

**Influência da densidade de corrente e da agitação mecânica no processo de
eletrodeposição de ligas Zn-Ni**

**Influence of current density and mechanical agitation on the electrodeposition process of
Zn-Ni alloys**

**Influencia de la densidad de corriente y la agitación mecánica en el proceso de
electrodeposición de aleaciones Zn-Ni**

Recebido: 06/08/2020 | Revisado: 14/08/2020 | Aceito: 17/08/2020 | Publicado: 21/08/2020

Josiane Dantas Costa

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: josiane_dantas@hotmail.com

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

Alison Silva Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4464-9111>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: alison.oliveira18@gmail.com

Anamélia de Medeiros Dantas Raulino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5124-3633>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: anameliadantas@yahoo.com.br

José Leonardo Costa Raulino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1479-5065>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: leonardo.jcr@hotmail.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

Ana Regina Nascimento Campos

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: arncampos@yahoo.com.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

Foram avaliados os efeitos da densidade de corrente e agitação mecânica do banho no processo de eletrodeposição para obtenção da liga Zn-Ni. Foi utilizado um banho eletrolítico constituído de sulfato de níquel, sulfato de zinco, sulfato de sódio, ácido bórico e citrato de sódio em pH 7,0. A densidade de corrente foi avaliada na faixa de 10-50 mA/cm² e para a agitação mecânica foi avaliada na faixa de 30-70 rpm. Como ferramenta de otimização, foi utilizado um planejamento fatorial completo 2² com três elementos centrais associado à Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Foi observado que o aumento da densidade de corrente e da agitação mecânica provocou o aumento do percentual atômico de níquel nos revestimentos. O percentual de zinco aumentou com a diminuição da densidade de corrente. O ponto ótimo de níquel obtido foi de 39 at.%. A eletrodeposição foi do tipo anômala. A microdureza aumentou com o aumento do percentual de níquel e com a diminuição do percentual de Zn no revestimento. Os revestimentos apresentaram nódulos na superfície com diferentes tamanhos e formas.

Palavras-chave: Composição química; Eletrodeposição; Liga Zn-Ni, Microdureza; Planejamento fatorial.

Abstract

The effects of current density and mechanical agitation of the bath in the electrodeposition process to obtain the Zn-Ni alloy were evaluated. An electrolytic bath was used consisted of nickel sulfate, zinc sulfate, sodium sulfate, boric acid and sodium citrate at pH 7.0. The current density was evaluated in the range of 10-50 mA / cm², and, for mechanical agitation, it was evaluated in the range of 30-70 rpm. As optimization tool, a complete 2² factorial design was used with three central elements associated with the Response Surface Methodology

(RSM). It was observed that the increase in current density and in mechanical agitation caused an increase in the atomic percentage of nickel in the coatings. The percentage of zinc increased with decreasing current density. The optimum nickel value obtained was 39 at.%. The electrodeposition was anomalous. The microhardness increased with the increase in the percentage of nickel and with the decrease in the percentage of Zn in the coating. The coatings showed nodules on the surface with different sizes and shapes.

Keywords: Chemical composition; Electrodeposition; Zn-Ni alloy; Microhardness; Factorial design.

Resumen

Se evaluaron los efectos de la densidad de corriente y la agitación mecánica del baño en el proceso de electrodeposición para obtener la aleación de Zn-Ni. Se usó un baño electrolítico que consistía en sulfato de níquel, sulfato de zinc, sulfato de sodio, ácido bórico y citrato de sodio a pH 7,0. La densidad de corriente se evaluó en el rango de 10-50 mA / cm² y para la agitación mecánica se evaluó en el rango de 30-70 rpm. Como herramienta de optimización, se utilizó un diseño factorial completo de 2² con tres elementos centrales asociados con la metodología de superficie de respuesta. Se observó que el aumento en la densidad de corriente y la agitación mecánica causaron un aumento en el porcentaje atómico de níquel en los recubrimientos. El porcentaje de zinc aumentó al disminuir la densidad de corriente. El valor óptimo de níquel obtenido fue del 39%. La electrodeposición fue anómala. La microdureza aumenta con el aumento en el porcentaje de níquel y disminuye en el porcentaje de Zn en el recubrimiento. Los recubrimientos mostraron nódulos en la superficie con diferentes tamaños y formas.

Palabras clave: Composición química; Electrodeposición; Aleación de Zn-Ni; Microdureza; Diseño factorial.

1. Introdução

Os revestimentos protetores, além de constituírem uma importante forma de prevenção à corrosão metálica, podem melhorar consideravelmente as propriedades físicas, químicas e mecânicas do substrato (Gentil, 2011). A eletrodeposição representa um método alternativo e eficiente para obtenção de revestimentos metálicos que têm a finalidade de inibir a corrosão, pois é considerado melhor que outros métodos como, por exemplo, a pulverização e deposição a vapor, devido à sua simplicidade e baixo custo, além da possibilidade de

depositar revestimentos com propriedades controladas por meio do ajuste dos parâmetros de deposição (Abou-Krishna, Rageh, & Matter, 2008; Cojocar et al., 2010; López, 1999).

Os revestimentos de zinco (Zn) e cádmio (Cd) são amplamente utilizados para proteger substratos metálicos contra a corrosão (Beltowska-Lehman et al., 2002; Gavrilá et al., 2000; Maciej et al., 2012). No entanto, o cádmio apresenta grandes inconvenientes devido à sua toxicidade (Dubent, Mertens, & Saurat, 2010; Jeong et al., 2008; Lodhi et al., 2007; Waalkes, 2003), então, uma alternativa encontrada foi adicionar metais como o ferro, cobalto e níquel ao zinco para obtenção de ligas à base de zinco com maior resistência à corrosão, aliado a uma menor toxicidade (Gharahcheshmeh & Sohi, 2009; Ortiz-Aparicio et al., 2007; Rahman et al., 2009; Srivastava et al., 2006; Swathirajan, 1987). Durante a codeposição de zinco com metais do grupo do ferro (Grupo 8B), o metal menos nobre é eletrodepositado preferencialmente, sendo este fenômeno denominado de codeposição anômala (Brenner, 1963; Hamid, 2001; Hammami, Dhouibi, & Triki, 2009; Maciej et al., 2012).

A função fundamental do ferro, níquel ou cobalto em uma liga de zinco é modificar o potencial de corrosão do depósito. A liga torna-se ligeiramente mais nobre que o zinco e por isso a taxa de corrosão do depósito é mais lenta. Ao mesmo tempo, o depósito ainda apresenta comportamento de sacrifício em relação ao substrato. Conseqüentemente, para depósitos de uma mesma espessura, uma liga tem a vantagem de proteger o substrato por um período de tempo mais longo que o zinco convencional (Albalat et al., 1990; Hegde, Venkatakrisna, & Eliaz, 2010).

Entre as ligas de zinco, os revestimentos de Zn-Ni preparados por eletrodeposição estão recebendo uma atenção crescente por muitos pesquisadores devido à sua maior resistência à corrosão (Chang et al., 2009; Lin, Li, & Xu, 2012; Pushpavanam et al., 1991). Ligas de Zn-Ni com teor de Ni na faixa de 12-14 % em peso exibem melhor resistência à corrosão e assim podem proteger por um tempo maior quando comparado com um revestimento de zinco puro da mesma espessura (Abou-Krishna, 2011; Brenner, 1963). No entanto, para algumas aplicações específicas, na indústria aeronáutica, por exemplo, uma liga de Zn-Ni com maior teor de níquel (22 %) se faz necessária (Soares, Souza, & Kuri, 2006). A eletrodeposição de ligas de Zn-Ni em banhos neutros ou básicos reduz o risco de fragilização por hidrogênio. Porém, nestes casos, o processo de deposição é menos eficiente e o teor de Ni necessário para assegurar uma boa proteção contra a corrosão é difícil de conseguir (Conde, Arenas, & de Damborenea, 2011).

Um planejamento fatorial é vantajoso em comparação com o método convencional de experimentação, pois permite avaliar de forma sistemática todas as possíveis interações entre

as variáveis de um processo que ocorrem durante um procedimento experimental (Burkert, Maugeri, & Rodrigues, 2004). Nos últimos anos o uso do planejamento fatorial em trabalhos científicos vem aumentando em diferentes áreas do conhecimento (Costa et al., 2018; Costa et al., 2016; dos Santos, Maciel, & de Santana, 2015; Oliveira et al., 2015; Rao & Subbarao, 2012; Santana et al., 2006; Santana et al., 2007; Santos et al., 2019; Soares et al., 2020)

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dos parâmetros de deposição, densidade de corrente e agitação mecânica do banho eletrolítico, sobre os resultados de composição química, microdureza e morfologia da liga de Zn-Ni. Para otimização do procedimento experimental, foi utilizado um planejamento fatorial completo associado à técnica de metodologia de superfície de resposta (MSR). Portanto, os resultados aqui apresentados podem servir de base para destacar a importância da utilização de técnicas de otimização experimental utilizadas no processo de eletrodeposição de revestimentos metálicos com propriedades controladas.

2. Metodologia

A pesquisa desenvolvida neste trabalho seguiu uma metodologia qualitativa e quantitativa, na qual foram observados os efeitos da densidade de corrente e da agitação mecânica na composição química da liga Zn-Ni, e na morfologia dos revestimentos obtidos. O tratamento dos dados experimentais confirma o método utilizado neste trabalho como sendo hipotético-dedutivo, o qual, inicia-se pela busca de preencher lacunas no conhecimento científico através de formação de hipóteses, as quais são testadas com a finalidade de explicar o fenômeno que se estuda (Pereira et al., 2018). O presente trabalho segue uma metodologia experimental para avaliar os efeitos das variáveis estudadas (densidade de corrente e agitação mecânica) nas propriedades de ligas de Zn-Ni. Para isso, um banho eletrolítico foi desenvolvido e, após obtidos os revestimentos, os materiais foram caracterizados.

O banho eletrolítico foi preparado utilizando reagentes com pureza analítica, sem posteriores etapas de purificação, dissolvidos em água deionizada. O banho eletrolítico utilizado na eletrodeposição da liga Zn-Ni foi constituído dos seguintes reagentes: sulfato de níquel (0,1 mol/L), sulfato de zinco (0,1 mol/L), sulfato de sódio (0,2 mol/L), citrato de sódio (0,2 mol/L) e ácido bórico (0,2 mol/L). O pH do banho foi mantido constante com valor igual a 7,0, ajustado adicionando-se hidróxido de sódio (concentrado) ou ácido sulfúrico (50 %, m/v).

O eletrodo de trabalho utilizado foram chapas de cobre (substrato), com área

superficial utilizada para deposição de 8 cm². O substrato foi inicialmente polido com lixas apresentando diferentes granulometrias: 400, 600 e 1200 mesh; e em seguida foi realizado um tratamento químico, onde o eletrodo foi lavado em solução diluída de hidróxido de sódio (NaOH, 10%) e de ácido sulfúrico (H₂SO₄, 1%) por 10 s em cada para remover possíveis contaminantes remanescentes do processo de polimento mecânico. Em seguida, o substrato foi lavado com água destilada por 10 s e secado em estufa à 70 °C por 15 min.

A eletrodeposição foi conduzida sob controle galvanostático em um sistema convencional de deposição de dois eletrodos, sendo o substrato retangular de cobre atuando como cátodo e um eletrodo cilíndrico de platina atuando como ânodo. Um potenciostato MQPG-01 da MicroQuímica foi utilizado no controle da densidade de corrente. Um eletrodo rotatório EG&G PARC 616 foi usado para o controle da rotação catódica do substrato. A eletrodeposição foi realizada à temperatura ambiente de 25 ± 2 °C.

Para a realização dos experimentos, um planejamento fatorial acoplado com a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) foi utilizado. Planejamentos fatoriais são ferramentas experimentais utilizadas na avaliação de duas variáveis ou mais em determinadas respostas. A principal vantagem dos planejamentos fatoriais é a diminuição da quantidade de experimentos quando comparados com métodos clássicos univariados (Santana et al., 2007). Entretanto, não é possível otimizar as variáveis do planejamento apenas com o planejamento fatorial. A MSR é um pacote de ferramentas estatísticas de otimização que, quando aplicada em conjunto com planejamentos fatoriais, fornece informações a respeito dos efeitos das variáveis não somente separadamente como também os efeitos sinérgicos entre as variáveis nas respostas analisadas. É possível ainda utilizar modelos que levem em consideração contribuições lineares e quadráticas das variáveis.

Para a realização dos experimentos, foi utilizado um planejamento fatorial completo 2² com 2 pontos centrais. Como forma de otimização das variáveis estudadas (densidade de corrente e agitação mecânica), foi utilizada a MSR. Todos os experimentos foram realizados em triplicata. Foi avaliada quantitativamente a influência das variáveis de entrada (densidade de corrente e agitação mecânica do banho eletrolítico) sobre a composição química e microdureza dos revestimentos, bem como suas possíveis interações, com a realização mínima do número de experimentos.

A Tabela 1 mostra as variáveis utilizadas no planejamento fatorial, suas codificações e os níveis reais para cada variável. As variáveis X₁ e X₂ do planejamento correspondem à densidade de corrente aplicada em mA/cm² e à agitação mecânica em rotações por minuto (rpm), respectivamente. Os níveis (-1), (0) e (+1) correspondem aos valores reais que cada

fator foi estudado. A codificação dos níveis dos fatores faz com que cada efeito corresponda “sempre à variação de duas unidades do fator correspondente [...]” e, “[...] consequentemente, os efeitos são a metade dos valores[...]” reais (Barros-Neto et al., 2010). Para o planejamento fatorial utilizado neste trabalho, considerou-se um modelo de primeira ordem, presente na equação 1. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software Statistica © versão 7.0.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (1)$$

Tabela1: Níveis reais e codificados das variáveis do planejamento fatorial 2², usado na deposição da liga Zn-Ni.

Variáveis de entrada	Nível (-1)	Nível (0)	Nível (+1)
X ₁ - Densidade de Corrente (mA/cm ²)	10	30	50
X ₂ - Agitação Mecânica (rpm)	30	50	70

Fonte: Autores.

Os ensaios de microdureza (na escala Vickers, HV) foram realizados com um microdurômetro digital FM-700 Future Tech. O estudo superficial dos revestimentos foi feito por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um microscópio eletrônico de varredura da Tescan, modelo VEGA3 SBH. A composição química das ligas depositadas foi determinada por energia dispersiva de raios-X (EDX), usando o EDX-720 da Shimadzu.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 2 mostra a matriz do planejamento fatorial e os resultados obtidos para composição química (em percentual atômico, at%) e microdureza (HV) da liga Zn-Ni.

Tabela 2: Matriz do planejamento fatorial 2² utilizado para deposição da liga Zn-Ni.

Exp.	(X ₁) Densidade de corrente (mA/cm ²)	(X ₂) Agitação mecânica (rpm)	Microdureza (HV)	Ni (at%)	Zn (at%)
1	-1	1	211	20	80
2	1	1	565	39	61
3	-1	-1	309	24	76
4	1	-1	546	36	64
5	0	0	508	33	67
6	0	0	508	34	66

Fonte: Autores.

Os resultados apresentados na Tabela 2 foram submetidos à análise estatística para fins de avaliação da significância de cada efeito estudado (densidade de corrente e agitação mecânica) nas respostas dos teores de Ni e Zn, e na microdureza. O teste de Fischer foi utilizado para este fim. Dados de Análise de Variância (ANOVA) estão presentes na Tabela 3 e na Tabela 4 para os teores de Ni e Zn, e para a microdureza, respectivamente. Os resultados obtidos foram ajustados a modelos de primeira ordem presentes nas equações 2, 3 e 4. Os ajustes obtidos consideraram um nível de confiança de 95% e os coeficientes de determinação (R²) para os teores de Ni e Zn nos revestimentos, e para a microdureza foram de 93% e 87%, respectivamente, o que mostra que os modelos obtidos são estatisticamente representativos.

$$\text{Ni (at.\%)} = 31 + 7,75X_1 - 0,25X_2 + 1,75X_1X_2 \quad (2)$$

$$\text{Zn (at.\%)} = 69 - 7,75X_1 + 0,25X_2 - 1,75X_1X_2 \quad (3)$$

$$\text{Microdureza (HV)} = 441,17 + 147,75X_1 - 19,75X_2 + 29,25X_1X_2 \quad (4)$$

Tabela 3: ANOVA das variáveis (X₁) densidade de corrente e (X₂) agitação mecânica com relação aos teores de Ni e Zn nos revestimentos obtidos.

Fatores	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrados Médios	Valor F	Valor p
X ₁	240,2500	1	240,2500	24,96104	0,037805
X ₂	0,2500	1	0,2500	0,02597	0,886772
X ₁ X ₂	12,2500	1	12,2500	1,27273	0,376390
Erro	19,2500	2	9,6250		
Total	272,0000	5			

Fonte: Autores.

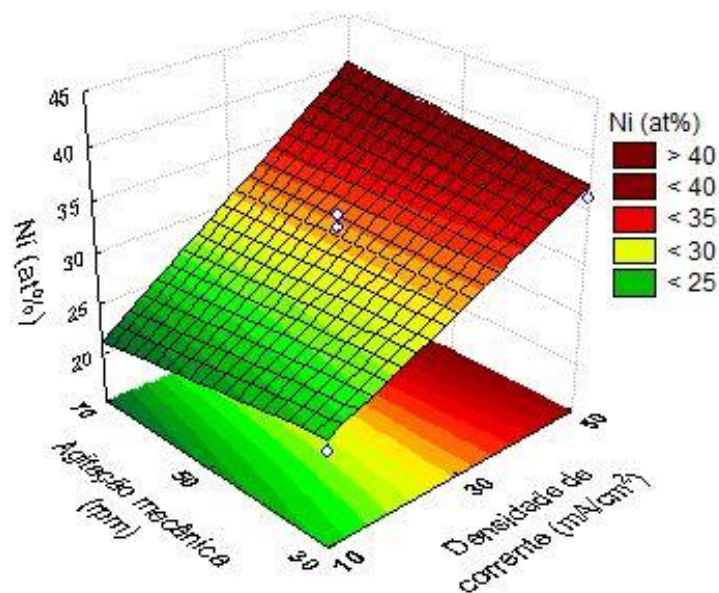
Tabela 4: ANOVA das variáveis (X_1) densidade de corrente e (X_2) agitação mecânica com relação à microdureza dos revestimentos obtidos

Fatores	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrados Médios	Valor F	Valor p
X_1	87320,3	1	87320,25	13,03279	0,068894
X_2	1560,2	1	1560,25	0,23287	0,677057
X_1X_2	3422,3	1	3422,25	0,51078	0,548962
Erro	13400,1	2	6700,04		
Total	105702,8	5			

Fonte: Autores.

Os resultados de composição química presentes na Tabela 2 comprovam a eletrodeposição da liga Zn-Ni em todas as condições experimentais avaliadas. A Figura 1 mostra a superfície de resposta referente à influência das variáveis, densidade de corrente e agitação mecânica, sobre os resultados de percentual atômico de níquel nos revestimentos obtidos.

Figura 1: Superfície de resposta da densidade de corrente vs. agitação mecânica tendo como resposta o percentual atômico de Ni.

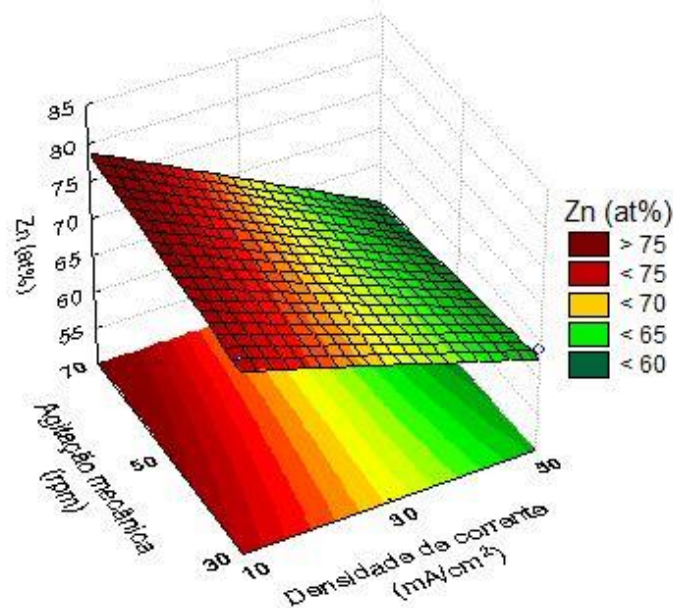


Fonte: Autores.

A Figura 1 mostra o comportamento do teor de Ni nos revestimentos em função da variação da densidade de corrente aplicada e da agitação mecânica do banho. É possível observar que o teor de Ni nos revestimentos aumentou significativamente com o aumento da densidade de corrente, enquanto não houve alterações expressivas com a variação da agitação do banho.

Observa-se que a variação da agitação mecânica do banho eletrolítico não apresentou influência significativa sobre os resultados de composição química de Ni (Fig. 1), confirmando os resultados de ANOVA presentes na Tabela 3. Já a variável densidade de corrente apresentou uma influência nos resultados de composição, sendo observado um aumento no percentual de níquel no depósito com o aumento da densidade de corrente utilizada no processo de deposição. O percentual atômico de Ni nos revestimentos variou na faixa de 20-39 %. Hegde et al., (2010), depositaram a liga Zi-Ni utilizando um banho ácido (pH 3,5) e avaliaram o efeito da densidade corrente sobre a composição química da liga. Os autores obtiveram um valor máximo de Ni de aproximadamente 22 % em peso, ou seja, um valor menor do que obtido neste trabalho. Resultados semelhantes para o aumento na deposição do Ni com o aumento da densidade de corrente foi encontrado na literatura (Feng et al., 2015). A Figura 2 mostra o efeito da densidade de corrente e da agitação mecânica no percentual atômico do Zn nos revestimentos.

Figura 2: Superfície de resposta da densidade de corrente vs. agitação mecânica tendo como resposta o percentual atômico de Zn.

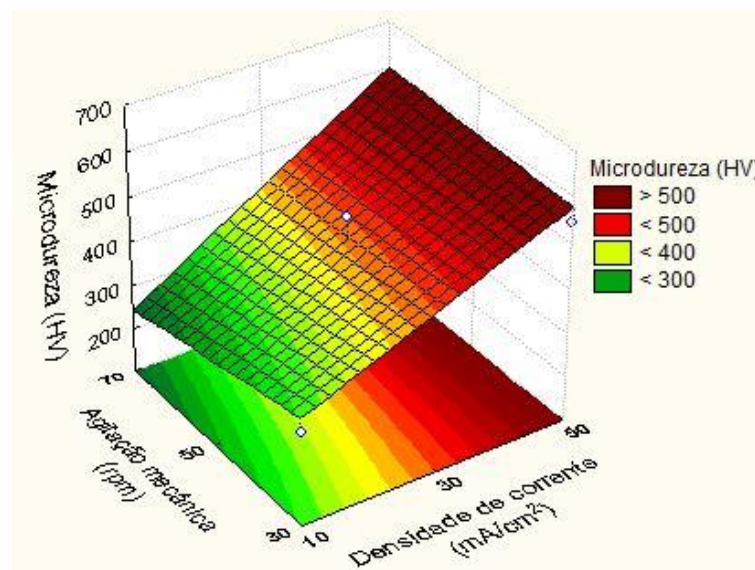


Fonte: Autores.

A Figura 2 mostra a variação do teor de Zn nos revestimentos em função da densidade de corrente aplicada e da agitação mecânica do banho. É possível observar mudanças significativas quando variada a densidade de corrente. De forma análoga ao que ocorreu com o Ni, também não houve influência significativa da agitação mecânica no teor de Zn, confirmando os resultados de ANOVA na Tabela 3. Ao contrário do que se observa com o teor de Ni, ao aumentar a densidade de corrente, o teor de Zn no revestimento diminui, visto que a liga é binária.

Observa-se um aumento no teor de Zn associado com a diminuição da densidade de corrente do processo de deposição, ou seja, em condições experimentais contrárias às observadas para favorecimento da deposição de Ni (Fig. 1). O percentual de Zn variou na faixa de 61-80 %, sendo, portanto, o zinco depositado em maior quantidade que o Ni em todas as condições experimentais avaliadas, confirmando o fenômeno de codeposição anômala para a liga de Zn-Ni, pois o metal menos nobre, zinco neste caso, depositou preferencialmente que o metal mais nobre, níquel (Assaf et al., 2015). A Figura 3 apresenta a superfície de resposta da variação da microdureza dos revestimentos em relação às variáveis densidade de corrente e agitação mecânica.

Figura 3: Superfície de resposta da densidade de corrente vs. agitação mecânica tendo como resposta a microdureza (HV) dos revestimentos.

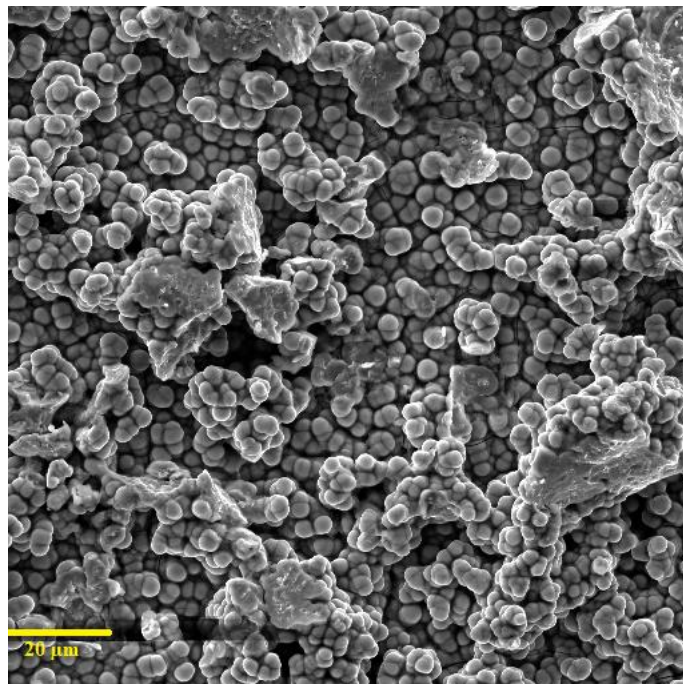


Fonte: Autores.

A Figura 3 mostra o comportamento da microdureza em função da densidade de corrente aplicada e da agitação mecânica do banho. É possível observar que não houve variações expressivas em função da agitação mecânica do banho. A densidade de corrente provocou variações significativas na microdureza dos revestimentos.

Observa-se que a microdureza aumentou com o aumento da densidade de corrente em toda faixa da variável agitação mecânica do banho eletrolítico. A microdureza variou na faixa de 211-565 HV. Este comportamento está relacionado com o aumento do percentual atômico de níquel no revestimento, pois estas também foram às condições experimentais que favoreceram a deposição do Ni (Fig. 1). Como o Ni possui maior microdureza do que o Zn, o seu valor percentual de composição na liga depositada pode ter influenciado no aumento da microdureza dos revestimentos. Comportamento semelhante foi relatado por Ghaziof & Gao (2014) em seu trabalho.

Figura 4: MEV da superfície da liga Zn-Ni.



Fonte: Autores.

A Figura 4 apresenta a imagem da superfície (MEV) da liga depositada que apresentou o maior valor de microdureza (Exp. 2). Observa-se que o revestimento apresentou nódulos com diferentes formatos e tamanhos com uma distribuição irregular. Resultados semelhantes para morfologias de ligas de Zn-Ni foram relatadas na literatura (Qiao et al., 2013). Não é possível identificar na imagem de MEV defeitos ou fissuras que possam atingir o substrato,

esse resultado pode influenciar nos resultados de resistência à corrosão e de resistência mecânica dos revestimentos (Assaf et al., 2015).

4. Considerações Finais

A liga Zn-Ni foi obtida com sucesso em todas as condições experimentais e foram aderentes ao substrato. Foi observado que o aumento da densidade de corrente favorece a deposição do níquel nos revestimentos. Já a diminuição da densidade de corrente favorece a deposição do zinco. A microdureza foi influenciada pelo aumento do percentual de níquel na liga, alcançando uma microdureza de até 560 HV. Os revestimentos apresentaram nódulos na superfície de diferentes tamanhos e formas. Portanto, nota-se a importância da utilização de técnicas de otimização experimental para obtenção de revestimentos metálicos, com propriedades controladas para aplicações específicas, por eletrodeposição. Investigações futuras irão focar na avaliação da resistência à corrosão da liga Zn-Ni em ambientes agressivos contendo íons cloreto (NaCl).

Além das variáveis estudadas nesse trabalho, existem outros fatores que influenciam na eletrodeposição de ligas de Zn-Ni. As principais variáveis operacionais são temperatura, agitação, densidade de corrente e pH. A temperatura e o pH também influenciam significativamente nas propriedades químicas e mecânicas das ligas de Zn-Ni. Portanto, sugerimos investigações de como a temperatura e o pH do banho podem modificar as propriedades dessas ligas.

Agradecimentos

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

Referências

Abou-Krishna, M. M., Rageh, H. M., & Matter, E. (2008). Electrochemical studies on the electrodeposited Zn-Ni-Co ternary alloy in different media. *Surface and Coatings Technology*, 202, 3739–3746.

Abou-Krishna, M. M. (2011). Influence of Ni²⁺ concentration and deposition potential on the

characterization of thin electrodeposited Zn-Ni-Co coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 125(3), 621–627.

Albalat, R., Gómez, E., Müller, C., Sarret, M., Vallés, E., & Pregonas, J. (1990). Electrodeposition of zinc-nickel alloy coatings: influence of a phenolic derivative. *Journal of Applied Electrochemistry*, 20, 635–639.

Assaf, F. H., El-Seidy, A. M. A., Abou-Krishal, M. M., & Eissa, A. A. (2015). Electrodeposition and Characterization of Zn-Ni-Mn Alloy from Sulfate Bath: Influence of Current Density. *International Journal of Electrochemical Science*, 10, 5465-5478.

Barros-Neto, B., Scarminio, I. E., & BRUNS, R. (2010). Como fazer experimentos: aplicações na ciência e na indústria. 4th.

Beltowska-Lehman, E., Ozga, P., Swiatek, Z., & Lupi, C. (2002). Electrodeposition of Zn-Ni protective coatings from sulfate-acetate baths. *Surface and Coatings Technology*, 151–152, 444–448.

Brenner, A. (1963). *Electrodeposition of Alloys* (vol. I). New York: Academic Press.

Burkert, J. F. M., Maugeri, F., & Rodrigues, M. I. (2004). Optimization of extracellular lipase production by *Geotrichum* sp. using factorial design. *Bioresource Technology*, 91, 77–84.

Chang, L. M., Chen, D., Liu, J. H., & Zhang, R. J. (2009). Effects of different plating modes on microstructure and corrosion resistance of Zn-Ni alloy coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 479, 489–493.

Cojocar, P., Magagnin, L., Gómez, E., & Vallés, E. (2010). Electrodeposition of CoNi and CoNiP alloys in sulphamate electrolytes. *Journal of Alloys and Compounds*, 503(2), 454–459.

Conde, A. A., M. A., & de Damborenea, J. J. (2011). Electrodeposition of Zn-Ni coatings as Cd replacement for corrosion protection of high strength steel. *Corrosion Science*, 53(4), 1489–1497.

Costa, J D, de Sousa, M. B., Alves, J. J. N., Evaristo, B. O., Queiroga, R. A., dos Santos, A. X., Prasad, S. (2018). Effect of electrochemical bath composition on the preparation of Ni-W-Fe-P amorphous alloy. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(3), 2969–2985.

Costa, J. D., de Sousa, M. B., Lia Fook, N. C. M., Alves, J. J. N., de Araújo, C. J., Prasad, S., de Santana, R. A. C. (2016). Obtaining and characterization of Ni-Ti/Ti-Mo joints welded by TIG process. *Vacuum*, 133, 58–69.

Santos, A. X., Maciel, T. M., & de Santana, R. A. C. (2015). Avaliação de revestimentos a base de Inconel 625 depositados através do processo de soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando planejamento fatorial. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, 34(3), 128–140.

Dubent, S., Mertens, M. L. a D., & Saurat, M. (2010). Electrodeposition, characterization and corrosion behaviour of tin-20 wt.% zinc coatings electroplated from a non-cyanide alkaline bath. *Materials Chemistry and Physics*, 120(2–3), 371–380.

Feng, Z., Li, Q., Zhang, J., Yang, P., Song, H., & An, M. (2015). Electrodeposition of nanocrystalline Zn–Ni coatings with single gamma phase from an alkaline bath. *Surface and Coatings Technology*, 270, 47–56.

Gavrila, M., Millet, J. P., Mazille, H., Marchandise, D., & Cuntz, J. M. (2000). Corrosion behaviour of zinc-nickel coatings, electrodeposited on steel. *Surface and Coatings Technology*, 123, 164–172.

Gentil, V. (2011). *Corrosão* (ed. 6). Rio de Janeiro: LTC.

Gharahcheshmeh, M. H., & Sohi, M. H. (2009). Study of the corrosion behavior of zinc and Zn-Co alloy electrodeposits obtained from alkaline bath using direct current. *Materials Chemistry and Physics*, 117, 414–421.

Ghaziof, S., & Gao, W. (2014). Electrodeposition of single gamma phased Zn–Ni alloy coatings from additive-free acidic bath. *Applied Surface Science*, 311, 635–642.

Hamid, Z. A. (2001). Thermodynamic parameters of electrodeposition of Zn-Co-TiO composite coatings. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 48, 235–241.

Hammami, O., Dhouibi, L., & Triki, E. (2009). Influence of Zn-Ni alloy electrodeposition techniques on the coating corrosion behaviour in chloride solution. *Surface and Coatings Technology*, 203(19), 2863–2870.

Hegde, A. C., Venkatakrishna, K., & Eliaz, N. (2010). Electrodeposition of Zn–Ni, Zn–Fe and Zn–Ni–Fe alloys. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 2031–2041.

Jeong, S. S., Mittiga, A., Salza, E., Masci, A., & Passerini, S. (2008). Electrodeposited ZnO/Cu₂O heterojunction solar cells. *Electrochimica Acta*, 53, 2226–2231.

Lin, Z. F., Li, X. B., & Xu, L. K. (2012). Electrodeposition and corrosion behavior of zinc-nickel films obtained from acid solutions: Effects of teos as additive. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 12507–12517.

Lodhi, Z. F., Mol, J. M. C., Hovestad, A., Terryn, H., & de Wit, J. H. W. (2007). Electrodeposition of Zn-Co and Zn-Co-Fe alloys from acidic chloride electrolytes. *Surface and Coatings Technology*, 202, 84–90.

López, R. (1999). Magnetic study of electrodeposited Cu₂Co heterogeneous alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 196–197, 53–55.

Maciej, A., Nawrat, G., Simka, W., & Piotrowski, J. (2012). Formation of compositionally modulated Zn-Ni alloy coatings on steel. *Materials Chemistry and Physics*, 132(2–3), 1095–1102.

Oliveira, A. L. M., Costa, J. D., de Sousa, M. B., Alves, J. J. N., Campos, A. R. N., Santana, R. A. C., & Prasad, S. (2015). Studies on electrodeposition and characterization of the Ni–W–Fe alloys coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 619, 697–703.

Ortiz-Aparicio, J. L., Meas, Y., Trejo, G., Ortega, R., Chapman, T. W., Chainet, E., & Ozil, P. (2007). Electrodeposition of zinc-cobalt alloy from a complexing alkaline glycinate bath.

Electrochimica Acta, 52, 4742–4751.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica [e-book].

Pushpavanam, M., Natarajan, S. R., Balakrishnan, K., & Sharma, L. R. (1991). Corrosion behaviour of electrodeposited zinc-nickel alloys. *Journal of Applied Electrochemistry*, 21, 642–645.

Qiao, X., Li, H., Zhao, W. & Li, D. (2013). Effects of deposition temperature on electrodeposition of zinc–nickel alloy coatings. *Electrochimica Acta*, 89, 771-777.

Rahman, M. J., Sen, S. R., Moniruzzaman, M., & Shorowordi, K. M. (2009). Morphology and Properties of Electrodeposited Zn-Ni Alloy Coatings on Mild Steel. *Journal of Mechanical Engineering*, 40(1).

Rao, K. M., & Subbarao, G. V. R. (2012). Optimum fly ash for mechanical stabilization of expansive soils using 2 2 factorial experimental design. *Natural Hazards*, 60, 703–713.

Santana, R. A. C, Prasad, S., Campos, A. R. N., Araújo, F. O., Da Silva, G. P., & De Lima-Neto, P. (2006). Electrodeposition and corrosion behaviour of a Ni-W-B amorphous alloy. *Journal of Applied Electrochemistry*, 36, 105–113.

Santana, R. A. C., Prasad, S., Moura, E. S., Campos, A. R. N., Silva, G. P., & Lima-Neto, P. (2007). Studies on electrodeposition of corrosion resistant Ni-Fe-Mo alloy. *Journal of Materials Science*, 42, 2290–2296.

Santos, A. X., Maciel, T. M., Costa, J. D., Sousa, M. B. de, Prasad, S., Campos, A. R. N., & Santana, R. A. C. de. (2019). Study on influence of the PTA-P welding process parameters on corrosion behavior of Inconel 625 coatings. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(1).

Soares, B. L. S., de Farias Ferreira, B. C., dos Santos, A. X., Maciel, T. M., & de Santana, R. A. C. (2020). Influência da corrente e taxa de alimentação na resistência à corrosão de revestimentos à base da liga Inconel 625 depositada por PTA-P. *Revista Brasileira de*

Aplicações de Vácuo, 39(1), 56–66.

Soares, M. E., Souza, C. A. C., & Kuri, S. E. (2006). Corrosion resistance of a Zn-Ni electrodeposited alloy obtained with a controlled electrolyte flow and gelatin additive. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 2953–2959.

Srivastava, M., Ezhil Selvi, V., William Grips, V. K., & Rajam, K. S. (2006). Corrosion resistance and microstructure of electrodeposited nickel–cobalt alloy coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3051–3060.

Swathirajan, S. (1987). Electrodeposition of zinc + Nickel alloy phases and electrochemical stripping studies of the anomalous codeposition of zinc. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 221, 211–228.

Waalkes, M. P. (2003). Cadmium carcinogenesis. *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 533(1–2), 107–120.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Josiane Dantas Costa – 50%

José Anderson Machado Oliveira – 10%

Alison Silva Oliveira – 4%

Anamélia de Medeiros Dantas Raulino – 4%

José Leonardo Costa Raulino – 4%

Arthur Filgueira de Almeida – 10%

Ana Regina Nascimento Campos – 6%

Renato Alexandre Costa de Santana – 12%