

 10.46943/VII.CONAPESC.2022.01.068

ELETRODEPOSIÇÃO DE LIGAS CONTENDO Fe-Mo-Sn: UMA REVISÃO

ALAN CARLOS DA ROCHA DUARTE

Mestrando do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal - UFCG, alan-carlosduarte@gmail.com;

EVELYN LOUISE SANTOS SOUZA

Mestranda pelo Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, evelynssouza@outlook.com

ARTHUR FILGUEIRA DE ALMEIDA

Doutor pelo Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, arthur.filgueira@eq.ufcg.edu.br;

RENATO ALEXANDRE COSTA DE SANTANA

Professor Orientador: Doutor, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, rena-toacs@ufcg.edu.br.

RESUMO

Um dos principais métodos de proteção à corrosão de metais é a utilização de revestimentos protetores. Estes se constituem em películas interpostas entre o metal e o meio corrosivo, ampliando a resistência à corrosão do material metálico. A eletrodeposição é um dos processos que vem sendo mais estudados nas últimas décadas para o desenvolvimento de revestimentos, como também na preparação de ligas para melhorar o desempenho industrial. O benefício em utilizar o molibdênio para a produção de revestimentos metálicos se deve às suas propriedades físicas e químicas. Entre eles, seu alto ponto de fusão, alta dureza e resistência à corrosão, boas propriedades magnéticas, entre outras. No entanto, é praticamente impossível obter molibdênio metálico puro a partir de soluções aquosas. Desta forma, ligas com metais do grupo Ferro podem competir ou mesmo substituir os tradicionais revestimentos de cromo duro, uma vez que, além de possuírem propriedades superiores

em certas aplicações, na obtenção dessas ligas, não são utilizados produtos tóxicos na formulação do banho eletrolítico utilizado no processo de eletrodeposição. Os revestimentos de estanho têm sido usados para formar uma superfície protetora para resistir à oxidação do ar, para aumentar a resistência à corrosão e para melhorar a soldabilidade. Portanto, nesse estudo buscou-se fazer uma revisão dos estudos realizados a partir da eletrodeposição da liga Ferro-Molibdênio-Estanho (Fe-Mo-Sn) a partir de uma busca sistemática nas plataformas SciELO e SCOPUS, obtendo-se 1.307 artigos encontrados. Após leitura exploratória, leitura seletiva e leitura analítica foram selecionados 16 artigos para compor o corpus deste trabalho, agrupando os temas mais abordados nas seguintes categorias: Considerações acerca da eletrodeposição do estanho, Ligas contendo Fe-Mo-Sn em sua composição: características gerais, obtenção e resistência à corrosão.

Palavras-chave: Eletrodeposição, Ligas de Fe-Mo-Sn, Revisão Sistemática.

INTRODUÇÃO

A interação mecânica, térmica, química e eletroquímica de um material em um determinado ambiente se inicia a partir de sua superfície. Portanto, pode-se dizer que a superfície de um material é uma parte da engenharia muito importante.

A aplicação de revestimentos metálicos nas superfícies de materiais com o objetivo de melhorar suas propriedades, como a resistência à corrosão, é uma prática que vem sendo comum nos setores industriais e de tecnologia, uma vez que a face dos materiais está frequentemente sob ameaça de desgaste e corrosão.

Os danos podem ser irreversíveis se os fenômenos de desgaste e corrosão não forem controlados corretamente. Segundo a The World Corrosion Organization (2020), o Custo anual estimado para reparos provenientes da corrosão está estimado em 2,5 trilhões de dólares em todo o mundo, isso representa de 3 a 4% do PIB dos países industrializados. Portanto, investir em tecnologia de superfície pode ser considerada peça chave no processo de engenharia e manufatura.

Dentre as técnicas que estão se desenvolvendo continuamente para o processo de aperfeiçoamento das superfícies de materiais se destaca a eletrodeposição, sendo ele um dos processos mais estudados nas últimas décadas para o desenvolvimento de revestimentos metálicos, por se tratar de uma técnica eletroquímica simples do ponto de vista operacional, bem como oferece um custo operacional relativamente baixo (Santana et.al,2007). Para melhorar ainda mais essas propriedades, ligas ternárias podem ser usadas para a formação de filme.

Além da resistência à corrosão, o revestimento pode ser depositado na superfície para aumentar a soldabilidade, propriedades do lubrificante, condutância elétrica e resistência ao desgaste e térmica do material do substrato.

O benefício em utilizar o molibdênio para a produção de revestimentos metálicos se deve às suas propriedades físicas e químicas. Entre eles, seu alto ponto de fusão, alta dureza e resistência à corrosão, boas propriedades magnéticas, entre outras. No entanto, é praticamente impossível obter molibdênio metálico puro a partir de soluções aquosas.

A obtenção de revestimentos de molibdênio por eletrodeposição a partir de soluções aquosas tem apresentado resultados insatisfatórios devido à formação de uma camada de óxido na superfície do cátodo durante o processo

de redução, que evita a deposição de molibdênio. Entretanto, revestimentos de molibdênio na forma de ligas com grupo 8B dos metais (Fe, Ni e Co) podem ser obtidos com sucesso por um mecanismo enunciado por Brenner, (1963) como co-deposição induzida.

Desta forma, ligas com metais do grupo Ferro podem competir ou mesmo substituir os tradicionais revestimentos de cromo duro, uma vez que, além de possuírem propriedades superiores em certas aplicações, na obtenção dessas ligas, não são utilizados produtos tóxicos na formulação do banho eletrolítico utilizado na o processo de eletrodeposição (LIMA-NETO et al., 1968).

Os revestimentos de estanho têm sido usados para formar uma superfície protetora para resistir à oxidação do ar, para aumentar a resistência à corrosão e para melhorar a soldabilidade. Eles também fornecem materiais decorativos e acabamentos que podem ser esteticamente agradáveis mesmo quando expostos ao ar e à umidade (Walsh; Low, 2016). Dessa forma, utilizar o estanho como elemento ternário na liga Fe-Mo pode ser uma boa alternativa para obtenção de ligas metálicas com várias aplicações e características.

Portanto, neste estudo de revisão da literatura, a eletrodeposição de revestimentos contendo Fe-Mo-Sn como elementos de liga foi investigada sob diferentes aspectos, sendo de valiosa importância para orientar pesquisas futuras, tendo em vista à escassez e fragmentação da literatura disponível sobre o assunto.

METODOLOGIA

Este estudo constitui uma revisão bibliográfica de caráter sistemático a respeito da obtenção de ligas contendo os elementos Fe-Mo-Sn na sua composição, obtidas a partir do processo de eletrodeposição. A coleta de dados foi realizada no período de 3 a 24 de agosto de 2021 e utilizou-se para a pesquisa as bases de dados Scientific Eletronic Library Online (SCIELO) e SCOPUS.

Foi definido como critério de inclusão: artigos publicados entre os anos de 2004 a 2021, pois levantamentos iniciais identificaram que este seria o período onde a pesquisa científica voltada para a área de estudo tinha seu maior número de publicações.

Para as pesquisas nas bases de dados, não foi limitado idioma na tentativa de obter quantidade relevante de referencial teórico, no entanto foi utilizado o seguinte critério de exclusão: não foram considerados artigos publicados em revistas com fator de impacto menor que 1.

Outro critério a considerar diz respeito aos descritores utilizados. Foram incluídos neste estudo artigos que apresentassem descritores como: “Fe-Mo-Sn AND alloys AND electrodeposition”, “Fe-Mo-Sn” e “Fe-Mo-Sn AND corrosion”.

Inicialmente, a busca de artigos científicos foi guiada pelos títulos, resumos e palavras-chave que se adequassem aos critérios de inclusão, sendo realizado nas seguintes bases de dados: SCIELO e SCOPUS, fazendo uso dos seguintes descritores: No primeiro momento, utilizou-se “Electrodeposition AND Fe-Mo-Sn”. Como resultados, foram obtidos 8 documentos no SCIELO, 9 no SCOPUS, porém nenhum artigo foi selecionado por não estar relacionado ao tema da pesquisa.

Em seguida, utilizou-se o descritor “Fe-Mo-Sn”, tendo 0 resultados de documentos no SCIELO e 48.098 no SCOPUS. A partir deste momento, observou-se a partir dos filtros disponibilizados que a maior parte do conteúdo para esta pesquisa utilizando esse descritor estava inserido na revista “Ore Geology Reviews” que se trata de uma revista relacionada ao estudo e busca de depósitos de minério, que não é alvo deste estudo.

Com o intuito de construir uma busca mais específica, foi utilizado o descritor “Fe-Mo-Sn AND corrosion”. Como resultado, obteve-se 8.382 documentos. Entretanto, a gama de assuntos oriundos desse descritor era diversa, e poucos resultados obtiveram a técnica alvo deste estudo, que é a eletrodeposição. Logo, por fim, o descritor “Fe-Mo-Sn AND alloys AND electrodeposition” na base de dados SCOPUS, obtendo 1.307 documentos encontrados. Em seguida a leitura de todos os títulos, foram selecionados 16 artigos para compor este trabalho.

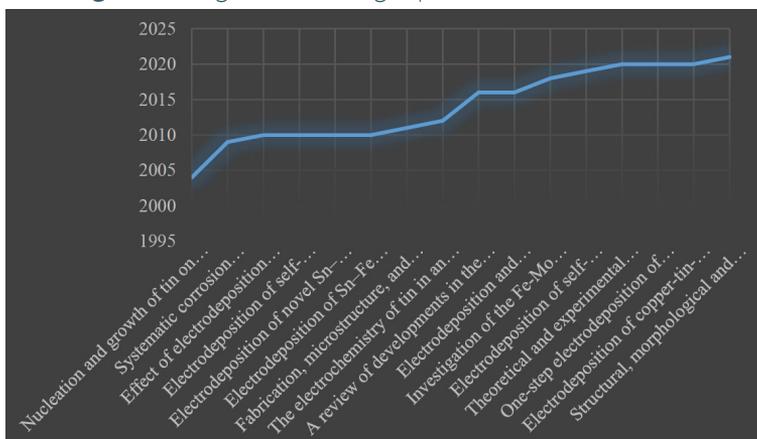
Após a seleção dos artigos conforme os critérios de inclusão previamente definidos, foram seguidos, nessa ordem, os seguintes passos: leitura exploratória; leitura seletiva e escolha do material que se adequassem aos objetivos e tema deste estudo; leitura analítica e análise dos textos, finalizando com a realização de leitura interpretativa e redação. Após estas etapas, constituiu-se um *corpus* do estudo agrupando os temas mais abordados nas seguintes categorias: Considerações acerca da eletrodeposição do estanho, Ligas contendo Fe-Mo-Sn em sua composição: características gerais, obtenção e resistência à corrosão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dos artigos encontrados nas buscas iniciais, foram selecionados 16 para leitura e fichamento. O período de publicação ficou compreendido entre 2004 e 2021, sendo que o ano de 2010 concentrou o maior número de artigos, totalizando 4 artigos, em seguida 2020 com 3 artigos e 2016 com duas publicações. O

ano de 2004, 2009, 2011, 2012 e 2018 contaram apenas com uma publicação e por último, um artigo de 2021. O gráfico da Fig. 1 representa a ascensão na produção de artigos no período de 2004 a 2021.

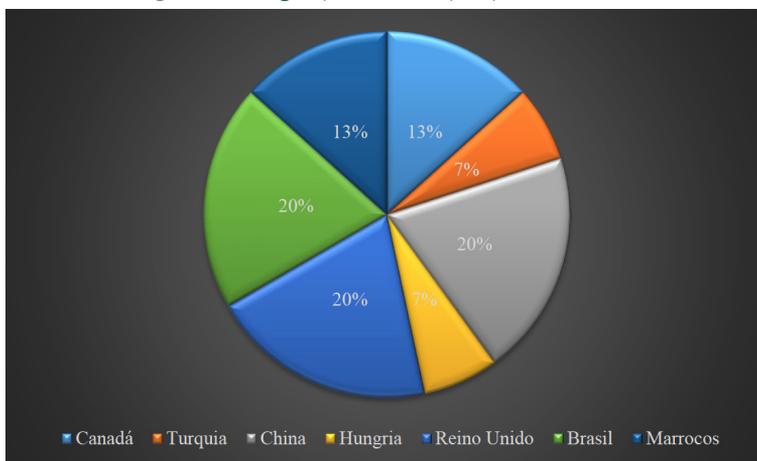
Figura 1. Progressão de artigos publicados de 2004 a 2021



Fonte: Autores (2022).

Entretanto, como essa pesquisa foi realizada em agosto de 2021 é provável que até o final de 2021 e início de 2022 venha a superar essa marca à medida que novos trabalhos forem publicados. Dos artigos selecionados, 60% referiam-se a publicações do Brasil, China e Reino Unido, em seguida do Canadá, Marrocos, Turquia e Hungria, como mostrado no gráfico da Fig. 2.

Figura 2. Artigos publicados por país/território



Fonte: Autores (2022).

A tabela 1 faz uma compilação dos títulos dos artigos, seus autores, o ano e a revista em que foram publicados.

Tabela 1. Artigos selecionados por autores, ano e o periódico em que foram publicados

Autor(es)	Ano	Periódico	País/Território
Wen et.al.	2004	Electrochimica Acta	Canadá
Sürme et.al.	2009	Journal of Alloys and Compounds	Turquia
Meng et.al.	2010	Electrochimica Acta	China
Wu et.al.	2010	Electrochimica Acta	China
Sziráki et.al.	2010	Applied Surface Science	Hungria
Chisholm et.al.	2010	Materials Chemistry and Physics	Reino Unido
Burek et.al.	2011	Materials Science and Engineering	Canadá
Walsh & Low	2012	Surface & Coatings Technology	Reino Unido
Walsh & Low	2016	Surface & Coatings Technology	Reino Unido
Barbano et.al.	2016	Journal of Electroanalytical Chemistry	Brasil
Zacarin et.al.	2018	Journal of Alloys and Compounds	Brasil
Bakkali et.al.	2020	Thin Solid Films	Marrocos
Zhang et.al.	2020	International Journal of hydrogen energy	China
Carvalho et.al.	2020	Surface & Coatings Technology	Brasil
Khouja et.al.	2021	Thin Solid Films	Marrocos

Fonte: Autores

Em seguida, algumas considerações podem ser feitas a partir das leituras exploratórias destes artigos, sendo elas divididas em dois tópicos: Considerações acerca da eletrodeposição do estanho, Ligas contendo Fe-Mo-Sn em sua composição: características gerais, obtenção e resistência à corrosão.

CONSIDERAÇÕES ACERCA DA ELETRODEPOSIÇÃO DO ESTANHO

Autores definem o estanho como um metal macio, dúctil e apresenta-se de forma esbranquiçada, mas também ligeiramente azulada. Algumas aplicações provenientes da sua eletrodeposição incluem: proteção contra corrosão, fabricação de eletrônicos e utensílios de domésticos.

O metal puro e suas ligas têm recebido atenção crescente também como materiais para baterias de lítio, como alternativas ao grafite devido às suas altas

capacidades de densidade de energia. Na verdade, o estanho é favorável ao meio ambiente e os revestimentos de estanho são resistentes à corrosão, não tóxicos e dúcteis. Da mesma forma, eles têm boa condutividade elétrica e alta confiabilidade elétrica (BUREK et al., 2011).

Os eletrólitos para a deposição de estanho podem ser ácidos ou alcalinos. Ele é normalmente depositado a partir de íons estanosos divalentes, Sn^{2+} em um banho ácido e através da íons estanato tetravalente, SnO_4^{4-} em um alcalino.

A escolha do banho é geralmente regida pelos parâmetros operacionais e as propriedades físicas exigidas do depósito. Fatores importantes podem incluir: A faixa de densidade de corrente aplicada, eficiência da corrente catódica, velocidade de deposição, uso de aditivos de banho e estabilidade eletrolítica, solubilidade de compostos de estanho, textura, aparência e uniformidade do depósito (WALSH; LOW, 2016). Independentemente do tipo de banho, o estanho galvanizado pode se apresentar macio e dúctil com um ponto de fusão relativamente baixo, 232 °C sendo soldável na condição revestida.

Estudos de Low e Walsh (2012) apresentaram exemplo de eletrodeposição do estanho puro em substrato de cobre a partir de um eletrólito ácido simples, sem a presença de aditivos no banho e à temperatura ambiente de 25°C. Em um estudo abrangente, os autores observaram as reações eletroquímicas do estanho, obtiveram dados voltamétricos e consideraram o coeficiente de difusão eficiente, observaram a nucleação e o crescimento de estanho eletrodepositado sob o substrato de cobre, juntamente com análise da microestrutura dos depósitos.

A eletrodeposição de estanho no substrato de cobre começou com um potencial de aproximadamente -0,444 V, um pico de densidade de corrente foi observado, correspondendo à redução do íon Sn^{2+} para Sn. Os autores também analisaram que um aumento adicional na densidade de corrente catódica em potenciais mais negativos foi devido à evolução do hidrogênio que ocorreu como uma reação secundária ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$). Nenhum excesso de potencial foi necessário para a deposição, pois ela foi do ponto de vista termodinâmico, favorável, principalmente em potenciais mais negativos.

As formulações de banhos ácidos são geralmente complexas, uma vez que normalmente contêm uma variedade de aditivos e complexantes para estabilidade do banho e para melhorar a qualidade do depósito (WALSH; LOW, 2016). Na ausência de aditivos, os depósitos de estanho se mostraram porosos e dendríticos, com forma irregular e grãos maiores, assim como mostrado também nos estudos de (BAKKALI et al., 2020). Entretanto, mesmo com ausência de

aditivos no estudo dos autores, foi possível obter depósitos não dendríticos e aderentes ao substrato, em função do potencial aplicado, como mostrado nas seções seguintes.

Nucleação, crescimento e microestrutura

Em relação à nucleação e crescimento, os autores afirmam que a interpretação mais simples do modelo é que os núcleos hemisféricos de estanho foram criados simultaneamente e cresceram aleatoriamente na superfície do eletrodo de cobre através de um processo de difusão controlada.

No que se refere à microestrutura da superfície dos depósitos, dependeu dos potenciais, como por exemplo, de -0,45 a -0,65 V, um depósito fosco, não dendrítico e aderentes ao substrato foi observado. Em potenciais mais negativos de -0,75 a -0,95 V, o depósito de estanho apresentou porosidade, devido à evolução de hidrogênio e foram observados dendritos em forma de agulha. Com potenciais ainda mais negativos, os dendritos cresceram em ramos semelhantes a árvores, de 100 a 200 μm de comprimento.

Aditivos de eletrólito e parâmetros operacionais

Na indústria, o estanho raramente é eletrodepositado sem a presença de aditivos de banho. Misturas patenteadas de aditivos orgânicos vem sendo comumente usadas para produzir revestimentos de boa qualidade. (BAKKALI et al., 2020) em uma combinação de estudos teóricos e experimentais, estudaram o efeito de um aditivo surfactante não iônico de base vegetal, um composto orgânico e altamente seguro, utilizado em produtos para a pele, tendo como resultados uma melhora significativa na qualidade dos depósitos e diminuição do tamanho do grão do filme em relação ao banho sem a presença do aditivo.

A escolha de aditivos geralmente depende da composição do banho e das propriedades necessárias. Os aditivos usados em banhos ácidos são diferentes dos banhos alcalinos, uma vez que os íons estanosos são suscetíveis à oxidação em banhos ácidos, enquanto os íons estanato estão presentes como íons complexantes em banhos alcalinos (Walsh; Low, 2016).

Quando os aditivos estão presentes nos banhos, o eletrodo é geralmente polarizado de modo que a deposição de estanho inicie em um potencial mais negativo devido à adsorção de aditivos na superfície do depósito. Os aditivos podem incluir compostos de carbonil aromáticos, derivados de amina, aldeídos

heterocíclicos aromáticos, cetonas aromáticas e outros (WEN; SZPUNAR, 2005). Vale ressaltar que, a obtenção desses aditivos é totalmente empírica. Os aditivos podem incluir também inibidores de oxidação e refinadores de grãos, assim como “abrilhantadores” para garanti depósitos mais lustrosos e lisos, tendo em vista a grande gama de aplicações que podem ser requeridas a partir destes depósitos.

LIGAS CONTENDO Fe-Mo-Sn EM SUA COMPOSIÇÃO: CARACTERÍSTICAS GERAIS, OBTENÇÃO E RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Há uma busca crescente por ligas eletrodepositadas que se deve, entre outros, ao fato de exibirem propriedades superiores quando comparadas àquelas dos elementos constituintes. A peça de trabalho torna-se um material compósito exibindo propriedades geralmente não alcançáveis por qualquer material homogêneo.

Os processos de eletrodeposição de ligas metálicas tornaram-se conhecidos desde meados do século XIX, principalmente para as ligas de cobre, onde os exemplos mais comuns são o latão e bronze.

(SÜRME et al., 2009) desenvolveram filmes da liga de Cu-Sn eletrodepositados em substrato de aço, combinando diferentes quantidades de eletrólitos de Cu e Sn a uma temperatura constante de 55°C e pH 3,5. Os resultados indicavam que houve um aumento da resistência à corrosão dos revestimentos da liga Cu-Sn em comparação com os elementos solos, e que o comportamento de corrosão foi dependeu fortemente do teor de Sn no revestimento.

Estudos de CARVALHO et.al (2014) também relataram a formação de filmes metálicos a partir de um banho ácido em pH 3,23 contendo etilenodiaminotetracetato dissódico (EDTA). Dessa vez, a investigação foi a partir da liga ternária Cu-Sn-Zn, a incorporação do zinco na liga Cu-Sn pode ser mais interessante pois pode promover uma melhor resistência mecânica. Os autores também expuseram que, a depender do potencial aplicado e da composição do banho, os revestimentos podem codepositados de forma anômala, uma vez que uma maior porcentagem de teor de Sn (um metal menos nobre do que Cu) estava presente no depósito final em comparação com os conteúdos de Cu e Zn.

Entretanto, do ponto de vista microestrutual, as micrografias dos filmes obtidos a partir mostram que os depósitos recobriram toda a superfície do substrato de aço e que, independe de qual íon metálico estava em maior

concentração no banho, esses filmes foram formados por pequenos cristais globulares bem coalescidos, não apresentando trincas nem dendritos.

Recentemente, Khouja et al., (2021) obtiveram por meio de eletrodeposição um material quartenário, contendo Cu-Fe-Sn-S, um desafio, uma vez que cada um dos quatro elementos tem um potencial de deposição ótimo diferente. Assim, introduzir agentes complexantes como ácido tartárico, EDTA ou citrato trissódico, as diferenças entre os potenciais de redução dos íons metálicos podem ser otimizadas. Todos os elementos estiveram homogeneamente presentes em todas as amostras. É claro que a mudança do potencial de deposição levou a uma mudança na composição dos filmes, uma vez que a taxa de eletrodeposição de cada elemento é dependente do potencial aplicado, além disso, a codeposição era normal ou anômala, dependendo da composição do banho, como verificado também nos estudos de (CARVALHO et.al 2014).

Ligas ternárias de Sn-Ni-Fe foram preparadas com sucesso pela primeira vez por deposição eletroquímica, declaram Sziráki et al., (2010). Em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa, ligas ternárias amorfas de Sn-Co-Fe de boa qualidade foram obtidas a partir de um eletrólito de gluconato de sódio, que é ambientalmente aceitável. Dessa forma, os autores foram impulsionados a investigar o sistema estanho-níquel-ferro usando o mesmo eletrólito e condições semelhantes aos seus estudos anteriores com o objetivo de estabelecer condições para realizar a deposição de novas estruturas de ligas ternárias de Sn-Ni-Fe de boa qualidade.

Observaram que o estanho e o ferro impediam a deposição de níquel no banho ternário contendo, indicando que o sistema eletrolítico exibe codeposição anômala observada em muitos outros sistemas de galvanização. (CARVALHO et.al (2014); (KHOUJA et al., 2021). A fase amorfa foi a fase dominante nos depósitos, que também se apresentaram compactos, brilhante e sem rachaduras. É claro que, alguns depósitos apresentaram também um revestimento com alguma rachadura superficial e com coloração diferente e corrosão na superfície, podendo ser devido a evolução de hidrogênio.

No mesmo período, Chisholm et al., (2010) estudaram os efeitos dos parâmetros de eletrodeposição, como densidade de corrente, tempo de deposição, temperatura de deposição e pH em relação à composição de fase, estrutura e qualidade do depósito de Sn-Fe obtidos do mesmo modo, a partir de um eletrólito à base de gluconato de sódio, e usando uma técnica de corrente constante.

A deposição foi investigada em uma faixa de temperatura de 20 a 60 °C usando uma faixa de pH de 3,0–9,0 e tempos de galvanização de 5–30min. Para

a faixa de densidade de corrente 1,5–2,5 Adm⁻² o teor de ferro foi considerado estável. Embora ligas metálicas tenham sido obtidas, todas exibiram um filme de superfície cinza a preto. Os depósitos também exibiram pulverização significativa na superfície combinada com coloração resultante da evolução de hidrogênio através do cátodo. Com base nisso, as ligas foram classificadas como de baixa qualidade. O exame da morfologia da superfície mostrou uma estrutura cristalina com o tamanho do grão aumentando com a densidade de corrente.

A fim de tentar melhorar a qualidade dos depósitos e obter ligas com maior quantidade de ferro, a razão de metal no eletrólito foi alterada para dar uma Sn: Fe de 1: 3 e os resultados experimentais repetidos. Os experimentos mostraram que, na mesma faixa de densidade de corrente a qualidade dos depósitos melhoraram dando superfícies metálicas brilhantes sem corrosão superficial. Obviamente, a mudança na proporção do metal do banho deu origem a ligas com grandes quantidades de ferro, embora seja interessante notar que a proporção de ligas ricas em estanho ainda é obtida até 1.0 Adm⁻².

No geral, os resultados confirmam que ligas de boa qualidade na faixa de 54-84% em peso de Sn podem ser obtidas com uma relação Sn: Fe de 1: 3 a 60 °C, em um pH de 5,0-7,0 em toda a faixa de densidade de corrente de 0,5-2, Adm⁻² Os resultados confirmam que ligas de boa qualidade na faixa de 54-84% Sn podem ser obtidas com uma relação Sn: Fe de 1: 3 a 60°C, um pH de 5,0-7,0 em toda a faixa de densidade de corrente de 0,5-2,0Adm⁻², diferente dos parâmetros iniciais.

A partir da gama de variáveis de banho investigadas pelos autores, parece que, a eletrodeposição à temperatura ambiente não pode ser realizada devido à má qualidade geral dos depósitos obtidos.

Há pouco, Zhang et al., (2020) caracterizaram a eletrodeposição de Ni-Fe-Sn como um eletrocatalisador altamente eficiente para a reação de evolução de hidrogênio. O filme de Ni-Fe-Sn mostrou melhor desempenho na relação de evolução de hidrogênio (HER) do que o filme binário de Ni-Fe. Durante o processo de eletrodeposição da liga Ni-Fe-Sn, inúmeras bolhas de hidrogênio foram produzidas na superfície do cátodo, no entanto, apenas algumas bolhas foram observadas durante a preparação do eletrodo de Ni-Fe.

Para avaliar o efeito do tempo de deposição, a eletrodeposição foi realizada pelos autores por 15, 30 e 60 min. Conforme o tempo de eletrodeposição aumenta para 30 min, partículas irregulares começam a se formar na superfície do eletrodo, embora apresentaram microestrutura desigual.

Em um tempo de deposição de 1h, a superfície do eletrodo foi caracterizada por uma distribuição mais uniforme de pequenas partículas semelhantes a couve-flor. Portanto, os autores perceberam que, o prolongamento do tempo de deposição pôde elevar a deposição de Sn e melhorar a morfologia da superfície de revestimento.

Até o momento podemos observar que, depósitos de ligas metálicas contendo Sn-Ni-Fe-Cu em sua composição, podem ser obtidos com sucesso através do processo de eletrodeposição, em temperaturas mais elevadas e em uma faixa de pH ácido à alcalino, sendo que a composição do banho influencia diretamente no tipo de codeposição do material, que pode ser anômala ou regular.

Outra característica importante é a busca e capacidade de desenvolver eletrólitos para o processo que sejam ambientalmente aceitáveis. O gluconato de sódio por exemplo, é reconhecido como um composto iônico benigno para o meio ambiente, não tóxico e de fácil descarte por meio do gerenciamento eficaz de resíduos. Isso, combinado com seu uso bem-sucedido para a deposição de outras ligas de estanho, torna-o uma escolha atraente para a investigação da deposição dessas ligas (CHISHOLM et al., 2010).

Mais um aspecto a considerar é o fato de que elementos como Sn, Ni, Fe e Cu tem a capacidade de serem depositados a partir de seu estado puro, enquanto para o molibdênio, a literatura relata a impossibilidade de sua deposição a partir de solução aquosa. Contudo, sua eletrodeposição juntamente com os do grupo 8B (Fe, Ni, Co) para a formação de ligas metálicas tem sido noticiado na literatura pelo tipo de codeposição induzida (SZCZYGEI et.al,2010); (TSYNTASARU et. Al., 2012); (SILVA et.al., 2015); (BARBANO; DE CARVALHO; CARLOS, 2016)

O mecanismo de eletrodeposição das ligas binárias de Fe-Mo são bem estudadas. Zacarin et al., 2018 e Barbano et.al (2016) eletrodepositaram ligas de Fe-Mo a partir de banhos alcalinos, um contendo sorbitol como agente complexante e o outro nitrilotriacetato trissódico (NTA), ambos em temperatura ambiente de 25 °C. Independentemente da concentração dos agentes complexantes, os autores indicaram que os depósitos apresentavam baixa cristalinidade ou parcialmente amorfos. Esses banhos não continham amônia, conforme exigido nos banhos de eletrodeposição de Fe-Mo alcalinos relatados na literatura e, portanto, não sofriam de problemas causados pela evaporação da amônia, representando uma vantagem distinta.

As micrografias mostraram que a superfície dos depósitos eram lisas ou continham trincas, dependendo do potencial de deposição. Perceberam também que, com base nos seus resultados, pode-se inferir que trincas podem ser

produzidas nos eletrodepósitos dependendo da quantidade de óxido/hidróxido de molibdênio presente nos mesmos.

Comparando os resultados de composição química para eletrodepósitos obtidos na presença de maior ou menor quantidade de NTA, concluiu-se que a composição dos banhos e o potencial de eletrodeposição influenciou a composição química, mas não a estrutura dos filmes (baixa cristalinidade ou parcialmente amorfo). Os revestimentos contendo Fe,Mo,Ni e Sn são revestimentos promissores para resistência à corrosão, com impacto ambiental muito menor do que os filmes de cromo duro ou à base de cobalto.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estanho como metal puro e também suas ligas têm recebido atenção crescente e vem sendo importante para muitas indústrias e vários segmentos. Na verdade, o estanho é favorável ao meio ambiente e os revestimentos de estanho são resistentes à corrosão, não tóxicos e dúcteis.

Algumas ligas contendo Ni, Fe e Cu foram investigadas através do processo de eletrodeposição, em temperaturas mais elevadas e em uma faixa de pH ácido à alcalino, sendo claro que a composição do banho influenciou diretamente no tipo de codeposição do material depositado e também em outras características dos depósitos apresentados. A busca pelo desenvolvimento de eletrólitos para o processo que sejam ambientalmente aceitáveis tem sido alvo dos estudos dos pesquisadores da área. Foi notável também que, as ligas com mais estudos desenvolvidos se trataram de ligas contendo Fe-Sn-Ni e outros elementos, como Cu e Zn.

Dessa forma, para esta metodologia apresentada, não foi encontrado na literatura, trabalhos que explorassem a eletrodeposição de ligas Fe-Mo-Sn em companhia, portanto, a partir deste estudo de revisão da literatura proporcionou aspectos e características de valiosa importância para orientar pesquisas futuras dessa liga, tendo em vista à escassez da literatura disponível sobre o assunto.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, R.; DE SANTANA, C. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO DAS LIGAS**

Co-Mo E Ni-Co-Mo PARA MITIGAR O EFEITO DA CORROSÃO TESE DOUTORADO CAMPINA GRANDE-PARAÍBA. [s.l: s.n.].

BAKKALI, S. et al. Theoretical and experimental studies of tin electrodeposition. **Surfaces and Interfaces**, v. 19, 1 jun. 2020.

BARBANO, E. P.; DE CARVALHO, M. F.; CARLOS, I. A. Electrodeposition and characterization of binary Fe-Mo alloys from trisodium nitrilotriacetate bath. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 775, p. 146–156, 15 ago. 2016.

BRENNER, A. **Electrodeposition of Alloys: Principles and Practice**. V. 691, p. 62-13044, 11 mai. 1963

BUREK, M. J. et al. Fabrication, microstructure, and mechanical properties of tin nanostructures. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 18, p. 5822–5832, 15 jul. 2011.

CHISHOLM, C. U. et al. Electrodeposition of Sn-Fe alloys using gluconate electrolytes and X-ray diffractometry and Mössbauer studies of the deposits. **Materials Chemistry and Physics**, v. 120, n. 2–3, p. 558–565, 15 abr. 2010.

DE CARVALHO, M. F.; BARBANO, E. P.; CARLOS, I. A. Electrodeposition of copper-tin-zinc ternary alloys from disodium ethylenediaminetetraacetate bath. **Surface and Coatings Technology**, v. 262, p. 111–122, 25 jan. 2015.

DE LIMA-NETO, P. et al. **Morphological, Structural, Microhardness and Corrosion Characterisations of Electrodeposited Ni-Mo and Cr Coatings**. **J. Braz. Chem. Soc.**

EL KHOUJA, O. et al. Structural, morphological and optical properties of Cu-Fe-Sn-S thin films prepared by electrodeposition at fixed applied potential. **Thin Solid Films**, v. 721, 1 mar. 2021.

MENG, G. et al. Effect of electrodeposition parameters on the hydrogen permeation during Cu-Sn alloy electrodeposition. **Electrochimica Acta**, v. 55, n. 7, p. 2238–2245, 28 fev. 2010.

SÜRME, Y. et al. Systematic corrosion investigation of various Cu-Sn alloys electrodeposited on mild steel in acidic solution: Dependence of alloy composition. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 485, n. 1–2, p. 98–103, 19 out. 2009.

SZIRÁKI, L. et al. Electrodeposition of novel Sn-Ni-Fe ternary alloys with amorphous structure. **Applied Surface Science**, v. 256, n. 24, p. 7713–7716, 1 out. 2010.

WALSH, F. C.; LOW, C. T. J. **A review of developments in the electrodeposition of tin. Surface and Coatings Technology** Elsevier, , 25 fev. 2016.

WEN, S.; SZPUNAR, J. A. Nucleation and growth of tin on low carbon steel. **Electrochimica Acta**, v. 50, n. 12, p. 2393–2399, 15 abr. 2005.

The World Corrosion Organization. Nova York, Estados Unidos da América, 2020. Disponível em: <https://corrosion.org/> Acesso em: 03 ago 2021.

ZACARIN, M. G. et al. Investigation of the Fe-Mo electrodeposition from sorbitol alkaline bath and characterization of the films produced. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 750, p. 577–586, 25 jun. 2018.

ZHANG, H. et al. One-step electrodeposition of cauliflower-like Ni-Fe-Sn particles as a highly-efficient electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 46, p. 24615–24625, 21 set. 2020.