

Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ELETRODEPOSIÇÃO DE COBRE SEM CIANETO UTILIZANDO GLICEROL: MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO

Cyanide-free copper electrodeposition using glycerol: Modeling and optimization

Electrodeposición de cobre sin cianuro utilizando glicerol: modelado y optimización

Lucas Franklin de Lima ¹, Ila Gabriele Diniz Dias de Azevedo ², Karen Giovanna Duarte Magalhães ³, André Anderson Costa Pereira ⁴, Carlson Pereira de Souza ⁵, & Raffael Andrade Costa de Melo ⁶

^{1 2 3 4 5 6} Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química

¹ lucasfranklin.022@gmail.com ² ila.azevedo.079@ufrn.edu.br ³ kgdm.engenharia@gmail.com

⁴ andre_antsu@yahoo.com.br ⁵ carlonsouza@gmail.com ⁶ raffael_melo_2@hotmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 27.05.2025

Aprovado: 29.08.2025

Disponibilizado: 21.10.2025

PALAVRAS-CHAVE: eletrodeposição de cobre, otimização, banho eletrolítico, glicerol, planejamento experimental;

KEYWORDS: Copper electrodeposition, optimization, electrolytic bath, glycerol, experimental design.

PALABRAS CLAVE: Electrodeposición de cobre, optimización, baño electrolítico, glicerol, diseño experimental

*Autor Correspondente: Lima, L. F. de.

RESUMO

A eletrodeposição do cobre em substrato de ligas de Cu-Zn (latão) é feita, normalmente, através de banhos de alcalinos cianídricos. No entanto, os banhos de cobre cianídricos são tóxicos, exigindo determinados cuidados. Esse trabalho estuda a modelagem e otimização da eletrodeposição do cobre em latão a partir de banho eletrolítico contendo glicerol isentos de cianeto. Um planejamento experimental composto central foi executado para avaliar os efeitos dos fatores concentração de glicerol, tempo e amperagem tendo como resposta a eficiência de corrente catódica. Os resultados apontaram que o modelo estimado é preditivo (R^2 igual a 0,9279), sendo significativos os efeitos dos termos linear e quadrático da amperagem, linear da concentração de glicerol e os efeitos das suas interações. O melhor ensaio resultou numa eficiência de corrente catódica de 57% e em um consumo energético de 234,40 kWh/kg que representou a maior deposição de cobre e o menor consumo de energia.

ABSTRACT

The electrodeposition of copper on a Cu-Zn alloy substrate (brass) is normally carried out using alkaline hydrocyanic baths. However, cyanide copper baths are toxic and require certain care. This work studies the modeling and optimization of copper electrodeposition on brass using an electrolytic bath containing cyanide-free glycerol. A central composite experimental design was carried out to evaluate the effects of the factor's glycerol concentration, time and amperage in response to cathodic current efficiency. The results showed that the estimated model is predictive (R^2 equal to 0.9279), with the effects of the linear and quadratic terms of amperage, linear terms of glycerol concentration and the effects of their interactions being significant. The best test resulted in a cathodic current efficiency of 57% and an energy consumption of 234.40 kWh/kg, which represented the highest copper deposition and the lowest energy consumption.

RESUMEN

La electrodeposición de cobre sobre un sustrato de aleación Cu-Zn (latón) se realiza normalmente utilizando baños alcalinos de cianuro. Sin embargo, los baños de cobre cianurados son tóxicos y requieren ciertos cuidados. Este trabajo estudia la modelación y optimización de la electrodeposición de cobre sobre latón utilizando un baño electrolítico que contiene glicerol libre de cianuro. Se llevó a cabo un diseño experimental compuesto central para evaluar los efectos de los factores: concentración de glicerol, tiempo y amperaje, en respuesta a la eficiencia de corriente catódica. Los resultados mostraron que el modelo estimado es predictivo (R^2 igual a 0.9279), siendo significativos los efectos de los términos lineales y cuadráticos del amperaje, los términos lineales de la concentración de glicerol y los efectos de sus interacciones. La mejor prueba resultó en una eficiencia de corriente catódica del 57% y un consumo de energía de 234.40 kWh/kg, lo que representó la mayor deposición de cobre y el menor consumo energético.

INTRODUÇÃO

O uso de métodos eletroquímicos para formação de materiais voltou a ganhar interesse científico nas últimas décadas, por serem econômicos, facilmente escaláveis e conduzir maior controle sobre o procedimento (Brudzisz et al., 2023). A galvanoplastia assume papel de destaque devido ao vasto número de produtos que demandam um revestimento metálico em sua superfície. A cobertura metálica por galvanização eletroquímica ou eletrodeposição, garante uma maior resistência mecânica, maior condutibilidade elétrica e proteção contra a corrosão, e fins estéticos (Sillos, 2009; Pirošková et al., 2012).

O processo de eletrodeposição envolve diversas variáveis tais como temperatura, agitação, concentração dos componentes do banho, tempo e densidade de corrente. O uso de aditivos ocorre para tratar os eventuais problemas na indústria galvânica, como o ajuste do brilho, nivelamento da superfície eletrodepositada e melhor deposição da camada de metal (Pasquale, Gassa & Arvia, 2008). Assim, a utilização de componentes que aumentam a eficiência de deposição e a resistência à corrosão tem atraído crescente interesse.

O cobre foi um dos primeiros metais a ser manipulado pelo homem, especialmente por ser encontrado na natureza em sua forma elementar (King, 2005). Esse metal de transição é um dos mais importantes na indústria, sendo dúctil, maleável e bom condutor de eletricidade, tornando-o promissor para a eletrodeposição. O cobre é comumente utilizado como revestimento em substratos em inúmeras aplicações de engenharia, que exigem uma gama de propriedades mecânicas e físicas (Dini & Snyder, 2010).

Por sua vez, o latão é uma liga metálica versátil, constituída por cobre (50 até 95 %) e zinco (50 a 5%), utilizado por diversos segmentos industriais devido às suas excelentes propriedades mecânicas, resistência à corrosão e condutividade elétrica e térmica (Castro, 2008; Fernández; Alvarez, 2011; Ravindranath, Tanoli & Gopal, 2012). Existem muitas aplicações para o latão, incluindo a construção naval e marítima (Michel et al., 2017), trocadores de calor (Shabtay, Ainali & Lea, 2004), células fotovoltaicas (Hoang et al., 2020), membranas separadoras de água e óleo e pneus (Bakhtiari et al., 2021), substrato na galvanoplastia entre outras.

A eletrodeposição de cobre e suas ligas a partir de eletrólitos alcalinos de cianeto tem sido amplamente utilizada para a produção industrial de revestimentos de depósitos de boa qualidade (Sekar, 2017). Apesar das excelentes propriedades, a utilização de cianetos não é desejável por questões ambientais, e aspectos de segurança. Possuindo elevada toxicidade, o descarte no meio ambiente de efluentes contendo esta substância pode gerar impactos significativos, como alteração ou deterioração da qualidade dos corpos hídricos. A exposição aguda ao cianeto pode resultar em sintomas clínicos graves, podendo levar até mesmo à morte. Colapso repentino, convulsões, coma e comprometimento cardiopulmonar são características de uma intoxicação grave. Ao penetrar na célula, tem a capacidade de interromper a cadeia respiratória ao bloquear a enzima citocromo oxidase, resultando em anóxia celular (Hodgson, 2004; Lavon & Bentur, 2010).

Por consequência, a remoção de cianetos em banhos alcalinos tem sido incentivada. Agentes complexantes são utilizados com a função de estabilizar os íons em solução e evitar a redução espontânea desses sobre o substrato, provocando depósitos de cobre com pouca aderência (Cunha et al., 2014).

O glicerol é uma molécula orgânica de função álcool. Em sua estrutura molecular os átomos de carbono formam ligações com grupos hidroxila. Estudos recentes concluíram que a presença de elétrons livres na hidroxila permite a adsorção do glicerol em substratos como zinco (Almeida et al., 2019) contribuindo também na resistência à corrosão (Almeida et al., 2019; Costa et al., 2022). O uso desse composto como aditivo em banhos galvânicos promove o aumento significativo na eficiência de deposição e resistência à corrosão, em virtude do potencial para formar um complexo metal-glicerol (Carlos et al., 2001). Estes compostos apresentam características abrillantadoras e niveladoras, ou seja, impedem o desenvolvimento de dendritos durante a eletrodeposição.

Dessa forma, a utilização de aditivos orgânicos, como o glicerol, que é um subproduto renovável do biodiesel, deve ser avaliada como uma possível alternativa de substituição gradativa dos banhos de eletrodeposição de cobre com cianeto. Diante disso, o objetivo deste trabalho é estudar a influência do glicerol atuando como aditivo em banhos eletrolíticos isentos de cianeto sobre a eletrodeposição do cobre em substrato de latão. Os efeitos da dosagem de glicerol, amperagem e tempo foram avaliados em planejamento experimental e o modelo polinomial obtido foi usado para otimização.

METODOLOGIA

MATERIAIS

Para a preparação do substrato, nas etapas de pré-tratamento, foram utilizados óxido de cálcio (CaO) PA ACS 95% da marca Dinâmica e ácido sulfúrico (H_2SO_4) PA ACS 95-98%.

No sistema eletroquímico de deposição metálica, utilizou-se um eletrodo de cobre fosforoso com pureza de 99,65% de 60 cm² de área. As placas de latão, com espessura média de 1 mm e dimensões de 10 x 6 cm, serviram como substrato para a deposição.

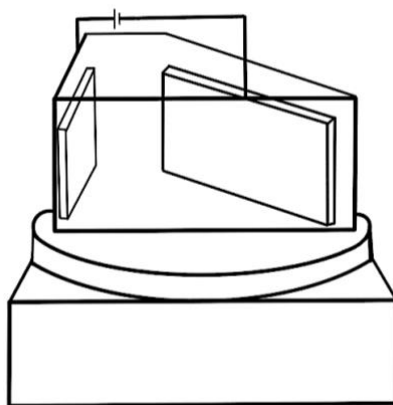
A solução eletrolítica foi formulada sem a utilização de cianeto. Foram utilizados sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) PA ACS da marca Synth, sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4), hidróxido de sódio (NaOH) MICROPEROLA PA ACS da marca Dinâmica e glicerina 99,5% PA ($C_3H_8O_3$) da marca Sciavicco.

ELETRODEPOSIÇÃO DO COBRE

A primeira etapa envolve o pré-tratamento da superfície do substrato, que consiste em desengraxe e decapagem, visando melhorar a aderência do revestimento metálico. O desengraxe foi realizado por fricção, utilizando uma solução de 3:1 de CaO e água destilada por 10 minutos. Em seguida, a decapagem foi efetuada por imersão das placas em uma solução de 5% de ácido sulfúrico durante 1 minuto.

O banho eletrolítico de cobre foi preparado a partir de NaOH, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $C_3H_8O_2$ e Na_2SO_4 , em proporções mássicas de 16%, 8%, 0,33% e 5%, respectivamente. Após a dissolução plena dos componentes, a mistura foi incubada até 70 °C. O aquecimento foi cessado mediante a mudança de cor da solução de azul para preto, indicando a formação do complexo de cobre de interesse para a eletrodeposição.

Os ensaios de eletrodeposição do cobre foram realizados em uma célula de Hull (267 mL) utilizando um eletrodo de cobre fosforoso como ânodo, uma placa de latão como cátodo, fonte de alimentação de corrente contínua, operando em modo galvanostático e um sistema de agitação magnética (Figura 1).

Figura 1. Esquema do sistema de eletrodeposição de cobre em célula de Hull

Fonte: Autores (2025).

O banho eletrolítico foi submetido a um aquecimento de 70°C antes da eletrodeposição. As placas de latão foram pesadas antes e depois dos ensaios de eletrodeposição a fim de determinar a massa de cobre aderida na superfície delas, e assim avaliar o rendimento do processo. Assim, foi refeita a metodologia para um ensaio adicional de eletrodeposição de cobre utilizando um banho eletrolítico contendo cianeto na composição com objetivo de comparar os resultados obtidos com outra tecnologia de revestimento de cobre. A solução aquosa foi preparada a partir de 75 g/L de cianeto de cobre, fornecendo íons de cobre dissociados no banho, 127 g/L de cianeto de potássio na forma livre e combinada, essencial para complexar o cianeto de cobre, e 10 g/L litro de hidróxido de potássio, a fim de ajustar e manter a estabilidade do pH da solução.

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de eletrodeposição foram realizados variando os níveis de concentração de glicerol do banho (X_1), amperagem (X_2) e tempo (X_3), seguindo o delineamento de um planejamento experimental de superfície de resposta do tipo composto central 2^3 , com o intuito de modelar e otimizar o processo de interesse. A eficiência da corrente catódica foi obtida como variável resposta (Tabela 1).

Tabela 1. Níveis dos fatores do planejamento experimental (centrais, fatoriais e axiais)

Fator	Símbolo	Níveis				
		-1,68	-1	0	+1	+1,68
Glicerol (g)	X_1	0,50	1,41	2,75	4,09	5,00
Amperagem (A)	X_2	0,5	0,7	1	1,3	1,5
Tempo (min.)	X_3	10	14	20	26	30

No total foram realizados 18 experimentos, sendo 8 pontos fatoriais, 6 pontos axiais e 4 repetições nos pontos centrais. A concentração de glicerol variou de 0,50 g (mínimo) até 5,00 g (máximo). A amperagem variou de 0,5 A (mínimo) até 1,5 A (máxima). O tempo variou de 10 minutos (mínimo) até 30 minutos (máximo). A escolha dos fatores e dos níveis foram definidos considerando os principais parâmetros e intervalos de valores observados na literatura (Sillos, 2009; Barbosa et al., 2022).

EFICIÊNCIA DE CORRENTE CATÓDICA (ECC)

A eficiência de corrente catódica (ECC) foi definida como a resposta de interesse para avaliar o rendimento da eletrodeposição de cobre e, consequentemente, modelar e otimizar o processo. Essa grandeza mede o aproveitamento da conversão de corrente elétrica em depósito metálico e foi calculada pela equação (1).

$$ECC = \frac{\Delta m}{E_{Cu} \cdot I_c \cdot t} \quad (1)$$

Onde: ECC é a eficiência de corrente catódica (%), Δm é variação de massa de cobre depositada na placa de latão (g), E_{Cu} é o equivalente eletroquímico do cobre (2,372 g/A.h), I_c é a de corrente elétrica (A) e t o tempo (h).

Além disso, o consumo de energia elétrica foi determinado com o intuito de ser o segundo indicador de desempenho do processo. Essa medida foi calculada pela equação (2).

$$CEE = \frac{2,778 \times 10^{-4} \cdot V \cdot I \cdot \Delta t}{\Delta m} = \frac{84,361 \cdot V}{ECC} \quad (2)$$

Onde: CEE é o consumo de corrente específico (kW.h/kg), e V é a diferença de potencial elétrico (V) e ECC é a eficiência de corrente catódica (%).

MODELAGEM DO PROCESSO

Um modelo quadrático, expresso genericamente pela equação (3), foi ajustado por meio da regressão multivariável dos dados experimentais. Este descreve a influência dos efeitos lineares, quadráticos e da interação da concentração de glicerol, amperagem e tempo sobre a eficiência de corrente catódica.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} \cdot X_i \cdot X_j \quad (3)$$

Onde: Y é a variável dependente (resposta), X_i e X_j são as variáveis independentes (fatores) e β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} são os coeficientes linear, quadrático e de interação das variáveis independentes.

A medida da qualidade do ajuste do modelo foi avaliada por meio dos coeficientes de determinação (R^2) e pela análise de variância a partir dos resíduos e do erro puro para determinar se ele é significativo e preditivo para um intervalo de confiança de 95%.

Por fim, o processo foi otimizado pela análise dos gráficos de superfície de resposta e curvatura de contorno do modelo que permite determinar os níveis ótimos dos fatores com base na observação da resposta de interesse. Sendo que toda a modelagem e otimização do processo de eletrodeposição de cobre foi realizada com auxílio do *software Statistica 7.0*.

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV-EDS)

A fim de caracterizar a camada de cobre depositada sobre o substrato de latão, ensaios de microscopia eletrônica de varredura de alta resolução (MEV-FEG) acoplado com um espectrofotômetro de energia dispersiva (EDS) foram realizados. Placas sem eletrodeposição, com eletrodeposição através do banho eletrolítico de glicerol, que resultou na maior eficiência de corrente catódica, e a placa cobreada em banho de cianeto, foram analisadas. O equipamento utilizado na análise é da marca FESEM (Auriga, Carl Zeiss, USA), modelo Supra 35-VP equipado com um detector EDS da Bruker (XFlash 410-M).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MODELAGEM ESTATÍSTICA DA ELETRODEPOSIÇÃO DO COBRE

O planejamento de experimentos foi aplicado para avaliar os efeitos dos parâmetros na eficiência de corrente catódica (ECC). Este método estatístico é útil para avaliar a interação entre os fatores, assim como, reduzir o número de experimentos, contendo custos e tempo (Tabela 2).

Tabela 2. Matriz resposta do planejamento experimental

Exp.	Fatores			Respostas	
	Glicerol (g)	Amperagem (A)	Tempo (min.)	Δm (g)	CCE (%)
1	1,41	0,7	14	0,040	10
2	1,41	0,7	26	0,245	34
3	1,41	1,3	14	0,035	5
4	1,41	1,3	26	0,172	13
5	4,09	0,7	14	0,223	57
6	4,09	0,7	26	0,395	55
7	4,09	1,3	14	0,294	41
8	4,09	1,3	26	0,256	19
9	0,50	1,0	20	0,120	15
10	5,00	1,0	20	0,252	32
11	2,75	0,5	20	0,219	55
12	2,75	1,5	20	0,171	14
13	2,75	1,0	10	0,095	24
14	2,75	1,0	30	0,294	25
15	2,75	1,0	20	0,160	20
16	2,75	1,0	20	0,126	16
17	2,75	1,0	20	0,189	18
18	2,75	1,0	20	0,125	24

A eficiência de corrente catódica é uma função entre a variação de massa de cobre depositada, o tempo e corrente elétrica, entretanto o máximo de massa depositada não significa uma maior CCE. É verificado que a maior massa depositada foi de 0,395 g, resultando em 55% de eficiência de corrente catódica, porém a maior CCE (57%) foi obtida com apenas 0,223 de massa de cobre depositada, onde o tempo foi o fator determinante para esse resultado. Este ensaio também apresentou o menor consumo energético, 234,40 KWh/Kg. Experimentos comparativos com cianeto foram realizados, com amperagem igual a 1, a eficiência de corrente catódica foi de 32%, consideravelmente menor do que a do glicerol, e ainda nociva. A partir da matriz resposta foi gerada uma tabela ANOVA para determinar quais os fatores que realmente apresentaram efeito significativo sobre a variável resposta estudada (CCE) (Tabela 3).

Tabela 3. Apresentação estatística para o resumo do modelo (ANOVA)

Factor	SS	DF	MS	F	p
Model	4038,81	9	448,76	11,444	< 0,001
Glycerol [g] (L)	1406,44	1	1406,44	35,868	< 0,001
Glycerol [g] (Q)	35,81	1	35,81	0,913	0,367
Amperage [A] (L)	1581,28	1	1581,28	40,327	< 0,001
Amperage [A] (Q)	393,12	1	393,12	10,025	0,013
Time [min] (L)	6,89	1	6,89	0,176	0,686
Time [min] (Q)	53,02	1	53,02	1,352	0,278
Glycerol [g] x Amperage [A]	84,50	1	84,50	2,156	0,180
Glycerol [g] x Time [min]	392,00	1	392,00	9,997	0,013
Amperage [A] x Time [min]	162,00	1	162,00	4,131	0,076
Residual	313,69	8	39,21		
Lack of Fit	278,69	5	55,73	4,77	0,114
Pure Error	35,00	3	11,66		
Total SS	4352,50	17			

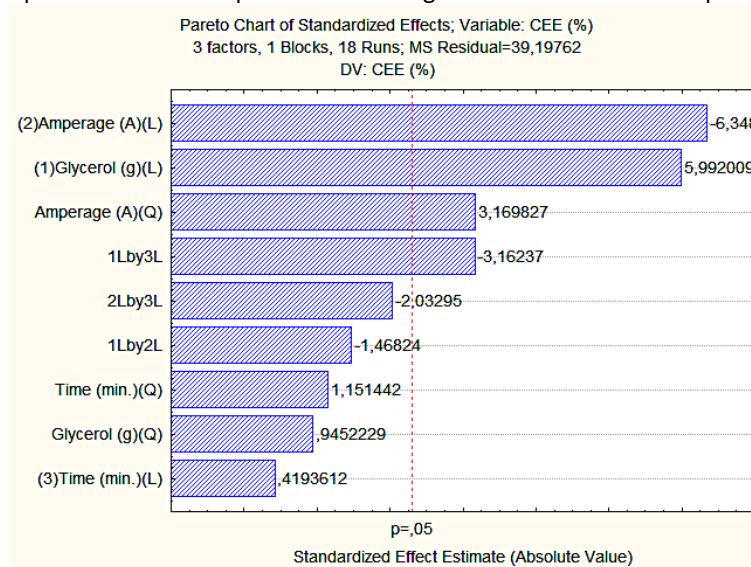
*Os símbolos L e Q referem-se à forma linear e quadrática das variáveis, respectivamente.

Através da análise da Tabela 3, a eficiência de corrente catódica foi afetada significativamente pelo glicerol de forma linear, amperagem, linear e quadraticamente e pela interação do glicerol com o tempo e da amperagem com o tempo, dentro de um intervalo de confiança de 95%. O coeficiente de determinação (R^2) apresentou o valor de 0,9279, está em concordância

considerável com R^2 ajustado de 0,84685, mostrando uma diferença inferior a 0,2, de forma que o modelo quadrático aplicado é o mais adequado (Haider, Ani & Mahmood, 2017).

O gráfico de pareto (Figura 2) aborda o nível de significância. A análise do gráfico permite perceber de forma visual, quais os fatores mais significativos, assim como as prioridades dos impactos das variáveis na resposta. Sendo a amperagem, a variável com maior impacto, pois atua de forma linear (L) e quadrática (Q) sobre o modelo. Os fatores com valor de p inferior a 0,05 são tidos como não significativos.

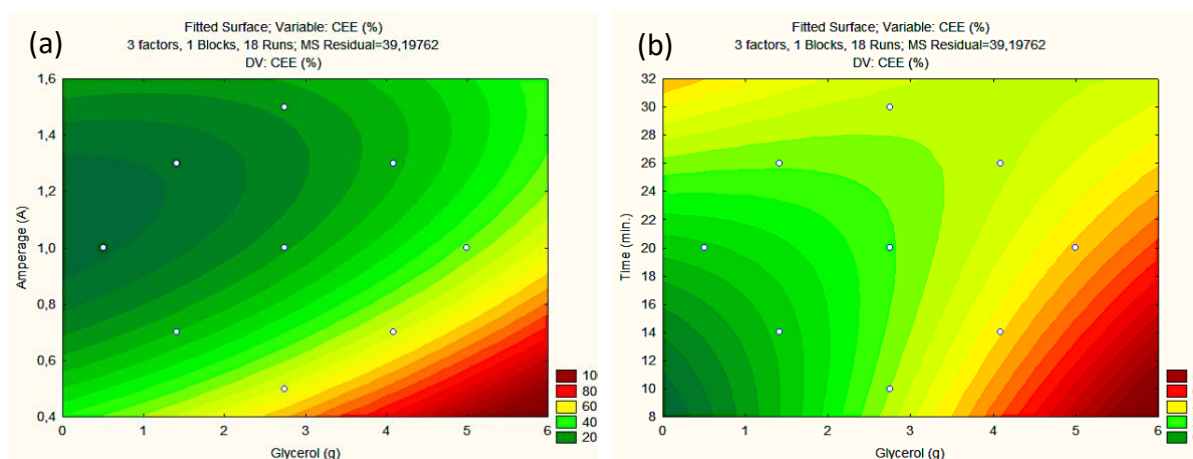
Figura 2. Gráfico de pareto com efeitos padronizados e significância estatística dos parâmetros do processo



Fonte: Autores (2025).

Devido aos fenômenos complexos que atuam dentro do processo de eletrodeposição, a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) pode ser adotada com sucesso para modelar o processo (Di Siena et al., 2023). Gráficos de superfícies de resposta e de contorno (Figura 3) foram plotados, avaliando o impacto do glicerol e da amperagem, fatores significativos, na eficiência de corrente catódica.

Figura 3. Gráficos de superfície de resposta (a) da amperagem e a quantidade glicerol; (b) do tempo e a quantidade glicerol



Fonte: Autores (2025).

A superfície de resposta apresenta uma curvatura considerável para menor amperagem e maior quantidade de glicerol, promovendo uma maior eficiência de corrente catódica, e comprovando que esses fatores são os mais determinantes dentro do processo de eletrodeposição do cobre, sendo observado da mesma forma na superfície de contorno.

A partir da regressão da superfície de resposta é possível determinar os respectivos coeficientes para os fatores e equacionar o modelo matemático codificado para determinar a eficiência de corrente catódica com os valores mássicos de glicerol (g), da amperagem (A) e tempo (min.), o que resultou na equação (4), em um $R^2 = 0,9279$.

$$\text{CCE (\%)} = 4,701 + 28,030 X_1 + 0,939 X_1^2 - 89,310 X_2 + 63,020 X_2^2 + 2,732 X_3 + 0,057 X_3^2 - 8,171 X_1 X_2 - 0,873 X_1 X_3 - 2,522 X_2 X_3 \quad (4)$$

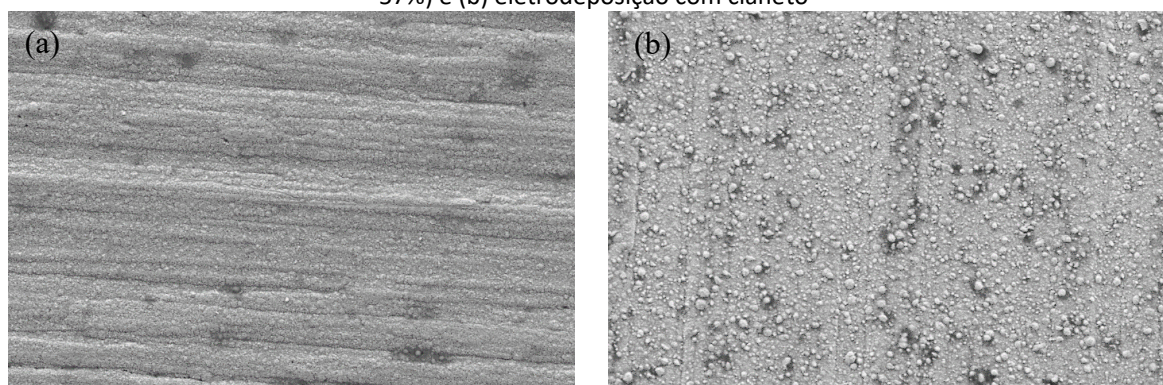
Restringindo as variáveis para apenas as significativas, obtemos a equação reduzida do modelo, expressa pela equação (5), com $R^2 = 0,8527$ e $R^2 \text{ adj.} = 0,80738$.

$$\text{CCE (\%)} = 93,884 + 78,964 X_1 - 147,776 X_2 + 55,791 X_2^2 - 0,069 X_1 X_3 \quad (5)$$

ANÁLISE DOS FILMES DE ELETRODEPOSIÇÃO DE COBRE

Análises morfológicas (Figura 4) foram realizadas para as superfícies do substrato de latão sem eletrodeposição, da melhor amostra do planejamento estatístico (CCE = 57%) utilizando glicerol, e uma amostra de eletrodeposição utilizando cianeto.

Figura 4. Micrografias na escala de 10µm em ampliação de 1.00 KX (a) eletrodeposição com glicerol (CEE = 57%) e (b) eletrodeposição com cianeto



Fonte: Autores (2025).

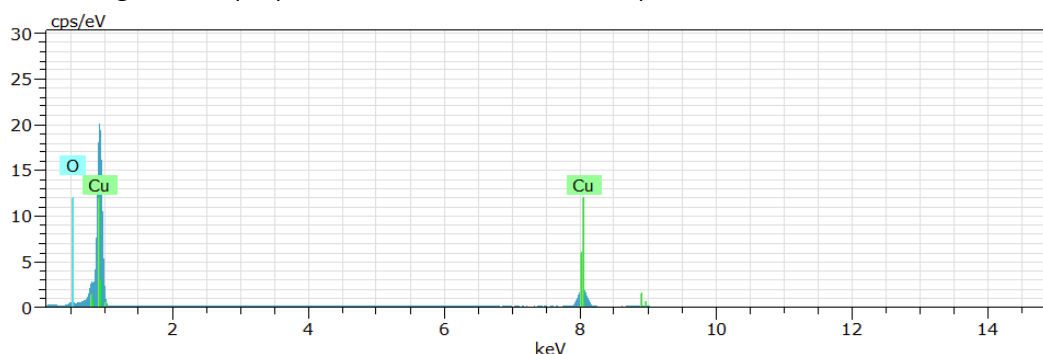
Na Figura 4a nota-se há o surgimento de uma supra camada com pequenos grãos, denotando a eficiência do processo de eletrodeposição do cobre sobre a superfície. Da mesma forma, na Figura 4b, ocorre o surgimento de grãos, indicando a eletrodeposição do cobre, entretanto esses são maiores, mostrando que há uma variação no processo, dado pela utilização do cianeto. Os grãos menores, transparecem uma melhor adesão de eletrodeposição de cobre isento de cianeto (Haider, Ani & Mahmood, 2017). Os grãos maiores podem facilitar a retirada da camada eletrodepositada através do atrito. Os depósitos gerados apresentaram a cor laranja avermelhado, característicos do cobre metálico, uniformidade de camada e nivelamento.

A adição do glicerol na solução isenta de cianeto não alterou o formato e distribuição dos grãos nodulares, porém provocou a diminuição no tamanho médio deles, proporcionando um aumento da concentração granular de cobre (Barbosa et al., 2022). Esse efeito é explicado na literatura, a inclusão do aditivo resulta na redução do tamanho dos cristaltos de cobre, ao passo que a microderfomação aumenta, ocasionando uma relação inversamente proporcional dos mesmos (Ramgir et al., 2006).

Análises de energia dispersiva foram realizadas associadamente com as microscopias eletrônicas, para as amostras que sofreram eletrodeposição, revelando a composição atômica e o mapeamento químico das amostras. Em ambos os casos, foi apresentado total recobrimento do filme de cobre. No entanto, para a eletrodeposição de cobre na presença de cianeto (Figura 5), foi identificado uma composição atômica de 91%. No mapeamento da

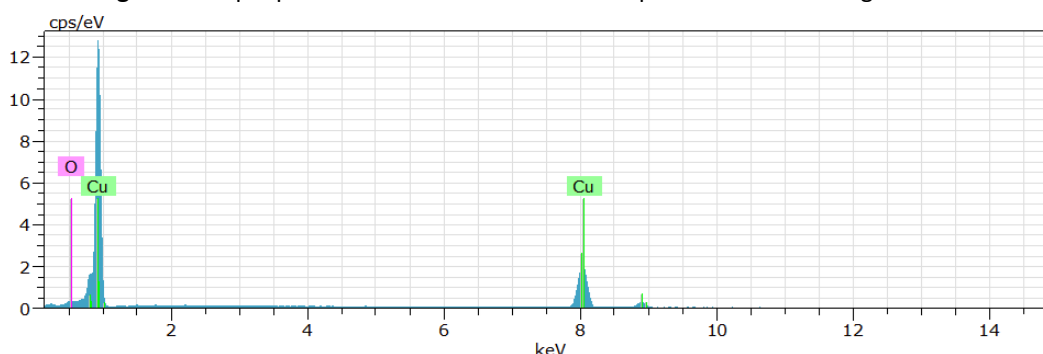
amostra que sofre eletrodeposição utilizando glicerol (Figura 6), o teor de cobre revela-se superior, com 94% do elemento cobre.

Figura 5. Mapa químico obtido com a análise EDS para a amostra com cianeto



Fonte: Autores (2025).

Figura 6. Mapa químico obtido com a análise EDS para a amostra com glicerol



Fonte: Autores (2025).

O aumento da eficiência da eletrodeposição do cobre com o uso do glicerol pode estar relacionado à inibição da evolução do hidrogênio, efeito este já evidenciado em outros trabalhos (Barbosa et al., 2022). Com a inibição dessa atividade, possíveis defeitos no revestimento causado pela falta de aditivos convencionais da galvanoplastia do cobre, como sulcos e cavidades, tendem a diminuir com o uso do glicerol (Sriraman et al., 2013).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O depósito de cobre por eletrodeposição em substrato de latão com a utilização de glicerol foi analisado a partir da aplicação de dezoito ensaios em diferentes concentrações de glicerol, amperagem e tempo. O ensaio que operou em 0,703 A, no tempo de 14 minutos e com a adição de 4,10 g de glicerol, apresentou uma maior eficiência de deposição catódica, de 57%, assim como, o menor consumo energético, 234,40 KWh/Kg. A eletrodeposição do cobre no latão com o uso do banho de cobre alcalino com glicerol foi justificada pela formação de complexos cobre-glicerol, que são termicamente mais assegurando estabilidade do banho eletrolítico, brilho, nivelamento e uniformidade de camada depositada. A partir das análises estatísticas foi possível atestar que a equação do modelo gerado, é preditivo e significativo, ou seja, os dados são confiáveis ao mesmo tempo em que se pode evidenciar próximas tendências. Dessa forma, o banho de cobre alcalino usando glicerol como aditivo orgânico mostra-se uma alternativa sustentável promissora. Há vantagens diretamente associadas com a isenção do íon cianeto em associação com o uso do glicerol, como o menor risco à segurança dos trabalhadores; mitigação de impactos ambientais; aumento da eficiência na deposição e depósitos esteticamente com maior brilho. Em relação à morfologia, o uso do glicerol na solução isenta de cianeto torna o filme de Cu mais compacto e com menor rugosidade garantindo uniformidade de camada e redução do consumo energético.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M. D. de J., Rovere, C. A. D., Lima, L. R. P. de A., Ribeiro, D. V., & Souza, C. A. C. de. (2019). Glycerol Effect on the Corrosion Resistance and Electrodeposition Conditions in a Zinc Electroplating Process. *Materials Research*, 22(4), e20180480. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0480>
- Bakhtiari, N. et al. (2021). One-step fabrication of brass filter with reversible wettability by nanosecond fiber laser ablation for highly efficient oil/water separation. *Separation and Purification Technology*, 259, 118139. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118139>
- Barbosa, R. S., Koga, G. Y., Nascimento, M. L. F., & Souza, C. A. C. de. (2022). Effect of glycerol addition on copper electrodeposition on steel substrate. *Materials Research*, 25, e20220021. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0021>
- Brudzisz, A. et al. (2023). Electrochemical oxidation of brass in electrolytes with different viscosities. *Electrochimica Acta*, 471, 143353. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143353>
- Carlos, I. A. et al. (2001). Study of the influence of glycerol on the cathodic process of lead electrodeposition and on its morphology. *Journal of power sources*, 92(1-2), 56-64. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00525-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00525-5)
- Castro, G. de S. (2008). Estudo e otimização da liga de latão utilizada na GROHE Portugal, SA. Recuperado de <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/59033>
- Costa, J. G. dos R. da., Rocha, C. L. F. da., Lima, L. R. P. de A., Ribeiro, D. V., & Souza, C. A. C. de. (2022). Study of Glycerol as an Additive in Ni-Mo Electrodeposition. *Materials Research*, 25, e20210139. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0139>
- Cunha, M. T. et al. (2014). Estudo da eletrodeposição de cobre em meio alcalino com uso de corrente pulsada. *Revista Virtual de Química*, 6(2), 258-278. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20140019>
- Di Siena, M., Genna, S., Guarino, S., & Ucciardello, N. (2023). Study of the electroplating process parameters on the electrical resistance of an aluminium alloy with a Cu-graphene-based coating. *Surface Engineering*, 39(1), 90-101. <https://doi.org/10.1080/02670844.2023.2194500>
- Dini, J. W. & Snyder, D. D. (2010). Electrodeposition of copper. *Modern electroplating*, 5, 33. <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch2>
- Fernández, S. A. & Alvarez, M. G. (2011). Passivity breakdown and stress corrosion cracking of α -brass in sodium nitrate solutions. *Corrosion science*, 53(1), 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.025>
- Haider, F. I., Ani, M. H., & Mahmood, M. H. (2017). Modelling and optimization of copper electroplating adhesion strength. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. Recuperado de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/204/1/012017/pdf>
- Hoang, H.-M. et al. (2020). Synthesis of brass nanowires and their use for organic photovoltaics. *Materials Chemistry and Physics*, 246, 122852. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122852>
- Hodgson, E. (2004). A Textbook of Modern Toxicology. Thrid edition. *John Wiley & Sons*. Recuperado de <https://repository.stikesbcm.ac.id/id/eprint/182/1/TOXICOLOGY.pdf>
- King, R. B. (2005). Encyclopedia of inorganic chemistry. 10 Volume Set, 2nd Edition. ISBN: 0-470-86078-2. Recuperado de https://application.wiley-vch.de/books/sample/0470860782_inh.pdf
- Lavon, O. & Bentur, Y. (2010). Does amyl nitrite have a role in the management of pre-hospital mass casualty cyanide poisoning? *Clinical Toxicology*, 48(6), 477-484. <https://doi.org/10.3109/15563650.2010.505573>
- Michel, J. H., Powell, C., Richardson, I., & Phull B. (2017). Development of copper alloys for seawater service from traditional application to state-of-the art engineering. *Proceedings of the Corrosion 2017*. Corrosion 2017. New Orleans, LA. (pp. 1-11). AMPP. <https://doi.org/10.5006/C2017-09382>
- Pasquale, M. A., Gassa, L. M., & Arvia, A. J. (2008). Copper electrodeposition from an acidic plating bath containing accelerating and inhibiting organic additives. *Electrochimica Acta*, 53(20), 5891-5904. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.03.073>
- Pirošková, J. et al. (2012). Flux skimmings originated during hot-dip galvanizing process and its hydrometallurgical processing. *Acta Metall. Slovaca*, 18(1), 34-39. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/290299998_Flux_skimmings_originated_during_hot-dip_galvanizing_process_and_its_hydrometallurgic_al_processing#fullTextFileContent
- Ramgir, N. S., et al. (2006). Effect of particle size and strain in nanocrystalline SnO₂ according to doping concentration of ruthenium. *Solid State Sciences*, 8(3-4), 359-362. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2006.02.008>
- Ravindranath, K., Tanoli, N., & Gopal, H. (2012). Failure investigation of brass heat exchanger tube. *Engineering Failure Analysis*, 26, 332-336. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.018>
- Sekar, R. (2017). Synergistic effect of additives on electrodeposition of copper from cyanide-free electrolytes and its structural and morphological characteristics. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(7), 1665-1676. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60189-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60189-4)
- Shabtay, Y. L., Ainali, M., & Lea, A. (2004). New brazing processes using anneal-resistant copper and brass alloys. *Materials & Design*, 25(1), 83-89. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00162-6)
- Sillos, R. M. (2009). Manual Técnico SurTec: Tratamentos de superfícies. SurTec do Brasil. Recuperado de <https://www.yumpu.com/pt/document/view/13061992/3-edicao-surtec-do-brasil>
- Sriraman, K. R., Brahimi, S., Szpunar, J. A., Osborne, J. H., & Yue, S. (2013). Characterization of corrosion resistance of electrodeposited Zn-Ni Zn and Cd coatings. *Electrochimica Acta*, 105, 314-323. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.05.010>