

RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇOS AUSTENÍTICOS UTILIZADOS EM UMA PLANTA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL¹

Amanda Petronilha Pereira²

Layane Isabelli da Silva³

Carlos Eduardo de Almeida Souza Torres⁴

Vanessa de Freitas Cunha Lins⁵

Maria das Mercês Reis de Castro⁵

Resumo

Neste trabalho, foi avaliada a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis AISI 304L, AISI 316L, AISI 317L e AISI 904L em meios de glicerina A (carga 11.000 kg/h) e glicerina B (carga 6.500 kg/h). Para tal utilizou-se o teste de potencial de circuito aberto (OCP), a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e o teste de polarização potenciodinâmica. A partir dos testes de OCP observou-se que o potencial de corrosão do aço AISI 904L é maior do que os demais, possuindo menor tendência de sofrer corrosão no meio de glicerina ácida. De acordo com os valores da resistência à polarização obtidos, verificou-se que os aços inoxidáveis AISI 317L e AISI 904L apresentaram valores de resistência de polarização uma ordem de grandeza maior que os demais. Somente em meio de glicerina B foi possível visualizar o potencial de pite, que foi maior para os aços AISI 317L e AISI 904L. Conclui-se que o aço AISI 317L é o mais indicado para o uso em serviço, já que o mesmo se apresenta resistente à corrosão no meio ácido e possui menor custo quando comparado ao aço AISI 904L.

Palavras-chave: Corrosão; Biodiesel; Aço inoxidável.

CORROSION RESISTANCE OF AUSTENITIC STEELS USED IN A BIODIESEL PRODUCTION PLANT

Abstract

In this study, the corrosion resistance of the AISI 304L, AISI 316L, AISI 317L and AISI 904L steels was evaluated in media of glycerin A (load 11,000 kg/h) and glycerin B (load 6,500 kg/h). The measurement of open circuit potential, the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic anodic polarization were used in this study. The corrosion potential of the steel AISI 904L was the highest, and the AISI 904L steel showed the slightest tendency to corrode in medium of acid glycerin. The AISI 317L and AISI 904L steels showed values of polarization resistance an order of magnitude greater than the values observed for the other steels. In medium of glycerin B, the pitting potential was identified, and the AISI 317 and AISI 904 steels showed higher values of pitting potential than the steels studied. The steel AISI 317L can be applied in biodiesel plant due to its low cost and high corrosion resistance in media of acid glycerin.

Key words: Corrosion; Biodiesel; 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 Engenharia Química. Mestrando, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil; amanda.petronilhapereira@gmail.com.

³ Química. Mestrando, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil; amanda.petronilhapereira@gmail.com.

⁴ Engenharia Mecânica. Mestrando, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil; amanda.petronilhapereira@gmail.com.

⁵ Engenharia Química. Professora Associada, Doutora, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil; vlins@deq.ufmg.br.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial, o processo de industrialização dos países em desenvolvimento e a constante busca pela melhoria na qualidade de vida culminam no aumento da demanda mundial por energia.⁽¹⁾ Conjuntura que alinhada à tendência natural de declínio em longo prazo das reservas de combustíveis fósseis, pressionam os preços e impelem governos e empresas a buscarem fontes alternativas de energia.⁽²⁾ Paralelamente, as mudanças observadas no clima planetário, geradas pela emissão de gases de efeito estufa, devido, em grande parte, ao uso de combustíveis de origem fóssil, fortalecem a necessidade de desenvolvimento de novas fontes de energia menos poluentes, mais eficientes e ambientalmente corretas.⁽³⁾

A utilização de combustíveis derivados de biomassa tem sido apontada como uma alternativa técnica capaz de minimizar a dependência ao uso de combustíveis fósseis, bem como os danos ambientais causados pela sua queima, além de figurar como uma opção potencial em termos de benefícios socioeconômicos.⁽²⁾ Em meio a este cenário, surge o biodiesel como uma alternativa viável frente ao diesel de petróleo.

Acreditando no potencial dos biocombustíveis, em 2008 a Petrobras criou a subsidiária Petrobras Biocombustível, que atua na produção de etanol e biodiesel. Dona de um Plano de Negócios e Gestão – PNG que prevê US\$ 2,5 bilhões em investimentos entre 2012 e 2016, a subsidiária tem o desafio de ampliar a produção de biocombustíveis de forma segura e rentável, com sustentabilidade socioambiental, contribuindo para a redução das emissões de gases do efeito estufa.⁽⁴⁾

A corrosão figura-se como um importante mecanismo de degradação atuante nas Usinas de Produção de Biodiesel da Petrobras Biocombustível, que deve ser estudado para o uso eficiente de medidas de mitigação da corrosão. As falhas de equipamento que operam em meio ácido, além de prejudicar a confiabilidade operacional das unidades, acarretam em perdas de produção e, conseqüentemente, em perdas econômicas. Este trabalho importância acadêmica e tecnológica, e na literatura os dados de resistência à corrosão de materiais empregados em plantas de produção de biodiesel são escassos.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP define biocombustíveis como “derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia”.⁽⁵⁾ E, segundo a Lei nº. 11.097, de 13 de janeiro de 2005, biodiesel é um “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil”,⁽⁵⁾ podendo ser usado puro ou misturado ao diesel em diversas proporções.

A produção do biodiesel em escala industrial ocorre geralmente por transesterificação de óleo vegetal via catálise química, gerando graves problemas de corrosão na planta dependendo do tipo de catalisador utilizado, que pode ser químico ou biológico. Com relação aos catalisadores químicos, a reação ocorre de maneira mais rápida na presença de um catalisador alcalino que na presença da mesma quantidade de catalisador ácido, observando-se também maior rendimento e seletividade, além de apresentar menores problemas relacionados à corrosão dos reatores.⁽⁶⁾

A fim de estudar esse processo de corrosão nos equipamentos e tubulações nas Usinas de Biodiesel da Petrobras, foram selecionados os aços inoxidáveis austeníticos, em ordem crescente de nobreza, AISI 304L, AISI 316L, AISI 317L e AISI 904L como materiais de interesse para a avaliação da resistência à corrosão no meio de glicerina ácida.

O trabalho visa obter informações a respeito da resistência à corrosão dos aços inoxidáveis AISI 304L, AISI 316L, AISI 317L e AISI 904L em glicerina ácida e avaliar o seu comportamento frente à corrosão nesse meio, através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica e de testes de polarização potenciodinâmica respectivamente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de se reproduzir as condições em que o fluido se encontra no processo, os experimentos foram conduzidos à temperatura de $64^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e agitação constante. Para tal, utilizou-se chapa de aquecimento, com temperatura de 65°C , para aquecer a glicerina.

A glicerina utilizada para realização dos testes, fornecida pela Petrobras Biocombustível, localizada em Montes Claros, foi retirada da planta após passar pelo processo de acidificação com ácido clorídrico. Tendo em vista a crescente produção da Petrobras, foram avaliadas duas cargas presentes no processo, 6.500 kg/h e 11.000 kg/h, já que quanto maior a carga utilizada, maior será a quantidade de ácido clorídrico utilizado. Dessa forma, a utilização de cargas diferentes permitiu verificar o efeito do aumento da concentração de ácido durante o processo. A análise da glicerina foi fornecida pela Petrobras e constituiu das seguintes características: pH (Potencial Hidrogeniônico), índice de acidez total, umidade e condutividade em águas.

As amostras analisadas foram provenientes de tubos de aços AISI 304L, AISI 316L, AISI 317L e AISI 904L, de aproximadamente 60 mm de diâmetro externo e espessura de 5 mm. Os tubos foram previamente cortados de forma a se obter amostras quadradas com pequenas áreas de aproximadamente $1,5\text{ cm}^2$. Essas amostras foram embutidas a quente, usando-se resina baquelite, em seguida lixadas com lixas grana 120, 320, 600 e 1.500. Posteriormente, foi feito um pequeno orifício na baquelite e neste uma solda de descarga capacitiva de um fio condutor.

Antes do início dos testes as amostras foram limpas com algodão seco a fim de se retirar algum resíduo depositado sobre a amostra.

Primeiramente, os potenciais de circuito aberto (OCP) foram medidos por um período de 3.300 segundos, de acordo com a norma ASTM G 5 – 94⁽⁷⁾. A partir dos testes de OCP é possível determinar o potencial de corrosão, que deve ser usado nos testes de polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica realizados em seguida. Uma vez concluídos os testes de OCP, foram realizados os testes de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). Utilizou-se um intervalo de frequência das medidas de 100.000 Hz a 1 mHz, com uma amplitude do tipo RMS, de 10 mV em torno do potencial de corrosão obtido, conforme a norma ASTM G – 106- 89.⁽⁷⁾

Em seguida, foram realizados os testes de polarização potenciodinâmica. A polarização potenciodinâmica foi feita utilizando-se uma taxa de $0,167\text{ mV/s}$, conforme a norma ASTM G5 – 94⁽⁸⁾ e um intervalo de potencial de 100 mV abaixo do potencial de corrosão e até $+1,6\text{ V}$, tendo em vista a obtenção do ramo catódico e anódico.

Os experimentos foram realizados no potenciostato Princeton, modelo VersaSTAT 3. As curvas de impedância e polarização foram obtidas com auxílio do *software* VersaSTUDIO. Os resultados de impedância eletroquímica foram analisados com o auxílio do *software* ZsimpWin da EchemSoftware, de modo a se obter informações a respeito da resistência à polarização e da resistência do meio analisado. As curvas de polarização potenciodinâmica foram tratadas no *software* Origin 8, obtendo-se, a partir delas, o potencial de pite. Todos os testes eletroquímicos foram realizados em triplicada para cada material utilizado.

3 RESULTADOS

As Tabelas 1 e 2 mostram os resultados das análises da glicerina, carga 11.000 kg/h e 6.500 kg/h, utilizadas nos testes eletroquímicos. As análises foram realizadas pela Unidade de Produção de Biodiesel de Montes Claros (UPBMC), Petrobras Biocombustível.

Tabela 1. Resultados da análise da glicerina A⁽⁴⁾

Característica	Método	Resultado	Und.
pH	STD 4500H+	2,0	
Índice de acidez total	D 664	2,30	mg KOH/g
Umidade	E 203	19,75	% (kg de vapor de água/kg de ar úmido)
Condutividade em águas	STD 2510	6500	µS/cm

Fluido A: Glicerina carga 11000 Kg/h.

Tabela 2. Resultados da análise da glicerina B⁽⁴⁾

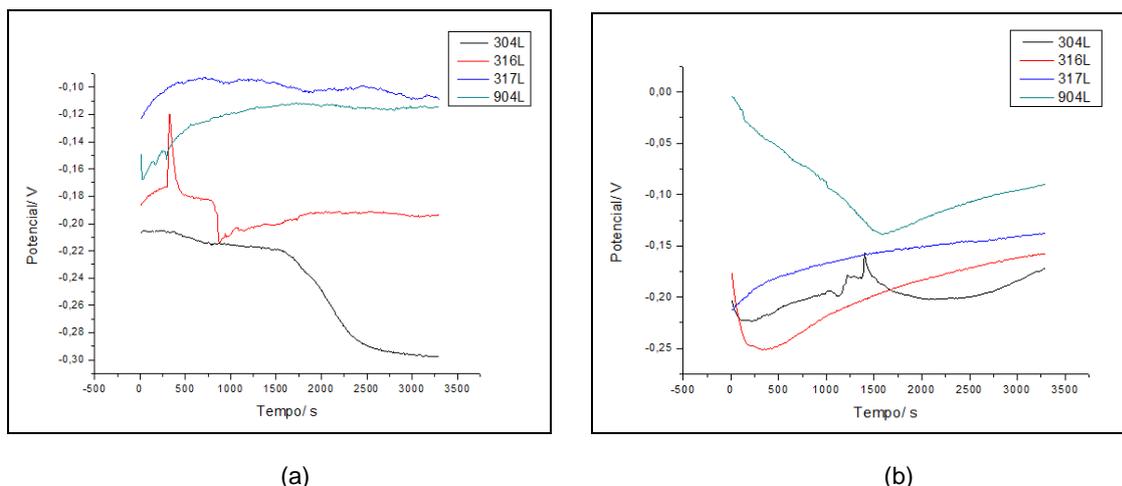
Característica	Método	Resultado	Und.
pH	STD 4500H+	5,0	
Índice de acidez total	D 664	3,47	mg KOH/g
Umidade	E 203	13,24	% (kg de vapor de água/kg de ar úmido)
Condutividade em águas	STD 2510	5200	µS/cm

Fluido B: Glicerina carga 6500 Kg/h.

As medidas de OCP foram realizadas em um período de 55 min, ou até estabilizar de acordo com a norma ASTM G 5 - 94⁽⁸⁾ e ASTM G 59 - 97.⁽⁹⁾

Por definição, OCP é o potencial assumido pelo eletrodo de trabalho quando a única reação influente sobre a dupla camada elétrica em sua superfície é a de oxidação do metal com conseqüente redução dos componentes do meio de imersão.⁽¹⁰⁾ Assim, o potencial estabilizado pode ser considerado uma aproximação do potencial de corrosão.

As curvas das Figuras 1a e 1b comparam as curvas de OCP, de uma amostra de cada aço, em Glicerina A e Glicerina B.



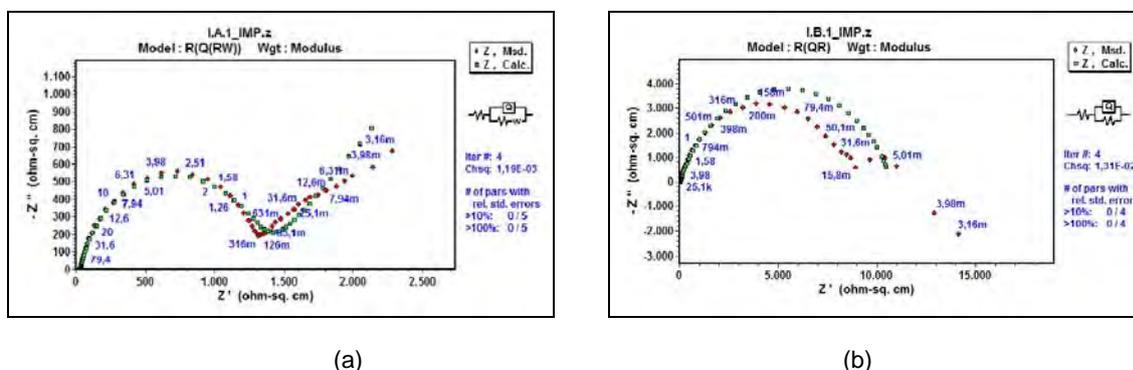
(a) (b)
Figura 1. Curvas de OCP dos aços em Glicerina A (a) e Glicerina B (b).

Os potenciais de corrosão médios foram obtidos a partir da média aritmética dos potenciais de cada aço, sendo que para cada aço foram utilizadas três amostras. Dessa forma, os valores apresentados na Tabela 3 não representam o potencial de uma única amostra como representado na Figura 1.

Tabela 3. Potenciais médios de corrosão dos aços AISI 304L, 316L, 317L e 904L em meio de glicerina ácida

Glicerina A			Glicerina B		
Material	$E_{corr, \text{médio}}$ (V)	Desvio Padrão	Material	$E_{corr, \text{médio}}$ (V)	Desvio Padrão
Aço 304L	-0,308	0,015	Aço 304L	-0,17	0,007
Aço 316L	-0,218	0,031	Aço 316L	-0,209	0,049
Aço 317L	-0,192	0,091	Aço 317L	-0,128	0,022
Aço 904L	-0,119	0,042	Aço 904L	-0,127	0,032

Foram realizadas medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica para a obtenção, principalmente, da resistência à polarização dos aços nos meios estudados. Os gráfico das Figuras 2 a 5, representam os Diagramas de Nyquist para uma das amostras de cada aço.



(a) (b)
Figura 2. Diagrama de Nyquist para o aço 304L em Glicerina A (a) e Glicerina B (b).

Os circuitos equivalentes utilizados no tratamento de dados foram R(QR), R(QR(QR)) e R(Q(RW)).

Os valores médios obtidos para a resistência R_p nos testes de impedância, a partir das Curvas do Diagrama de Nyquist, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de R_p para as amostras de aço estudadas em meio de glicerina ácida

Glicerina A				Glicerina B			
Material	$R_p(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	Erro %	W	Material	$R_p(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	Erro %	W
Aço 304L	3,22E+03	1,13	6,26E-03	Aço 304L	4,39E+04	3,07	-
Aço 316L	4,55E+03	5,09	-	Aço 316L	5,55E+04	2,59	-
Aço 317L	1,51E+04	5,44	-	Aço 317L	1,20E+05	4,59	-
Aço 904L	5,28E+04	4,98	-	Aço 904L	8,74E+04	3,14	-

As curvas de polarização obtidas para algumas amostras dos aços estão representadas nas Figuras 7 a 10. As curvas obtidas são de potencial (V) em função do logaritmo da densidade de corrente (A/cm^2).

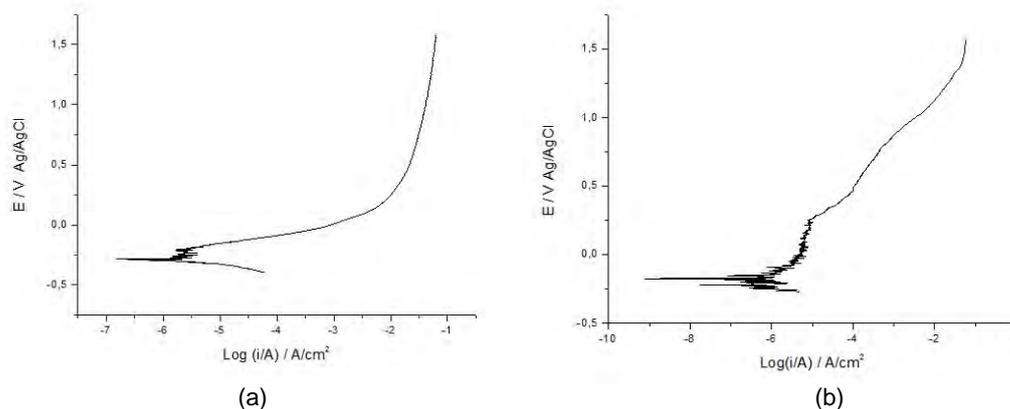


Figura 7. Curva de polarização do aço 304L em a Glicerina A (a) e Glicerina B (b).

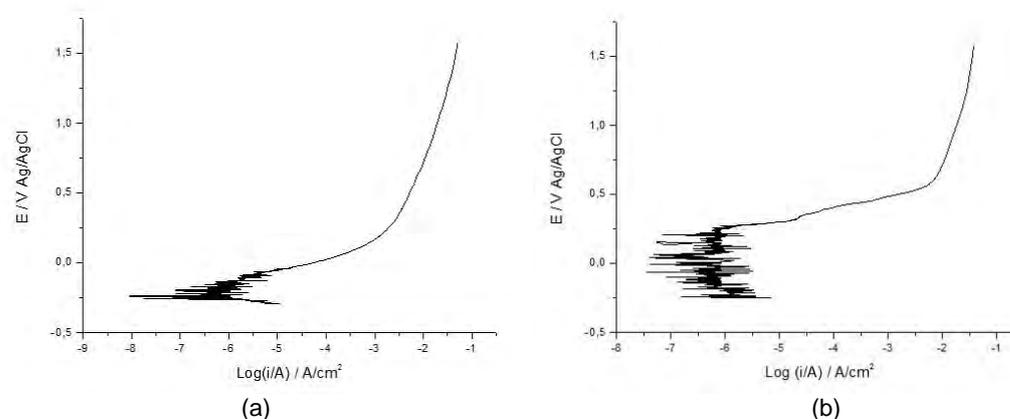


Figura 8. Curva de polarização do aço 316L em Glicerina A (a) e Glicerina B (b).

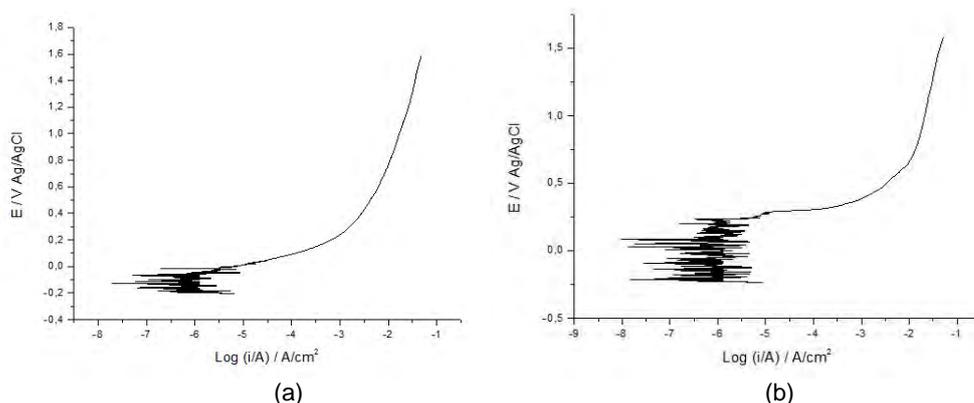


Figura 9. Curva de polarização do aço 317L em Glicerina A (a) e Glicerina B (b).

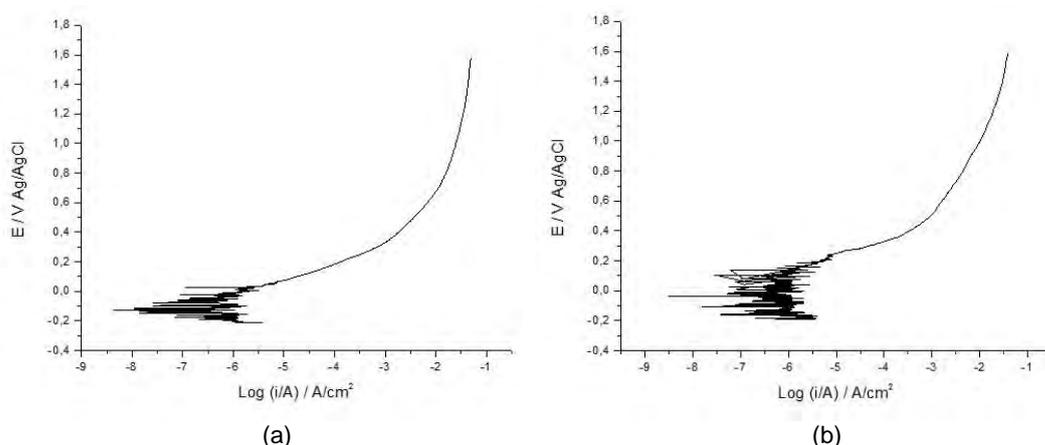


Figura 10. Curva de polarização do aço 904L em Glicerina A (a) e Glicerina B (b).

A Tabela 5 apresenta os valores dos potenciais de pite, (E_{pite}), obtidos a partir da média dos valores encontrados para cada aço. O potencial de pite foi obtido a partir das curvas de polarização de potencial (V) em função do logaritmo da densidade de corrente (A/cm^2).

Tabela 5. Potencial de pite para os aços estudados

Aço	Glicerina B	
	E_{pite} (Ag/AgCl)	Desvio Padrão
Aço 304L	0,1	0,100
Aço 316L	0,2	0,153
Aço 317L	0,3	0,100
Aço 904L	0,3	0,058

4 DISCUSSÃO

A glicerina A possui maior carga, como consequência, um menor pH e maior condutividade decorrentes da maior quantidade de HCl utilizado no processo de lavagem do fluido. Desta forma, essa glicerina se torna um meio mais agressivo quando comparada com a glicerina B que possui uma carga menor.

Pelos resultados mostrados na Tabela 3 e na Figura 1, percebe-se que o potencial de corrosão obtido para amostras dos aços AISI 317L e AISI 904L são maiores que

o potencial de corrosão dos aços AISI 316L e AISI 304L. Isso mostra que os primeiros são aços mais nobres, no aspecto termodinâmico, que os demais, ou seja, têm menor propensão de sofrer corrosão no meio de glicerina ácida. De acordo com os valores do potencial de corrosão obtidos, pode-se inferir que, entre os materiais estudados, o aço AISI 904L é o mais nobre e o aço AISI 304L o mais susceptível a sofrer corrosão no meio estudado. Ressalva-se, porém, que a diferença entre o potencial de circuito aberto do aço AISI 904L e o aço AISI 317L é pouco significativa. Observa-se também que, para o fluido A (glicerina carga 11.000 kg/h), os valores de potencial de corrosão dos aços são menores que os valores encontrados para o fluido B (glicerina carga 6.500 kg/h). Isso pode ser justificado pelo fato do fluido A possuir menor pH e uma carga maior, o que favorece o processo corrosivo. Por possuir uma carga maior, o fluido A possui maior concentração de íons Cl^- advindos do processo de lavagem durante a produção de biodiesel. Apesar dos valores do potencial de circuito aberto dos aços na glicerina B apresentarem tendência de crescimento ao final do teste, foi deixado um tempo maior que 55 minutos e foi observada uma variação inferior a 10 mV no potencial durante 30 minutos, considerando-se que houve estabilização do potencial.

Os aços inoxidáveis AISI 904L e AISI 317L se diferenciam dos demais, apresentando uma resistência à polarização uma ordem de grandeza maior que os aços AISI 304L e 316L nos dois meios estudados (Tabela 4). Assim, pode-se prever que os aços AISI 904L e AISI 317L são os mais resistentes à corrosão nesses meios.

Os resultados obtidos para os valores de resistência a corrosão podem ser explicados pela composição química dos aços (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da Composição dos Aços Inoxidáveis estudados no Projeto

Nome Comum	UNS	Composição Típica (% em massa)						
		C	Cr	Ni	Mo	Cu	Mn	Si
304L	S30403	0,03	18,0 – 20,0	8,0 – 11,0	-	-	2,0	1,0
316L	S31603	0,03	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	2,0 – 3,0	-	2,0	1,0
317L	S31703	0,03	18,0 – 20,0	11,0 – 15,0	3,0 – 4,0	-	2,0	1,0
904L	NO8904	0,02	19,0 - 23,0	23,0 - 28,0	4,0 - 5,0	1,0 - 2,0	2,0	1,0

Fonte: GENTIL, 2003⁽¹¹⁾.

A presença de cromo nos aços estudados garante a formação de um filme de óxido/hidróxido de cromo, favorecendo a formação da camada passiva. Observa-se que o teor de cromo é similar para os aços AISI 304L, AISI 316L e AISI 317L. O aço AISI 904L apresenta um maior teor de cromo, o que contribui para o melhor desempenho frente à corrosão deste aço em meio de glicerina ácida. A maior diferença entre eles é o teor de níquel e molibdênio. Um maior teor de molibdênio contribui para o aumento da resistência à corrosão aquosa dos aços inoxidáveis, principalmente em meios contendo cloretos, pois a presença desse elemento estabiliza a camada passiva, diminuindo a probabilidade de o aço corroer⁽¹¹⁾. Por isso, os aços AISI 904L (4,0% – 5,0% Mo) e 317L (3,0% – 4,0% Mo) são mais resistentes à corrosão que os aços AISI 316L (2,0% – 3,0% Mo) e AISI 304L (não possui Mo) no meio de glicerina contendo íons cloreto.

A adição de níquel, elemento gamagênico, aumenta a faixa de existência da fase austenita no diagrama de equilíbrio Fe – Ni. Sua presença favorece a ductilidade, a resistência mecânica, a soldabilidade e a tenacidade do material e, em associação ao cromo, melhora a resistência à corrosão dos aços. É efetivo quanto à regeneração da camada passiva, além de estabilizar a austenita à temperatura

ambiente, o que favorece a resistência à corrosão, potencializando a usinabilidade do aço inox. Em contrapartida, a adição de níquel aumenta o custo da liga.⁽¹¹⁾ Assim, as propriedades mecânicas do aço AISI 904L e o custo desta liga, que possui maior teor de níquel, são superiores aos dos demais aços.

Pelos resultados obtidos na polarização potenciodinâmica, percebe-se que os aços AISI 904L e AISI 317L se apresentaram mais resistentes à corrosão por pite, já que o potencial de pite é mais alto do que nos outros aços, sendo que os valores do potencial de pite apresentaram menor desvio padrão para o aço AISI 904L. O aço AISI 304L apresenta um potencial de pite mais baixo que os demais, o que demonstra que o mesmo tem uma tendência maior de corroer por pite em meios contendo cloretos. O aço AISI 316L, comumente usado na indústria, apresenta um potencial de pite relativamente mais alto, porém, assim como o aço AISI 304L, passiva rapidamente com continuação do processo corrosivo posteriormente.

A partir dos resultados obtidos, pode-se avaliar qual aço é mais apropriado para substituir o aço AISI 304L que está sendo usado na planta de produção de biodiesel e tem apresentado problemas de corrosão. Outro fator de grande relevância é que o custo do aço AISI 904L é maior, devido ao seu alto teor de níquel, cujo preço é elevado, R\$ 36/kg.⁽¹²⁾ Desta maneira, considerando a viabilidade técnica e econômica dos aços 317L e 904L, é mais indicado o uso do aço AISI 317L na usina de biodiesel da Petrobras.

5 CONCLUSÃO

Embora os três testes, utilizados para o estudo do processo de corrosão dos aços nos meios Glicerina A e B, tenham princípios e metodologia diferentes, os resultados obtidos por esses testes são concordantes.

O aço AISI 904L apresentou o maior potencial de corrosão, e os aços inoxidáveis AISI 317L e AISI 904L apresentaram valores de resistência à polarização uma ordem de grandeza maior que a resistência dos aços AISI 304L e 316L, e maiores potenciais de pite em relação aos aços AISI 304L e 316L.

Considerando os fatores técnicos e econômicos, recomenda-se a utilização do aço AISI 317L como material resistente ao meio de glicerina ácida da planta de produção de biodiesel.

Agradecimentos

A Capes e a Petrobras pelo importante incentivo financeiro para o desenvolvimento deste projeto. À Fapemig e CNPq.

REFERÊNCIAS

- 1 PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARIA, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 1513 – 1524, 2011.
- 2 RAMOS, L. P.; SILVA, F. R.; MANGRICH, A. S.; CORDEIRO, C. S. Tecnologias de Produção de Biodiesel. *Revista Virtual de Química*, v. 3 (5), p. 385 – 405, 2011.
- 3 PEREIRA Jr., N.; SCHLITTLER, L. A. F. S.; GOMES, E. B.; MELO, W. C.; ANTUNES, A. M. S. (2008). A indústria brasileira do etanol: origem e perspectivas. *Diálogos & Ciência – Revista da Rede de Ensino FTC*, ano II, n. 7. Salvador, 2008.
- 4 PETROBRAS. N – 76 (Rev. F). *Materiais de Tubulação para Instalações de Refino e Transporte*, 2012.

- 5 BRASIL, Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Introduz o Biodiesel na Matriz Energética Brasileira e da outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 15 jan. 2005.
- 6 FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja – Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. Revista Química Nova. Ponta Grossa, v. 28, n.1, p. 19-23, nov. 2009.
- 7 ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G106 -89: Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements, 2010.
- 8 ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G5 - 94: Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, 2004.
- 9 ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G59 - 97: Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, 2009.
- 10 WOLYNEC, S. Técnicas eletroquímicas em corrosão. Editora da Universidade de São Paulo. 1ª Edição, São Paulo, 2003.
- 11 GENTIL, V.; Corrosão. 4. ed. LTC Livros técnicos e Científicos S.A.: Rio de Janeiro, 2003.
- 12 Site INDEX Mundi. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/pt/pre%E7os-de-mercado/?mercadoria=niquel>>. Acesso em 27 de fevereiro de 2013 às 23h25min.