

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

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

## **Avaliação da resistência à corrosão de aços inoxidáveis austeníticos utilizados em planta de produção de biodiesel através de testes de imersão**

Layane I. Silva<sup>a</sup>, Cíntia G. F. Costa<sup>b</sup>, Maria M. R. Castro<sup>c</sup>, Vanessa F. C. Lins<sup>c</sup>

### **Abstract**

The world's dependence of fossil fuels as well as the environmental damage caused by their burning drive the search for new, renewable and less polluting energy sources. One alternative for the fossil fuels is biomass fuel. In this scenario, biodiesel comes forward as a feasible alternative to petroleum diesel. Believing in the biodiesel potential, Petrobras invested on implementation of biodiesel plants, in which corrosion plays a fundamental role in the degradation of the used materials. With this perspective, this research evaluates the corrosion resistance of AISI 304L, AISI 316L, AISI 317L and AISI 904L austenitic stainless steels, in glycerin and biodiesel media, from a biodiesel production plant. The corrosion evaluation was carry out by immersion tests with heating and constant stirring, in order to reproduce the plant process conditions, and the use of the electrochemical impedance spectroscopy technique (EIS) for monitoring steel corrosion over time of immersion.

**Keywords:** corrosion, biodiesel, glycerin, stainless steel, electrochemistry impedance spectroscopy, immersion.

### **Resumo**

A dependência mundial ao uso de combustíveis de origem fóssil e os danos ambientais causados pela sua queima impulsionam a busca por novas fontes de energia, menos poluentes e renováveis. Uma alternativa energética para os combustíveis fósseis é o combustível derivado de biomassa. Em meio a este cenário, surge o biodiesel como uma alternativa viável frente ao diesel de petróleo. Acreditando em seu potencial, a Petrobras investiu na criação de usinas de biodiesel, nas quais a corrosão tem papel fundamental na degradação dos materiais utilizados. Com essa perspectiva, o presente trabalho avalia a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304L, AISI 316L, AISI 317L e AISI 904L nos meios de glicerina e biodiesel, provenientes de uma planta de produção de biodiesel. A metodologia aplicada no estudo abrange a realização de testes de imersão, com aquecimento e agitação constante, a fim de reproduzir as condições do processo na planta, além do uso da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) para o monitoramento da corrosão ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** corrosão, biodiesel, glicerina, aço inoxidável, espectroscopia de impedância eletroquímica, imersão.

<sup>a</sup> Mestranda, Engenharia Química – UFMG

<sup>b</sup> Doutora, Engenharia Química - UFMG

<sup>c</sup> Professora Associada, Engenharia Química - UFMG

---

## 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 impõem 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). Nessa perspectiva, o biodiesel vem ganhando espaço comparado ao diesel.

Acreditando no potencial dos biocombustíveis, em 2008 a Petrobras criou a Petrobras Biocombustível, que atua na produção de etanol e biodiesel, onde a corrosão figura-se como um importante mecanismo de degradação. 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.

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 e biodiesel de processo.

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 e biodiesel e monitorar a evolução da corrosão ao longo do tempo através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica, a fim de desenvolver conhecimento e propor soluções.

---

## Metodologia

---

A metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho visa obter informações a respeito da corrosão de aços utilizados em planta de produção de biodiesel, nos meios de glicerina e biodiesel através de ensaios eletroquímicos e de imersão, a fim de proporcionar à Petrobras um estudo de viabilidade técnica e econômica da substituição do aço atualmente presente nos trechos críticos da tubulação.

### *Amostras e meios*

As amostras analisadas, provenientes de tubos de aços inoxidáveis 304L, 316L, 317L e 904L foram fornecidas pela Petrobras Biocombustível, localizada em Montes Claros – MG. Também fornecidos pela Petrobras Biocombustível, os meios utilizados para a imersão das amostras foram glicerina ácida e biodiesel de processo, ambos com carga de 11000kg/h. Os eletrólitos foram previamente caracterizados e posteriormente quanto ao pH (potencial hidrogeniônico) e à condutividade, aspectos mais relevantes no estudo da corrosão.

### *Condições experimentais*

Com o intuito de reproduzir as condições do processo na planta, os ensaios de imersão foram conduzidos à temperatura de  $64^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  e sob agitação constante de 130 rpm, enquanto que os ensaios eletroquímicos foram feitos à temperatura ambiente e sem agitação.

### *Equipamentos*

Para os ensaios de imersão foi utilizado um agitador orbital da marca IKA, modelo KS 4000 i control, com capacidade para dezesseis *erlenmeyers*.

As medidas eletroquímicas selecionadas para avaliar a corrosão foram o potencial de circuito aberto (OCP) e a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), as quais foram realizadas no potenciostato IVIUM, acoplado a um computador com o *software* IviumStat. Nos ensaios feitos no biodiesel, é comum não se utilizar eletrodo de referência, uma vez que se trata de um eletrólito significativamente resistivo o qual atrapalha a passagem de potencial elétrico, impedindo sua leitura. Portanto, um eletrodo de platina foi usado como contra eletrodo e eletrodo de referência, simultaneamente, em ambos os meios. As curvas do OCP foram construídas com o auxílio do *software* Origin 8, entretanto, as da EIE foram construídas e tratadas pelo *software* Zview.

### *Preparo das amostras*

As amostras de aço foram previamente cortadas em forma de quadrados com área de aproximadamente  $1,5\text{ cm}^2$ . O seu preparo foi baseado na norma ASTM G 31 – 72 (4) e efetuado no Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, no qual as amostras foram lixadas com lixas d'água números 50 e 120 para eliminar imperfeições e bordas na superfície. Antes de se iniciar os ensaios, as amostras foram limpas com sabão, álcool e acetona para retirar qualquer resíduo depositado sobre sua superfície. Feito isso, as amostras foram identificadas e pesadas com balança de cinco dígitos de precisão.

### *Ensaio de imersão*

Foram realizados dois ensaios de imersão ao longo da execução da pesquisa, sendo um de três meses e o outro com duração de seis meses. Com o objetivo de quantificar o tempo de imersão, o primeiro ensaio foi classificado como um pré-teste, onde se observou a necessidade de um teste mais longo para mensurar com mais exatidão os efeitos da corrosão.

### *Ensaio eletroquímico*

A finalidade dos ensaios eletroquímicos foi monitorar a corrosão dos aços ao longo do tempo de imersão nos meios selecionados, por meio da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica. Para tal, primeiramente, os potenciais de circuito aberto foram medidos em triplicata por um período de 3300 segundos, de acordo com a norma ASTM G 5 – 94 (5), ou até a estabilização do potencial, para determinar comparativamente o potencial de corrosão dos aços nos eletrólitos utilizados, em seguida, na espectroscopia de impedância eletroquímica, também realizada em triplicata.

De acordo com a norma ASTM G 106 – 89 (6), estipulou-se para as medidas um intervalo de frequência de 100.000 Hz a 5 mHz e a uma amplitude de 10 mV, porém, para aquelas conduzidas no biodiesel, a amplitude foi modificada para 100 mV, após vários testes com diferentes faixas de amplitudes e conforme alguns artigos, nos quais os valores são maiores que 10 mV (7, 8).

## Resultados e discussão

### Análise dos fluidos

As Tabelas 1 e 2 mostram os resultados das análises da glicerina (fluidos A e B) e do biodiesel (fluidos C e D), realizadas antes e depois dos ensaios de imersão. As análises foram conduzidas no Departamento de Engenharia Química e no Departamento de Química, ambos da UFMG.

Tabela 1 – Parâmetros determinados no meios antes dos ensaios de imersão.

| PARÂMETROS DOS MEIOS (PRÉ ENSAIO) |                      |              |
|-----------------------------------|----------------------|--------------|
| <b>Glicerina</b>                  | <b>pH</b>            | 1,60         |
|                                   | <b>Condutividade</b> | 9,40 mS/cm   |
| <b>Biodiesel</b>                  | <b>pH</b>            | 1,10         |
|                                   | <b>Condutividade</b> | 0 $\mu$ S/cm |

Tabela 2 – Parâmetros determinados no meios depois dos ensaios de imersão.

| PARÂMETROS DOS MEIOS (PÓS ENSAIO) |      |                |  |                         |      |                |
|-----------------------------------|------|----------------|--|-------------------------|------|----------------|
| Meio ensaiado com o aço           | pH   | Condutividade  |  | Meio ensaiado com o aço | pH   | Condutividade  |
| <b>304 A</b>                      | 2,01 | 4,49 mS/cm     |  | <b>317 A</b>            | 1,53 | 4,62 mS/cm     |
| <b>304 B</b>                      | 2,68 | 4,49 mS/cm     |  | <b>317 B</b>            | 1,82 | 4,49 mS/cm     |
| <b>304 C</b>                      | 2,09 | 0,1 $\mu$ S/cm |  | <b>317 C</b>            | 1,90 | 0,1 $\mu$ S/cm |
| <b>304 D</b>                      | 1,94 | 0,1 $\mu$ S/cm |  | <b>317 D</b>            | 1,99 | 0,1 $\mu$ S/cm |
| <b>316 A</b>                      | 1,61 | 4,52 mS/cm     |  | <b>904 A</b>            | 1,56 | 4,57 mS/cm     |
| <b>316 B</b>                      | 1,84 | 4,53 mS/cm     |  | <b>904 B</b>            | 1,56 | 4,57 mS/cm     |
| <b>316 C</b>                      | 1,94 | 0,1 $\mu$ S/cm |  | <b>904 C</b>            | 2,70 | 0,1 $\mu$ S/cm |
| <b>316 D</b>                      | 2,81 | 0,1 $\mu$ S/cm |  | <b>904 D</b>            | 2,51 | 0,1 $\mu$ S/cm |

### Potencial de circuito aberto (OCP)

A partir da média aritmética das triplicatas dos potenciais estabilizados, obteve-se os potenciais médios de corrosão ( $E_{\text{corr médio}}$ ) para cada aço em cada meio, depois da imersão, dispostos na Tabela 3. Esses dados são comparativos e não reais, uma vez que as medidas

foram realizadas sem eletrodo de referência, em consequência da baixa condutividade do biodiesel, a qual inviabiliza o seu uso.

**Tabela 3 – Potenciais médios de corrosão para cada amostra.**

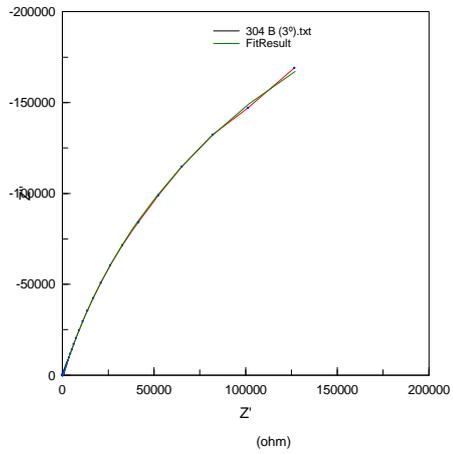
| GLICERINA        |                                     |               | BIODIESEL        |                                     |               |
|------------------|-------------------------------------|---------------|------------------|-------------------------------------|---------------|
| Aço              | $E_{\text{corr}} \text{ médio (V)}$ | desvio padrão | aço              | $E_{\text{corr}} \text{ médio (V)}$ | desvio padrão |
| <b>AISI 304L</b> | - 0,263                             | 0,008         | <b>AISI 304L</b> | 0,0235                              | 0,0725        |
| <b>AISI 316L</b> | - 0,046                             | 0,139         | <b>AISI 316L</b> | - 0,009                             | 0,053         |
| <b>AISI 317L</b> | - 0,1315                            | 0,0405        | <b>AISI 317L</b> | 0,041                               | 0,019         |
| <b>AISI 904L</b> | - 0,0925                            | 0,0185        | <b>AISI 904L</b> | 0,1175                              | 0,0835        |

Conforme esperado, o aço 904L apresentou o maior potencial de corrosão devido à sua maior nobreza. Além disso, em geral os potenciais de corrosão foram maiores no meio de biodiesel, uma vez que a glicerina é considerada o meio mais agressivo por possuir pH mais baixo e menor condutividade.

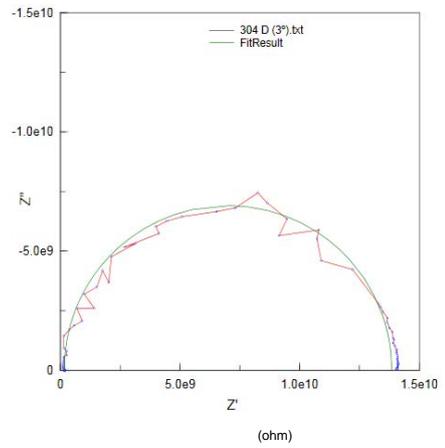
Pelos resultados da Tabela 3, percebe-se que o potencial de corrosão obtido para amostras dos aços 317L e 904L são maiores que o potencial de corrosão dos aços 316L e 304L em biodiesel. Isso mostra que os primeiros são aços mais nobres, no aspecto termodinâmico, que os demais, ou seja, tem menor propensão de sofrer corrosão nesse meio. Apesar de na glicerina o aço 317L registrar um  $E_{\text{corr}} \text{ médio}$  menor que o 316L, essa diferença é pouco significativa, não descartando, então, a nobreza do primeiro. Também se pode inferir que, entre os materiais estudados, o aço 904L é o mais nobre em ambos os meios.

#### *Espectroscopia de impedância eletroquímica*

A medida de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) é uma ferramenta poderosa para a separação de diversos componentes presentes na interface eletrificada, diferentemente dos métodos DC (Corrente Direta) onde os componentes são observados simultaneamente. Desta forma, foram realizadas medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica para a obtenção, principalmente, da resistência à polarização dos aços nos meios estudados. Os dados obtidos no ensaio eletroquímico foram tratados no software Zview, obtendo-se para cada um dos aços em cada meio os diagramas de *Nyquist* apresentados nas Figuras 1 a 4.

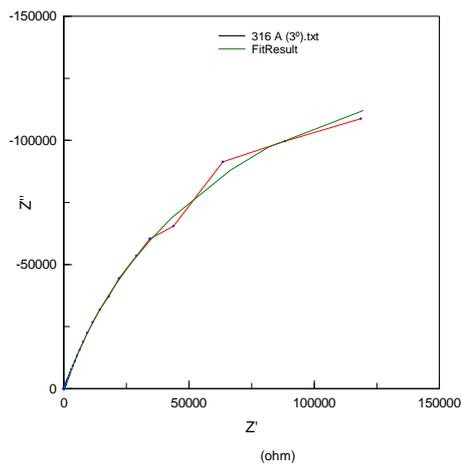


(a)

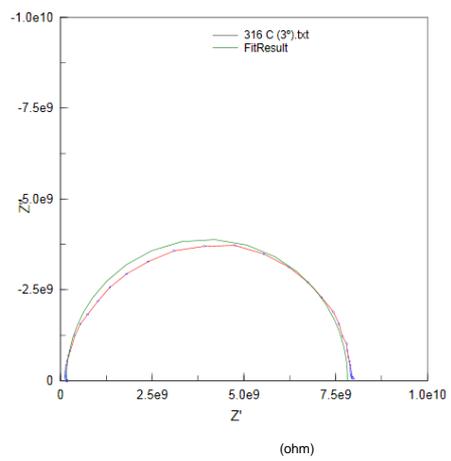


(b)

**Figura 1 – Diagramas de Nyquist para o aço 304L em glicerina (a) e em biodiesel (b).**

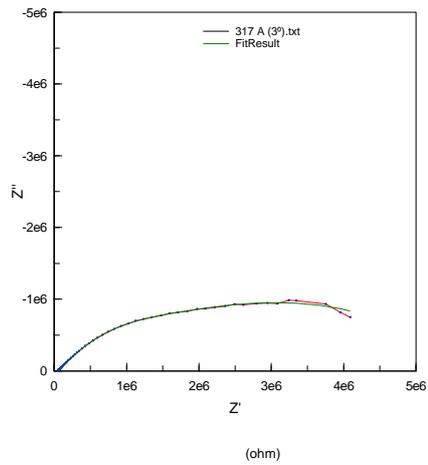


(a)

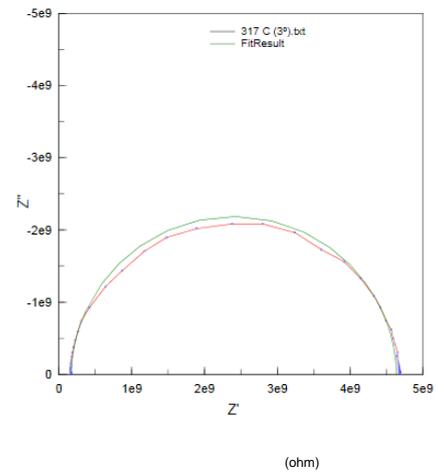


(b)

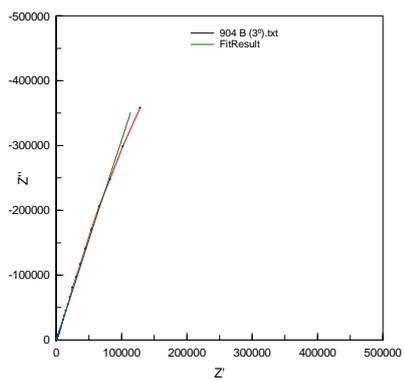
**Figura 2 – Diagramas de Nyquist para o aço 316L em glicerina (a) e em biodiesel (b).**



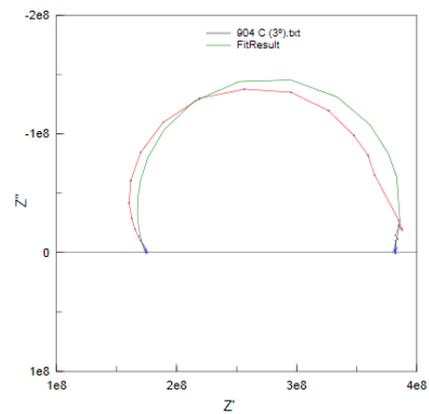
(a)



(b)

**Figura 3 – Diagramas de Nyquist para o aço 317L em glicerina (a) e em biodiesel (b).**

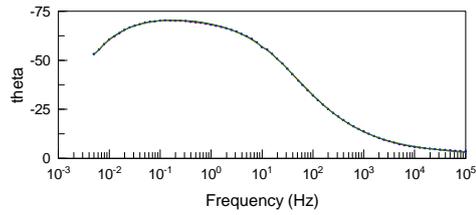
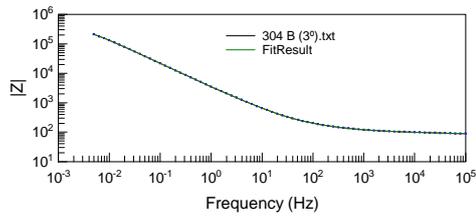
(a)



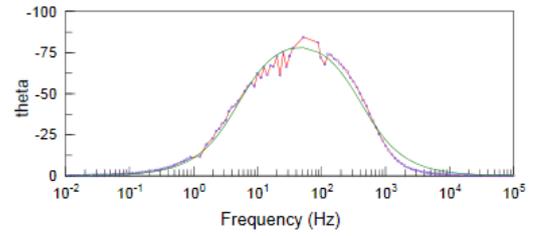
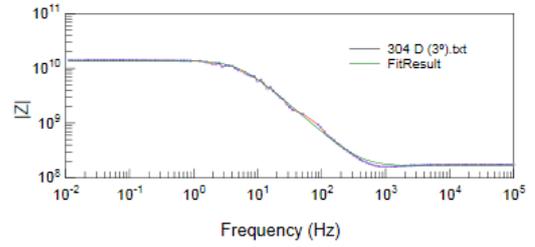
(b)

**Figura 4 – Diagramas de Nyquist para o aço 904L em glicerina (a) e em biodiesel (b).**

Os gráficos de Bode para todos os aços analisados em cada meio estão representados pelas Figuras 5 a 8.

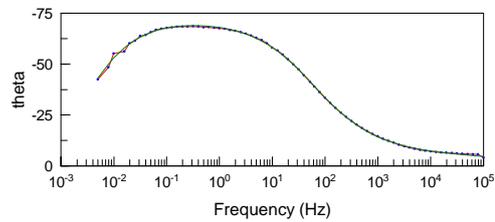
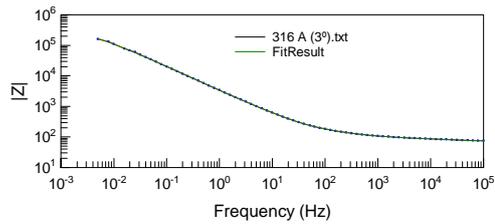


(a)

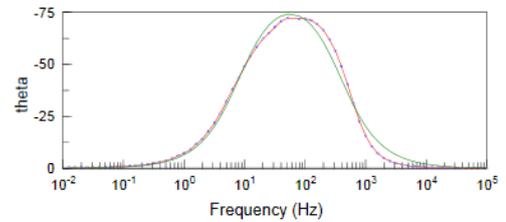
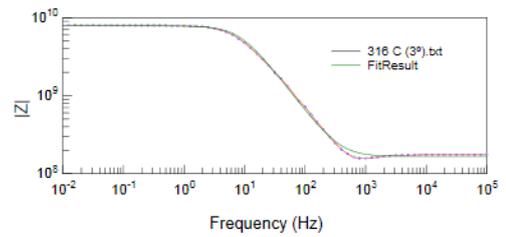


(b)

**Figura 5 – Diagramas de Bode para o aço 304L em glicerina (a) e em biodiesel (b).**



(a)



(b)

**Figura 6 – Diagramas de Bode para o aço 316L em glicerina (a) e em biodiesel (b).**

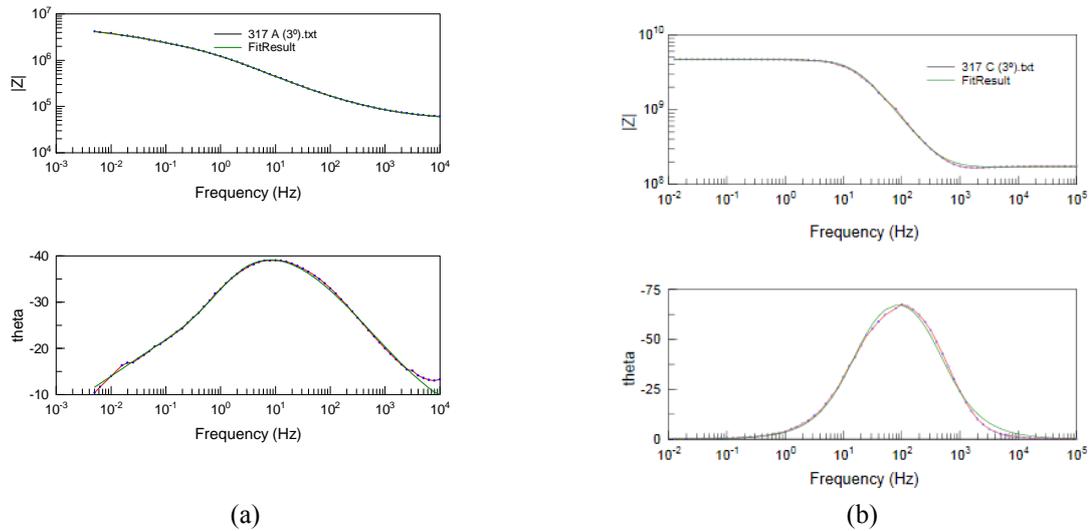


Figura 7 – Diagramas de Bode para o aço 317L em glicerina (a) e em biodiesel (b).

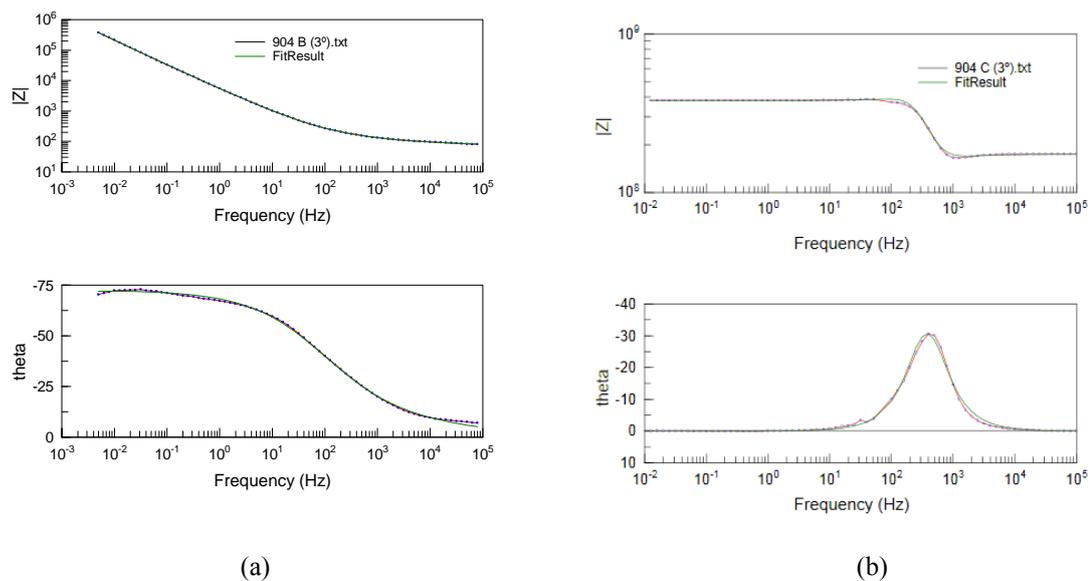


Figura 8 – Diagramas de Bode para o aço 904L em glicerina (a) e em biodiesel (b).

Os valores médios obtidos para a resistência à polarização,  $R_p$ , nos testes de impedância são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de  $R_p$  para as amostras de aços estudadas.

| GLICERINA |  |                | BIODIESEL |  |                |
|-----------|--|----------------|-----------|--|----------------|
| Aço       | $R_p$ médio<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) | Erro médio (%) | Aço       | $R_p$ médio<br>( $\Omega \text{ cm}^2$ ) | Erro médio (%) |
| AISI 304L | $5,1615 \cdot 10^3$                      | 0,92173        | AISI 304L | $1,15756 \cdot 10^{10}$                  | 0,98098        |
| AISI 316L | $1,55326 \cdot 10^6$                     | 1,1748         | AISI 316L | $1,30152 \cdot 10^{10}$                  | 1,325395       |
| AISI 317L | $7,1644 \cdot 10^4$                      | 1,43625        | AISI 317L | $2,67018 \cdot 10^9$                     | 0,75005        |
| AISI 904L | $1,3947 \cdot 10^8$                      | 20,6534        | AISI 904L | $9,47755 \cdot 10^8$                     | 0,76367        |

No meio de biodiesel, os aços se comportaram de maneira semelhante: registraram altos valores de Rp, o que sugere que todos são resistentes à corrosão. Em glicerina, o aço 904L apresentou a maior resistência à polarização, mostrando ser o metal com maior resistência à corrosão. Isso pode ser explicado pelo fato desse aço possuir maior nobreza frente aos outros aços. Enquanto que, o aço 304L, por ser uma liga menos nobre, possui o menor Rp. Os valores médios de Rp para a glicerina foram menores em relação aos do biodiesel. A glicerina, portanto, mostrou ser mais agressiva comparada ao biodiesel, devido ao fato de possuir maior condutividade, possibilitando maior transferência de carga. A relação entre os resultados obtidos de Rp e a nobreza dos aços pode ser explicada pela sua composição química, mostrada na Tabela 5 (9).

**Tabela 5 – Composição dos aços estudados.**

| COMPOSIÇÃO (%) |      |     |       |       |      |             |             |           |     |           |
|----------------|------|-----|-------|-------|------|-------------|-------------|-----------|-----|-----------|
| AISI           | C    | Mn  | P     | S     | Si   | Cr          | Ni          | Mo        | N   | Cu        |
| 304 L          | 0,03 | 2,0 | 0,045 | 0,03  | 0,75 | 17,5 – 19,5 | 8,0 – 12,0  | -         | 0,1 | -         |
| 316 L          | 0,03 | 2,0 | 0,045 | 0,03  | 0,75 | 16,0 – 18,0 | 10,0 – 14,0 | 2,0 – 3,0 | 0,1 | -         |
| 317 L          | 0,03 | 2,0 | 0,045 | 0,03  | 0,75 | 18,0 – 20,0 | 11,0 – 15,0 | 3,0 – 4,0 | 0,1 | -         |
| 904 L          | 0,02 | 2,0 | 0,045 | 0,035 | 1,0  | 19,0 – 23,0 | 23,0 – 28,0 | 4,0 – 5,0 | 0,1 | 1,0 – 2,0 |

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 304L, 316L e 317L. O aço AISI 904L apresenta um maior teor de cromo, o que contribui para o melhor desempenho frente à corrosão desse 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 uma maior resistência à corrosão, principalmente em meios contendo cloretos, pois a presença do Mo estabiliza a camada passiva diminuindo a probabilidade do aço corroer (10). O aço 304L, por não possuir Mo, possui a menor resistência à corrosão nesse meio.

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

## Conclusões

Em ambas as medidas, potencial de circuito aberto e espectroscopia de impedância eletroquímica, os dados concordam quanto à nobreza do aço inoxidável 904L nos dois meios e quanto à maior agressividade corrosiva da glicerina em relação ao biodiesel.

De acordo com a Tabela 3, o aço 904L apresentou valores de potenciais médios de corrosão maiores que os demais aços nos dois meios estudados. Ainda na Tabela 3, no meio de biodiesel, o potencial de corrosão desse aço foi superior quando comparado à glicerina. Na Tabela que apresenta os valores de resistência à polarização, o aço 904L também se mostrou mais nobre tanto em glicerina quanto em biodiesel. Enquanto que o aço 304L, no meio de glicerina, teve a menor resistência à corrosão. A Tabela 5 comprova os resultados obtidos nas análises realizadas, indicando o aço inoxidável 904L como o mais nobre e, conseqüentemente, com maior resistência à corrosão nos meios de glicerina ácida e biodiesel de processo.

### Referências bibliográficas

- (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) ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G31–72. Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals**, 2004.
- (5) ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G5–94. Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements**, 2004.
- (6) ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G106–89. Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements**, 2010.
- (7) M'PEKO, J. C.; REIS, D. L. S.; SOUZA, J. E.; CAIRES, A. R. L. Evaluation of the dielectric properties of biodiesel fuels produced from different vegetable oil feedstocks through electrochemical impedance spectroscopy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, 2013.
- (8) NICOLAU, A.; LUTCKMEIER, C. V.; SAMIOS, D.; GUTTERRES, M.; PIATNICK, C. M. S. The relation between lubricity and electrical properties of low sulfur diesel and diesel/biodiesel blends. **Fuel**, 2013.
- (9) ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A240–A240M. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications**, 2012.
- (10) MIRANDA, E. F. **Comportamento quanto à corrosão de aços inoxidáveis na produção de biodiesel.** Dissertação (Pós-graduação em Análise e Controle de Processos Químicos). Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2009.
- (11) GENTIL, V. **Corrosão.** 4. ed. LTC Livros técnicos e Científicos S.A.: Rio de Janeiro, 2003.
- (12) WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão;** Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2003.