

ESTUDO DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA DOS AÇOS CARBONO ASTM SA 516 Gr. 70, NÍQUEL PURO E AÇO CARBONO ASTM SA 516 Gr. 70 ELETROREVESTIDO COM NÍQUEL EM AMBIENTE DE H₂SO₄ 0,5M¹

Carlos Roberto Araújo²

José Rubens Gonçalves Carneiro³

André Bragança Carvalho França⁴

Ana Cláudia França Meireles⁵

Mônica Maria de Abreu Mendonça Schwartzman⁶

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, níquel puro, e o aço ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com níquel em meio corrosivo H₂SO₄ 0,5 mol/L, não aerado, contendo oxigênio naturalmente dissolvido a temperatura ambiente. 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 mostram que na avaliação do desempenho do aço carbono SA 516 Gr.70, do aço carbono ASTM SA 516 Gr.70 eletrorevestido com níquel e níquel puro em meio corrosivo 0,5 mol/L H₂SO₄, foi constatado que o aço carbono e o níquel puro apresentaram comportamento pseudopassivo e que o níquel puro apresentou um comportamento mais nobre que os demais. Os resultados encontrados nos ensaios de polarização potenciodinâmica para o aço carbono ASTM SA 516 Gr.70 eletrorevestido com níquel, em solução 0,5 mol/L H₂SO₄, mostraram que o material apresentou corrosão localizada. A formação de pites pode ser resultante de corrosão galvânica entre o substrato (aço carbono) e o eletrodepósito (Ni) devido à presença de poros no revestimento. Isto indica que o processo de eletrodeposição pode ser aperfeiçoado.

Palavras-chave: Corrosão eletroquímica; Aço carbono; Níquel puro; Aço carbono eletrorevestido; Técnicas eletroquímicas.

STUDY OF ELECTROCHEMICAL CORROSION OF CARBON STEEL ASTM SA 516 Gr 70, PURE NICKEL AND CARBON STEEL ASTM SA 516 Gr 70 ELECTROCOATED BY NICKEL WITH ENVIRONMENT IN H₂SO₄ 0.5 M

Abstract

Pressure vessels are containers, not subject to calls, for storing fluids under external or internal pressure at different temperatures, used in chemical, petrochemical, pulp and paper, among others. 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, such as 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 ASTM SA 516 Gr.70, pure nickel, and steel ASTM SA 516 Gr.70 nickel electrocoated an corrosive solution of H₂SO₄ 0,5 mol/L non-aerated, containing oxygen Naturally dissolved. Assays were performed lifting curve of evolution of corrosion potential with time, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy. The experimental results show that in evaluating from the performance of SA 516 Gr.70 carbon steel, carbon steel ASTM SA 516 Gr.70 electrodeposited with nickel and nickel pure in corrosive medium 0,5 mol/L H₂SO₄, it was found that the carbon steel and pure nickel behaved like pseudopassivated and that the pure nickel it behaved more noble than others. The results of potentiodynamic polarization assays for ASTM carbon steel SA 516 Gr.70 electrocoated with by nickel solution in 0,5 mol/L H₂SO₄, showed that the material exhibited localized corrosion. The formation of pits may be the result of galvanic corrosion between the substrate (carbon steel) and the electrodeposit (Ni) due to the presence of pores in the sheet. This indicates that the electrodeposition process can be improved.

Key words: Electrochemical corrosion; Carbon steel; Pure nickel; Carbon steel electrocoated; Electrochemical techniques.

³ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil
Engenheiro Metalurgista, D. Sc., Prof. PUC Minas, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, M. Sc., Prof. PUC Minas (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais), 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. Dra. Pesquisadora CDTN/CNEN. Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O aço carbono é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentagens variáveis de carbono entre 0,008% e 2,11%. São os mais utilizados na fabricação de equipamentos de processo, por apresentarem boa resistência mecânica, baixo custo, além de boa soldabilidade, o que facilita o uso nos processos de fabricação dos vasos de pressão.⁽¹⁾ Estruturas metálicas exigem propriedades especiais dos materiais para a sua construção, pois podem operar em ambientes hostis em relação à corrosão, desgaste, cargas cíclicas, temperaturas elevadas, etc.

Com a evolução da engenharia de materiais, foram desenvolvidas as chapas cladeadas por explosão ou por laminação unidas por aderência ou ancoragem mecânica.⁽²⁾

A eletrodeposição é, também, um processo empregado para se obter materiais com maior resistência à corrosão com utilização em equipamentos expostos aos meios corrosivos e a desgastes mecânicos por fricção ou abrasão. A eletrodeposição consiste no recobrimento de peças com um metal condutor ou outra substância, sendo resultado de uma migração de partículas carregadas eletricamente de uma solução aquosa iônica com o auxílio de corrente elétrica.^(3,4) Os eletrodepósitos de níquel em superfícies com pouca resistência à corrosão são amplamente usados na indústria para efeito decorativo, mas ainda pouco explorados para uso em revestimentos de chapas de vasos de pressão, fabricados em aço carbono.

As aplicações de engenharia resultantes do processo de niquelação e seu uso em galvanoplastia tiveram aumento expressivo nos últimos anos. Revestimentos de níquel são usados em aplicações de engenharia objetivando a modificação nas propriedades tais como características anticorrosivas, dureza, resistência ao desgaste e propriedades magnéticas. Cerca de 50% das falhas de materiais em equipamentos petrolíferos e petroquímicos estão sendo creditadas à corrosão. Logo, se observa a importância da correta seleção dos materiais que comporão os vasos de pressão.

Neste estudo, o revestimento industrial de níquel está sendo utilizado para proteção ao desgaste de placas de cobre de moldes de lingotamento contínuo usados na indústria siderúrgica. Desta forma, buscam-se utilizar essa experiência na eletrodeposição de níquel no aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dos aços carbono ASTM SA 516 Gr. 70, níquel puro e aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com níquel frente à corrosão eletroquímica em solução 0,5 mol/L H₂SO₄, aerada, a temperatura ambiente.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Análise Química e Metalográfica do Material

Os materiais utilizados nessa pesquisa são chapas laminadas a quente de aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70, níquel puro e aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com níquel, tendo o aço carbono e o níquel, respectivamente as espessuras de 12 e 4mm. A análise química foi realizada em corpos-de-prova de

dimensões 50x50 mm em espectrômetro óptico de emissão.

As amostras para ensaio metalográfico foram cortadas na direção perpendicular à laminação e embutidas em resina acrílica.

Essas amostras foram fresadas e, posteriormente, preparadas em lixas com granulometrias de 180, 220, 320, 400, 500, 600, 1.000 e 1.200 mesh. Em seguida, foi realizado polimento de acabamento em feltro impregnado com pasta de diamante de dimensão de 9, 3 e 1 μm .

Para análise da microestrutura do aço carbono, as amostras foram atacadas com Nital 4%, e, posteriormente, analisadas em microscópio óptico, marca Zeiss, com analisador de imagens e em microscópio eletrônico de varredura, marca Philips, à tensão de 20 kV.

3.2 Eletrodeposição

As dimensões das chapas de aço ASTM SA 516 Gr. 70 foram de 150 x 120 x 12,5 mm. Essas chapas foram submetidas à usinagem e retificadas, posteriormente, para adequação geométrica, e sua superfície pré-ativada através de polimento com lixadeira pneumática equipada com discos 3M Roloc Scotch-Brita MR Surface AMF, equivalente a lixa grana 320.

Em seguida, as amostras foram montadas em dispositivos de polipropileno, simulando a condição de eletrodeposição do processo industrial (Figura 1).



Figura 1. Configuração do sistema experimental de niquelagem do substrato de aço ASTM SA 516 Gr. 70.

Na deposição de níquel, utilizou-se um retificador, marca Adelco, com capacidade para até 50 A/dm². A corrente e tensão durante a deposição foram monitoradas de forma horária através de medições com um alicate amperímetro Minipa ET-3360 AC/DC 600 A. O monitoramento de pH do banho foi efetuado através de um medidor WTW pH 320 equipado com sensor Sentix 41, o qual incorpora, também, o monitoramento da temperatura do banho.

Após a deposição, todas as amostras foram lavadas com água deionizada, para remoção de resíduos do eletrólito. A dureza do revestimento de níquel foi medida em 4 pontos diferentes das amostras utilizando microdurômetro digital. O teste de adesão foi realizado com uma chama oxi-acetilênica em 100% da área depositada de níquel em temperatura de $(900 \pm 20)^{\circ}\text{C}$, simulando as condições de trabalho das placas de lingotamento contínuo. Esse teste foi realizado nas duas amostras experimentais e não ocorreu anomalia na superfície do substrato.

3.3 Ensaios Eletroquímicos

Através de solda capacitiva, foi feita a fixação de fios cobreados 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 acrílica. Neste trabalho, foi usada a solução de ácido sulfúrico 0,5 mol/L (H_2SO_4 0,5 M), na condição aerada para realização dos ensaios. O preparo desta solução seguiu o procedimento recomendado na norma técnica ASTM G5.⁽⁵⁾

O equipamento usado na realização dos ensaios de corrosão eletroquímica foi o potenciostato 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 - KCl saturado, referência) e eletrodo de trabalho (amostra a ser analisada).

As diferentes técnicas de ensaios eletroquímicos utilizados foram: 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 são listadas na Tabela 1 e, para EIE, na Tabela 2.

Tabela 1. Condições experimentais usadas na obtenção da curva de polarização potenciodinâmica

Condições usadas	Valores
Potencial inicial de varredura	-100 mV (-0,1 V) abaixo do potencial de circuito aberto
Potencial final de varredura anódica:	2000 mV (2,0 V)
Velocidade de varredura	1,0 mV/s – 0,001 V/s

Tabela 2. Condições experimentais usadas na obtenção do diagrama de espectroscopia de impedância eletroquímica

Condições usadas	Valores
Faixa de frequência	15 mHz – 10 kHz
Amplitude de voltagem (rms)	5 mV rms
Frequência de leitura	5 pontos/década

A interpretação dos resultados e análise dos diagramas seguiu os procedimentos recomendados pela literatura específica⁽⁶⁻⁹⁾ 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

Na Tabela 3 é apresentada a composição química do aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 e do níquel puro obtidas por espectrometria óptica de emissão.

Tabela 3. Composição química do aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 utilizado nos experimentos, em porcentagem em peso

Aço carbono 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
Níquel Puro											
Ni	Co	Si	Mn	Mo	Al	W	C	Ta	Nb		
92,0	7,72	0,02	0,02	0,02	0,01	0,07	0,10	0,10	0,01		

4.2 Microscopia Óptica

A Figura 2 apresenta as micrografias obtidas das amostras estudadas.

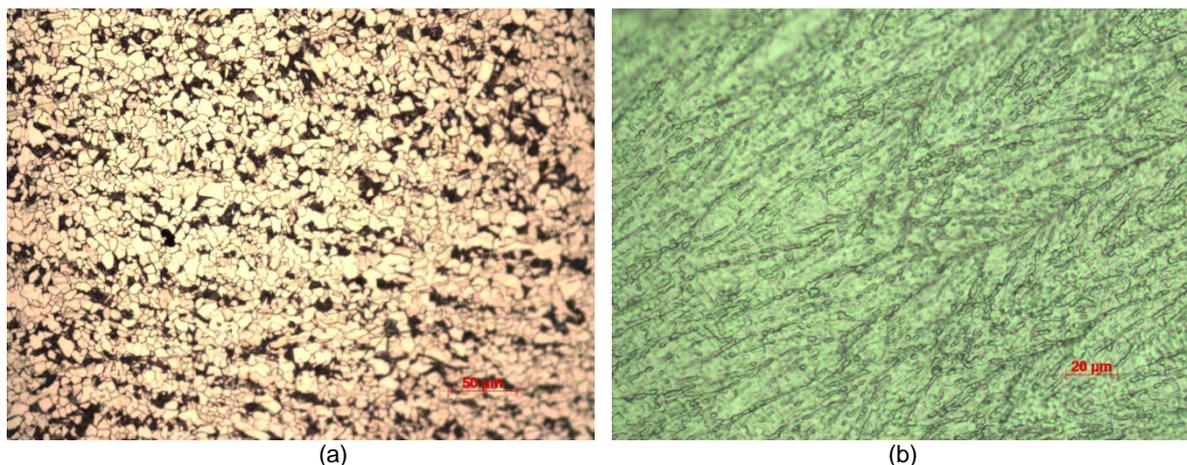


Figura 2. Micrografias ópticas – (a) aço carbono SA-516 Gr. 70, (b) níquel puro. **Fonte:** Laboratório de Ciências dos Materiais – PUC Minas

Na Figura 2a observa-se a presença de ferrita (claro) e perlita (escuro) em disposição bandeada. Na Figura 2b mostra-se a estrutura colunar de níquel fundido usado no processo de eletrodeposição sob o substrato de aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70.

4.3 Ensaios Eletroquímicos

A Figura 3 apresenta as curvas de estabilização de potencial de circuito aberto (potencial de corrosão).

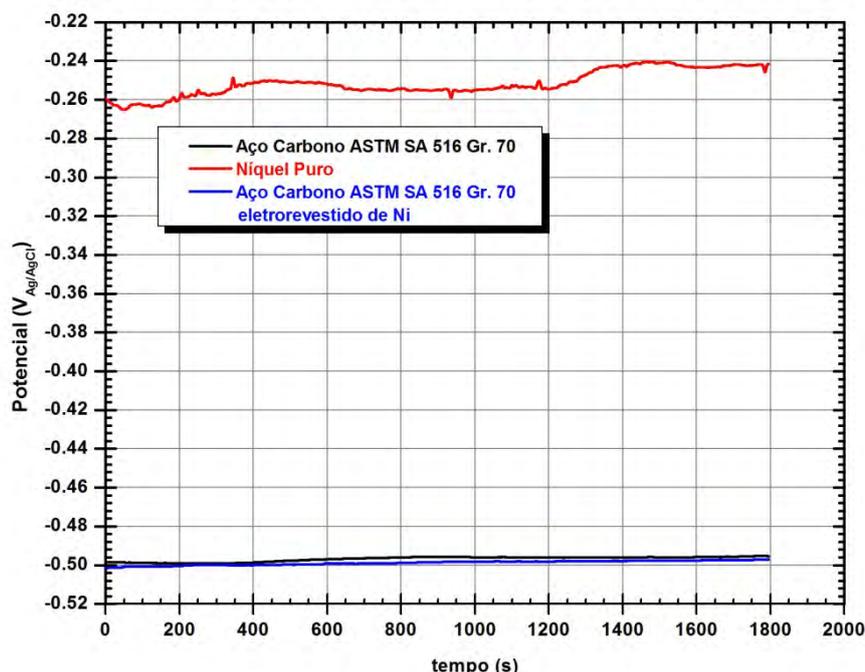


Figura 3. Curvas de estabilização de potencial de circuito aberto para os materiais estudados, a temperatura ambiente, em solução 0,5 mol/L H₂SO₄, aerada. **Fonte:**

A Tabela 4 apresenta os valores de estabilização do potencial de circuito aberto referentes às curvas da Figura 4.

Tabela 4. Potencial de circuito aberto para os materiais estudados em solução 0,5 mol/L H₂SO₄, não aerada, a temperatura ambiente, extraídos da Figura 4

Amostra	E _{corr} (mV)
Aço Carbono ASTM SA 516 Gr. 70	- 495,3
Níquel puro	- 242,1
Aço Carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com Ni	- 497,2

Nota-se que o aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 e o eletrorevestido apresentaram potenciais de corrosão semelhantes na solução 0,5 mol/L H₂SO₄ e menos nobres que o níquel puro. A eletrodeposição de níquel não melhorou as características eletroquímicas do aço carbono, que ainda apresenta características anódicas. A amostra de níquel puro revelou ser mais catódica, que as demais.

A Figura 4 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmica para os aços estudados. Segundo Galvele,⁽¹⁰⁾ um material para ser considerado passivo deve apresentar densidade de corrente de passivação na faixa de 10 a 100 μA, o que não se observa na Figura 4.

A Figura 4 mostra que os materiais metálicos estudados, aço ASTM SA 516 Gr. 70 e níquel puro, apresentaram um comportamento pseudopassivo em solução 0,5 mol/L H₂SO₄.^(3,11)

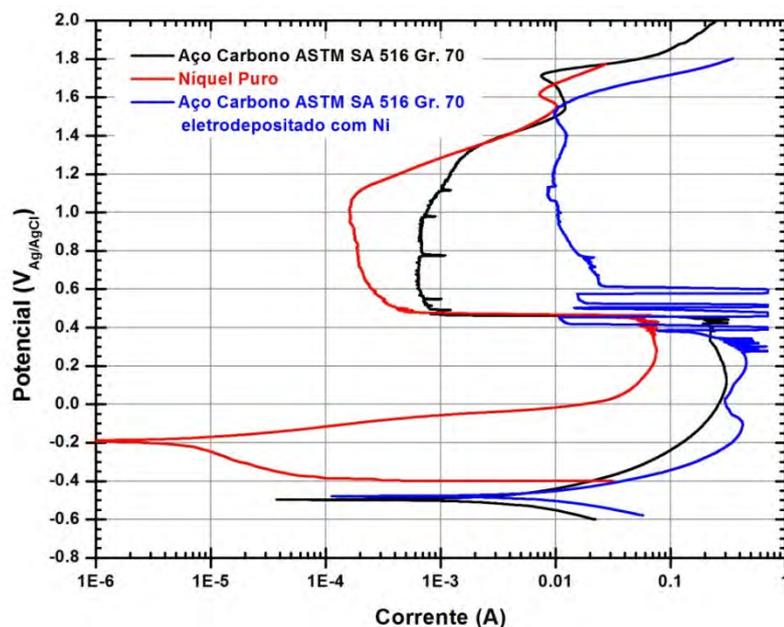


Figura 4. Curvas de polarização potenciodinâmica para os materiais estudados, obtidas a temperatura ambiente, em solução 0,5 mol/L H_2SO_4 , não aerada.

Observa-se na Figura 4 que a amostra de Ni puro apresenta maior resistência à corrosão do que às amostras de aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 e aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com Ni. A amostra de aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com Ni apresentou valores de densidade de corrente superiores aos demais materiais e não apresentou comportamento pseudopassivo. Na Figura 5 são mostradas micrografias ópticas do aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com Ni.

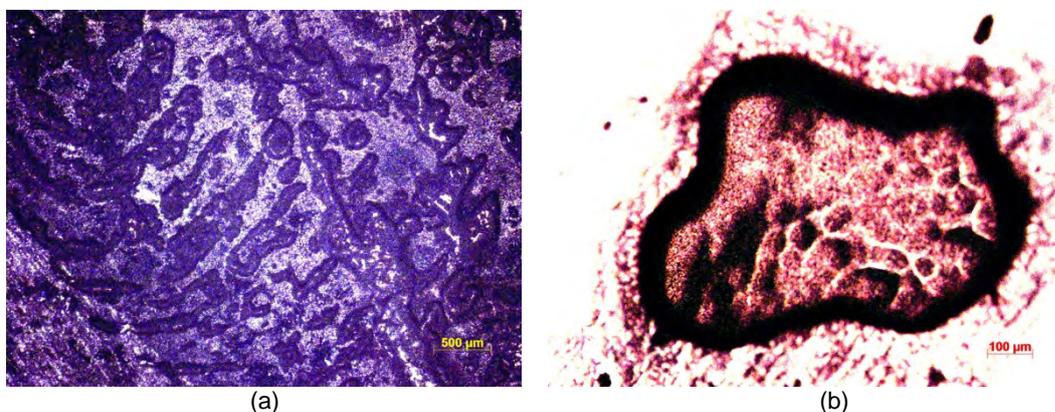


Figura 5. Micrografias ópticas da superfície do aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com Ni – (a) visão geral e (b) pite superficial devido ao processo de corrosão eletroquímica.

Devido à corrosão galvânica que provavelmente instalou-se nos poros e pites das amostras eletrorevestidas (Figura 5), a corrosão eletroquímica da amostra de aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com Ni foi mais intensa, resultando em densidades de corrente maiores do que aquelas observadas para as amostras de níquel puro e aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70. Este resultado fornece uma indicação de que o material eletrorevestido com espessura de 4 mm de níquel não é indicado para ambientes corrosivos contendo solução de ácido sulfúrico.

Os parâmetros físico-químicos necessários para a determinação da taxa de corrosão foram determinados como recomendado pela literatura.⁽¹²⁻¹⁴⁾

Na determinação dos parâmetros eletroquímicos usou-se o método da resistência de polarização linear (RPL).^(12,14)

A Tabela 5 apresenta os parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de polarização potenciodinâmica, onde E_{corr} é o potencial de corrosão, em volts, I_{corr} a corrente de corrosão, em micro ampère, R_p é a resistência de polarização, em Ω , calculada pelo método de RPL e, R_{corr} , é a taxa de corrosão dada em milímetros por ano.

Tabela 5. Parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de polarização potenciodinâmicas para os materiais estudados em solução 0,5 mol/L H_2SO_4 , aerada, a temperatura ambiente

Amostra	E_{corr} (V)	I_{corr} (μA)	R_p (Ω)	R_{corr} (mma)
Carbono ASTM SA 516 Gr. 70	- 0,495	811	19,34	9,411
Níquel puro	- 0,242	2,015	1603,62	0,02172
Aço Carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com Ni	- 0,497	2604,54	11,288	28,07

Os resultados obtidos mostram que o níquel puro apresenta maior resistência à corrosão eletroquímica em solução 0,5 mol/L H_2SO_4 . O fato de a amostra de aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestida com Ni apresentar taxa de corrosão maior do que a do aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 é devido, provavelmente, ao surgimento do par galvânico entre o revestimento eletrolítico de Ni e o substrato, através do surgimento de poros gerados na superfície metálica.

A Figura 6 apresenta a representação de Nyquist para os diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica dos materiais estudados.

A Figura 7 apresenta a representação de Bode para os diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica dos materiais estudados.

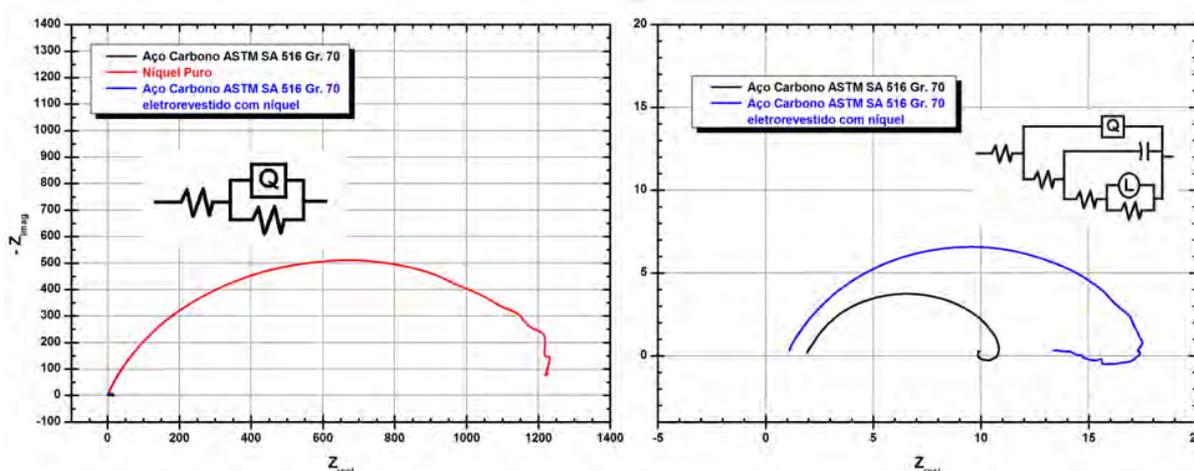


Figura 6. Diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica, representação de Nyquist para as amostras corroídas em solução 0,5 mol/L H_2SO_4 aerada, a temperatura ambiente. **Fonte:** Laboratório de Corrosão – CDTN

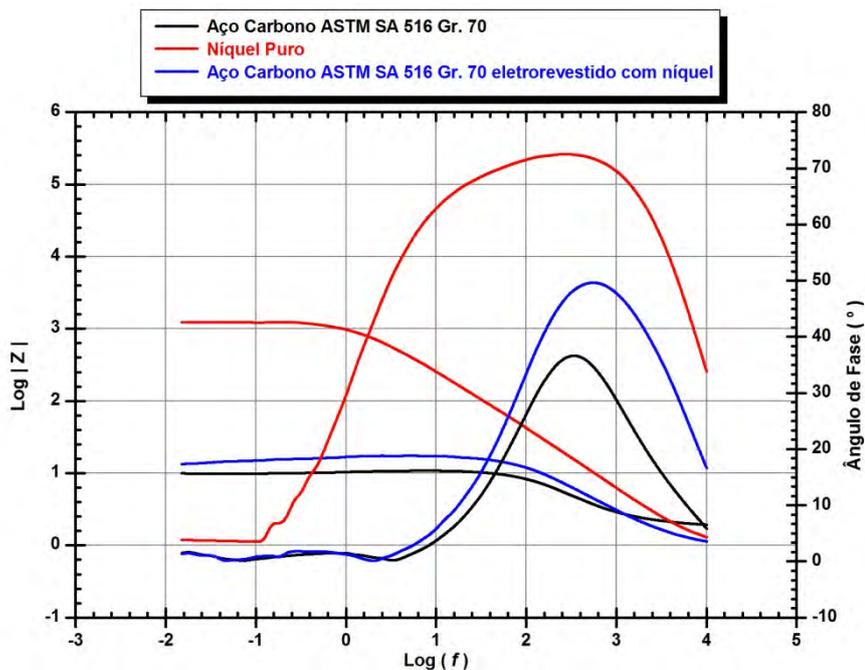


Figura 7. Diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica, representação de Bode para as amostras corroídas em solução 0,5 mol/L H₂SO₄ aerada, a temperatura ambiente. **Fonte:** Laboratório de Corrosão – CDTN

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 na faixa de resistência de 10 a 11 Ω , referente ao processo de adsorção superficial.

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 et al.,⁽¹¹⁾ para o processo de adsorção superficial, caracterizado pelo aparecimento do arco indutivo, como sugerido por Abdallah et al.⁽¹²⁾

A Tabela 6 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 $\mu\text{S}\cdot\text{s}^n/\text{cm}^2$, L é o elemento indutivo, em mH, e, R_i representa a resistência elétrica, em $\Omega\cdot\text{cm}^2$. Ainda identifica-se esta tabela a seguinte nomenclatura: Aço C = aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70, Ni = níquel puro e, (C+Ni) = aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com níquel puro.

Tabela 6. Parâmetros eletroquímicos extraídos dos diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica

Chapa	E_{corr}	R_{Ω}	C	R_1	(Q)	n	R_2	L	R_3
Aço C	-0,495	1,927	26,28	0,101	337,9	0,859	7,95	122	1,133
Ni	-0,242	1,224		1928	74,2	0,838			
(C+Ni)	-0,497	1,028	78,90	10,03	173,4	0,871	3,645	909,7	2,636

Mesmo não havendo a confirmação do arco indutivo (no diagrama de bode, Figura 7) 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

$L = 122$ mH não pode ser desprezado. Wolyne⁽⁹⁾ sugere que quanto maior o valor de L , maior o valor de Z_L , conseqüentemente, ocorre redução na resistência à corrosão do metal. Assim como para a amostra de aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70 eletrorevestido com níquel, onde o elemento indutivo assume valor igual a $L = 909,7$ mH.

De acordo com o circuito elétrico proposto, a interface em corrosão para a amostra de níquel puro reage e o processo de corrosão é controlado por cinética de transferência de elétrons.

As resistências de polarização, R_P , calculada conforme a literatura,^(13,14) são: $7,95 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para o aço carbono ASTM SA 516 Gr. 70, que está de acordo com Li et al.,⁽¹¹⁾ Orazen e Tribollet⁽⁸⁾ e Epelboin et al.;⁽¹⁴⁾ igual a $12,31 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para o aço carbono eletrorevestido e, para o níquel puro, igual a $1928 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

5 CONCLUSÕES

Com base na análise de resultados foi possível atingir as seguintes conclusões:

- na avaliação do desempenho do aço carbono SA 516 Gr.70, do aço carbono ASTM SA 516 Gr.70 eletrorevestido com níquel e níquel puro em meio corrosivo $0,5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$, foi constatado que o aço carbono e o níquel puro apresentaram comportamento pseudopassivo e que o níquel puro apresentou um comportamento mais nobre que os demais; e
- os resultados encontrados nos ensaios de polarização potenciodinâmica para o aço carbono ASTM SA 516 Gr.70 eletrorevestido com níquel, em solução $0,5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$, mostraram que o material apresentou corrosão localizada. A formação de pites pode ser resultante de corrosão galvânica entre o substrato (aço) e o eletrodepósito (Ni) devido à presença de poros no revestimento. Isto indica que o processo de eletrodeposição pode ser aperfeiçoado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro, ao CDTN (Centro de desenvolvimento da tecnologia Nuclear) e à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pelo uso das instalações laboratoriais.

REFERENCIAS

- 1 CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials science and engineering: an introduction. 8th Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., USA. 885p. 2010.
- 2 CARNEIRO, J. R. G. ET AL. Corrosion Engineering, Science and Technology, 47 (2012), 116.
- 3 FONTANA, M.G., (1986) Corrosion Engineering. 3rd. Ed. New York: McGraw-Hill, 556p.
- 4 GOMÉZ, E., POLLINA, R. and VALLÉS, E. (1995). J **Título do artigo**. urnal of Electroanalytical Chemistry 386, pp 45-56.
- 5 ASTM Standards G-5. Standards recommended practice for standard method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurement. Philadelphia. PA. 12p. 2004.
- 6 ASTM Standards G-106. Standard practice for verification of algorithm and equipment for electrochemical impedance measurements. Philadelphia. PA. 11p. 2010.
- 7 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.

- 8 ORAZEM, M. E.; TRIBOLLET, B. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, 523, 2008, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA.
- 9 WOLYNEC, S. *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*, 166, 2003, São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.
- 10 GALVELE, J. R. *Procesos de corrosión*. Buenos Aires: ECOMAR. 164 pp. 1975.
- 11 LI, P. et al. *Corrosion Science* v.38, p. 1935-1955, 1996.
- 12 ABDALLAH, M. et al. Inhibition of Carbon Steel Corrosion by Iron(III) and Imidazole in Sulfuric Acid. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 1564 – 1579.
- 13 MARCUS, P; MANSFELD, F. *Analytical Methods in Corrosion Science and Technology*, 760, 2006, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- 14 EPELBOIN, I. et al. *ASTM STP 727*, 150 [1981].