

Obtenção de superfície porosa e condutora em aço inoxidável ferrítico

Patricia Leite¹
César Eduardo Schimitt¹
Fernando Dal Pont Morisso¹
Carlos Leonardo Pandolfo Carone¹
Sandra Raquel Kunst²
Jane Zoppas Ferreira²
Cláudia Trindade Oliveira^{1*} 

Resumo

O aço inoxidável ferrítico possui boa condutividade elétrica e resistência à corrosão, possibilitando seu uso como interconector de células a combustível que operam em baixa temperatura. O desempenho desses eletrodos está relacionado à porosidade da superfície, que pode ser obtido por meio do processo de anodização. No entanto, o processo de anodização em aço inoxidável tem sido feito principalmente para colorimento do aço inoxidável ferrítico com aplicação de corrente pulsada. Com isso, o objetivo deste trabalho trata da anodização de aço inoxidável ferrítico para obtenção de superfície porosa por meio da aplicação de corrente contínua. Para tanto, a anodização foi feita em eletrólito INCO ($2,5 \text{ M CrO}_3 + 5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$) com variação de tempo. Análises ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostraram formação de superfície porosa, sendo que o tempo de anodização parece não ter influenciado no processo. Análises eletroquímicas mostraram que o tempo de anodização pode ter favorecido a formação de óxido barreira. No entanto, o processo de dissolução que ocorre durante a anodização pode ter sido mais intenso que a formação do óxido, ocasionando em medidas de condutividade elétrica similares entre as amostras sem e com anodização. Neste caso, é possível obter superfície porosa e condutora por anodização em eletrólito INCO com aplicação de corrente contínua.

Palavras-chave: Aço inoxidável ferrítico; Anodização; Superfície porosa.

Obtaining porous and conductive structure in ferritic stainless steel

Abstract

Ferritic stainless steel has good electrical conductivity and corrosion resistance, enabling its use as an interconnector for low temperature fuel cells. The performance of these electrodes is related to the surface porosity, which can be obtained through the anodizing process. However, the stainless steel anodizing process has been mainly done for coloring ferritic stainless steel with pulsed current application. Thus, the objective of this work deals with the anodizing of ferritic stainless steel to obtain a porous surface through the application of direct current. For this purpose, anodization was performed in INCO electrolyte ($2.5 \text{ M CrO}_3 + 5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$) with time variation. Scanning electron microscope (SEM) analyzes showed the formation of a porous surface, and the anodizing time does not seem to have influenced the process. Electrochemical analysis showed that the anodizing time may have favored the formation of barrier oxide. However, the dissolution process that occurs during anodizing may have been more intense than the oxide formation, causing similar electrical conductivity measurements between samples without and with anodizing. In this case, it is possible to obtain a porous and conductive surface by anodizing INCO electrolyte with the application of direct current.

Keywords: Ferritic stainless steel; Anodizing; Porous surface.

¹Instituto de Ciências Criativas e Tecnológicas, ICCT, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

²Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais, LACOR, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

*Autor correspondente: cto@feevale.br



1 Introdução

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro (Fe)/cromo (Cr), que podem conter outros elementos de liga. O cromo é o principal elemento, pois ele garante a alta resistência à corrosão devido à facilidade que apresenta em oxidar-se em diferentes meios. Contudo, os aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe-Cr contendo de 11 a 26% em massa de cromo e teor de carbono em geral abaixo de 0,1%. Além do carbono, o nitrogênio também está presente na composição destes aços. Tanto C quanto N contribuem para a estabilização da fase austenita, tornando necessária a redução destes elementos ou aumento no teor de cromo, para manter a estrutura totalmente ferrítica [1,2].

Os aços inoxidáveis apresentam propriedades físico-químicas superiores aos aços comuns, sendo elas, a alta resistência à oxidação atmosférica, resistência à corrosão e resistência mecânica. Essas características fazem com que os aços inoxidáveis tenham diversas aplicações em vários segmentos das indústrias, tais como, cutelaria, construção civil, indústria química, indústria alimentícia, moveleira, bens de consumo [3-6].

Além disso, estudos tem despertado o interesse de aplicação do aço inoxidável contendo superfície porosa e condutora. Superfícies porosas podem ser obtidas por meio do processo de anodização, em que forma-se inicialmente uma camada barreira, a qual sofre dissolução, originando uma camada porosa [7]. Usualmente a anodização em aços inoxidáveis tem sido utilizada para efeito decorativo, obtendo-se óxidos coloridos. Convencionalmente, filmes coloridos em aços inoxidáveis são obtidos pelo processo “INCO” desenvolvido por Evans et al. 1973, o qual inclui duas etapas, a primeira de colorimento químico e a segunda de endurecimento eletrolítico [8]. Estas etapas são feitas em soluções, temperaturas e condições de tratamento variadas com aplicação de corrente pulsada. Isto tem despertado o interesse de muitos pesquisadores, tentando elucidar este mecanismo, por meio de modificações no processo a fim de obter uma superfície porosa [9,10].

A camada porosa, geralmente com poucos *microns* de espessura, é composta de um arranjo de células hexagonais (4×10^8 células/cm²), contendo, cada uma, um longo e fino poro de aproximadamente 100 nm de diâmetro [11]. Ela se forma por meio da dissolução da camada barreira pelo eletrólito provocando milhares de pontos de ataque na superfície da mesma. Estes são produzidos no centro das células hexagonais iniciando o começo dos poros. Cada ponto de ataque pode ser considerado uma fonte de corrente, a partir da qual vai se desenvolver um campo de potencial. Os íons, que estão na interface óxido-eletrólito, fornecem o oxigênio que transforma em óxido a parte reatacada. Simultaneamente, a ação de dissolução do eletrólito continua se manifestando na base dos poros, tendendo a diminuir a espessura da camada barreira que se desenvolve. Os poros se alongam, fazendo com que os íons penetrem mais facilmente. Com isso, ocorre liberação de calor, o que tende a favorecer a dissolução do

filme de óxido [12]. Os óxidos porosos são muito utilizados industrialmente, principalmente nas indústrias automotiva e aeronáutica. Estes óxidos permitem seu uso em acabamentos superficiais, ancoragens de pigmentos, prevenção contra corrosão, etc. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é a obtenção de uma superfície porosa em aço inoxidável ferrítico (o qual apresenta características de condutor elétrico) por meio de processo convencional INCO ($2,5 \text{ M CrO}_3 + 5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$) com aplicação de corrente contínua.

2 Materiais e métodos

2.1 Preparação das amostras

O material utilizado neste trabalho foi o aço inoxidável ferrítico AISI 430, cuja composição química (16,11% Cr, 0,2563% Ni, 0,3467% Mn, 0,3587% Si) foi fornecida pelo fabricante (Aços Riograndense). As amostras, com espessura de 0,5 mm, foram cortadas em dimensões 2,0 x 2,0 cm e furadas numa das extremidades da mesma para contato elétrico. As amostras foram então lixadas com lixas d'água de SiC na seguinte ordem: # 100, # 220, #400, # 600, # 800, # 1200, # 2400 e # 4000 e após as mesmas foram polidas com pasta de diamante 1 μm com álcool em uma politriz da marca Pantec e de modelo Polipan-U.

Após a etapa de preparação da superfície, foi realizado o contato elétrico nas amostras com fio de cobre e laca acetônica. E em seguida as amostras foram anodizadas.

2.2 Anodização e caracterização das amostras

A anodização foi feita em eletrólito convencional utilizado em processo industrial INCO ($2,5 \text{ M CrO}_3 + 5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$), a temperatura ambiente. Neste processo foi aplicada uma densidade de corrente de 400 mA/cm² por tempos variados de 10 min., 30 min. e 60 min., em que a amostra de aço ferrítico era o ânodo, sendo o cátodo de platina o contra-eletródo. O equipamento utilizado para anodização foi uma fonte de tensão e corrente 0-300 V e 0-500 mA.

2.3 Caracterização das amostras

A análise morfológica do óxido foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV Jeol, modelo JSM-6510LV). Antes de serem analisadas ao MEV, as amostras foram metalizadas com alvo de ouro, para prevenir a acumulação de campos elétricos estáticos na amostra devido à irradiação elétrica durante a produção da imagem. Outra razão para a metalização, mesmo quando há condução mais do que suficiente, é para melhorar o contraste [13].

A condutividade elétrica dos óxidos foi medida pelo método de quatro pontas, onde foi utilizada uma base de quatro pontas fixas e em linha, sendo que a distância entre as pontas eram iguais. Nas pontas externas, foi aplicada uma

tensão, utilizando uma fonte variável 20 V/2A, enquanto o material foi pressionado à base das pontas, de modo a fechar o circuito de corrente. Utilizou-se um multímetro, Minipa ET 2042C, para indicar a corrente estabelecida no circuito. Além disso, foi utilizado um multímetro, modelo Agilent 34401, para determinar a tensão nas pontas internas.

Os testes eletroquímicos de corrosão foram feitos em potencial de circuito aberto e por meio de polarização potenciostática. Para realização dos ensaios eletroquímicos foi utilizada uma célula convencional de três eletrodos, em que o eletrodo de trabalho era a amostra anodizada em diferentes tempos, o contra eletrodo era de platina e o eletrodo de referência utilizado foi o de calomelano saturado (ECS). As análises foram feitas em equipamento potenciostato AUTOLAB PGSTAT302N em solução aerada de NaCl 0,1 M. As curvas de polarização potenciostática foram feitas com varredura de 0,1 mV/s iniciando em -200 mV até 1000 mV com relação ao potencial de circuito aberto

3 Resultados e discussões

3.1 Análise da morfologia de amostras de aço inoxidável ferrítico sem anodização e anodizadas por 10 min., 30 min. e 60 min. por meio da técnica de MEV

A Figura 1 mostra superfície do aço inoxidável ferrítico sem e com processo de anodização por 10 min., 30 min. e 60 min. Observa-se que a amostra somente lixada e polida sem o processo de anodização apresentou uma superfície com “esferas”. A fim de comprovar se as esperas eram oriundas da incrustação da pasta de polimento ou do processo de polimento foi feito EDS nas esferas e no metal base e se observou os mesmos elementos químicos nos dois EDS. As análises de EDS mostraram a presença dos mesmos elementos (Fe, Cr, C, O e Au) nas “esferas” e na superfície polida, indicando que esta morfologia pode estar associada ao processo de polimento. Uma provável justificativa seria devido aos elementos químicos que atuam como soluto em solução sólida. Neste caso, o polimento e lixamento ocorreria devido à diferença de dureza entre esses elementos [14].

Por meio do processo de anodização houve a formação de poros na superfície das amostras para todos os tempos de anodização (10 min., 30 min. e 60 min.). Todas as amostras anodizadas apresentaram tamanho de poros aproximado (os quais estão representados na Tabela 1). No entanto estes poros não apresentaram estrutura ordenada de células hexagonais como, aquelas obtidas por anodização em metais válvula, por exemplo [12]. Isto pode estar relacionado com o processo de dissolução que ocorre durante a anodização. Além disso, o tempo de anodização parece não ter influência na formação de poros, uma vez que todos ficaram na mesma ordem de grandeza.

Tabela 1. Tamanho dos poros e desvio padrão das amostras anodizadas por 10, 30 e 60 minutos

Amostras anodizadas	Média	Desvio padrão
10 min	1,83 μm	0,67
30 min	1,59 μm	0,50
60 min	1,52 μm	0,68

3.2 Análise qualitativa por imagem de espectro – mapeamento

Mapeamento é uma técnica disponível no microscópio eletrônico de varredura em que é feita uma análise qualitativa de elementos químicos presentes na superfície da amostra. A análise é feita separadamente por elementos químicos na superfície da amostra, diferente do EDS que fornece análises pontuais dos elementos químicos. Como o tempo de mapeamento foi relativamente alto (3 horas) e considerando que teoricamente o tempo de anodização influi na formação do óxido, optou-se por fazer esta análise na amostra sem anodização e anodizada por 1 hora. A Figura 2 mostra o mapeamento das amostras sem anodização e com anodização por 60 min., respectivamente. Os elementos mapeados foram Cr, Fe e O devido aos mesmos estarem supostamente presentes no eletrólito, no metal base e no óxido. Na amostra não anodizada observa-se que os elementos Cr, Fe e O apresentaram uma distribuição homogênea a qual pode ser verificada de acordo com a estabilidade da cor obtida no espectro.

Cada espectro possui uma barra acima da composição química do elemento, iniciando em zero até o máximo de contagem do elemento. No caso do Cr essa barra varia de 0 a 53, para o Fe varia de 0 a 99 e para o O varia de 0 a 27, indicando que o Fe é o elemento em maior quantidade. Para amostra anodizada em 60 min. se observou comportamento similar para o Cr e o Fe os quais tiveram uma variação de 0 a 49 e de 0 a 104, respectivamente. Para o O não se observou uma distribuição homogênea na superfície metálica e a variação foi de 0 a 35. No entanto, como o processo de anodização produz óxido na superfície metálica, esperava-se que a amostra anodizada em 60 min. tivesse uma distribuição homogênea de oxigênio sem falhas comparativamente a amostra sem anodização. Isto pode estar relacionado com a falta de oxigênio ou com a rugosidade da superfície da amostra. No entanto, se a rugosidade da superfície tivesse influência nos resultados obtidos por mapeamento, os espectros de cromo e ferro também apresentariam falhas, o que não foi observado.

Portanto, não se pode ignorar a formação de óxido decorrente da anodização, uma vez que o mapeamento indica certa quantidade de oxigênio.

3.3 Medida de condutividade elétrica das amostras anodizadas

Para as medidas de condutividade elétrica das amostras foi utilizado o método de 4 pontas. A resistividade

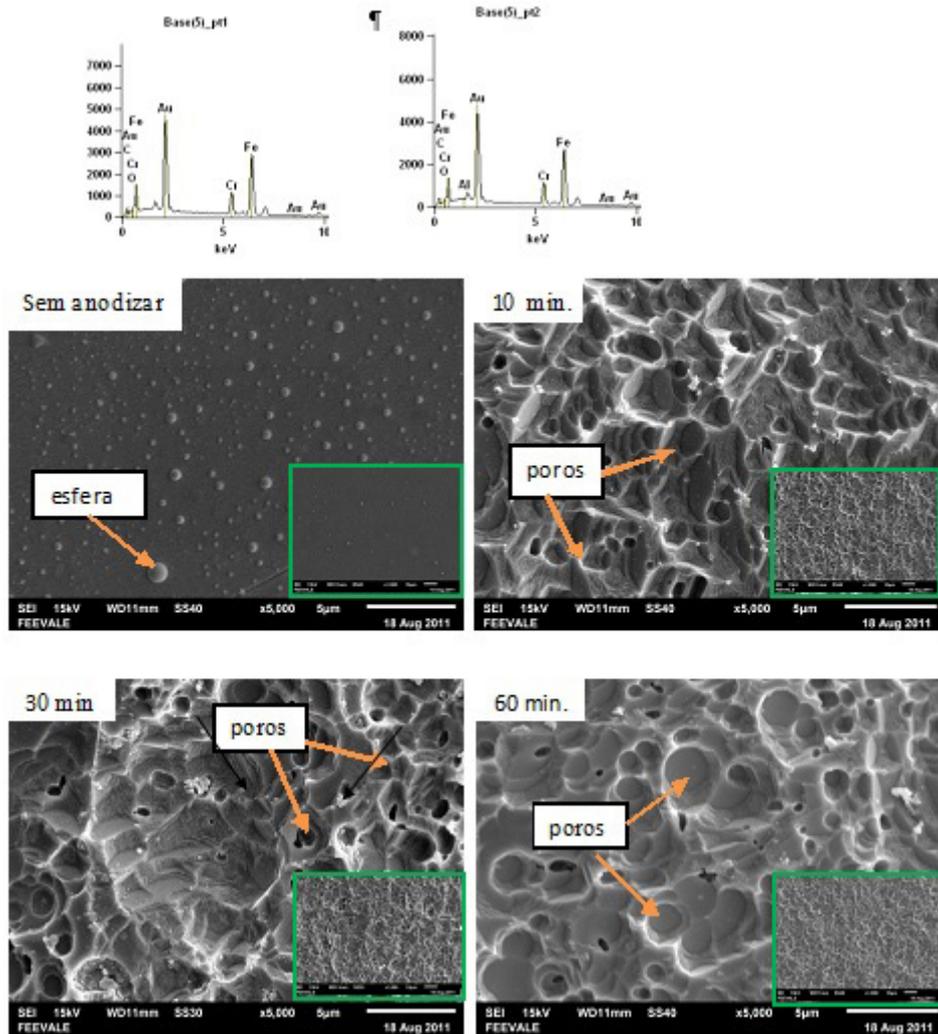


Figura 1. Morfologia de aço inoxidável ferrítico sem anodizar e anodizado por 10, 30 e 60 minutos.

e a condutividade elétrica das amostras foram calculadas de acordo com a média de várias medições. Como a distância estabelecida entre os eletrodos foi constante, a resistividade e a condutividade foram calculadas de acordo com as Equações 1 e 2.

$$\rho = 2\pi s \cdot \frac{V}{i} \quad (1)$$

em que, s = distância entre as pontas ; V = tensão ; i = corrente ; ρ = resistividade; c = condutividade.

$$c = \rho^{-1} \quad (2)$$

Os valores de resistividade e condutividade elétrica calculados para aço inoxidável ferrítico puro e sem anodizar por 10, 30 e 60 minutos, são mostradas na Tabela 2.

Observa-se que todas as amostras anodizadas apresentaram-se bastante condutoras com valores de resistividade e condutividade da mesma ordem de grandeza que o aço inoxidável. De acordo com Bastidas 2006 [15], o óxido de cromo Cr_2O_3 apresenta valor de resistividade

Tabela 2. Resistividade e condutividade de aço inoxidável puro e anodizado por 10, 30 e 60 minutos

Amostra	Resistividade (Ωm)	Condutividade (Ωm) ⁻¹
Aço inoxidável	2,97E-06	3,81E+05
10 min	4,81E-06	2,22E+05
30 min	6,94E-06	1,50E+05
60 min	5,03E-06	2,02E+05

da ordem de $10^3 \Omega m$, superior ao medido nas amostras anodizadas. Como o aço inoxidável ferrítico apresenta Cr_2O_3 na superfície, esperava-se obter este óxido por anodização e com isso valores de resistividade maiores do que os medidos. Por outro lado, como a pressão das pontas sobre o metal base é alta e provavelmente o óxido formado seja muito fino as medidas de resistividade e de condutividade são as do metal base. Isto complementa os resultados já observados de que o processo de dissolução é mais intenso do que a formação de óxido [16-18].

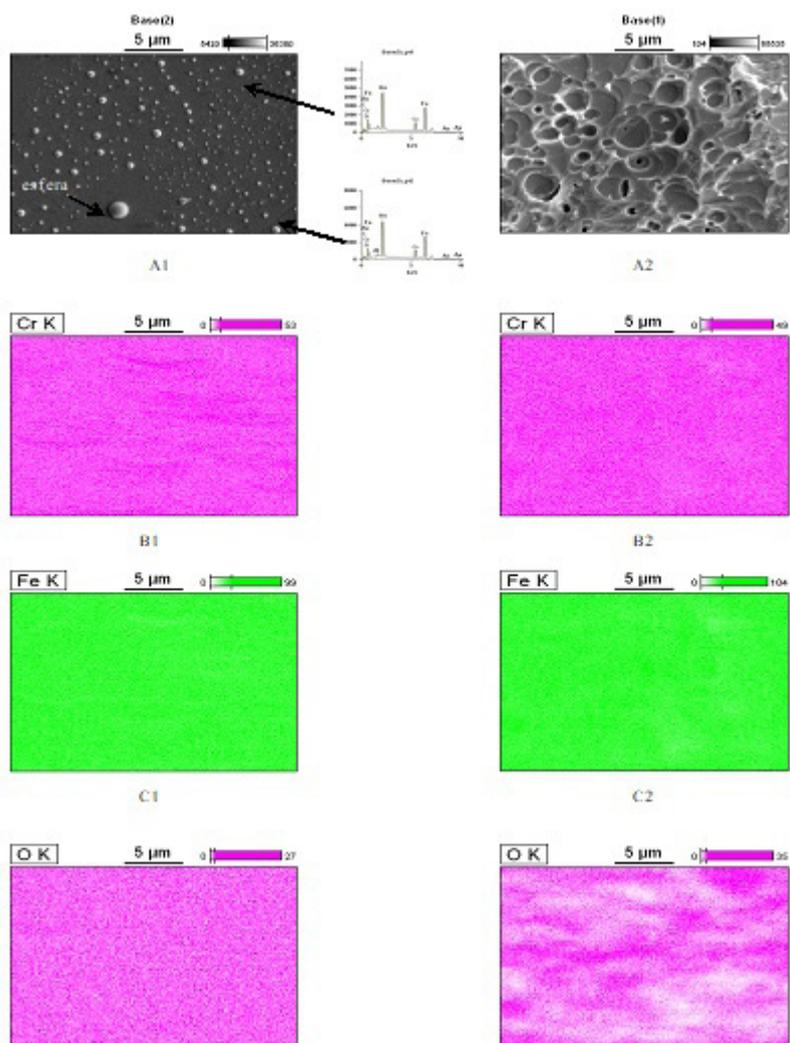


Figura 2. Análise qualitativa dos elementos químicos por mapeamento de amostra de aço inoxidável sem anodização e anodizada por 60 min.; (A1) imagem amostra pura somente polida; (A2) imagem de mapeamento amostra anodizada por 60 min.; (B1 e B2) imagem de mapeamento do elemento Cr; (C1 e C2) imagem de mapeamento do elemento Fe; (D1 e D2) imagem de mapeamento do elemento O.

3.4 Análise morfológica em seção transversal das amostras anodizadas

Para a análise da morfologia em seção transversal é necessário que as amostras sejam coladas (com resina especial para microscopia) face a face. Esse processo de preparação de amostras em seção transversal exige que se faça lixamento e polimento das mesmas, o que as vezes acaba inutilizando a amostra. Neste trabalho todas as amostras foram preparadas por seção transversal. No entanto, a amostra anodizada em 10 minutos apresentou um resultado significativo em termos de comparação. Portanto, somente esta amostra foi analisada neste teste. A Figura 3 mostra a seção transversal do filme de óxido obtido por anodização em eletrólito INCO por 10 min. Observa-se que as análises de EDS mostram a existência de um pico de oxigênio indicando a presença de óxido. No entanto, observa-se um desnível ao longo da superfície do óxido, o que não era esperado, pois óxidos tendem a

aumentar sua espessura com o tempo de anodização. Este desnível pode estar associado à formação e dissolução do óxido. Este comportamento foi observado nas demais amostras, sendo, portanto difícil medir a espessura do óxido. Apesar de o óxido apresentar o tamanho de poros independente do tempo de anodização, provavelmente a espessura dos mesmos permanecem constante devido a dissolução.

Neste contexto, sugere-se o modelo de dissolução (Figura 4), conforme análise morfológica da seção transversal para a Figura 3, em que se observa um crescimento do óxido (Etapa 1). A partir daí ocorre a dissolução do óxido e a formação de óxido (Etapa 2) a qual continua aumentando com o tempo de anodização (Etapa 3).

3.5 Testes eletroquímicos de corrosão

A Figura 5 apresenta as curvas de potencial de circuito aberto das amostras analisadas. Como pode-se observar todos os

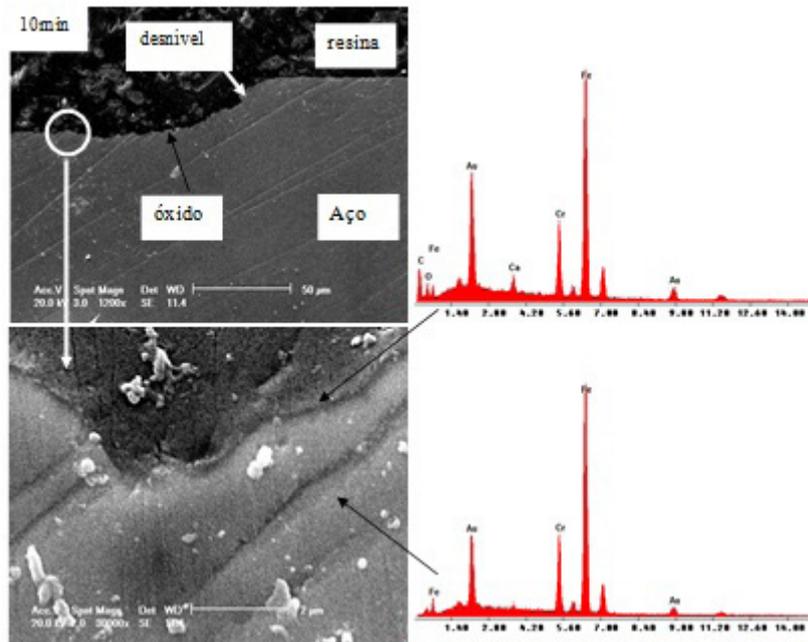


Figura 3. Seção transversal de aço inoxidável ferrítico anodizado em eletrólito INCO por 10 min.

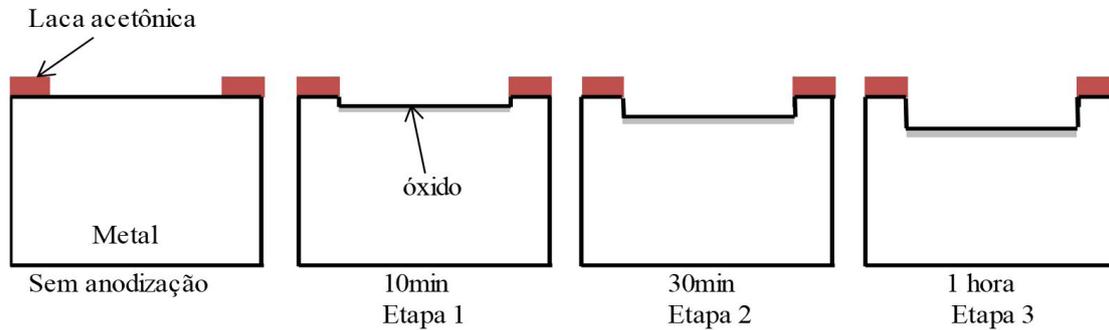


Figura 4. Modelo de processo de dissolução sugerido para amostras de aço inoxidável ferrítico sem anodização e anodizado em eletrólito INCO por 10 min, 30 min e 60 min.

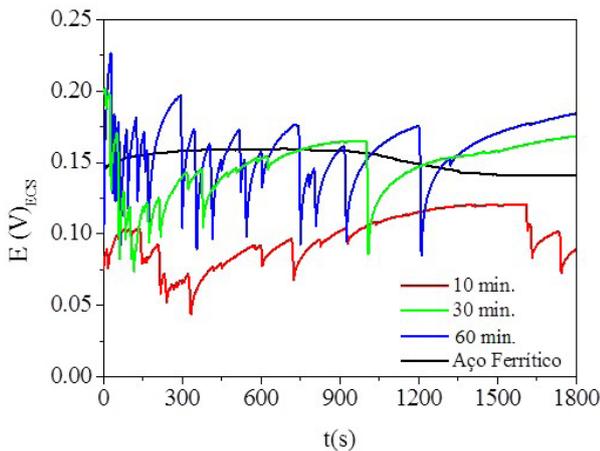


Figura 5. Curvas de potencial de circuito aberto (OCP) das amostras de aço inoxidável ferrítico sem anodizar, anodizadas por 10 min., 30 min. e 60 min.

sistemas anodizados apresentaram picos de potencial durante a medida, o que não foi observado para a amostra não anodizada. Estes picos estão relacionados com o processo de passivação e ataque da amostra. Assim mesmo, o tempo de anodização parece aumentar a frequência de ataque e passivação da amostra. Isto indica que provavelmente o aumento no tempo de anodização aumenta a incidência de pites nas amostras.

A Figura 6 apresenta a curva de polarização das amostras estudadas. Observa-se que todas as amostras apresentaram comportamento semelhante. As amostras passivam ocorrendo aumento abrupto de corrente indicando a formação de pites, e logo em seguida, o sistema tenta se repassivar.

O aço inoxidável sem anodizar apresentou potencial de corrosão de aproximadamente 0,06V. A anodização em 10 e 30 min deslocou esse potencial para valores mais negativos, sendo que a amostra de 10min foi mais negativa que a de 30 min. Por outro lado, o aumento do tempo de anodização

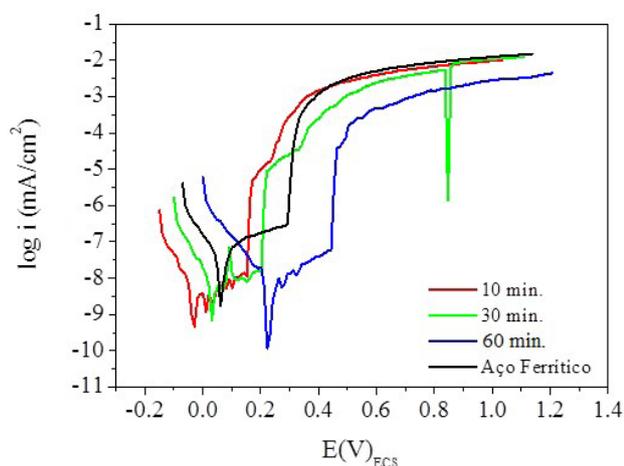


Figura 6. Curvas de polarização das amostras de aço inoxidável ferrítico sem anodizar, anodizadas por 10 min., 30 min. e 60 min.

em 60 min. deslocou o potencial de corrosão do aço inoxidável ferrítico para valor mais positivo. Isto indica que o tempo de anodização pode ter tido efeito no processo de dissolução sendo que nesse caso, provavelmente esse processo foi perdendo a intensidade com o tempo possibilitando a formação de uma camada barreira maior. O mesmo comportamento foi observado com relação ao potencial de pite em que as amostras anodizadas em 10 e 30 min. apresentam potencial de pite menor do que a amostra sem anodizar e amostra de 60 min. apresentou potencial de pite maior. A ocorrência de pites foi verificada por meio de fotos das amostras após os testes de polarização mostradas na Figura 7.

3.6 Análise morfológica após ensaio de polarização

A Figura 7 mostra as amostras sem anodização (a1 e a2) e com anodização por 10 min. (b1 e b2), 30 min. (c1 e c2) e 60 min. (d1 e d2) após os testes eletroquímicos de polarização.

De acordo com a Figura 7 observa-se a formação de pites em todos os sistemas estudados. No entanto, como já era de se esperar a amostra aço inoxidável ferrítico sem anodização apresentou menor incidência de pites em comparação as outras amostras. A incidência de pite foi facilitada devido às amostras já serem porosas.

De acordo com a Tabela 3, os pites formados somente em aço inoxidável ferrítico apresentaram tamanho dez vezes menor do que as demais amostras anodizadas, as quais apresentaram tamanhos de pites semelhantes.

4 Conclusões

As amostras anodizadas apresentaram tamanho de poros semelhante, independentemente do tempo de anodização. No entanto estes poros não apresentaram estrutura ordenada de células hexagonais. Contudo, pode-se observar que as análises por mapeamento mostraram uma superfície anodizada com falhas de oxigênio. Além disso, o

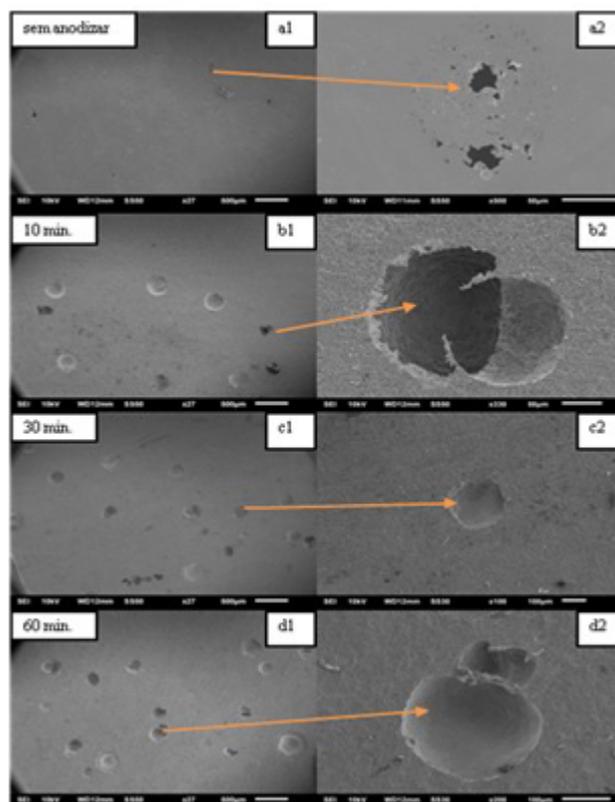


Figura 7. Análise de MEV das amostras de aço inoxidável ferrítico após testes eletroquímicos de polarização, sem anodização (a1) 27x, (a2) 500x; anodizadas por 10 min. (b1) 27x, (b2) 330x; 30 min. (c1) 27x, (c2) 100x; 60 min. (d1) 27x, (d2) 200x.

Tabela 3. Medida dos tamanho de pites e desvio padrão das amostras de aço inoxidável ferrítico, sem anodizar e anodizadas por 10 min., 30 min. e 60 min.

Amostras	Ampliação	Média Tamanho dos pites	Desvio padrão
sem anodizar	27x	22,4 μm	3,56
10 min	27x	277,63 μm	67,74
30 min	27x	226,56 μm	60,74
60 min	27x	283,52 μm	97,87

processo de dissolução foi mais intenso do que o processo de formação de óxido. O tempo de anodização parece que não influenciou o processo de anodização. Conclui-se que o aumento do tempo de anodização em 60 min. deslocou o potencial de corrosão do aço inoxidável ferrítico para valores de potenciais mais positivos (mais nobres). Isto indica que o tempo de anodização pode ter tido efeito no processo de dissolução sendo que nesse caso, provavelmente esse processo foi perdendo a intensidade com o tempo possibilitando a formação de uma camada barreira maior. Contudo, por meio dos testes eletroquímicos de corrosão se observou a tendência das amostras à formação de pites, os quais foram induzidos pela superfície porosa obtida durante o processo de anodização. É possível obter superfície porosa e condutora por anodização em eletrólito INCO.

Referências

- 1 Cieslak J, Dubiel SM. Nucleation and growth versus spinodal decomposition in Fe-Cr alloys: mossbauer-effect modelling. *Journal of Alloys and Compounds*. 1998;269(1-2):208-218.
- 2 Cardoso HRP, Kunst TX, Kunst SR, Malfatti CF. Corrosion and wear resistance of carbon films obtained by electrodeposition on ferritic stainless steel. *Materials Research*. 2015;18:292-297.
- 3 Lalthazuala R, Singh KD. Investigations on structural performance of hybrid stainless steel I-beams based on slenderness. *Thin-walled Structures*. 2019;137:197-212.
- 4 Rodrigues JPC, Laím L. Comparing fire behaviour of restrained hollow stainless steel with carbon steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019;153:449-458.
- 5 Zhao O, Gardner L, Young B. Behaviour and design of stainless steel SHS and RHS beam-columns. *Thin-walled Structures*. 2016;106:330-345.
- 6 Gardner L, Baddoo NR. Fire testing and design of stainless steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006;62:532-543.
- 7 Cui Y, Paxson AT, Zhang X, Tu Q, Varanasi KK. Study of the relationship between the crystal structure and micro-nano morphology of anodized stainless steels. *Electrochemistry Communications*. 2019;101:109-114.
- 8 Wang JH, Duh JG, Shih HC. Corrosion characteristics of coloured films on stainless steel formed by chemical, INCO and a. c. processes. *Surface and Coatings Technology*. 1996;78:248-254.
- 9 Xue W, Deng Z, Chen R, Zhang T. Growth regularity of ceramic coatings formed by microarc oxidation on Al-Cu-Mg alloy. *Thin Solid Films*. 2000;372(1-2):114-117.
- 10 Rajasekaran B, Raman SGS, Krishna LR, Joshi SV, Sundararajan G. Influence of microarc oxidation and hard anodizing on plain fatigue and fretting fatigue behaviour of Al-Mg-Si alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2008;202(8):1462-1469.
- 11 Cohen SM. Replacements for chromium pretreatments as aluminum. *Corrosion*. 1995;51(1):71-78.
- 12 Parkhutik VP, Shershulsky VI. Theoretical modelling of porous oxide growth on aluminium. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1992;25:1258-1263.
- 13 Segantini E, Dantas ST. Aplicação de microscopia de varredura para avaliação de embalagens. *ITAL. Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens*. 1996 [acesso em 18 ago. 2011];8(2):1-9. Disponível em: https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v8n2/v8n2_artigo2.pdf
- 14 Callister WD Jr, Rethwisch DG. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC; 2020.
- 15 Bastidas DM. High temperature corrosion of metallic interconnects in solid oxide fuel cells. *Revista de Metalurgia*. 2006;42:425-443.
- 16 El-Sayed HA, Horwood CA, Abhayawardhana AD, Birss VI. New insights into the initial stages of Ta oxide nanotube formation on polycrystalline Ta electrodes. *Nanoscale*. 2013;5:1494-1498.
- 17 El-Sayed HA, Birss VI. Controlled growth and monitoring of tantalum oxide nanostructures. *Nanoscale*. 2010;2:793-798.
- 18 Ni S, Sun I, Ercan B, Liu L, Ziemer K, Webster TJ. A mechanism for the enhanced attachment and proliferation of fibroblasts on anodized 316L stainless steel with nano-pit arrays. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*. 2014;102:1297-1303.

Recebido em: 12 Ago. 2019

Aceito em: 11 Nov. 2021