 mesh, após o qual foi realizado o polimento de acabamento em feltro impregnado com pasta de diamante de 9, 3 e 1 µm.

Para análise da microestrutura do aço carbono, as amostras foram atacadas com nital 4% e água régia para ataque de aço inox austenítico (1:3, uma porção de ácido nítrico concentrado para três porções de ácido clorídrico concentrado), e, posteriormente, analisadas em microscópio ótico marca Zeiss, com analisador de imagem. Utilizou-se o reativo de Murakami para ataque do aço duplex (30g K₃Fe(CN)₆ + 30g KOH + 60 mL H₂O) à temperatura ambiente.⁽⁶⁾

As amostras também foram observadas em microscópio eletrônico de varredura, marca Philips, à tensão de 20 kV. Amostras dos aços inoxidáveis duplex e ASME SA 240 TP 317L foram submetidas à análise por difração de raios-X para identificação e avaliação da quantidade relativa de fases presentes. Os ensaios foram realizados em um difratômetro Shimadzu XRD-6000 operando com comprimento de onda Cu-K_α. O ângulo de difração (2θ) foi variado entre 35° e 105°, com resolução de 0,02° e velocidade de varredura de 2° por minuto. A fração volumétrica das fases presentes foi determinada por refinamento Rietveld no software *Maud versão 2.26*⁽⁷⁾ e, também, pela análise das reflexões individuais segundo procedimento adotado por Kim.⁽⁸⁾

3.2 Ensaio Eletroquímico

Através de solda capacitiva, foi feita a fixação dos fios de aço nos corpos de prova, a fim de realizarem o transporte de corrente nos ensaios de corrosão eletroquímica. Em seguida, foi feito o embutimento a frio em resina termoplástica. Neste trabalho, foi usada a solução de ácido sulfúrico 0,5 mol/L (H₂SO₄ 0,5 M), na condição não aerada (contendo oxigênio naturalmente dissolvido) para realização dos ensaios. O preparo desta solução seguiu o procedimento recomendado na norma técnica ASTM G 5.⁽⁹⁾

O equipamento usado na realização dos ensaios de corrosão eletroquímica foi o potenciostato, modelo Autolab, Potenciostat/Galvanostat PGSTAT 100, acoplado "on-line" a um microcomputador e a célula eletroquímica de três eletrodos: eletrodo de platina (Pt, auxiliar), eletrodo de prata-cloreto de prata (Ag/AgCl, referência) e eletrodo de trabalho (amostra a ser analisada).

As diferentes técnicas de ensaios eletroquímicos utilizados e de apoio são a evolução do potencial com o tempo, levantamento de curva de polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). Todos os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente. As condições usadas na obtenção das curvas de polarização potenciodinâmica e diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica foram adaptadas, respectivamente, das recomendações das normas ASTM G-5⁽⁹⁾ e ASTM G-106.⁽¹¹⁾ A interpretação dos resultados e análise dos diagramas seguiu os procedimentos recomendados pela literatura específica⁽¹⁰⁻¹³⁾ e ajustou-se os circuitos equivalentes usando-se o software ZSimpWin[®] Version 3.21, da Echem Software.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Análise Química

A Tabela 1 apresenta a composição química dos aços utilizados neste trabalho.

Tabela 1. Composição químicas dos materiais estudados (em % p/p)

AÇO ASTM SA 516 Gr. 70											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	Al	Cu
0,22	1,04	0,20	0,017	0,016	0,02	0,01	0,01	0,003	0,002	0,033	0,02
AÇO INOXIDÁVEL ASME SA 240 TP 317L											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	N (ppm)		
0,027	1,31	0,490	0,034	0,001	18,00	11,6	3,03	0,044	623		
AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	N	Al	Cu
0,010	0,45	0,32	0,017	0,002	24,82	6,24	4,81	0,005	0,853	0,015	0,18
V	B	Nb	Sn								
0,048	0,002	0,02	0,005								

4.2 Análise Microscópica e Difratométrica

A Figura 1 apresenta as micrografias obtidas ao microscópio óptico.

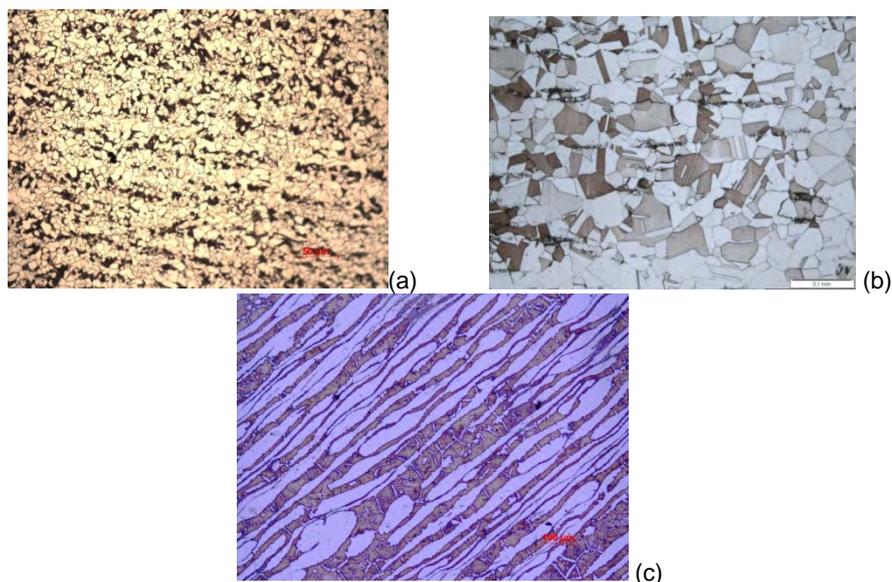


Figura 1. Micrografias ópticas – (a) Aço Carbono ASTM SA 516 Gr. 70, (b) Aço Inoxidável ASME SA 240 TP 317L e (c) Aço Inoxidável Duplex.

Na Figura 1a observa-se a presença de ferrita (claro) e perlita (escuro) em disposição bandeada. Nas Figuras 1b e 1c verifica-se a presença de austenita e ferrita. A Figura 3 apresenta a microestrutura obtida por microscopia eletrônica de varredura e o espectro de difração de raios-X do aço inoxidável ASME SA 240 TP 317L.

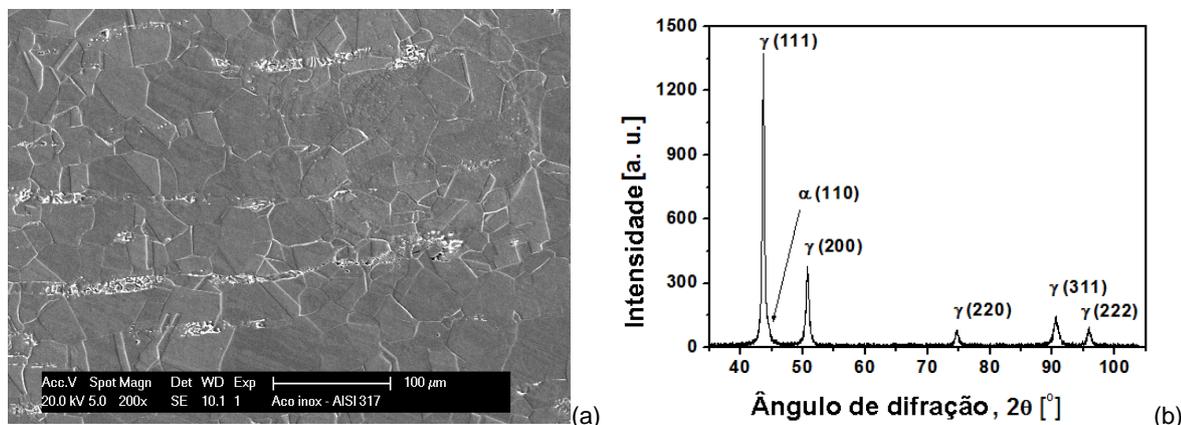


Figura 2. Aço Inoxidável ASME SA 240 TP 317L – (a) Microscopia eletrônica de varredura; e (b) Espectro de difração de raios-X.

Nota-se na Figura 2a a presença de segunda fase (fase branca). A difração de raios-X revela que estas inclusões são compostas de 5% de ferrita e 95% de austenita (γ), como mostra a Figura 2b.

Usando-se as expressões matemáticas para o cálculo do parâmetro de rede a , conforme a literatura,^(14,15) determina-se $a = (3,6029 \pm 0,0264) \text{ \AA}$, coincidente com o parâmetro de rede da austenita (cúbica de face centrada).

A Figura 3 apresenta a microestrutura e espectro de difração de raios-X do aço inoxidável duplex.

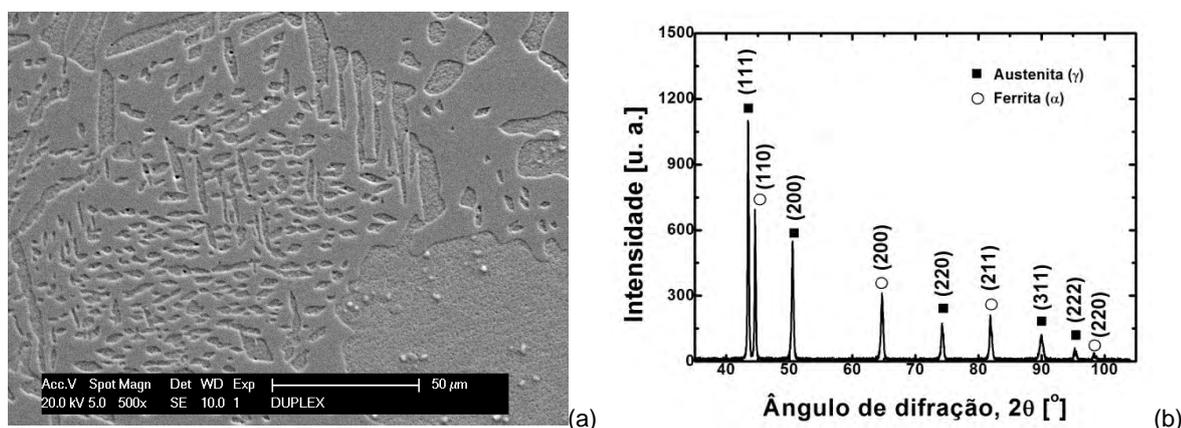


Figura 3. Aço Inoxidável Duplex – (a) Microscopia eletrônica de varredura e (b) Espectro de difração de raios-X.

A difração de raios-X (Figura 4b) revela 50% é, respectivamente, o percentual das fases ferrita (α) e austenita (γ) no aço inoxidável duplex.

4.3 Ensaios Eletroquímicos

A Figura 4 apresenta as curvas de potencial de circuito aberto.

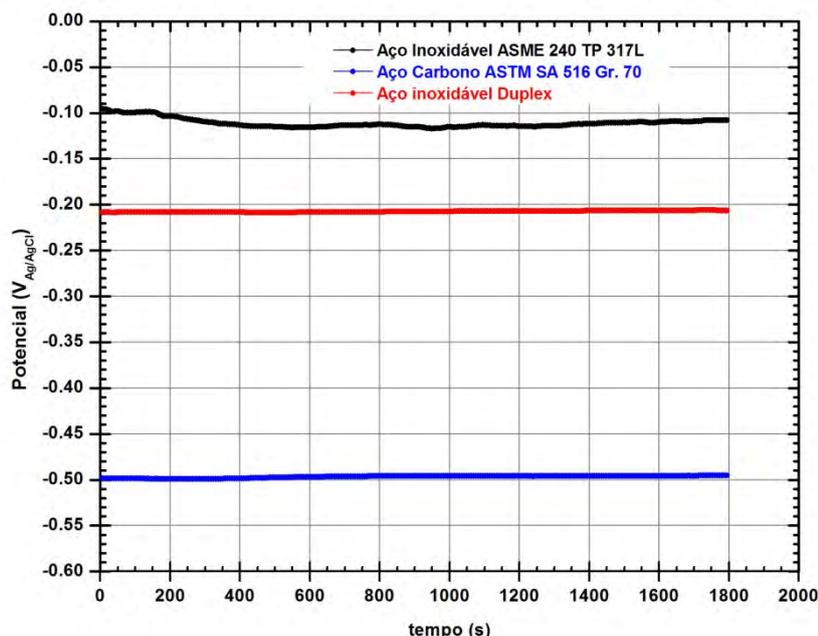


Figura 4. Curvas de estabilização de potencial vs. tempo para os aços estudados, obtidas à temperatura ambiente em solução H_2SO_4 0,5 M, não aerada.

A Figura 4 mostra que o aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 é mais anódico e que o aço inoxidável ASME SA 240 TP 317L como o mais catódico. A Figura 6 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmica para os aços estudados.

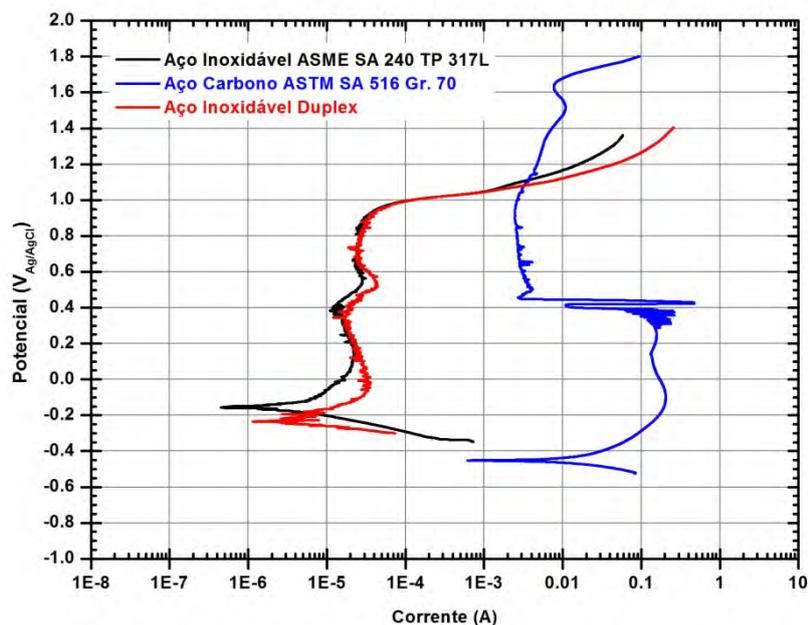


Figura 5. Curvas de polarização potenciodinâmica para os aços estudados, obtidas à temperatura ambiente em solução H_2SO_4 0,5 M, não aerada.

A Figura 5 mostra que o aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 apresenta região de pseudopassivação, enquanto que os aços inoxidáveis, ASME SA 240 TP 317L e duplex, apresentam região de passivação na faixa de corrente de 10 a 100 μA . Segundo Galvele,⁽¹⁶⁾ um material para ser considerado passivo deve apresentar densidade de corrente de passivação na faixa de 10 a 100 μA . Portanto, o resultado obtido corrobora com a literatura.

Os parâmetros físico-químicos necessários para a determinação da taxa de corrosão foram determinados como recomendado pela literatura.⁽¹⁷⁻¹⁹⁾ Na determinação dos parâmetros eletroquímicos usou-se o método da resistência de polarização linear (RPL).^(17,19) A Tabela 2 apresenta os parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de polarização potenciodinâmica.

Tabela 2. Parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de polarização potenciodinâmica

Aço	E_{corr} (V)	I_{corr} (μ A)	R_p (Ω)	R_{corr} (mma)
Carbono ASTM SA 516 Gr. 70	- 0,497	1237,9	6,2	13,67
Inoxidável ASME SA 240 TP 317L	- 0,154	7,70	5966	0,0850
Inoxidável Duplex	- 0,237	17,75	1756	0,1886

A Figura 6 apresenta os diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica.

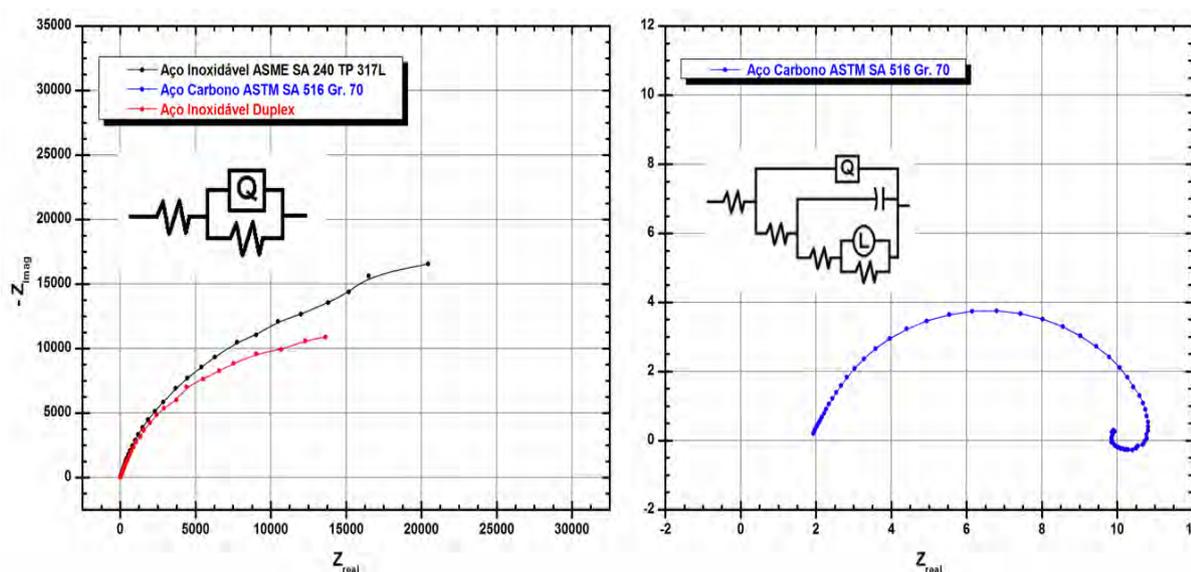


Figura 6. Diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica, representação de Nyquist, para os aços estudados, obtidos à temperatura ambiente, em solução 0,5 mol/L H_2SO_4 , não aerada.

Os resultados mostram que o aço inoxidável ASME SA 240 TP 317L apresenta maior resistência à corrosão eletroquímica em solução 0,5 mol/L H_2SO_4 , não aerado, a temperatura ambiente.

A Figura 6 revela que os três aços estudados apresentam mecanismos e comportamentos distintos frente à corrosão eletroquímica em solução 0,5 mol/L H_2SO_4 , não aerada, à temperatura ambiente.

A Figura 7 apresenta os diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica, na representação do diagrama de Bode, correspondentes à Figura 6.

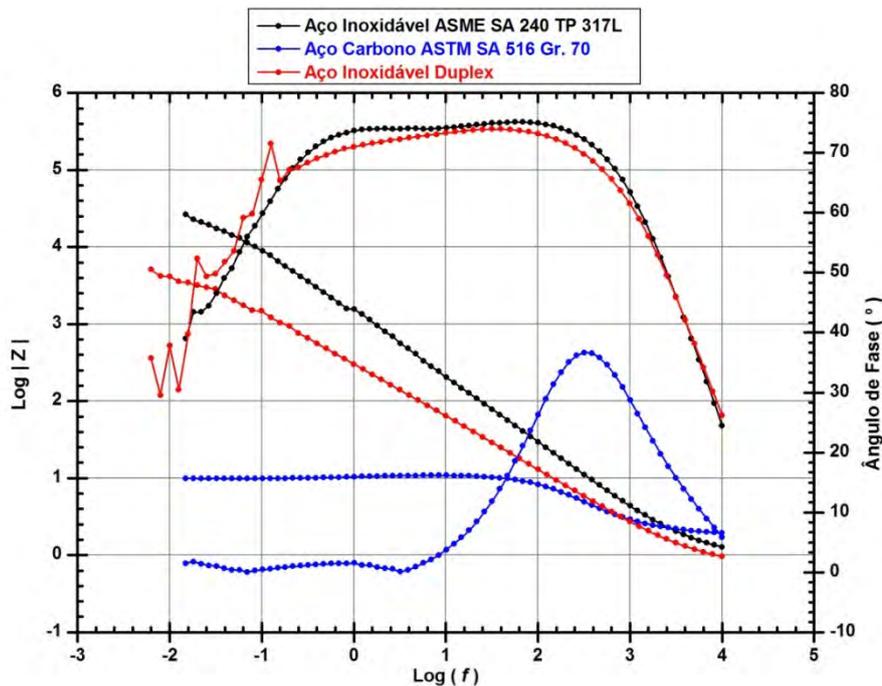


Figura 7. Diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica, representação de Bode, para os aços estudados, obtidos à temperatura ambiente, em solução H_2SO_4 0,5 M, não aerada.

Comparando-se a representação de Nyquist para o aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 com a representação de Bode, observa-se que no diagrama de Bode não confirma a presença do arco indutivo em baixa frequência (na faixa de 10^{-2} a 1 Hz), como mostrado no diagrama de Nyquist (na faixa de resistência de 9,5 a 11,5 Ω). Nesta faixa de frequência (ou de resistência) deve-se observar uma mudança na inclinação da reta de forma descendente (como é característico para um arco indutivo), semelhante ao que ocorre na faixa de frequência de 10^1 a 10^3 Hz, no diagrama de Bode; na forma ascendente e que não foi observado.

Conclui-se, portanto, que o arco indutivo, neste caso, não é representativo para o mecanismo de corrosão: pouco contribui para aumentar ou diminuir a resistência à corrosão do material. O seu surgimento na representação do diagrama de Nyquist pode ser interpretado como ruído eletroquímico, que não confirma a hipótese sugerida por Li,⁽¹⁾ para o processo de adsorção superficial, caracterizado pelo aparecimento do arco indutivo, como sugerido por Abdallah et al.⁽²⁰⁾

A Tabela 3 apresenta os parâmetros eletroquímicos extraídos dos diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica apresentados nas Figuras 6 e 7, onde se identifica que E_{corr} é o potencial de corrosão, C é o elemento capacitivo, em μF , Q é o elemento de constante de fase, em $\mu S \cdot s^n / cm^2$, L é o elemento indutivo, em mH, $Y_o = Z_w^{-1}$, em $\mu S \cdot \sqrt{s}$,⁽¹⁰⁻¹³⁾ e, R_i representa a resistência elétrica, em $\Omega \cdot cm^2$.

Tabela 3. Parâmetros eletroquímicos extraídos dos diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica

Aço	E_{corr}	R_Ω	C	R_1	(Q)	n	Y_o	R_2	L	R_3
A	-0,497	1,927	26,3	0,101	338	0,859		7,93	122	1,133
B	-0,154	1,018		35180	147,8	0,845				
C	-0,237	0,647		24320	364,1	0,776				

A: aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70, B: Inoxidável ASME SA 240 TP 317L e C: Aço Inoxidável Duplex

Mesmo não havendo a confirmação do arco indutivo (no diagrama de bode, Figura 8) para o aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70, pode-se afirmar, pelo menos nestas condições, que existe sim a presença do arco indutivo, pois o valor de $L = 122$ mili-Henry não pode ser desprezado. Como o elemento indutivo é representado por $Z_L = j\omega L$,^(12,13) quando ligado em paralelo, sua influência é significativa, já que, como sugere Wolyneç,⁽¹³⁾ quanto maior o valor de L , maior o valor de Z_L , conseqüentemente, reduz a resistência à corrosão do metal.

De acordo com o circuito elétrico proposto para a interface em corrosão para a amostra de aço inoxidável ASME SA 240 TP 317L, verifica-se que o processo de corrosão ocorre em cinética de transferência de elétrons. Já o aço inoxidável duplex apresenta como mecanismo de corrosão cinética de transferência de elétrons seguida de difusão iônica,^(1,21,22)

As resistências de polarização, R_P , calculadas conforme,^(23,24) são: $8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para o aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70, que está de acordo com Li,⁽¹⁾ Orazen⁽¹²⁾ e Epelboin et al.,⁽²⁴⁾ $35180 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para o aço inoxidável ASME SA 240 TP 317L e $24320 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para o aço inoxidável duplex.

5 CONCLUSÃO

Concluiu-se que o aço inoxidável duplex pode ser utilizado como substituto do aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 frente ao mecanismo de passivação superficial e ao meio corrosivo estudado, o que lhe confere boa aplicabilidade na construção de vaso de pressão e tubulações que trabalhem, também, em alta pressão.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Fapemig, à FIAT - Fiat Chrysler America Latina e ao Laboratório de Corrosão do CDTN.

REFERENCIAS

- 1 LI, P. et al. Corrosion Science, 38 (1996), 1935.
- 2 MICHIUCHI, M. et al, Acta Mater, 54 (2006), 5179.
- 3 AYDOGDU, G. H.; AYDINOL, M. K. Corrosion Science, 48 (2006), 3565.
- 4 TALBOT, D; TALBOT, J. Corrosion Science and Technology, 390, 1998, Washington, CRC Press LLC.
- 5 UHLIG, H. H. Uhlig's Corrosion Handbook. Edited by R. Winston Revie, 3rd ed., 1253, 2011, New Jersey, John Wiley & Sons.
- 6 LUO, H. et al. Eletrochimica Acta v.64, p. 211-220, 2012.
- 7 LUTTEROTTI, L. et al. MAUD (Material Analysis Using Diffraction): a user friendly Java program for Rietveld Texture Analysis and more, Proceeding of the Twelfth International Conference on Textures of Materials (ICOTOM-12), v. 1, p. 1599-1604, 1999.
- 8 KIM, C. X-ray Method of Measuring Retained Austenite in Heat Treated White Cast Irons, Journal of Heat Treating, v. 1, n. 2, p. 43-51, 1979.
- 9 Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Material. G-5. Standards recommended practice for standard method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurement. Philadelphia. PA. 12p. 2004.
- 10 MATTOS, O. R. Acompanhamento do processo de deterioração de revestimentos com o auxílio da técnica de impedância eletroquímica. Rev. Ibero. Corros. y Prot., Vol. XVIII, no. 1, pp. 43-48, 1987.

- 11 Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Material. G 106. Standard practice for verification of algorithm and equipment for electrochemical impedance measurements. Philadelphia. PA. 11p. 2010.
- 12 ORAZEM, M. E.; TRIBOLLET, B. Electrochemical Impedance Spectroscopy, 523, 2008, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA.
- 13 WOLYNEC, S. Técnicas Eletroquímicas em Corrosão, 166, 2003, São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.
- 14 CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials science and engineering: an introduction. 8th Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., USA. 885p. 2010.
- 15 PADILHA, A. F. Materiais de Engenharia: Microestrutura. São Paulo: Hemus Editora Limitada. 349p. 2000.
- 16 GALVELE, J. R. Procesos de corrosión. Buenos Aires: ECOMAR. 164 pp. 1975.
- 17 BABOIAN, R. Corrosion tests and standards: application and interpretation, 2nd ed, 882; 2005, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- 18 ARAÚJO, C. R. Estudo do comportamento anódico do aço inoxidável tipo AISI 304 com filme de interferência, em NaCl 3,5% e FeCl₃.6H₂O 6% p/v. Belo Horizonte: UFMG, 1999. 212p. *Dissertação de Mestrado* (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Minas Gerais. 1999. On-line em <<http://www.pos.demet.ufmg.br/hpcpgem/P/defesas/104M.PDF>>.
- 19 TAIT, W. S. An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists, 155, 1994, Wisconsin, Pair O'Docs Publications, USA.
- 20 ABDALLAH, M. et al. Int. J. Electrochem. Sci., 7 (2012) 1564 – 1579.
- 21 AKBARI-MOUSAVI, S. A. A. et al. J. Mater. Process. Technol., 202 (2008), 224.
- 22 ABDEL GHANYL, N. A. et al. Modern Applied Science 5 (2011), No. 4, 19 – 29.
- 23 MARCUS, P; MANSFELD, F. Analytical Methods in Corrosion Science and Technology, 760, 2006, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- 24 EPELBOIN, I. et al. ASTM STP 727, 150 [1981].