



# ESTUDO DO EFEITO DA CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 409 EM SOLUÇÕES DE $H_2SO_4$ 0,1M E NaCl 3,5%<sup>1</sup>

Pedro Rupf Pereira Viana<sup>2</sup>  
Leonardo Cabral Gontijo<sup>3</sup>  
Viviane Monteiro Azambuja<sup>3</sup>

## Resumo

Os aços inoxidáveis são utilizados em grande proporção pelas indústrias por apresentarem menores custos e uma boa resistência à corrosão devido à formação da camada passiva. O objetivo deste trabalho visa o estudo das propriedades eletroquímicas e mecânicas do aço inoxidável ferrítico AISI 409, utilizando como parâmetro de comparação o aço inoxidável austenítico AISI 316, devido a sua alta resistência à corrosão. Para isso foram feitas análises metalográficas para a caracterização microestrutural do material. Ensaios de microdureza e testes eletroquímicos de polarização para determinação da resistência à corrosão do material em determinados meios também foram realizados.

**Palavras-chave:** AISI 409; Corrosão; Corrosão por pite; Microestrutura.

## STUDY OF EFFECTS OF AISI 409 FERRITIC STAINLESS STEEL CORROSION IN $H_2SO_4$ 0.1M AND NaCl 3.5% SOLUTIONS

## Abstract

The stainless steels are widely used by industries for presenting reduced costs combined with a good resistance to corrosion, due to the formation of  $Cr_2O_3$  passive layer. The aim of this work is to study the electrochemical and mechanical properties of ferritic stainless steel, using as parameter the austenitic stainless steel AISI 316 for its high corrosion resistance. Therefore, metallographic analyses for the AISI 409 and AISI 316 steels were carried out. Microhardness and polarization electrochemical tests were also realized for the analyses of corrosion resistance in some environment.

**Key words:** AISI 409; Corrosion; Pitting corrosion; Microstructure.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Graduando em Química – Instituto Federal do Espírito Santo (IFES).

<sup>3</sup> Profº Dr. Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Instituto Federal do Espírito Santo - PROPEMM/IFES.

## 1 INTRODUÇÃO

A deterioração dos materiais pela corrosão pode causar prejuízos diretos que estão associados aos custos de recolocação de equipamentos danificados, máquinas, estruturas ou peças. Também podemos apontar os custos ligados às pesquisas de materiais que apresentam uma maior resistência à corrosão e a utilização de métodos mais eficazes na proteção. Os custos indiretos são apontados devido às interrupções de operação das plantas industriais durante substituições de peças danificadas, perdas de impostos e prejuízos provocados por acidentes, como vazamentos de materiais tóxicos e outros.<sup>(1)</sup> O aço inoxidável ferrítico foi por muito tempo utilizado na metalurgia por apresentar um menor custo e uma boa resistência à corrosão mesmo em comparação com os austeníticos. Segundo Gentil,<sup>(2)</sup> estes aços requerem alguns cuidados especiais, mas são soldáveis, facilmente conformados e apresentam elevada resistência à corrosão quando sob tensão e temperaturas elevadas. Por isso, os aços inoxidáveis ferríticos são usados em tubulações para transporte de ácido nítrico, utensílios domésticos (baixelas, fogões, geladeiras, pias e talheres), cunhagem de moedas e acessórios para indústria alimentícia. Quanto aos aços austeníticos, sua ampla utilização se deve a uma combinação favorável de propriedades, tais como alta resistência à corrosão e à oxidação, resistência mecânica a quente, trabalhabilidade e soldabilidade. Segundo Padilha e Guedes,<sup>(3)</sup> não é somente a matriz austenítica que determina as propriedades desses materiais, pois numerosas fases como a ferrita delta, vários tipos de carbonetos ( $MC$ ,  $M_6C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ) e fases intermetálicas de nitretos, sulfetos, boretos e martensitas induzidas por deformação podem estar presentes na microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos, possibilitando assim que sejam largamente utilizados, principalmente em indústrias químicas e petroquímicas.

Neste estudo será observado o comportamento anódico dos aços AISI 409 e AISI 316 em dois diferentes meios:  $H_2SO_4$  0,1M e NaCl 3,5%. A solução de  $H_2SO_4$  0,1M simula o meio corrosivo correspondente ao uso de óleos combustíveis com 3 a 4% de enxofre das atmosferas industriais,<sup>(1)</sup> enquanto a solução de NaCl 3,5% é típica do ambiente corrosivo das atmosferas marinhas proporcionada pela presença de névoa salina contendo íons cloreto.<sup>(2)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram preparadas amostras dos aços AISI 409 e AISI 316 com as dimensões de 15x10 mm. As amostras foram devidamente lixadas desde a lixa 80 Mesh até a 1.000 Mesh. Após o processo de lixamento, as amostras passaram por um processo de polimento utilizando uma solução de alumina de 1,0  $\mu$ , e outra solução de 0,3 $\mu$ , respectivamente. Com o polimento finalizado, foram realizadas análises da microestrutura do aço com uso do microscópio ótico Leitz MetalLab 3 localizado no laboratório de metalografia do IFES, na Figura 1.



**Figura 1.** Microscópio óptico Leitz MetalLab 3.

Também foram realizados testes de microdureza com o uso do equipamento Micro Hardness Tester, modelo HVS-1000 localizado no laboratório de metalurgia do IFES, conforme a Figura 2.



**Figura 2.** Equipamento de microdureza Micro Hardness Tester, Mod. HVS-1000.

Os testes de corrosão do aço AISI 409 em solução de  $H_2SO_4$  0,1 M e em solução de NaCl 3,5% foram realizados utilizando o equipamento Omnimetra Instrumentos Mod. PG39-A localizado no laboratório de corrosão do IFES, na Figura 3.



**Figura 3.** Aparelho de corrosão Omnimetra Instrumentos, Mod. PG39A, em operação.

Por fim, os testes de difração de raios-X foram realizados em um difratômetro de marca Zeiss HZG\$ (Figura 4) no Laboratório de Raios-X do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).



Figura 4. Aparelho de raios-X Zeiss HZG\$, do Laboratório de Raios-X do CBPF.

### 3 RESULTADOS

Os ensaios eletroquímicos foram realizados utilizando a metodologia de voltametria linear, variando as voltagens na solução de  $H_2SO_4$  0,1M entre -1,0 V até +3,0 V, e na solução de NaCl 3,5% entre -1,5V até +2,0 V, ambos com uma taxa de variação de 1mV/s, como vemos nas Figuras 5 e 6.

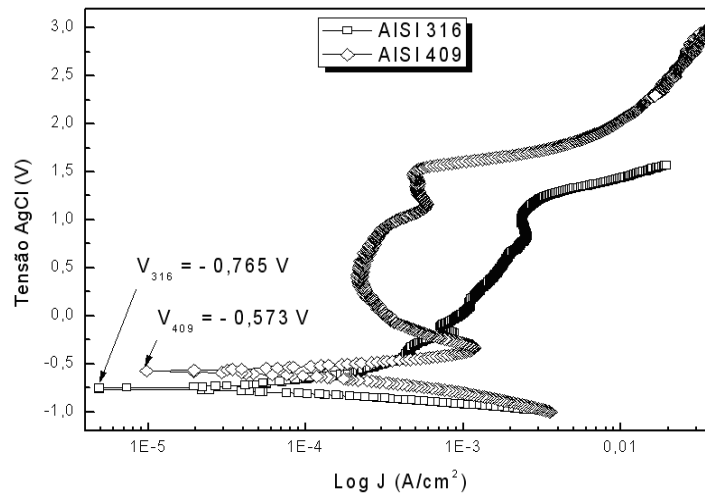


Figura 5. Curva de polarização dos aços AISI 409 e AISI 316, em solução de  $H_2SO_4$  0,1M.

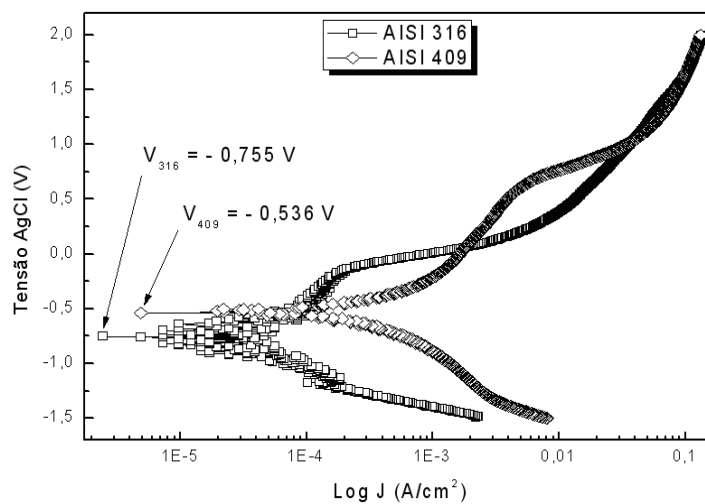
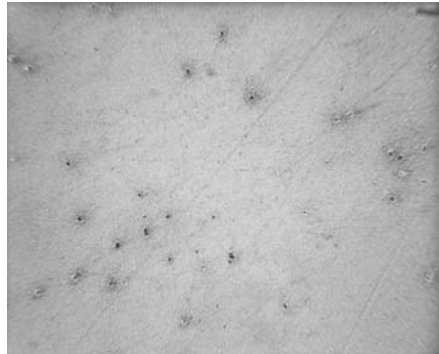
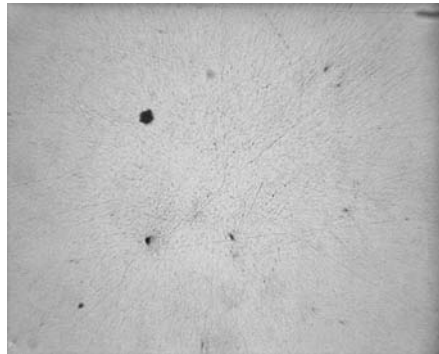


Figura 6. Curva de polarização dos aços AISI 409 e AISI 316, em solução de NaCl 3,5%.

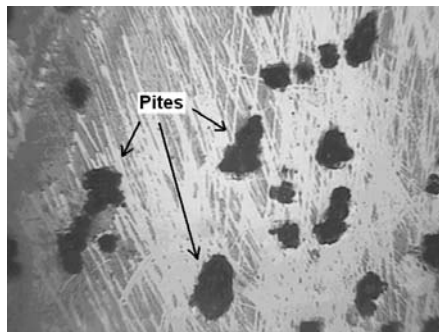
A seguir serão apresentados os testes de microscopia ótica, onde é possível analisar as superfícies das matrizes dos aços AISI 409 (Figura 7) e AISI 316 (Figura 8), e nas Figuras 9 e 10, são apresentadas as superfícies dos aços AISI 409 e AISI 316, após os testes de corrosão, mostrando a presença de pites:



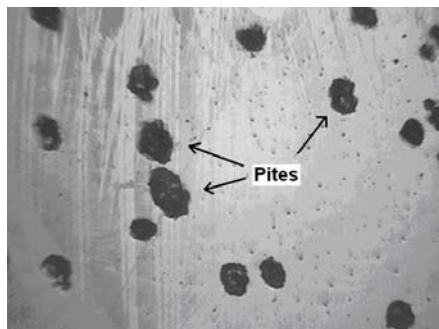
**Figura 7.** Aço inoxidável AISI 409 – Zoom: 200x.



**Figura 8.** Aço inoxidável AISI 316 – Zoom: 200x



**Figura 9.** Aço inoxidável AISI 409, mostrando a presença de pites – Zoom: 200x.



**Figura 10.** Aço inoxidável AISI 316, mostrando a presença de pites – Zoom: 200x

Para realização dos testes de microdureza, foram realizados 5 ensaios nas amostras do aço inoxidável AISI 409 e do AISI 316L, utilizando o método de dureza Vickers, como podemos ver nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

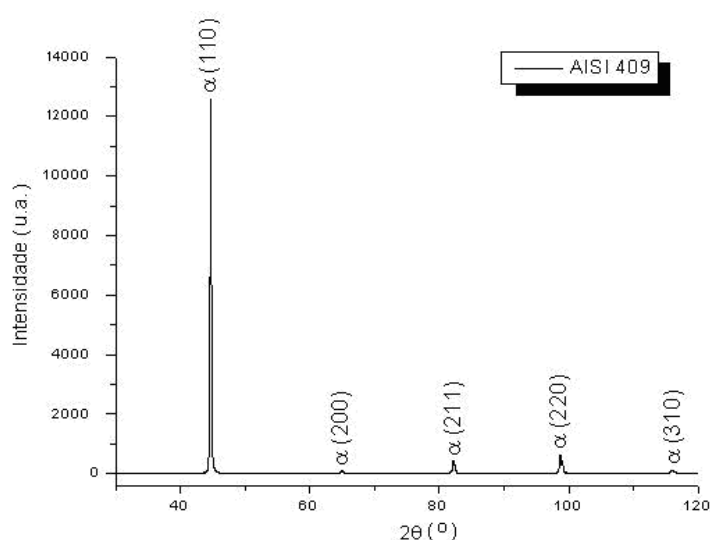
**Tabela 1.** Dados do teste de microdureza do aço inoxidável AISI 409

	D1	D2	Tempo (s)	HV
Teste 01	70,813	68,750	20	190
Teste 02	70,938	68,380	20	190
Teste 03	69,625	67,375	20	198
Teste 04	69,688	65,938	20	202
Teste 05	68,250	66,500	20	204
				<b>197 ± 6</b>

**Tabela 2.** Dados do teste de microdureza do aço inoxidável AISI 316

	D1	D2	Tempo(s)	HV
Teste 01	71,063	71,625	20	182
Teste 02	71,188	71,750	20	182
Teste 03	73,813	73,125	20	172
Teste 04	74,000	76,563	20	164
Teste 05	73,875	71,938	20	174
				<b>175 ± 7</b>

Por fim, serão apresentados os testes de difração de raios-X das amostras dos aços AISI 409 e AISI 316, onde foram submetidas ao equipamento Zeiss HZG\$, utilizando radiação Cu-K $\alpha$ , fazendo análises entre os ângulos de 2° à 120°. Os resultados estão apresentados nas Figuras 11 e 12.



**Figura 11.** Raio-X da amostra do aço AISI 409.

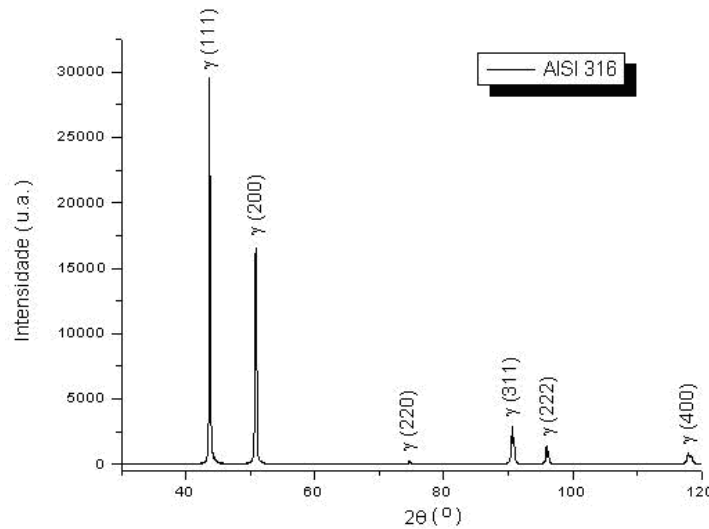


Figura 12. Raio-X da amostra do aço AISI 316.

#### 4 DISCUSSÃO

Com relação aos resultados dos testes de corrosão, é possível perceber nas Figuras 5 e 6 que a amostra do aço AISI 409 apresenta um potencial de corrosão mais elevado em relação ao AISI 316; ou seja, a partir do potencial de corrosão se dará início a corrosão na superfície do aço, seguido de um processo de passivação, que consiste na formação de uma película de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  que protege o material do efeito corrosivo. Essa película irá proteger o material dentro de uma faixa de tensão que varia desde -0,3 V até +1,6 V, para o aço AISI 409, e entre uma faixa de tensão que varia desde -0,4 V até +0,8 V, para o aço AISI 316, para solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Figura 5). Após o processo de passivação, é possível notar uma região onde ocorre uma segunda passivação, localizada entre uma faixa de tensão de +1,1 V até +1,5 V, para o aço AISI 409, e entre uma faixa de tensão de +0,8 V até +1,0 V, para o aço AISI 316. Uma vez ocorrida a segunda passivação, é possível notar o aparecimento da região transpassiva, que é uma região onde o aço torna-se novamente vulnerável aos efeitos da corrosão.<sup>(2,4)</sup> Em soluções de NaCl (Figura 6), o comportamento dos aços é semelhante ao apresentado na Figura 5, com a diferença de que não há a formação das camadas de passivação, partindo diretamente para a corrosão dos aços, com a formação dos pites. De acordo com a Figura 6, o aço AISI 409 apresenta um potencial de corrosão mais elevado em relação ao AISI 316. Essa afirmação traz a idéia de que haveria uma possível proteção à formação de pites no aço AISI 409, em relação ao aço AISI 316. No entanto, a lei de Faraday diz que:<sup>(2)</sup>

$$m = \frac{(MM_{\text{elemento}})it}{n_{\text{elemento}}} = \frac{(MM_{\text{elemento}})JA t}{n_{\text{elemento}}} \quad (1)$$

Onde  $m$  é a massa do elemento,  $MM_{\text{elemento}}$  é sua massa molecular,  $n_{\text{elemento}}$  é o número de elétrons que reagem no meio,  $J$  é a densidade de corrente e  $A$  é a área onde está ocorrendo a reação. Analisando a equação 1, a massa é proporcional à densidade de corrente aplicada, ou seja, se a densidade de corrente for alta, então a perda de massa do associada à essa densidade de corrente aplicada será maior. É possível notar que o aço AISI 409 possui uma densidade de corrente maior do que o aço AISI 316, o que facilitaria na formação de pites.<sup>(4,6)</sup>



Com relação aos resultados de microscopia ótica mostrados nas Figuras 7 e 8, é possível perceber uma quantidade maior de inclusões no aço AISI 409 em relação ao aço AISI 316. Isso é devido à presença dos vários elementos de liga encontrados em sua composição. Quanto às Figuras 9 e 10, é possível perceber que há uma maior formação dos pites no aço AISI 409 em relação ao aço AISI 316. Essa maior formação de pites comprova os resultados dos testes eletroquímicos obtidos, onde se observa um aumento da densidade de corrente do aço AISI 409 em relação ao aço AISI 316 (Figura 6). Além desse fator, o aço AISI 316 apresenta molibdênio em sua composição que, quando combinado com cromo, possui grande estabilidade do filme de passivação, principalmente em ambientes onde há a presença de íons cloreto.<sup>(1,4)</sup>

Com relação aos resultados dos testes de microdureza, de acordo com Gontijo et al.,<sup>(5)</sup> pode-se afirmar que a dureza do aço inoxidável AISI 409 (Tabela 1), é maior que a do aço 316 (Tabela 2), uma vez que o aço AISI 409 apresenta uma concentração maior de carbono em sua estrutura, deixando o material mais rígido. Isso implica não apenas no aumento da dureza, como também influencia na fragilidade do material e em sua resposta à corrosão em diversos meios.

Com relação aos resultados dos testes de difração de raios-X, é possível perceber analisando as Figuras 11 e 12 uma notável diferença entre os aços AISI 409 e AISI 316 quando verificamos que no aço AISI 409 há a predominância da fase  $\alpha$  (ferrita) e no aço AISI 316 há a predominância da fase  $\gamma$  (austenita). Essa diferença é vista com mais clareza quando se analisa os constituintes desses aços, pois o aço AISI 409 é constituído basicamente por ferro e cromo e elementos de liga, possuindo estrutura CCC, enquanto que o aço AISI 316 é constituído basicamente de ferro, cromo, níquel, molibdênio e elementos de liga, possuindo estrutura CFC.<sup>(6)</sup>

## 5 CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho, foi possível verificar que a utilização e a aplicação do aço AISI 409 deve ser bem estudada, pois, em linhas gerais, trata-se de um aço com uma resistência mecânica superior em relação ao aço AISI 316, mas possui uma resistência à corrosão inferior quando comparado com o aço AISI 316, uma vez que a concentração de cromo no AISI 409 é menor do que no AISI 316.

Com relação aos testes de corrosão, as diferenças de constituintes entre os aços AISI 409 e AISI 316, principalmente com relação ao cromo, influenciam na formação da camada passiva de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , protegendo os aços da ação do efeito corrosivo nas soluções de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,1M e NaCl 3,5%. Também conclui-se que o aumento da densidade de corrente no aço AISI 409 implica em uma perda de massa maior e, conseqüentemente, em uma maior formação de pites em sua superfície e em sua estrutura, quando comparados com os resultados obtidos para o aço AISI 316.

Com relação aos testes de microdureza, microscopia ótica e difração de raios-X, conclui-se também que o aço AISI 409 apresenta uma maior dureza em relação ao aço AISI 316 por causa de sua maior concentração de carbono em sua estrutura.



## Agradecimentos

Ao Laboratório de Raios-X do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), ao mestrando Gustavo Paganini Canal e ao Prof<sup>o</sup> Ademarl auto França Barbosa. Aos laboratórios do IFES e ao CNPq pelo aporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 ROBERGE, P.R. Handbook of Corrosion Engineering, 1<sup>st</sup> Edition, McGraw-Hill, New York, NY, sep. 1999.
- 2 GENTIL, V. Corrosão. Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, RJ. 2003.
- 3 PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C.; Aços Inoxidáveis Austeníticos – Microestrutura e Propriedades, Ed. Hemus; 1<sup>a</sup> Edição.; São Paulo, 1994.
- 4 SEDRIKS, A.J. Corrosion of Stainless Steels, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, 1996.
- 5 GONTIJO, L.C.; MACHADO, R.; CASTELETTI, L.C.; KURI, S.E.; NASCENTE, P.A.P. Comparação entre os comportamentos dos aços inoxidáveis AISI 304L e 316L nitretados à plasma. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo. São Paulo. SP, 2007, v.26, n. 3, p. 145-150.
- 6 FORONI, F.D.; MENEZES, M.A.; MOREIRA FILHO, L.A. Uso do aço AISI 409 para fabricação de pás para ventiladores. In: 17<sup>o</sup> CBECIMat – CONGRÉSSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15 a 19 de Novembro de 2006. Anais: Foz do Iguaçu, PR, Brasil.