

**Otimização do banho eletrolítico utilizado no processo de eletrodeposição da
liga de Ni-W**

**Optimization of the electrolytic bath used in the electrodeposition process of the
Ni-W alloy**

**Optimización del baño electrolítico utilizado en el proceso de electrodeposición de la
aleación Ni-W**

Recebido: 06/08/2020 | Revisado: 18/08/2020 | Aceito: 21/08/2020 | Publicado: 26/08/2020

José Anderson Machado Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0473-8443>

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: jmo.anderson@gmail.com

Arthur Filgueira de Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9641-5037>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: arthur.filgueira@eq.ufcg.edu.br

Heleno da Costa Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2852-4186>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: netohelleno@gmail.com

Mikarla Baía de Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7478-5312>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: mikarlabaia@hotmail.com

Josiane Dantas Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9835-8016>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: josiane_dantas@hotmail.com

Danilo Lima Dantas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0780-3474>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: danielold.15@gmail.com

Ana Regina Nascimento Campos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9029-6922>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: arncampos@ufcg.edu.br

Renato Alexandre Costa de Santana

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-7709>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: renatoacs@ufcg.edu.br

Resumo

O objetivo deste trabalho foi utilizar um planejamento experimental associado à técnica de Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) para avaliar o efeito da variação na concentração dos reagentes utilizados na preparação do banho eletrolítico utilizado para obtenção da liga de Ni-W por eletrodeposição. A metodologia empregada neste estudo foi quali-quantitativa. O efeito da variação na concentração dos reagentes sobre a composição química da liga depositada, sobre a eficiência catódica do processo de deposição e sobre a morfologia dos revestimentos foi avaliado. A resistência à corrosão da liga Ni-W em meio contendo íons cloreto (solução de NaCl) foi investigada utilizando a técnica de Polarização Potenciodinâmica (PP). Os resultados de composição mostraram que o níquel foi depositado preferencialmente em todas as condições experimentais avaliadas. Os revestimentos apresentaram uma morfologia nodular dependente da concentração de níquel nos depósitos. O revestimento obtido utilizando as maiores concentrações das fontes dos metais (níveis +1 e +1) apresentou a maior eficiência do processo de deposição (65,30 %). A liga de Ni-W apresentou uma maior proteção contra corrosão em meio contendo íons cloreto, em comparação à liga de Fe-W.

Palavras-chave: Eletrodeposição; Corrosão; Ligas de Ni-W.

Abstract

The aim of this work was to use an experimental design associated with the Response Surface Methodology (MSR) technique to evaluate the effect of the variation in the concentration of reagents used in the preparation of the electrolytic bath used to obtain the Ni-W alloy by electrodeposition. The methodology used in this study was quali-quantitative. The effect of the variation of the reagent's concentration on the chemical composition of the deposited

alloy, on the cathodic efficiency of the deposition process, and on the morphology of the coatings was evaluated. The corrosion resistance of the Ni-W alloy in a medium containing chloride ions (NaCl solution) was investigated using the Potentiodynamic Polarization (PP) technique. Results of composition showed that nickel was deposited preferentially in all experimental conditions evaluated. The coatings showed a nodular morphology dependent on the concentration of nickel in the deposits. The coating obtained using the highest concentrations of the metal sources (levels +1 and +1) showed the highest efficiency of the deposition process (65.30%). The Ni-W alloy showed greater protection against corrosion in a medium containing chloride ions, compared to the Fe-W alloy.

Keywords: Electrodeposition; Corrosion; Ni-W alloys.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue utilizar un diseño experimental asociado a la técnica Response Surface Methodology (MSR) para evaluar el efecto de la variación en la concentración de reactivos utilizados en la preparación del baño electrolítico utilizado para obtener la aleación Ni-W por electrodeposición. La metodología utilizada en este estudio fue cuali-cuantitativa. Se evaluó el efecto de la variación de la concentración de los reactivos sobre la composición química de la aleación depositada, sobre la eficiencia catódica del proceso de deposición y la morfología de los recubrimientos. La resistencia a la corrosión de la aleación de Ni-W en un medio que contiene iones cloruro (solución de NaCl) se investigó utilizando la técnica de polarización potenciodinámica (PP). Los resultados de la composición mostraron que el níquel se depositó preferentemente en todas las condiciones experimentales evaluadas. Los recubrimientos mostraron una morfología nodular dependiente de la concentración de níquel en los depósitos. El recubrimiento obtenido utilizando las concentraciones más altas de las fuentes de metal (niveles +1 y +1) mostró la mayor eficiencia del proceso de deposición (65.30%). La aleación de Ni-W mostró una mayor protección contra la corrosión en un medio que contiene iones cloruro, en comparación con la aleación de Fe-W.

Palabras clave: Electrodeposición; Corrosión; Aleaciones de Ni-W.

1. Introdução

A utilização de revestimentos metálicos, obtidos por eletrodeposição, com a finalidade de inibir a corrosão de estruturas metálicas, que ocorre na superfície do material e em suas estruturas internas sob a influência do meio ambiente, é uma prática comum nos setores

industriais (Hamid, 2003; Chianpairot et al., 2011). Segundo Prasad (1993) o tungstênio apresenta propriedades interessantes como, por exemplo, alta resistência à corrosão, elevada dureza, baixo coeficiente de dilatação, alta condutividade e estabilidade térmica, além de não ser atacado por nenhum ácido mineral à temperatura ambiente. Por apresentar o mais elevado ponto de fusão entre os metais, revestimentos de tungstênio, obtidos por fusão, sobre substratos metálicos não são possíveis devido à fusão do substrato. No entanto, a obtenção de revestimentos de tungstênio na forma de ligas com metais do grupo do ferro, obtidos por eletrodeposição, é possível graças à possibilidade de deposição à temperatura ambiente por um mecanismo de codeposição induzida conhecido na literatura (Graef et al., 1996; Prasad et al., 2000; Tsyntsarou et al., 2012). Ligas à base de tungstênio apresentam propriedades adequadas para uma grande quantidade de aplicações como, por exemplo, nas indústrias química, petrolífera, petroquímica, naval, construção civil, automobilística, entre outras aplicações (Wang et al., 2010; Arganaraz et al., 2011). Entre essas ligas, destaca-se a liga formada entre o tungstênio e o níquel, utilizado como metal indutor, que apresenta elevada resistência térmica, mecânica, além de uma alta resistência à corrosão (Sriraman et al., 2006; Tsyntsarou et al., 2012; Oliveira et al. 2019).

O planejamento fatorial experimental apresenta muitas vantagens em comparação aos métodos tradicionais de experimentação conhecidos como univariantes, pois permite avaliar os fatores envolvidos no processo de forma simultânea e não um por vez como nos métodos clássicos, garantindo a observação das interações antagônicas e a sinergia envolvendo os fatores analisados. Métodos univariantes são incapazes de medir estas interações e por esta razão não são efetivos como técnicas de otimização. A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas usada para desenvolvimento, melhoramento e otimização de processos, e pode ser usada para avaliar a significância relativa de muitos fatores que são afetados por interações complexas. O objetivo principal da MSR é determinar as condições ótimas de operação para um sistema ou determinar uma região que satisfaça as especificações operacionais (Murat, 2002; Santana et al., 2007; Oliveira et al., 2017).

O objetivo deste trabalho foi otimizar a concentração dos reagentes (fontes dos metais) utilizado no processo de eletrodeposição da liga de Ni-W. Como técnicas de otimização foram utilizados um planejamento experimental completo, associado à metodologia de superfície de resposta. O efeito das variáveis estudadas sobre a eficiência do processo de deposição foi avaliado. Os revestimentos obtidos foram caracterizados quanto a sua composição química, morfologia de superfície e resistência à corrosão. Portanto, os resultados aqui apresentados

podem servir de base para o desenvolvimento de técnicas de otimização utilizadas no processo de eletrodeposição de revestimentos metálicos com propriedades controladas para aplicações específicas.

2. Metodologia

Este trabalho refere-se a uma pesquisa laboratorial, onde foi empregada uma metodologia qualitativa-quantitativa para avaliação dos resultados (Pereira et al., 2018). Foram utilizados reagentes de grau analítico na preparação do banho eletrolítico utilizado no processo de deposição. Os reagentes foram usados como recebidos, sem posteriores etapas de purificação, e dissolvidos em água deionizada. A Tabela 1 apresenta a composição química do banho eletrolítico utilizado no processo de eletrodeposição.

Tabela 1: Composição do banho eletrolítico utilizado para eletrodeposição das ligas de Ni-W.

Componente	Concentração
Sulfato de níquel	0,037–0,111 mol/L
Tungstato de sódio	0,031–0,093 mol/L
Fosfato de boro	0,100 mol/L
Citrato de sódio	0,200 mol/L
Dodecil sulfato de sódio	0,035 g/L

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 1 destaca a faixa de concentrações utilizadas para todos os reagentes utilizados no processo de preparação do banho eletrolítico aplicado na eletrodeposição da liga de Ni-W.

Os revestimentos foram obtidos sobre chapas de cobre (substrato). Uma área total de 8 cm² foi utilizada para deposição da liga. Os substratos metálicos passaram por tratamentos antes do processo de deposição, seguindo procedimento experimental descrito em nossos trabalhos anteriores (Costa et al., 2018; Oliveira et al., 2019). Em resumo, os eletrodos foram polidos mecanicamente com lixas abrasivas de SiC em diferentes granulometrias (400–1200), para remover a camada de óxido natural e nivelamento da superfície do substrato. Em seguida, os eletrodos foram lavados em soluções de hidróxido de sódio (10 %, m/v) e ácido sulfúrico (1 %, v/v), e água destilada, separadamente, para remover impurezas remanescentes do processo de polimento e ativar a superfície dos eletrodos antes do processo de deposição.

Um potenciostato/galvanostato PGSTAT 30 da Autolab foi utilizado no controle da densidade de corrente utilizada no processo de deposição (20 mA/cm²). A temperatura do banho eletrolítico foi fixada em 70 °C utilizando um termostato MTA KUTESZ MD2. O substrato foi agitado (15 rpm) por meio de rotação catódica utilizando um eletrodo rotatório EG&G PARC 616. A eficiência de corrente de deposição (EC), quantidade de energia gasta efetivamente na redução dos metais, foi calculada utilizando a Equação 1, baseada na Lei de Faraday (Oliveira et al., 2017).

$$EC = w/[Ew*(I*t/F)] = (w*F)/(I*t) * \sum[(ci*ni)/Mi] * 100 \quad (1)$$

Sendo w a massa do depósito (em gramas), t o tempo de deposição (em segundos), I a corrente total do processo (em Ampère), Ew o peso equivalente da liga (em gramas por equivalente), ci a fração em peso do elemento depositado, ni o número de elétrons transferidos por cada átomo de metal, Mi a massa atômica do elemento (g/mol) e F a constante de Faraday (96485 C/mol).

Na otimização dos experimentos foi utilizado um planejamento fatorial completo 3², com 2 experimentos no ponto central. Avaliou-se quantitativamente e qualitativamente a influência das variáveis, concentração de sulfato de níquel e concentração de tungstato de sódio, fontes dos metais níquel e tungstênio, respectivamente, sobre a eficiência de corrente de deposição. Os experimentos foram realizados em ordem aleatória para evitar erros sistemáticos, variando-se simultaneamente as variáveis de entrada (concentrações de sulfato de níquel e de tungstato de sódio). As análises da regressão dos dados experimentais foram realizadas utilizando o *software* STATISTICA®. Cada variável independente foi investigada para um nível alto (+1) e baixo (-1). Os experimentos do ponto central (0) foram incluídos na matriz e na análise estatística para identificar o efeito de cada variável em função da eficiência do processo (Faveri et al. 2002). A Tabela 2 apresenta os valores reais e codificados da matriz de planejamento.

Tabela 2: Níveis reais e codificados das variáveis do planejamento fatorial 3^2 utilizado no processo de deposição da liga Ni-W.

Variáveis	Níveis (codificados)		
	-1	0	1
Sulfato de níquel (mol/L)	0,037	0,074	0,111
Tungstato de sódio (mol/L)	0,031	0,062	0,093

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 2 destaca a faixa de concentração das variáveis independentes (concentração de sulfato de níquel e de tungstato de sódio), investigada de forma simultânea neste estudo e suas respectivas codificações utilizadas na matriz de planejamento experimental.

As características morfológicas superficiais dos revestimentos foram examinadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), usando um microscópio Philips XL-30. As análises de composição química das ligas eletrodepositadas foram feitas por Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), usando um espectrofotômetro da Analytical QX-2000 acoplado ao MEV.

Para avaliar a resistência à corrosão da liga de Ni-W em meio corrosivo contendo íons cloreto (NaCl, 0,1 mol/L), foi utilizada a técnica de Polarização Potenciodinâmica (PP). As medidas foram realizadas no potencial de circuito aberto (PCA), após estabilização por 20 minutos, em uma faixa de varredura de $\pm 0,3$ V a partir do PCA, à temperatura ambiente de 25 ± 2 °C. Os testes de corrosão foram realizados em um sistema convencional adaptado composto de três eletrodos, sendo o substrato de cobre revestido com a liga de Ni-W atuando como eletrodo de trabalho, uma folha de platina como contra eletrodo e um eletrodo de prata (Ag/AgCl) como referência.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta a matriz do planejamento experimental com os resultados de eficiência de deposição (EC %) e porcentagem em peso no depósito de níquel e tungstênio.

Tabela 3: Matriz do planejamento experimental 3² utilizado no processo de deposição.

Exp.	Sulfato de Níquel	Tungstato de Sódio	EC (%)	Ni (%)	W (%)
1	-1	-1	26,50	62,37	37,63
2	-1	0	44,40	68,33	31,67
3	-1	1	60,10	74,72	25,28
4	0	-1	29,90	60,38	39,62
5	0	0	45,60	66,78	33,22
6	0	1	60,80	65,35	34,65
7	1	-1	37,40	55,91	44,09
8	1	0	50,60	66,18	33,82
9	1	1	65,30	66,88	33,12
10	0	0	46,01	66,27	33,73
11	0	0	45,70	63,59	36,41

Fonte: Arquivo pessoal.

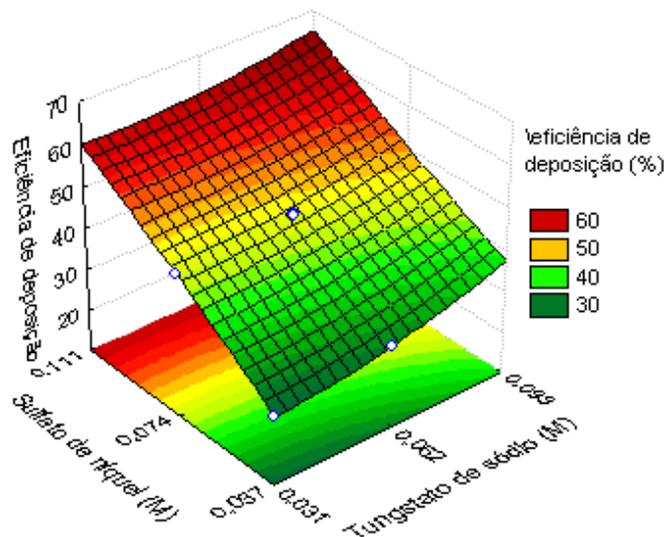
A Tabela 3 destaca os resultados de composição química dos metais na liga de Ni-W após o processo de eletrodeposição e os resultados de eficiência de corrente para cada condição experimental avaliada seguindo a matriz do planejamento fatorial.

Observa-se nos resultados uma ampla variação nos resultados experimentais obtidos. Nota-se que a eficiência de corrente variou na faixa de 26,50–65,30 %, sendo a menor eficiência obtida quando as fontes dos metais foram utilizadas nas menores concentrações (-1 e -1). Já a maior EC foi obtida quando os reagentes foram utilizados nas maiores concentrações (+1 e +1), dessa forma, nota-se claramente o efeito significativo do aumento da fonte dos metais sobre os resultados de EC. Com relação aos resultados de composição química, observa-se que os dois metais foram depositados em todas as condições experimentais avaliadas comprovando, portanto, a formação da liga Ni-W. Observa-se, também, que o níquel foi depositado em maior proporção em todos os experimentos comprovando seu efeito de metal indutor no mecanismo de deposição do tungstênio (Arganaraz et al., 2011; Tsyntsarou et al., 2012).

De acordo com a literatura (Tsyntsarou et al., 2012; Oliveira et al., 2019), a deposição de tungstênio puro a partir de soluções aquosas não é possível, pois forma-se na superfície do cátodo uma camada de óxido de tungstênio isolante impedindo o progresso efetivo do processo de deposição. No entanto, na presença de metais indutores como os metais do grupo do ferro (Fe, Ni ou Co), por exemplo, é possível induzir a deposição do tungstênio formando ligas do tipo Me-W (Me = metal indutor), com diferentes composições percentuais dependendo das condições utilizadas no processo de eletrodeposição. A Figura 1 apresenta a

superfície de resposta com os resultados de EC em função das variáveis (concentrações dos metais no banho eletrolítico).

Figura 1: Superfície de resposta da influência da concentração de tungstato de sódio vs. a concentração de sulfato de níquel sobre os resultados de EC %.



Fonte: Arquivo pessoal.

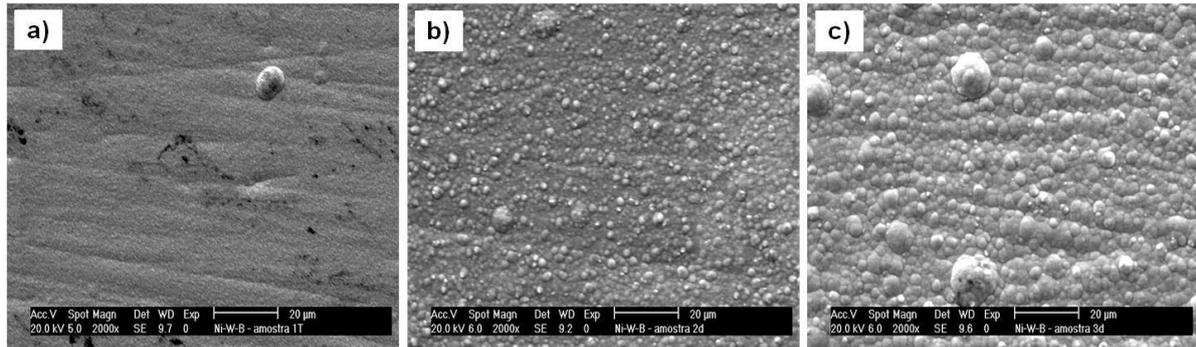
A Figura 1 destaca por meio da superfície de resposta todos os possíveis resultados de eficiência de corrente, em função das variáveis independentes, dentro da faixa estabelecida no planejamento experimental.

Observa-se na superfície de resposta que o aumento da concentração de níquel teve uma maior influência sobre os resultados de eficiência de corrente. Resultado semelhante foi observado na literatura (Eliaz et al., 2005). Nota-se que os maiores valores de EC foram obtidos quando a concentração de níquel foi avaliada nos maiores valores do planejamento (nível +1), em quase toda faixa de concentração de tungstênio, sendo os valores máximos de EC alcançados quando as duas fontes dos metais foram avaliadas nos maiores valores do planejamento experimental (+1 e +1), ou seja, nestas condições as variáveis apresentaram um efeito sinérgico nos resultados de EC. Portanto, nota-se claramente que o aumento da concentração da fonte dos metais, aliado ao mecanismo de codeposição induzida estabelecido na literatura para explicar a deposição do tungstênio, favoreceu o aumento da eficiência do processo de deposição (Tsyntsaru et al., 2012).

Para avaliar o efeito da variação na concentração dos metais sobre a morfologia superficial dos revestimentos foram obtidas imagens de MEV da superfície dos depósitos nos

experimentos 1, 2 e 3 (Figura 2a, b, c). Essas ligas foram obtidas mantendo-se a concentração da fonte de níquel fixa (nível -1) e variando-se a concentração da fonte de tungstênio (níveis -1, 0, +1).

Figura 2: MEV da superfície da liga Ni-W depositada utilizando uma concentração de sulfato de níquel de 0,037 mol/L e (a) tungstato de sódio de 0,031 mol/L, (b) tungstato de sódio de 0,062 mol/L e (c) tungstato de sódio de 0,093 mol/L.



Fonte: Arquivo pessoal.

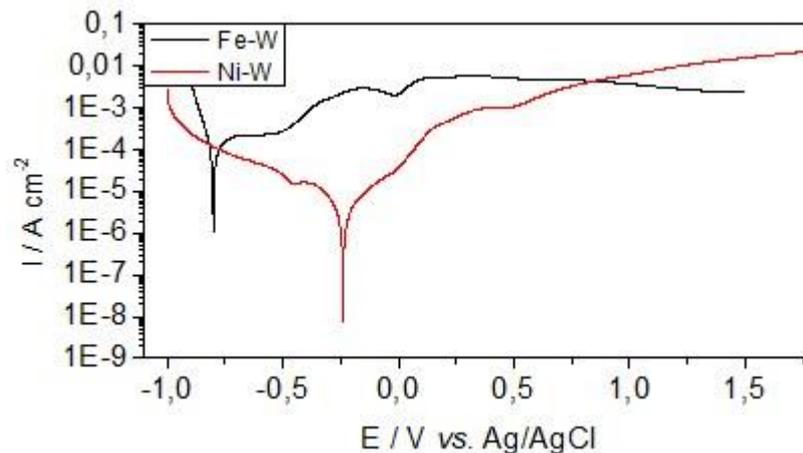
A Figura 2 destaca as características morfológicas da superfície da liga de Ni-W obtida em diferentes condições experimentais (variação na concentração de tungstato de sódio, fonte de tungstênio, utilizada na preparação do banho eletrolítico).

Observa-se nos resultados de MEV que todos os depósitos apresentaram nódulos com uma morfologia quase esférica e com diferentes tamanhos. Verifica-se que a quantidade e o tamanho dos nódulos aumentaram com o aumento na concentração de Ni e, conseqüentemente, com a diminuição de W no depósito. Resultado semelhante foi obtido em trabalho anterior desenvolvido por nosso grupo de pesquisa (Santana et al., 2006). Não é possível observar a presença de defeitos (microfissuras) na superfície dos revestimentos que possam atingir o substrato. Essa ausência de defeitos superficiais é importante para garantir ao revestimento uma maior propriedade de barreira entre o meio corrosivo e a superfície do substrato garantindo, desse modo, uma melhor proteção contra o ataque de espécies corrosivas (Chianpairot et al., 2011; Oliveira et al., 2019).

Para avaliar a resistência à corrosão da liga de Ni-W em um ambiente corrosivo contendo íons cloreto (solução de NaCl), foram obtidas curvas de Polarização Potenciodinâmica (PP) para o revestimento que apresentou a maior eficiência de corrente (65,30 %). Esta liga foi obtida utilizando as maiores concentrações das fontes dos metais (+1 e +1) e apresentou uma composição química percentual de 66,88 % de Ni e 33,12% de W

(Tabela 3). Além disso, os resultados de resistência à corrosão foram comparados com os resultados apresentados por uma liga de Fe-W obtida nas mesmas condições experimentais (Figura 3).

Figura 3: Curvas de polarização obtidas em meio de NaCl (0,1 mol/L), a 25 ± 2 °C.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 3 destaca o comportamento eletroquímico de corrosão da liga de Ni-W e de uma liga de Fe-W, obtida em condições experimentais semelhantes e utilizada para comparação, em meio corrosivo contendo íons cloretos e em diferentes condições de potencial (polarização).

Observa-se nas curvas de polarização (Figura 3) um deslocamento no potencial de corrosão para valores mais nobres para a liga Ni-W em comparação à liga de Fe-W. Observa-se, também, uma diminuição da corrente de corrosão da liga Ni-W.

A Tabela 4 apresenta os resultados de potencial de corrosão (E_{corr}) e de resistência à polarização (R_p) obtidas das curvas de PP utilizando a técnica de extrapolação das retas de Tafel (Costa et al., 2018; Oliveira et al., 2017).

Tabela 4: Resultados eletroquímicos de corrosão.

Resultados de corrosão	Ni-W	Fe-W
E_{corr} (V)	-0,240	-0,800
R_p (Ohm.cm ²)	$9,001 \times 10^3$	$1,895 \times 10^3$

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 4 destaca os resultados dos parâmetros de corrosão dos sistemas avaliados (liga de Ni-W e de Fe-W, utilizada para comparação), obtidos diretamente das curvas de polarização em meio corrosivo contendo íons cloreto.

Além disso, os resultados de resistência à polarização (Tabela 4) mostram que a liga Ni-W apresenta uma maior resistência à corrosão em comparação à liga de Fe-W. De acordo com a literatura (Pozzo et al., 2019; Oliveria et al., 2020), materiais com valores de potencial de corrosão mais nobres, associados a uma diminuição da densidade de corrente de corrosão e um elevado valor de resistência à polarização, apresentam uma maior resistência à corrosão, pois possuem uma diminuição na tendência cinética do processo corrosivo.

4. Considerações Finais

Revestimentos aderentes ao substrato formados pela liga de Ni-W foram obtidos com sucesso neste trabalho. Os resultados de composição química mostraram uma maior proporção percentual em massa de níquel em todos os experimentos, comprovando o mecanismo de codeposição induzida do tungstênio. A concentração de Ni apresentou uma maior influência sobre os resultados de EC. A maior eficiência de corrente (EC = 65,30 %) foi obtida para o experimento otimizado nas condições experimentais de 0,111 mol/L de sulfato de níquel, 0,093 mol/L de tungstato de sódio (níveis +1 e +1), 20 mA/cm², 15 rpm e 70 °C.

Os revestimentos de Ni-W apresentaram nódulos de tamanhos variados em sua superfície que aumentaram com a elevação da quantidade de Ni nos depósitos. Os resultados de resistência à corrosão mostraram que a liga de Ni-W apresentou um melhor desempenho anticorrosivo em comparação à liga de Fe-W em meio contendo íons cloreto (solução de NaCl). Portanto, os resultados deste estudo comprovam a importância da aplicação de técnicas de otimização experimental para obtenção de ligas metálicas utilizando a técnica de eletrodeposição, pois é possível determinar as condições experimentais ótimas para depositar revestimentos com propriedades controladas para aplicações específicas.

Trabalhos futuros irão utilizar a técnica de planejamento experimental para otimização de outros parâmetros utilizados no processo de deposição da liga como, por exemplo, densidade de corrente e pH do banho eletrolítico. Além disso, a resistência à corrosão da liga de Ni-W em outros meios corrosivos também será avaliada.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

- Arganaraz, M. P. Q., Ribotta, S. B., Folquer, M. E., Gassa, L. M., Benítez, G., Vela, M. E., & Salvarezza, R. C. (2011). Ni–W coatings electrodeposited on carbon steel: Chemical composition, mechanical properties and corrosion resistance. *Electrochimica Acta*, 56, 5898–5903.
- Chianpairot, A., Lothongkum, G., Schuh, C. A., & Boonyongmaneerat, Y. (2011). Corrosion of nanocrystalline Ni–W alloys in alkaline and acidic 3.5 wt.% NaCl solutions. *Corrosion Science*, 53, 1066–1071.
- Costa, J. D., Sousa, M. B., Alves, J. J. N., Evaristo, B. O., Queiroga, R. A., Santos, A. X., Maciel, T. M., Campos, A. R. N., Santana, R. A. C., & Prasad, S. (2018). Effect of Electrochemical Bath Composition on the Preparation of Ni-W-Fe-P Amorphous Alloy. *International Journal of Electrochemical Science*, 13, 2969-2985.
- Eliaz, N., Sridhar, T. M., & Gileadi, E. (2005). Synthesis and characterization of nickel tungsten alloys by electrodeposition. *Electrochimica Acta*, 50, 2893–2904.
- Faveri, D., Perego, P., Converti, A., & Borghi, M.D. (2002). Optimization of Xylitol Recovery by Crystallization from Synthetic Solutions and Fermented Hemicellulose Hydrolyzates. *Chemical Engineering Journal*, 90, 291-298.
- Graef, G., Anderson, K., Groza, J., & Palazoglu, A. (1996). Phase evolution in electrodeposited Ni-W-B alloy. *Materials Science and Engineering: B*, B41, 253-257.
- Hamid, Z. A. (2003). Electrodeposition of cobalt–tungsten alloys from acidic bath containing cationic surfactants. *Materials letters*, 57, 2558-2564.

Murat, E. (2002). Response Surface Methodological Approach for Inclusion of Perfluorocarbon in Actinorhodin Fermentation Medium. *Process Biochemistry*, 38, 667-673.

Oliveira, J. A. M., Raulino, A. M. D., Raulino, J. L. C., Campos, A. R. N., Prasad, S., & Santana, R. A. C. (2017). Efeito da densidade de corrente e pH na obtenção da liga Ni-Fe por eletrodeposição. *Revista Matéria*, 22 (1), e-11773.

Oliveira, J. A. M., Santana, R. A. C., & Wanderley Neto, A. O. (2020). Characterization of the chitosan-tungsten composite coating obtained by electrophoretic deposition. *Progress in Organic Coatings*, 143, 105631.

Oliveira, J. A. M., Silva, P. S. G., Santana, R. A. C., & Silva, G. P. (2019). Estudo do efeito de pH do banho eletrolítico nas propriedades da liga Ni-W obtida por eletrodeposição. *Educação Ciência e Saúde*, 6, (1), 1-16.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *METODOLOGIA DA PESQUISA CIENTÍFICA*, Santa Maria: UAB/NTE/UFSM https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia_Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.

Pozzo, L. Y., Da Conceição, T. F., Spinelli, A., Scharnagl, N., & Nunes Pires, A. T. (2019). The influence of the crosslinking degree on the corrosion protection properties of chitosan coatings in simulated body fluid. *Progress in Organic Coatings*, 137, 105328.

Prasad S. (1993). Eletrodeposição de camadas de liga níquel-tungstênio e determinação de níquel por voltametria de onda quadrada. *Tratamento de Superfície*, 58, 23-28.

Prasad S., Marinho F. A., & Silva L. B. (2000). A comparative study on electrodeposition of Fe-W-B and Fe-Mo-B alloys. *Journal of the Indian Chemical Society*, 77, 311-313.

Santana, R. A. C., Campos, A. R. N., & Prasad, S. (2007). Otimização do Banho Eletrolítico da Liga Fe-W-B Resistente à Corrosão. *Química Nova*, 30 (2), 360-365.

Santana, R. A. C., Prasad, S., Campos, A. R. N., Araújo, F. O., Silva, G. P., & Lima-Neto, P. (2006). Electrodeposition and Corrosion Behaviour of a Ni-W-B Amorphous Alloy. *Journal of Applied Electrochemistry*, 36, 105-113.

Sriraman, K. R., Raman, S. G. S., & Seshadri, S. K. (2006). Synthesis and evaluation of hardness and sliding wear resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-W alloys. *Materials Science and Engineering A*, 418, 303-311.

Tsyntsar, N., Cesiulis, H., Donten, M., Sort, J., Pellicer, E., & Podlaha-Murphy, E. J. P. (2012). Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 48 (6), 491-520.

Wang, H., Liu, R., Cheng, F., Cao, Y., Ding, G., & Zhao, X. (2010). Electrodepositing amorphous Ni-W alloys for MEMS. *Microelectronic Engineering*, 87, 1901-1906.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

José Anderson Machado Oliveira – 50 %

Arthur Filgueira de Almeida – 10 %

Heleno da Costa Neto – 4 %

Mikarla Baía de Sousa – 4 %

Josiane Dantas Costa – 6 %

Danilo Lima Dantas – 4 %

Ana Regina Nascimento Campos – 10 %

Renato Alexandre Costa de Santana – 12 %