Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

DESEMPENHO DO FILME DE POLIPIRROL DOPADO COM TUNGSTATO E ÀCIDO OXÁLICO NA PROTEÇÃO À CORROSÃO DA LIGA AA-1100

Kátia R.L. Castagno[1], Denise S. Azambuja [2], Viviane Dalmoro[3]

Abstract

The use of conducting polymers as protecting layer against the corrosion, it is pointed as an technique less aggressive to the environment and the health, appropriate for substitution of traditional coatings. Polypyrrole (PPy) is a conducting polymer very studied due to its high electric conductivity, thermal stability and synthesis easiness. The effective protection of the polypyrrole has been evaluated on ferrous and nonferrous metals, mainly, steel and aluminum. The sodium tungstate is pointed as a good inhibitor for aluminum alloy. Inside of this context, the objective of this work is to study the protecting character of the polypyrrole films doped with oxalic acid (OXA) and sodium tungstate, potentiostatically electropolymerizated on AA 1100 alloy. The characterization electrochemistry was accomplished by the attendance of the open circuit potential (E_{CA}) and electrochemical impedance spectroscopy of (EIE) in solution of 0,05 mol.L^{-1} NaCl. A fractional 2^{4-1} factorial design was used to study the influence of the tungstate and pyrrole concentration, potential and charge electropolymerization in the corrosion protection of the aluminum alloy by the polymer film. The obtained results reveal narrows dependence among these varied and the corrosion resistance of the film. The results obtained showed that the films of polypyrrole doped with oxalate and tungstate anions (PPy/OXA/W) presented higher corrosion resistance than the films synthesized in tungstato absence (PPy/OXA). This behavior is due to the fact of the tungstate anion to act as dopant and inhibitor.

1 Doutor, profesor – CEFET/RS
2 Doutor, professor – IQ-UFRGS
3 Mestranda, Química Industrial – IQ-UFRGS

Resumo

O emprego de polímeros condutores como camada protetora contra a corrosão é apontado como uma técnica adequada para substituição de recobrimentos tradicionais menos agressivos ao meio ambiente e à saúde. Polipirrol (PPy) é um polímero condutor muito estudado devido à sua elevada condutividade elétrica, estabilidade térmica e facilidade de síntese. A efetiva proteção do polipirrol tem sido avaliada sobre metais ferrosos e não ferrosos, principalmente, aço e alumínio. O tungstato de sódio é apontado como um bom inibidor para ligas de alumínio. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é estudar o caráter protetor dos filmes de polipirrol dopados com ácido oxálico (OXA) e tungstato de sódio, eletropolimerizados potenciostaticamente sobre a liga Al-1100. A caracterização eletroquímica foi realizada pelo acompanhamento do potencial de circuito aberto (E_{CA}) e por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), em solução de 0,05 mol.L^{-1} NaCl. Um planejamentos fatorial fracionário 2^{4-1} foi usado para estudar a influência da concentração de tungstato e de pirrol, potencial e carga de eletropolimerização na proteção a corrosão da liga de alumínio pelo filme de polímero. Os resultados obtidos revelam estreita dependência entre essas variáveis e a resistência à corrosão do filme. Os resultados obtidos mostraram que os filmes de polipirrol dopados com os ânions oxalato e tungstato (PPy/OXA/W) apresentaram resistência à corrosão mais alta que os filmes sintetizados em ausência de tungstato (PPy/OXA). Este comportamento é devido ao fato do ânion tungstato atuar como dopante e inibidor.

Palavras-chave: revestimento, polipirrol, alumínio.

Introdução

Muitos pesquisadores têm se dedicado a melhorar o desempenho dos filmes de PC's, na proteção à corrosão de metais oxidáveis, pela modificação da estrutura polimérica, através da introdução de grupos funcionais, pela copolimerização ou formação de multicamadas de diferentes PC's ou pela adição de partículas metálicas e grafite.

Recentemente, alguns pesquisadores estudaram a eletrossíntese de PC's por oxidação anódica do monômero na presença de ânions com propriedades inibidoras da corrosão(1-3). Os resultados obtidos por esses pesquisadores mostram que os filmes de PC's dopados com esses ânions são mais eficientes na proteção à corrosão do substrato metálico.

Assim como os ânions cromato e molibdato, o ânion tungstato tem sido utilizado, em soluções de cloreto, como agente inibidor da corrosão do alumínio e suas ligas. Embora os compostos de tungstato apresentem toxicidade moderada, tanto para o homem como para espécies aquáticas, poucos pesquisadores têm estudado o emprego de tungstato como inibidor de corrosão em meio aquoso.

A qualidade de filmes de PPy é afetada por muitos fatores experimentais, como: concentração do monômero e dopantes, potencial de polimerização, tempo de polimerização e outros. A escolha da melhor condição de síntese torna-se difícil quando muitas varáveis estão envolvidas e são necesários um grande número de experimentos. Essas dificuldades têm sido superadas, em grande parte, pelo uso de ferramentas como o planejamento estatístico de experimentos, o qual permite estabelecer as condições de síntese através da realização de um pequeno número de experimentos. O planejamento estatístico de experimentos tem sido empregado amplamente na otimização de processos industriais, em trabalhos analíticos e no estudo de processos eletroquímicos.

O presente trabalho tem por objetivo investigar a deposição eletroquímica de PPy dopado com ácido oxálico e tungstato sobre a liga Al-1100, a fim de obter um filme protetor contra corrosão. Para alcançar a melhor condição de síntese foi utilizado um planejamento fatorial fracionário, seguido por um planejamento fatorial completo. Os filmes obtidos foram analisados através de técnicas electroquímicas.

Corpo do Trabalho

1. Experimental

Os experimentos foram executados na presença de oxigênio dissolvido e a temperatura ambiente de (24 ± 6)ºC. Corpos-de-prova da liga Al-1100, com 1 cm^2 de área exposta, rede de platina e eletrodo de calomelano saturado foram empregados, respectivamente, como eletrodo de trabalho, eletrodo auxiliar e eletrodo de referência.

O eletrodo de trabalho foi pré-tratado por ativação galvanostática, por 120 s a 27 mA cm^{-2}, em uma mistura de 0,1 mol L^{-1} HNO_3 e 0,1 mol L^{-1} Py. Em seguida, o eletrodo foi lavado com água deionizada e transferido à célula eletroquímica.

Como um procedimento típico, tungstato de sódio (Na_2WO_4) e ácido oxálico ($H_2C_2O_4$) foram dissolvidos sob agitação magnética, sendo que o pirrol foi adicionado posteriormente. A solução foi, então, levada para a célula eletroquímica onde se procedeu a eletropolimerização potenciostática em presença de oxigênio dissolvido. Subseqüentemente, o filme foi enxaguado com água deionizada e deixado na presença de ar e na temperatura ambiente até a realização dos testes eletroquímicos.

As medidas eletroquímicas foram realizadas no aparelho AUTOLAB PGSTAT 30/FRA 2. As medidas de varredura de potencial foram executadas com eletrodo de carbono vítreo (CV) a 0,020 V s^{-1} em diferentes soluções. As medidas de potencial de circuito aberto, testes de polarização de potenciodinâmica e EIS foram realizadas em solução de NaCl 0,05 mol L^{-1}. Os testes de EIS foram realizados no potencial de circuito aberto, na faixa de freqüência 100 kHz-10 mHz com amplitude de voltagem senoidal de 10 mV.

2. Resultados e Discussão

2.1. *Eletrossíntese*

O método de eletropolimerização potenciostática foi escolhido para a eletrodeposição dos filmes de PPy devido à facilidade no controle do potencial de síntese. Os filmes obtidos por este método são homogêneos e de fácil reprodução. A figura 1 mostra os transientes I *versus* t obtidos para a eletrossíntese de PPy, sobre a liga alumínio, a 1,0 V em solução de Py 0,2 mol L^{-1} e: (a) $H_2C_2O_4$ 0,1 mol L^{-1} + Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1}; (b) Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1}.

Como pode ser visto na figura 1, em solução de Py 0,2 mol L^{-1} + $H_2C_2O_4$ 0,1 mol L^{-1} + Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1} (curva a), o transiente I-t apresenta um decaimento inicial seguido de um período de crescimento de corrente anódica chamado de período de indução e que corresponde ao início do processo de deposição de PPy, após o qual começa um período de decaimento de corrente, característico de um processo controlado por difusão. O transiente I-t obtido nessa condição apresenta um tempo de indução de 350 s e uma corrente anódica de 1,48 x 10^{-3} A cm^{-2}. O final do processo de eletropolimerização é alcançado depois de 1600 s com 1,5 C s^{-1} de carga total. Quando o dopante é somente o ânion tungstato, WO_4^{-2}, (curva b), a eletrossíntese do PPy falha, visto que após 3400 s a densidade de corrente é de 0,33 x 10^{-6} A cm^{-2} e a carga total é 0,107 C. Esses resultados indicam que a eletropolimerização de PPy é impedida nas soluções de WO_4^{-2}, já que o ânion tungstato é nucleofílico e pode atacar o cátion radical, inibindo o processo de eletropolimerização e, por sua vez, a formação e o crescimento do filme.

2.2. Comportamento Redox do Filme PPy/OXA/W

O comportamento redox do filme de polipirrol dopado com os ânions oxalato e tungstato (PPy/OXA/W) foi analisado por voltametria cíclica, em uma solução livre do monômero, entre 0,75 V e -1,25 V a 0,010 V s^{-1} (figura 2a e 2b). O filme foi eletropolimerizado sobre eletrodo de carbono vítreo (CV) a 1,0 V, em solução de pirrol 0,2 mol L^{-1} + $H_2C_2O_4$ 0,1 mol L^{-1} + Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1}, até carga total de 1,5 C. A figura 2a

mostra o voltamograma cíclico para o eletrodo CV/PPy/OXA/W, em solução de $H_2C_2O_4$ 0,1 mol L^{-1} + Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1}, entre 0,75 V e -1,25 V a 0,010 V s^{-1}.

A partir da figura 2a observa-se, na primeira varredura, um pico de redução em -0,5 V e um pico de oxidação em 0,0 V. Esses picos são associados com a saída e a entrada, respectivamente, do ânion oxalato, já que picos semelhantes foram observados para filmes PPy/OXA. Aumentando o número de varreduras, as correntes associadas aos picos catódico e anódico aumentam. Em nenhum dos ciclos foi observado pico associado à oxi-redução do ânion tungstato, o que indica que esse ânion permanece preso à matriz polimérica durante o processo de oxi-redução do filme. A bibliografia mostra que, na redução de filmes de PPy dopados com polioxometalato (4), a quantidade de ânions de polioxometalato que deixam a matriz polimérica é menor em solução ácida do que quando o filme é reduzido em meio neutro. Assim, nessas condições, a eletroneutralidade do filme é alcançada pela saída e entrada do ânion de oxalato.

A fim de avaliar a habilidade do WO_4^{-2} em deixar a matriz polimérica, quando o filme é reduzido em meio neutro, foram realizadas medidas de voltametria cíclica em solução de NaCl 0,5 mol L^{-1}. A figura 2b mostra os voltamogramas cíclicos para o eletrodo CV/PPy/OXA/W, em solução de NaCl 0,05 mol L^{-1}, entre 0,75 V e -1,25 V a 0,010 V s^{-1}.

As curvas da figura 2b mostram-se significativamente diferentes daquelas da figura 2a. Em solução neutra de NaCl, observa-se, na primeira varredura, um pico de redução a –0,95 V e um pico de oxidação a -0,125 V. Já na segunda varredura, são observados dois picos catódicos (–0,95 V and -0,70 V), o que indica que os dois ânions ($C_2O_4^{-2}$ e WO_4^{-2}) deixam a matriz polimérica durante o processo de redução do filme. Segundo a bibliografia (5) a quantidade de PPy-fosfotungstato que deixa a matriz polimérica em solução de NaCl pH 7 pode ser três vezes maior que aquela observada em solução de HCl pH 3.

2.3. *Planejamento Fatorial*

A fim de avaliar a influência das variáveis de síntese no desempenho do filme PPy/OXA/W na proteção à corrosão da liga de alumínio, foi executado um planejamento fatorial com quatro variáveis: concentração de tungstato, concentração de Py, carga (Q_{pol}) e potencial (E_{pol}) de polimerização. Para cada variável foram escolhidos dois valores (níveis), conhecidos como níveis "alto" e "baixo", que são descritos de forma codificada por (+) e (-),

respectivamente. Os valores para os dois níveis das variáveis, mostrados na tabela 1, foram escolhidos por meio de estudos prévios em nosso laboratório.

O planejamento fatorial fracionário para quatro variáveis, com dois níveis para cada variável, foi executado com 8 experimentos (2^{4-1}). Como variáveis de resposta foram escolhidos o potencial de circuito aberto (E_{CA}) e a resistência de polarização (R_P) dos filmes PPy/OXA/W, medidos em solução de NaCl 0,05 mol L^{-1}. A matriz, com as respostas correspondentes, pode ser observado na tabela 2.

As quatro colunas iniciais mostram os valores das variáveis relacionados a cada corrida; as duas últimas colunas mostram os resultados experimentais obtidos para os filmes PPy/OXA/W eletrossíntetizados sob essas condições. Por exemplo, a corrida 3 foi executada aplicando um potencial de 0,8 V (-), até carga total de 1,5 C (+), usando uma concentração de Py de 0,2 mol L^{-1} (-) e uma concentração de WO_4^{-2} de 0,05 mol L^{-1} (+). O filme obtido nessas condições, quando colocado em solução de NaCl 0,05 mol L^{-1}, apresentou E_{CA} de -0,569 V e R_P de 473 cm^2.

A análise dos resultados experimentais obtidos foi realizada através do cálculo dos efeitos de primeira e segunda ordem, sendo que as interações de terceira-ordem foram desconsideradas, não sendo calculadas. A tabela 3 mostra o efeito dos fatores estudados, e suas combinações, nas variáveis de resposta E_{CA} e R_P.

Analisando-se os resultados mostrados na tabela 3, é possível observar que, das variáveis estudadas, o potencial e a carga de polimerização tem forte influência nas variáveis de resposta. Os filmes PPy/OXA/W sintetizados no nível alto de potencial de polimerização (1,0 V) e de carga de polimerização (1,5 C) apresentaram bom desempenho na proteção à corrosão da liga de alumínio.

Para validar a análise estatística, foram sintetizados filmes a 1,0 V até 1,5 C em solução de pirrol 0,2 mol L^{-1} + 0,1 mol L-1 $H_2C_2O_4$ na ausência e na presença de Na_2WO_4 0.05 mol L^{-1}. Os filmes obtidos foram imersos em solução de NaCl 0,05 mol L^{-1} para a medida do E_{CA} e da R_p. Os resultados são apresentados na tabela 4.

Os resultados apresentados na tabela 4 confirmam o bom desempenho do filme PPy/OXA/W na proteção à corrosão da liga Al-1100.

2.4. Influência da Carga de Polimerização

Os resultados obtidos no planejamento estatístico fracionário mostraram que o aumento da carga favoreceria a obtenção de filmes de PPy/OXA/W protetores da liga de alumínio. Assim, filmes de PPy/OXA/W foram eletrosintetizados sobre alumínio a 1,0 V, em solução de pirrol 0,2 mol L^{-1}, $H_2C_2O_4$ 0,1 mol L^{-1} e Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1}, até carga de 1,5 e 5,0 C. O desempenho desses filmes na proteção da liga Al-1100 foi avaliada por meio de medidas de EIE, no potencial de circuito aberto, durante diferentes tempos de imersão em solução de NaCl 0,05 mol L^{-1}. A figura 3 mostra os diagramas de Nyquist para os eletrodos Al/PPy/OXA com1,5 C e Al/PPy/OXA/W com 1,5 e 5,0 C depois de 1 hora de imersão.

O diagrama da figura 3 mostra curvas na forma de um arco capacitivo achatado, que vai da alta até a média freqüência, seguido por um trecho retilíneo, situado nas baixas freqüências, sendo esse último relacionado aos processos difusionais que ocorrem na interface eletrodo/eletrólito (6). Assim como observado nas medidas de E_{CA}, a presença de tungstato no filme de PPy aumenta a resistência à corrosão da liga.

O efeito do aumento da carga no desempenho dos filmes PPy/OXA/W foi acompanhado por até 48 horas de imersão em solução de NaCl 0,05 mol L^{-1}. A figura 4 mostra os diagrama de Nyquist para os eletrodos Al/PPy/OXA/W com 1,5 C e 5,0 C após 24 e 48 horas de imersão.

A evolução dos espectros de EIE (figura 4) mostra que, para o eletrodo de alumínio coberto com o filme de PPy/OXA/W de 1,5 C, o diâmetro do arco capacitivo aumenta de 24 para 48 horas de imersão. Já para o filme PPy/OXA/W de 5,0 C é observado uma diminuição da impedância total de 1 para 24 horas, a qual pode ser atribuída à formação de um recobrimento pouco aderente, que permite o ataque do eletrólito à superfície.

Os dados experimentais obtidos por EIE, mostrados nas figuras 3 e 4, foram analisadas por meio de simulação do circuito elétrico equivalente Rs(Q[R_P W]). Os valores obtidos para os elementos do circuito elétrico proposto são dados pela tabela 5.

A tabela 5 mostra que, para tempos de imersão de 24 e 48 horas, os filmes de PPy/OXA/W com 1,5 C apresentam altos valores para o expoente n e baixos valores para Q, enquanto que os filmes PPy/OXA/W com 5,0 C apresentam baixos valores para n (ao redor 0,65) e os maiores valores para Q. Os valores de n e Q obtidos para os filmes com carga de 1,5 C indicam que esse filme apresenta menor porosidade e/ou defeitos, resultando em altos valores para a resistência à polarização.

A resistência à polarização dos eletrodos de alumínio recobertos com os filmes PPy/OXA/W com 1,5 C aumenta com o tempo imersão em solução de NaCl. Isso pode ser atribuído a uma redução parcial de filme de PPy durante o qual os ânions tungstato deixam a matriz polimérica. Filmes de PPy dopados com molibdato foram eficientes na proteção à corrosão do aço devido à liberação do ânion da matriz do polímero que, então, passou a agir dentro dos defeitos inibindo a corrosão do substrato. Assim, nas condições desse trabalho, acredita-se que os ânions tungstato deixam a matriz do polímero, passando a agir sobre a superfície do substrato metálico, devido aos defeitos do filme, aumentando a resistência à corrosão da liga Al-1100.

Comportamento semelhante ao mostrado na figura 4 foi observado para eletrodos de aço cobertos com filme de PPy dopado com oxalato (7). Esse comportamento foi explicado assumindo que a saída dos ânions de oxalato da matriz polimérica diminui a condutividade do polímero, o que provoca a diminuição da taxa de corrosão.

Por fim, acredita-se que um efeito de sinergismo foi obtido com a presença de tungstato na matriz de PPy. O ânion pode agir tanto como dopante quanto como um inibidor, melhorando a resistência à corrosão da liga de alumínio em meio neutro de cloreto.

Conclusões

Os resultados obtidos nesse trabalho demonstram que:

- A eletropolimerização de pirrol é impedida nas soluções de WO_4^{-2}, já que o ânion tungstato é nucleofílico e pode atacar o cátion radical, inibindo o processo de eletropolimerização e, por sua vez, a formação e o crescimento do filme.
- A eletroneutralidade do filme PPy/OXA/W, em meio ácido, é alcançada pela saída e entrada do ânion de oxalato. Já em meio neutro, a eletroneutralidade é alcançada pela saída e entrada dos ânions oxalato e tungstato.
- O planejamento fatorial estatístico mostrou ser uma ferramenta útil na definição das variáveis de síntese e no estudo da resistência à corrosão do eletrodo Al/PPy/OXA/W, sendo que o melhor desempenho foi obtido com filmes produzidos a 1 V, 1,5 C em solução de pirrol 0,2 mol L^{-1} + $H_2C_2O_4$ 0.1 mol L-1 + Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1}.
- A maior resistência à corrosão em meio neutro de cloreto obtida com os filmes de PPy/OXA/W pode ser atribuída à redução parcial do filme de polipirrol que, assim,

libera os ânions de tungstato da matriz polimérica. Nessas condições, o ânion tungstato comporta-se como dopante e inibidor.

Referências bibliográficas

1 - KENDIG, M.; HOU, M.; WARREN, L. Prog. Org. Coat. 2003, 47, 183.

2 - RAMMELT, U.; DUC, L.M.; PLIETH, W. Improvement of protection performance of polypyrrole by dopant anions. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 35, p. 1225, 2005.

3 - LEHR, I.L.; SAIDMAN, S.B. Characterisation and corrosion protection properties of polypyrrole electropolymerised onto aluminium in the presence of molybdate and nitrate. **Electrochimica Acta**, v. 51, p.3249, 2006

4 - CHENG, S.A., OTERO, T.F. Synth. Met. 129 (2002) 53.

5 - T. SHIMIDZU, A. OHTANI, M. AIBA, K. HONDA (1988) J. Chem. Soc., Faraday Trans. I 84:3941

6 - WALTER,G.W. Corros. Sci. 26 (1986) 681.

7 - GRGUR, B.N., ZIVKOVIÉ, P., GVOZDENOVIÉ, M.M. Kinetics of the mild steel corrosion protection by polypyrrole-oxalate coating in sulfuric acid solution. **Progress in Organic Coatings**, v. 56, P. 240, 2006.

SINGH, D., BALASUBRAMANIAM, R. B; DUBE, R. K. Effect of coating time on corrosion behavior of electroless nickel-phosphorus coated powder metallurgy iron specimens. **Corrosion Science**, Oxford, v. 51, n. 8, p. 581-585, Aug. 1995.

FIGURAS

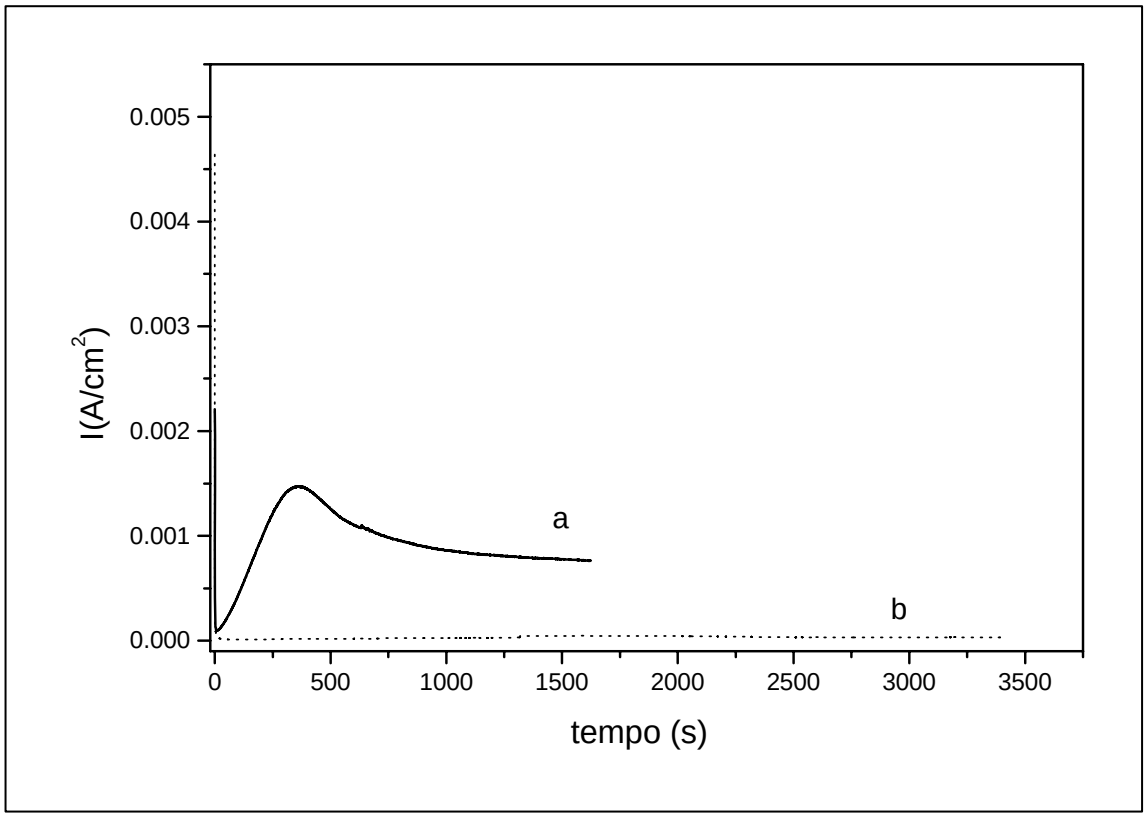

Figura 1: Transientes *I-t* obtidos para a eletrossíntese de PPy sobre alumínio a 1,0 V em solução de Py 0,2 mol L^{-1} e: (a) $H_2C_2O_4$ 0,1 mol L^{-1} + Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1}; (b) Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1}.

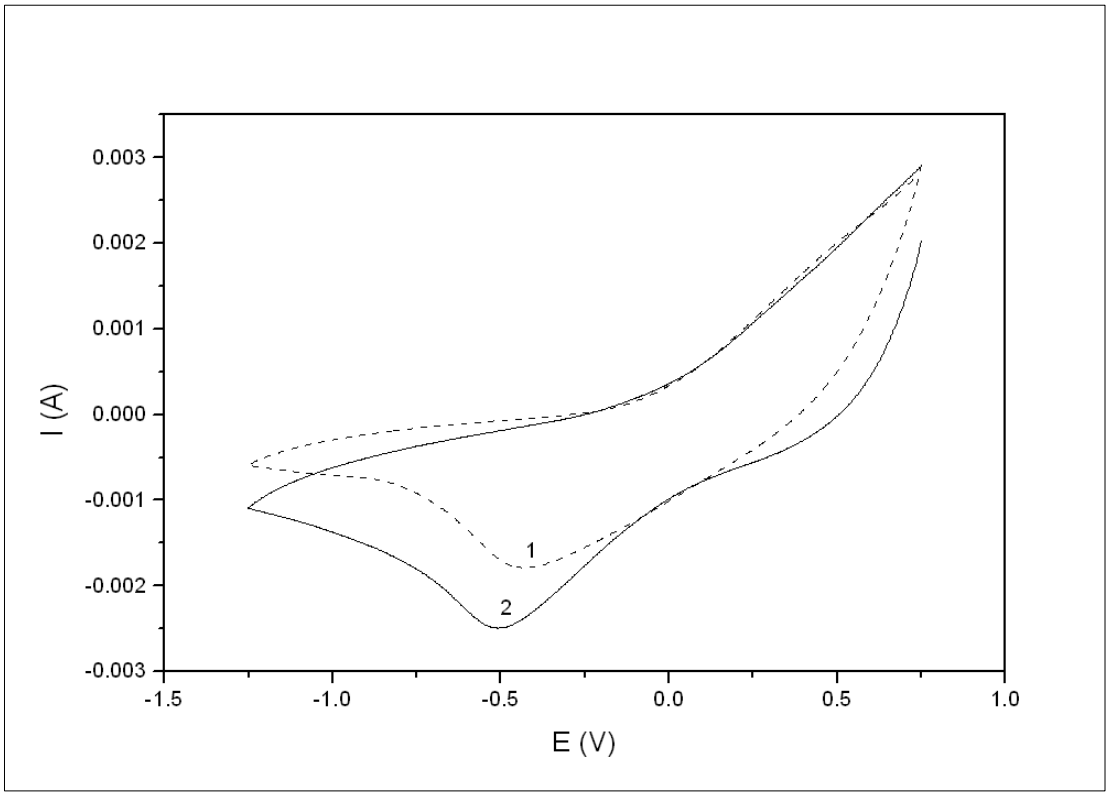

Figura 2a: Voltamograma Cíclico para o eletrodo CV/PPy/OXA/W, em solução de $H_2C_2O_4$ 0,1 mol L^{-1} + Na_2WO_4 0,05 mol L^{-1}, entre 0,75 V e -1,25 V a 0,010 V s^{-1}.

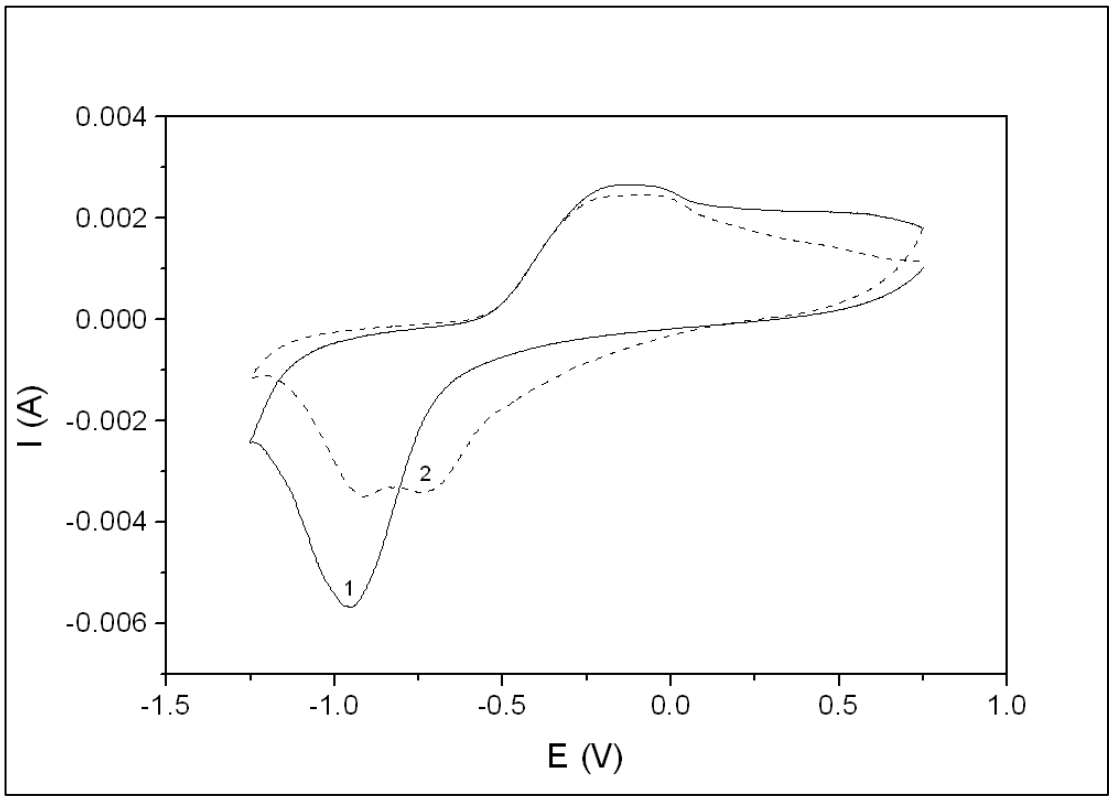

Figura 2b: Voltamograma Cíclico para o eletrodo CV/PPy/OXA/W, em solução de NaCl 0.05 mol L^{-1}, entre 0,75 V e -1,25 V a 0,010 V s^{-1}.

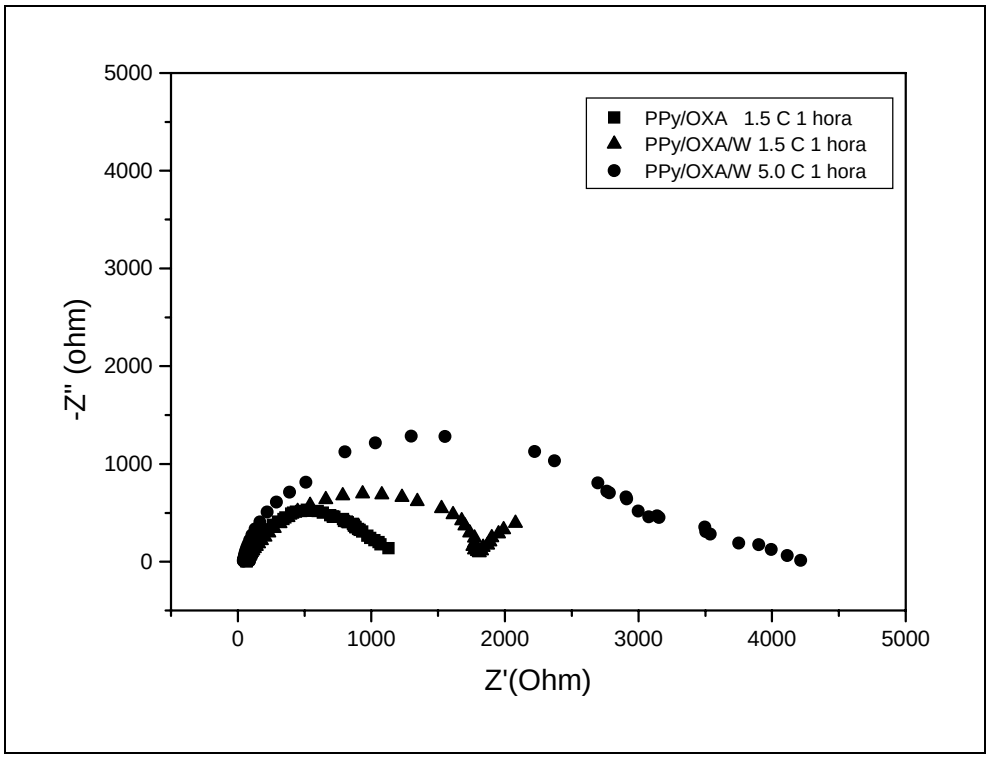

Figura 3: Diagrama de Nyquist dos eletrodos de alumínio cobertos com PPy/OXA 1,5 C e PPy/OXA/W com 1,5 e 5,0 C após 1 hora de imersão.

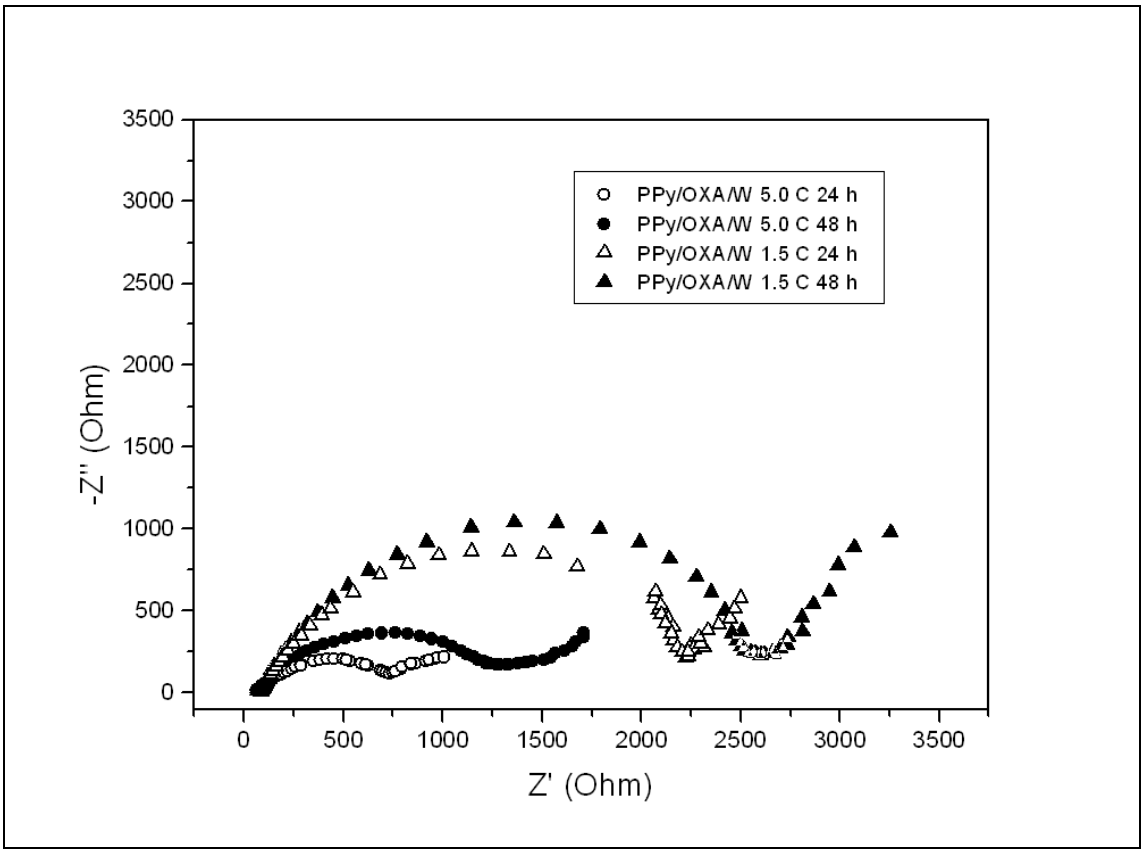

Figura 4: Diagrama de Nyquist para os eletrodos de alumínio cobertos com filmes de PPy/OXA/W com 1,5 e 5,0 C após 24 e 48 horas de imersão em NaCl 0,05 mol L-1.

TABELAS

Tabela 1: Níveis alto e baixo para as variáveis com influência na eletrossíntese dos filmes PPy/OXA/W.

Variável	Nível alto (+)	Nível baixo (-)
(1) $[WO_4^{-2}]$ (mol L^{-1})	0,05	0,025
(2) [Py] (mol L^{-1})	0,4	0,2
(3) Carga de Polimerização (C)	1,5	1,0
(4) Potencial de Polimerização (V)	1,0	0,8

Tabela 2: Desenho da matriz utilizada no planejamento fatorial fracionário 24-1 e as variáveis de reposta E_{CA} e R_P.

$[WO_4^{-2}]$ (mol L^{-1})	[Py] (mol L^{-1})	Q_{pol} (C)	E_{pol} (V)	E_{CA} (V)	R_P (Ω cm^2)
+	+	+	+	-0,543	1494
+	+	-	-	-0,618	607
+	-	+	-	-0,569	473
+	-	-	+	-0,615	878
-	+	+	-	-0,540	107
-	+	-	+	-0,597	1273
-	-	+	+	-0,546	2110
-	-	-	-	-0,657	248

Tabela 3: Efeito dos fatores estudados, e suas combinações, nas variáveis de resposta E_{CA} e R_P.

Níveis de Combinação dos fatores	**Efeito em E_{CA} (V)**	**Efeito em R_P (Ω cm^2)**
$[WO_4^{-2}]$	-0,001	-72
[Py]	0,022	-57
Q_{pol}	0,072	295
E_{pol}	0,021	1080
$[WO_4^{-2}]$ x [Py]	-0,011	375
$[WO_4^{-2}]$ x Q_{pol}	-0,278	241
$[WO_4^{-2}]$ x E_{pol}	-0,014	646
[Py] x Q_{pol}	0,066	-140
[Py] x E_{pol}	0,009	1027
Q_{pol} x E_{pol}	0,010	1512

Tabela 4: Proteção à corrosão da liga Al-1100 oferecida pelos filmes PPy/OXA/W e PPy/OXA

Filme	**E_{CORR} (V)**	**R_P (Ω cm^2)**
PPy/OXA/W	-0.530	1756
PPy/OXA	-0.636	886

Tabela 5: Valores obtidos para os elementos do circuito Rs(Q[RP W]) proposto para analisar os dados de EIE das figuras 3 e 4.

Filme	**Q_{pol} (C)**	**Tempo de Imersão (h)**	**R_S (Ω cm^2)**	**Q (μF cm^{-2})**	**n**	**R_P (Ω cm^2)**	**W (Ω cm^{-2})**
PPy/OXA/W	1,5	1	66,7	1,1	0,80	1746	114
PPy/OXA/W	5	1	42,5	1,4	0,81	2970	179
PPy/OXA	1,5	1	66,5	3,2	0,92	916	162
PPy/OXA/W	1,5	24	86,6	1,3	0,80	2129	167
PPy/OXA/W	5	24	62,4	2,1	0,59	759	108
PPy/OXA/W	1,5	48	74,8	1,2	0,78	2530	230
PPy/OXA/W	5	48	89,3	3,9	0,69	1218	167