



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SILAS MOURA DA SILVA

ELETRODEPOSIÇÃO DE ZINCO COM SILICATO DE SÓDIO EM AÇO SAE 1020

São Luís

2024

SILAS MOURA DA SILVA

ELETRODEPOSIÇÃO DE ZINCO COM SILICATO DE SÓDIO EM AÇO SAE 1020

Orientadora: Prof. Dr^a. Maria Eliziane Pires de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora:

Prof^a: Dr^a. Maria Eliziane Pires de Souza

São Luís

2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Silva, Silas Moura da.

ELETRODEPOSIÇÃO DE ZINCO COM SILICATO DE SÓDIO EM AÇO
SAE 1020 / Silas Moura da Silva. - 2025.

39 p.

Orientador(a): Maria Eliziane Pires de Souza.

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís - Ma, 2025.

1. Eletrodeposição. 2. Zinco. 3. Silicato de Sódio.
I. Souza, Maria Eliziane Pires de. II. Título.

SILAS MOURA DA SILVA

ELETRODEPOSIÇÃO DE ZINCO COM SILICATO DE SÓDIO EM AÇO SAE 1020

Trabalho aprovado em 27 de fevereiro de 2025

Profa. Dra. Maria Eliziane Pires de Souza (Orientadora)– UFMA/Engenharia
Mecânica

Prof. Dr. Andrei Bavaresco Rezende – UFMA/Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Jean Robert – UFMA/Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Ao Deus Eterno, Autor e Consumador da minha fé.

À minha querida Avó, Joana Batista Silva Moura (em memória) que muito desejava ver os seus netos formados.

Ao meu querido Avô, Antônio Moura a quem puxei o jeito criativo de consertar as coisas.

À minha amada família, meus pais José Romildo e Maria Edna, que muito se esforçaram para que este sonho se tornasse realidade e meus irmãos Filipe Moura e Sara Moura.

À minha orientadora Profa. Maria Eliziane, que me ajudou muito no desenvolvimento deste projeto.

Ao meu amigo Vinicius Costa que esteve comigo do começo ao fim da graduação.

Aos amigos que fiz, Nádia Lypp, Wagner Junior, João Victor, Estephane Diana e tantos outros que foram essenciais nessa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus, por sua bondade, graça e misericórdia que me deram forças para chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, José Romildo e Maria Edna que se dedicaram para que esse sonho se tornasse realidade.

Aos meus irmãos, Filipe Moura e Sara Moura pelo apoio para a conclusão deste curso.

À minha orientadora Profa. Dra. Maria Eliziane, que me auxiliou durante todo o desenvolvimento deste trabalho e por sua dedicação na universidade na formação de muitos alunos.

Aos meus avós Antônio Moura e Joana Batista (em memória) que sonhavam juntamente comigo a conclusão deste curso.

Aos meus tios, em especial meu tio Evandro Moura que sempre nos ajudou. Além dos meus primos que crescemos e nos divertimos juntos.

Aos meus amigos, Vinicius costa, Nádia Lypp, Wagner Junior, João Victor, Estephane Diana e aos demais que foram importantes nessa caminhada para não desistir no meio do caminho.

Aos meus amigos e irmãos da Igreja que também estiveram me encorajando durante o tempo que passei em São Luís – MA, em especial ao Pr. José Arnaldo e sua família e ao Dc. Leullyano Almeida e sua família.

Ao Coordenador do curso de Engenharia Mecânica Prof. Dr. Glauber Cruz pela paciência e dedicação em tornar o curso melhor para todos.

Aos meus professores da graduação que foram essenciais durante o processo de formação.

Agradeço à Profa. Dra. Janieyd Karla Castro Sousa por ceder o Laboratório de Pesquisa em Química Analítica (LPQA) para realização do experimento de polarização.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram no meu crescimento. Àqueles que são responsáveis por se esforçarem de todas as formas para ver os filhos, os netos e os sobrinhos formados. Não há palavras que possam expressar esse momento de gratidão a Deus.

“Sobre tudo o que se deve guardar, guarda o teu coração, porque dele procedem as fontes da vida.” Provérbios 4.23

Bíblia Sagrada

RESUMO

O aço SAE 1020 é amplamente utilizado na indústria, pois possui características que favorecem sua aplicação na usinagem e soldagem, além de apresentar ótima plasticidade e adequação ao tratamento térmico. Isso se deve ao baixo teor de carbono em sua composição. O processo de eletrodeposição é uma técnica de revestimento de materiais em que um metal ou liga é depositado sobre uma superfície para a proteção da peça revestida. Neste contexto, a eletrodeposição de zinco e silicato de sódio torna-se uma excelente alternativa quando se deseja aumentar a resistência à corrosão do aço SAE 1020 e conservar suas características. O processo cria uma camada de zinco sobre a superfície do metal base, que atua como uma barreira física e oferece proteção catódica, pois o zinco se oxida preferencialmente em contato com agentes corrosivos. O presente trabalho tem como foco estudar a eletrodeposição de zinco com a adição de silicato de sódio em um aço com 0,20% de carbono (SAE 1020), observando as características microestruturais, de microdureza e resistência à corrosão após o tratamento.

Palavras-chave: Eletrodeposição, zinco, silicato de sódio.

ABSTRACT

SAE 1020 steel is widely used in industry because it has characteristics that favor its application in machining, and welding and because it presents excellent plasticity and suitability for heat treatment, this due to the low carbon content in its composition. The electrodeposition process is a material coating technique in which a metal or alloy is deposited on a surface to protect the coated part. In this context, the electrodeposition of zinc and sodium silicate becomes an excellent alternative when it is desired to increase the corrosion resistance of SAE 1020 steel and preserve its characteristics. The process creates a layer of zinc on the surface of the base metal, which acts as a physical barrier and offers cathode protection since zinc oxidizes preferentially in contact with corrosive agents. The present work focuses on studying the electrodeposition of zinc by adding sodium silicate in steel with 0.20% carbon (SAE 1020) observing the microstructural characteristics, microhardness, and corrosion resistance after treatment.

Keywords: Electroplating, zinc, sodium silicate.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Esquema ilustrativo do processo de eletrodeposição de zinco, para revestimento protetor do aço (cátodo) a partir da dissolução de ânodos de zinco em um eletrólito, impulsionado por uma fonte de corrente externa. 16
- Figura 2: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da morfologia das camadas formadas por diferentes ligas metálicas utilizadas na eletrodeposição: (a) camada de zinco puro (Zn), (b) camada de liga zinco-níquel (ZnNi), (c) camada de liga zinco-ferro (ZnFe) e (d) camada de liga zinco-cobalto(ZnCo). 18
- Figura 3: Representação esquemática do ensaio de dureza Vickers, onde um penetrador em forma de pirâmide de diamante com ângulo de 136° é pressionado contra a superfície do corpo de prova sob uma carga predefinida.. 20
- Figura 4: Curva de polarização esquemática mostrando extrapolação de Tafel formada pela intersecção das curvas anódicas e catódicas em um ponto do potencial de corrosão (E_c).. 22
- Figura 5: Montagem do esquema de eletrodeposição.: 23
- Figura 6: Diagrama do esquema de eletrodeposição. 23
- Figura 7: Ensaio de dureza Vickers em uma amostra de aço sob carga de 1N por 15 segundos e análise microscópica. A) Indentador Digimes; B) Microscópio Óptica. 25
- Figura 8: Locais que foram escolhidos para as indentações ao longo da amostra. 25
- Figura 9: Ensaio de Polarização 26
- Figura 10: Amostras eletrodepositada sob cada condição apresentando filmes característicos da eletrodeposição de zinco e um filme mais esbranquiçado com a adição do silicato de sódio.. 27
- Figura 11: Depósitos obtidos típicos da eletrodeposição de zinco, além da alteração da morfologia dos depósitos após a incorporação do silicato de sódio e a formação dendritas e irregularidades ao longo do filme: A) Amostra 1 ($ZnCl_2$); B) Amostra 6 ($ZnCl_2 + 50 \text{ mL } Na_2SiO_4$); C) Amostra 8 ($ZnCl_2 + 100 \text{ mL } Na_2SiO_4$) D) Amostra 11 ($ZnCl_2 + 150 \text{ mL } Na_2SiO_4$). 30
- Figura 12: Curvas de polarização para o aço 1020, em solução NaCl 0,1%. Os potenciais de corrosão mais positivo e menor valor de corrente de corrosão indicam uma menor propensão à corrosão para amostra a2, a4 e a9. A amostra com alta concentração de silicato não obteve melhoria na resposta à corrosão. 32

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1:Variação da média da massa depositada (g) em função das diferentes condições de eletrodeposição. 29

Gráfico 2: Microdureza associada a incorporação do silicato do sódio. A incorporação do silicato aumento a dureza em até 290 HV para a amostra 11, um aumento de 51,2% em relação a A0, amostra sem filme. 31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições que foram submetidas cada grupo de amostras. 24

Tabela 2: Massas antes e após a Eletrodeposição. 28

Tabela 3: Parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de Polarização Potenciodinâmica. 33

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

A	Ampere
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
cm ²	Centímetro quadrado
Co	Cobalto
Ecorr	Potencial de Corrosão
Fe	Ferro
G	Gramas
H ₃ BO ₃	cido Bórico
HV	Vickers
Icorr	Corrente de corrosão
Kgf	Quilo-grama Força
La	Latnio
MEV	Microscópio Eletrnico de Varredura
mL	Mililitro
mm	Milímetro
Mn	Mangnes
mV	Milivolt
N	Newton
Na ₂ SiO ₄	Silicato de Sódio
NaCl	Cloreto de Sódio
NaH ₂ PO ₄	Fosfto de Sódio
Ni	Níquel
R _p	Resistência a Polarizao
SAE	Society of Automotive Engineers
SiO ₂	Dióxido de silício
Zn	Zinco
ZnCl ₂	Cloreto de Zinco

SUMÁRIO

1.	13
1.1.	14
2.	15
2.1.	15
2.2.	15
3.	16
3.1.	16
3.1.1.	17
3.2.	19
3.3.	20
3.4.	21
4.	23
4.1.	23
4.2.	23
4.3.	25
4.4.	26
5.	27
5.1.	31
5.2.	32
6.	35
7.	36
REFERENCIAS 37

1. INTRODUÇÃO

O revestimento de zinco é essencial para proteger o aço da corrosão, formando uma camada passiva em contato com o ar. Esse processo pode ser realizado por eletrólise com diferentes tipos de banhos. Tradicionalmente, banhos à base de cianeto alcalino são amplamente usados na indústria aeroespacial devido à estabilidade, qualidade do revestimento e uniformidade dos grãos. No entanto, seu uso tem sido reduzido devido à toxicidade e alto impacto ambiental. Como alternativa, pesquisas vêm explorando banhos sem cianeto, como soluções de cloreto de potássio, sulfato, zincato e amônia. A solução alcalina de zincato destaca-se por sua composição simples, boa capacidade de cobertura e dispersão (YUAN *et al.*, 2017).

O processo de eletrodeposição ocorre através de um circuito fechado composto por uma fonte de corrente, que fornece a energia necessária, o eletrólito (também chamado de banho ou solução), o cátodo (substrato a ser revestido) e o ânodo. A eletrodeposição baseia-se em fenômenos eletroquímicos, nos quais ocorrem reações químicas nas interfaces entre os eletrodos e o eletrólito. Essas reações envolvem a redução, que consome elétrons, e a oxidação, que os libera. Para garantir que as reações aconteçam na direção correta, é necessária a aplicação de corrente contínua. As reações nos eletrodos e na solução ocorrem simultaneamente: os elétrons são retirados do ânodo e transferidos para o cátodo. Esse fluxo permite que os íons metálicos do eletrólito se depositem no cátodo, formando uma camada metálica, caracterizando o processo de eletrodeposição (MARTINS, 2009).

O aço SAE 1020 ou ABNT 1020 é um aço baixo carbono, basicamente é constituído por ferro, silício, manganês e o carbono, sendo este 0,20% na composição. Suas aplicações estão presentes em todas as indústrias, alguns exemplos são indústrias ferroviárias, automobilísticas, navais e aeronáuticas, nelas sendo muito usadas como componentes mecânicos, pois apresenta características como ótima plasticidade, adequação ao tratamento térmico e excelente soldabilidade (FERRI, 2021). A eletrodeposição de zinco é indicada para aços expostos em ambientes agressivos, atuando como camada protetora, corroendo preferencialmente e preservando o metal base. Uma vez que as camadas eletrodepositadas têm maior proporção de resistência mecânica e durabilidade contra a corrosão em comparação

com metais individuais que compõe a liga metálica (MARTINS, 2009; ZOPPAS, 1982).

1.1. JUSTIFICATIVA

O aço ABNT1020 é vulnerável à oxidação em ambientes agressivos devido ao baixo teor de carbono. Diante disso, os revestimentos de zinco eletrodepositados surgem como alternativa para proteção do aço. Entretanto, os revestimentos de zinco não têm resistência adequada ao desgaste. A adição de outros particulados para a criação de revestimentos compósitos de zinco torna-se uma solução para melhorar a resistência a corrosão, ao desgaste e conseqüentemente a dureza (MAPELLI *et al*, 2014) (CHANG, 1996).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Obtenção de revestimento eletrodepositados de zinco com silicato de sódio e caracterização eletroquímica e de dureza em amostras de aço ABNT1020.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Apresentar um estudo bibliográfico sobre a eletrodeposição de zinco e as camadas depositada.

Realizar eletrodeposição variando a concentração da solução.

Realizar teste de microdureza para analisar o comportamento do filme formado com a incorporação do silicato de sódio.

Realizar ensaio de polarização potenciodinâmica para avaliar a resistência a polarização dos depósitos de Zinco e Silicato de sódio.

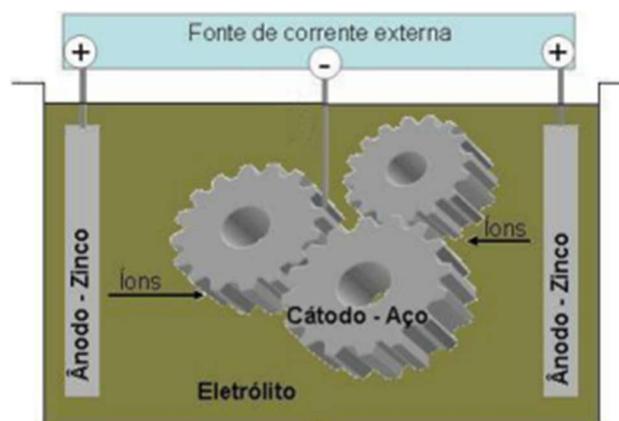
3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. ELETRODEPOSIÇÃO DE ZINCO

Os revestimentos de zinco são amplamente empregados para proteger o aço da corrosão devido a sua capacidade de fornecer proteção catódica. No entanto, o zinco não possui elevada resistência mecânica, sendo relativamente macio e suscetível ao desgaste. Além disso, o zinco é preferido por seu custo mais baixo, abundância em relação a outros metais, não toxicidade e facilidade de reciclagem. Esses fatores fazem dele o revestimento protetor mais utilizado. Segundo a International Zinc Association (2019), mais de 5 milhões de toneladas de zinco por ano são aplicadas para proteger o aço contra a corrosão, correspondendo a 60% da produção global desse metal (MANIAM, 2021; MARCHETTI, 2008).

A peça é submersa em uma solução eletrolítica que contém sais do metal que se pretende depositar no substrato de aço, esse método é mais conhecido como eletrodeposição galvânica, como mostra a Figura 1. O ânodo é composto por zinco, enquanto o cátodo é o aço, e o eletrólito é uma solução de cloreto de zinco. A energia elétrica é fornecida por uma fonte de corrente contínua. No ânodo, o zinco sofre oxidação, liberando dois elétrons e dissolvendo-se como cátion no eletrólito. No cátodo de aço, os cátions de zinco se combinam com os dois elétrons (redução), resultando na formação de zinco elementar, que se deposita na superfície do aço (RIBEIRO *et al*, 2021).

Figura 1: Esquema ilustrativo do processo de eletrodeposição de zinco, para revestimento protetor do aço (cátodo) a partir da dissolução de ânodos de zinco em um eletrólito, impulsionado por uma fonte de corrente externa.



Fonte: (MARTINS, 2009).

A depender dos requisitos de aplicação, como espessura, condições de exposição e o custo do processo influenciará na escolha do método, como por exemplo, a eletrodeposição com eletrodo rotativo, que tem um filme de deposição mais uniforme em peças de geometria complexa, obtendo uma eficiência maior em áreas de difícil acesso. Além da eletrodeposição a quente, a qual é utilizada principalmente para quando se deseja camadas mais espessas, em que o banho metálico está em estado fundido (TOMACHUK, 2015; CAMPOS 2020).

As vantagens da eletrodeposição para os aços estão na proteção anticorrosiva que influencia diretamente na durabilidade da peça, além do aspecto visual e a capacidade de formar uma superfície adequada para pintura ou outros acabamentos. Essa técnica também possibilita a deposição controlada, permitindo camadas finas, uniformes e melhorando a qualidade do acabamento superficial (TOMACHUK, 2015).

3.1.1. CAMADA DEPOSITADA

A camada depositada durante a eletrodeposição nas superfícies dos aços atribui propriedades que melhoram a resistência do material à corrosão e durabilidade. A aplicação da camada de zinco por exemplo, é muito comum, pois essas camadas criam uma barreira protetora contra os agentes corrosivos. Os depósitos de zinco puro, ou ligas de zinco com níquel ou cobalto, por exemplo, criam uma capa densa que atua como uma proteção sacrificial, pelo fato de o zinco se corroer primeiro, dificultando a corrosão na superfície da peça. A liga Zn-Ni possui uma estrutura de grãos mais finos e um aspecto mais uniforme, o que aumenta a resistência à corrosão em comparação com o zinco puro, principalmente quando a superfície recebe um tratamento de passivação adicional, como a cromatização, aumentando a aderência e a uniformidade da camada (DULTRA *et al*, 2006; REGONE *et al*, 2011).

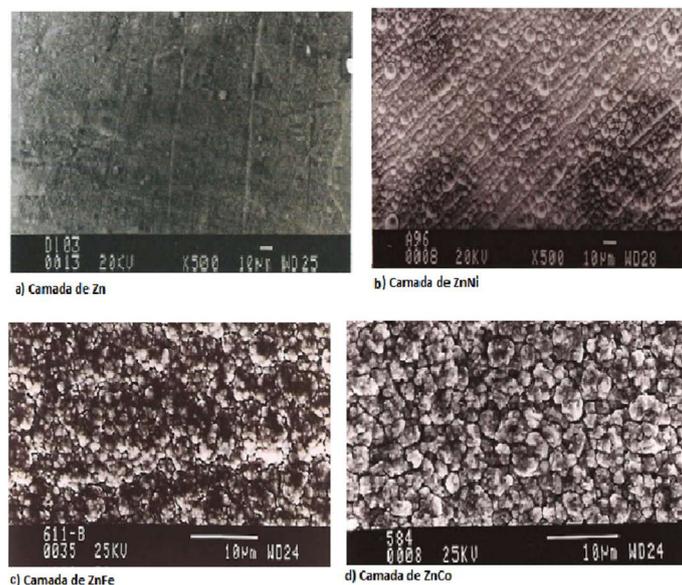
As camadas que contém ligas como Zn-Co também são destacadas por sua maior dureza, ductilidade, tensão interna, soldabilidade e boa propensão de receber revestimentos de tintas, além do mecanismo de proteção sacrificial e por efeito de barreira, dependendo da composição de Co (TOMACHUK, 2018). Estudos com revestimentos Zn-La revelaram que a adição de lantânio pode alterar a microestrutura e reduzir pontos de corrosão localizada, promovendo uma superfície mais nobre e com menor taxa de corrosão em comparação com o zinco puro. Esse controle da composição e da estrutura da camada protetora é essencial para aplicações

industriais que requerem resistência à abrasão e proteção prolongada (REGONE *et al*, 2011).

A eletrodeposição de ligas de Zn-Mn é valorizada por seu comportamento passivo em meios de cloreto. Essas ligas, especialmente com teor de manganês entre 30% e 40%, apresentam resistência à corrosão superior à de outras ligas de zinco. No entanto, o processo de deposição de Zn-Mn tem desvantagens, como dificuldades no controle do processo e menor eficiência de corrente. A elevada proteção contra corrosão proporcionada pelas ligas Zn-Mn ocorre pela dissolução do manganês que protege o zinco e da formação de $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$, um produto de corrosão de baixa solubilidade que atua no revestimento galvânico (TOMACHUK, 2018).

As ligas de ZnNi, ZnFe, ZnCo e ZnMn foram desenvolvidas para oferecer uma resistência à corrosão superior, mantendo um custo acessível em comparação com o zinco puro. Além dessas ligas, outros aditivos também são constantemente estudados para aprimorar a proteção das superfícies de aço contra a corrosão. (TOMACHUK, 2018). A Figura 2, apresenta as camadas formadas pelo Zn, ZnNi, ZnFe e ZnCo.

Figura 2: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da morfologia das camadas formadas por diferentes ligas metálicas utilizadas na eletrodeposição: (a) camada de zinco puro (Zn), (b) camada de liga zinco-níquel (ZnNi), (c) camada de liga zinco-ferro (ZnFe) e (d) camada de liga zinco-cobalto (ZnCo).



Fonte: (TOMACHUK *et al*, 2018; TOMACHUK *et al*, 2015)

Conforme Vieira (2013), embora o revestimento de zinco possua excelentes propriedades protetoras, sua durabilidade é limitada devido à agressividade de determinados ambientes. Com o objetivo de aprimorar a resistência à corrosão e suas

características mecânicas, nanopartículas são incorporadas à matriz metálica durante o processo de eletrodeposição. Dessa forma, são obtidos materiais compósitos com desempenho superior, destacando-se pela maior resistência à corrosão. Segundo Lahodny-Šarc e Kaštelan, L (1981) o silicato de sódio é um aditivo usado para proteção de aço, ferro galvanizado, chumbo, zinco e latão amarelo, em meio aquoso. Tais autores, avaliaram por meio de polarização potencioestática e potenciocinética a inibição da corrosão em ferro e aço macio em solução de silicato de sódio em diferentes concentrações de pH, e assim discutiram a formação de camadas protetoras na presença do inibidor.

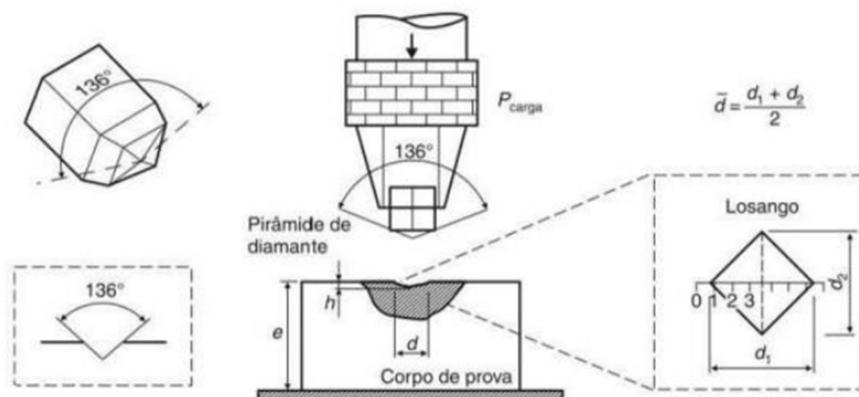
As vantagens potenciais do uso de silicatos são a proteção efetiva do aço carbono, especialmente em fluidos salinos aerados, baixos custos e comportamento não agressivo ao meio ambiente (MAINIER *et al*, 2016).

3.2. ENSAIO DE DUREZA VICKERS

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito está relacionado à capacidade que um material, ao ser pressionado por outro material ou por instrumentos padronizados, demonstra em resistir ao risco ou à formação de uma marca permanente. Os métodos e testes comumente empregados em engenharia utilizam penetradores com formas padronizadas que são aplicados à superfície do material, sob condições específicas de pré-carga e/ou carga. Isso resulta inicialmente em deformação elástica e, em seguida, em deformação plástica. A área ou profundidade da marca superficial formada é medida e correlacionada a um valor numérico que representa a dureza do material. Essa correlação é estabelecida com base na quantidade de força que o penetrador requer para superar a resistência da superfície do material (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

O indentador piramidal de diamante Vickers assume a forma de uma pirâmide de base quadrada com um ângulo de 136° entre suas faces. Esse ângulo é definido pelas linhas tangentes às bordas da impressão que partem do fundo dessa marca, conforme ilustrado na figura 3 (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Figura 3: Representação esquemática do ensaio de dureza Vickers, onde um penetrador em forma de pirâmide de diamante com ângulo de 136° é pressionado contra a superfície do corpo de prova sob uma carga predefinida..



Fonte: (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Visualizando a Figura 3, percebe-se que a impressão formada pelo penetrador, possui duas diagonais, d_1 e d_2 . Segundo Garcia, Spim e Santos (2012), estas diagonais serão medidas, através do uso de um microscópio acoplado a máquina de testes, e utilizado o cálculo da dureza, conforme demonstrado nas equações 1 e 2.

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot P \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{0,189}{d^2} \quad (2)$$

Onde:

- P = carga (N).
- d = comprimento da diagonal da impressão (mm).
- $\theta = 136^\circ$.

Conforme escrito por Garcia, Spim e Santos (2012). neste ensaio de dureza, a carga aplicada pode variar de 1 kgf até 120 kgf, para cargas normais, e de 0,1 gf até 1000 gf para ensaios de microdureza. Outro parâmetro que pode variar neste ensaio, é o tempo de aplicação da carga, que pode variar de 10 a 15 segundos para materiais duros, e de 30 a 60 segundos para materiais com uma menor dureza associada.

3.3. ENSAIO DE CORROSÃO

Os aços carbono apresentam baixa resistência à corrosão, sendo bastante suscetíveis ao processo de deterioração quando expostos a ambientes agressivos. A corrosão, resultante de reações eletroquímicas entre o ferro da liga metálica, oxigênio e umidade, gera produtos como a ferrugem, comprometendo a integridade estrutural

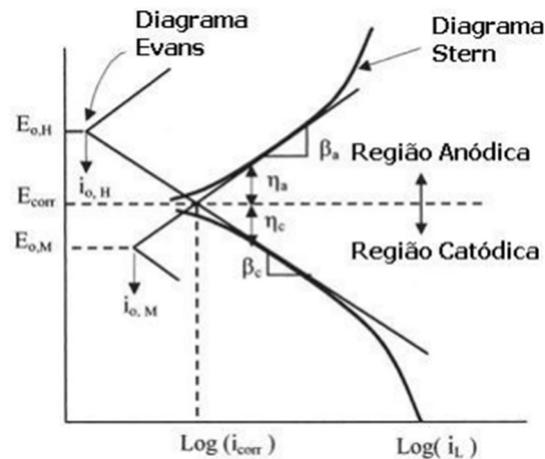
do material. Fatores como a composição do aço, as condições ambientais e as tensões mecânicas também influenciam diretamente a velocidade desse processo (SILVA, 2015). Na indústria petrolífera, por exemplo, os aços são amplamente utilizados, mas enfrentam desafios devido à exposição a ambientes extremamente agressivos. Durante todo o processo, desde a extração até o armazenamento de derivados de petróleo, os materiais são submetidos a fluidos corrosivos, altas temperaturas e pressões elevadas, intensificando o risco de corrosão e exigindo métodos eficientes de proteção para garantir segurança e durabilidade (LIMA, 2022).

Segundo Silva (2023), para contornar os efeitos corrosivos, os revestimentos de filmes finos são utilizados para proteção contra corrosão, atuando como barreira iônica, ânodo de sacrifício ou incorporando inibidores. Materiais compósitos, com boas propriedades de adesão, deformação, autocura e condutividade, melhoram a eficiência da proteção, inibindo trincas, reduzindo desgaste e atuando como barreira de difusão

3.4. CURVAS DE POLARIZAÇÃO

A Figura 4 apresenta um esquema das curvas de polarização para um processo hipotético. Nessa representação, é possível observar a intersecção das curvas anódica e catódica em um ponto específico de potencial, denominado E_c , ou potencial de corrosão. Esse ponto indica que, nesse potencial, as velocidades das reações anódicas e catódicas se igualam, resultando em um estado de equilíbrio cinético em que a corrente total do sistema é zero. A técnica de polarização linear é aplicada em uma faixa restrita de sobrepotenciais anódicos e catódicos, utilizando coordenadas lineares. Esse método permite a determinação da corrente de corrosão (i_{Corr}), com uma escala de potencial em torno de ± 10 mV a partir do potencial de corrosão (E_{corr}) (MELO, 2009).

Figura 4: Curva de polarização esquemática mostrando extrapolação de Tafel formada pela intersecção das curvas anódicas e catódicas em um ponto do potencial de corrosão (E_c).



Fonte: (MELO, 2009).

Segundo Melo (2009) com base nas curvas de polarização obtidas, é possível identificar dois fatores que estão associados à corrosão:

- **Potencial de corrosão:** É um potencial que estabelece um equilíbrio cinético entre as reações catódicas e anódicas que ocorrem durante a polarização. Isso significa que a velocidade das reações anódicas é igual à velocidade das reações catódicas, resultando em uma corrente aplicada nula neste potencial.
- **Resistência à polarização:** Este parâmetro está diretamente ligado à corrente de corrosão e, portanto, está ligado à velocidade do processo de corrosão, tornando-se, portanto, um fator crucial a considerar.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras utilizadas são de aço ABNT 1020 em formato retangular, com dimensões 30 mm x 25 mm x 2 mm. As amostras foram lixadas manualmente até a lixa 1000 mesh para remover defeitos na superfície e posteriormente foram lavadas.

Em seguida, foram furadas na parte superior e pesadas antes da eletrodeposição, depois se fixou o arame de contato e uma das faces da amostra foi coberta com fita de eletrodeposição para delimitar a área de deposição.

4.2. PROCEDIMENTO DE ELETRODEPOSIÇÃO

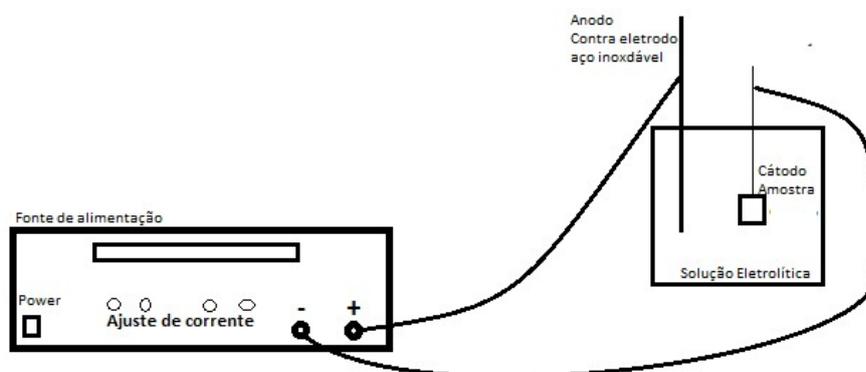
O ensaio foi realizado utilizando uma fonte de corrente contínua POWERBRAS que alimentava o sistema de deposição conforme a Figura 5. Conforme a Figura 6, o diagrama representa o esquema montado durante o experimento.

Figura 5: Montagem do esquema de eletrodeposição.



Fonte: (AUTOR, 2024).

Figura 6: Diagrama do esquema de eletrodeposição.



Fonte: (AUTOR, 2024).

Antes de iniciar a eletrodeposição, as amostras eram submersas em ácido sulfúrico a 1M por 5 min para decapagem. Para o experimento, foi utilizado um béquer de vidro de 500 ml, uma chapa de aço inoxidável como contra eletrodo, para garantir um filme uniforme em toda a face da amostra.

A chapa de aço inoxidável estava ligada ao polo positivo, funcionando como ânodo e a amostra o cátodo, no polo negativo. O eletrólito base foi uma solução de $ZnCl_2$ (150g/L) e H_3BO_3 (15g/L), em 400 ml de água destilada. Nessa solução foram acrescentadas Na_2SiO_3 (20g/L) e NaH_2PO_4 (1,5g/L) para efeitos de estudo e comparação dos revestimentos.

A Tabela 1 apresenta as quatro condições que foram submetidas as 12 amostras. Inicialmente a eletrodeposição foi realizada apenas com a solução de Cloreto de zinco no primeiro grupo de amostras. Nos grupos 2, 3 e 4, foi adicionado a solução de Na_2SiO_3 (20g/L) e NaH_2PO_4 (1,5g/L) em três condições diferentes, 50 ml, 100 ml e 150 ml, respectivamente. Uma amostra de cada grupo foi destinada para o ensaio de dureza, análise microscópica e duas amostras para ensaio de polarização.

Tabela 1: Condições que foram submetidas cada grupo de amostras.

Condição	Solução (mL)	Amostras
1	400 mL $ZnCl_2$	A1
		A2
		A3
2	350 mL $ZnCl_2$ + 50 mL Na_2SiO_4	A4
		A5
		A6
3	300 mL $ZnCl_2$ + 100 mL Na_2SiO_4	A7
		A8
		A9
4	250 mL $ZnCl_2$ + 150 mL Na_2SiO_4	A10
		A11
		A12

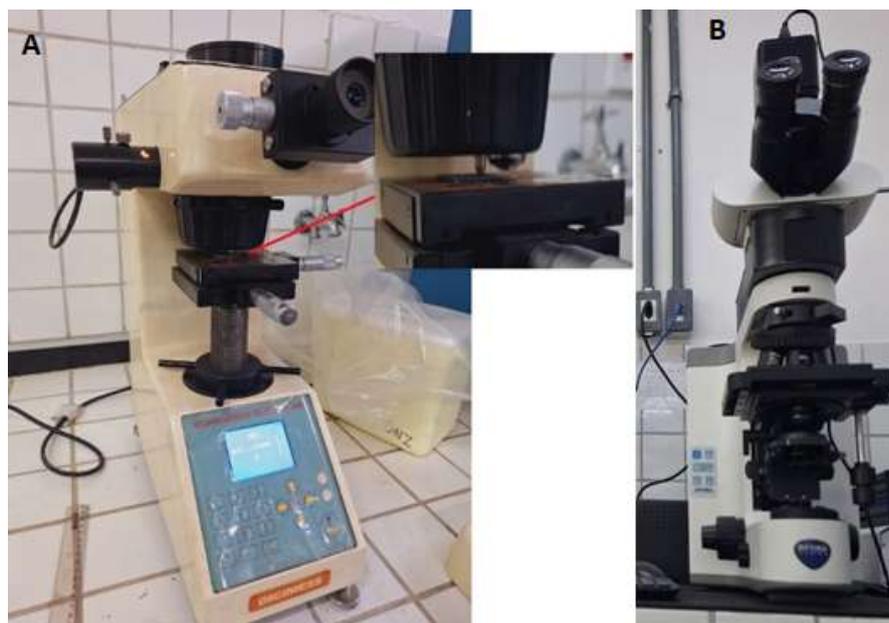
Fonte: (Autor, 2025).

A eletrodeposição foi realizada em corrente direta de 1 A, com duração de 5 min sob agitação, para melhor homogeneidade da solução. Após a deposição as amostras eram secas e pesadas novamente.

4.3. ENSAIO DE DUREZA

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando o microdurometro Vickers 1000G da Digimess, Figura 7a, e utilizou-se uma carga de 1N para fazer a indentação. Para medição das diagonais foi utilizado o microscópio Óptica, Modelo B-1000PH, conforme Figura 7b.

Figura 7: Ensaio de dureza Vickers em uma amostra de aço sob carga de 1N por 15 segundos e análise microscópica. A) Indentador Digimess; B) Microscópio Óptica.



Fonte: (Autor, 2024).

Para o experimento foram escolhidas uma amostra sem filme e uma de cada grupo (A0, A1, A6, A8 e A11) e fez-se 9 indentações ao longo de cada amostra. A Figura 8 apresenta os locais que foram efetuadas as indentações, seguindo o mesmo padrão para as demais amostras.

Figura 8: Locais que foram escolhidos para as indentações ao longo da amostra.

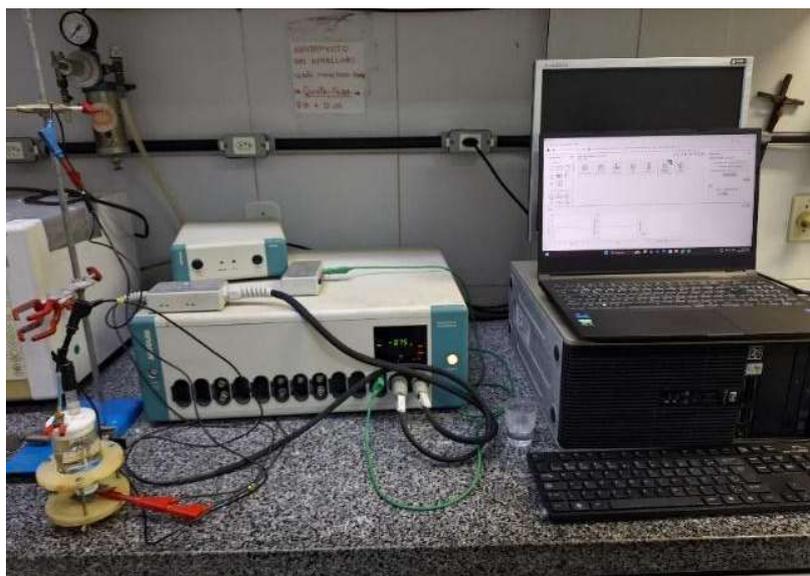


Fonte: (Autor, 2024).

4.4. ENSAIO DE POLARIZAÇÃO

O ensaio de polarização foi realizado utilizando um Potenciostato – Galvanostato, μ Autolab, empregando uma célula de vidro com capacidade de 300 mL contendo o eletrodo de referência e o contra-eletrodo de platina, o eletrodo de trabalho e a solução de NaCl 0,1%. O potencial empregado foi de ± 150 mV em relação ao potencial de circuito aberto. As amostras com e sem revestimento foram avaliadas. A Figura 9 mostra a configuração do ensaio.

Figura 9: Ensaio de Polarização

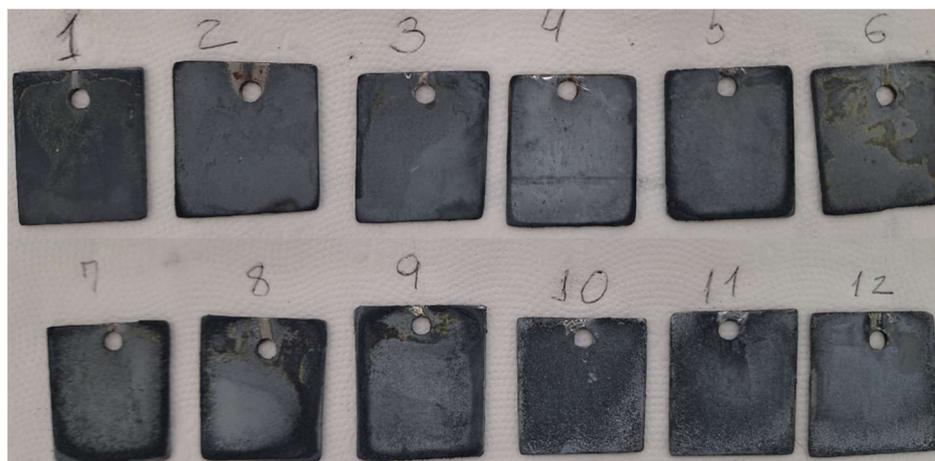


Fonte: (Autor, 2024).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 10, pode-se observar o filme depositado sobre a superfície das amostras com a coloração acinzentada, típico dos filmes de zinco, além de apresentar em algumas amostras uma coloração esbranquiçada devido a presença do silicato de sódio.

Figura 10: Amostras eletrodepositada sob cada condição apresentando filmes característicos da eletrodeposição de zinco e um filme mais esbranquiçado com a adição do silicato de sódio..



Fonte: (Autor, 2024).

Nota-se também uma diferença de deposição no centro e nas bordas de algumas amostras. Segundo Kubiaki (2017) esse efeito ocorre devido a uma maior nucleação nas bordas, apresentando microestrutura constituída por grãos equiaxiais onde a densidade decorrente é maior. Pode-se inferir que a densidade da corrente e a temperatura local têm um papel importante no desenvolvimento dos depósitos. Este fenômeno é justificado pela maior densidade de corrente nas pontas, devido ao efeito das bordas no campo elétrico aplicado, o que provoca uma aceleração do núcleo. Molina (2013) também afirma que há uma maior densidade de corrente nas extremidades, devido ao depósito ter uma coloração mais escura nessa área, o que pode levar ao destacamento da camada.

Na Tabela 2 são apresentados os valores de massa antes e após o ensaio, além da massa do filme. O filme das amostras sem aditivo (A1, A2 e A3) é relativamente baixa (0,14 g, 0,047 g e 0,042 g). A variação significativa da massa em A1 pode indicar algum desvio experimental. Com o aumento da quantidade de aditivo, a massa do filme aumenta gradualmente, com valores maiores nas amostras com 50

ml (A4-A6), 100 ml (A7-A9), e 150 ml (A10-A12). Isso sugere que o silicato de sódio contribui positivamente para a deposição de zinco.

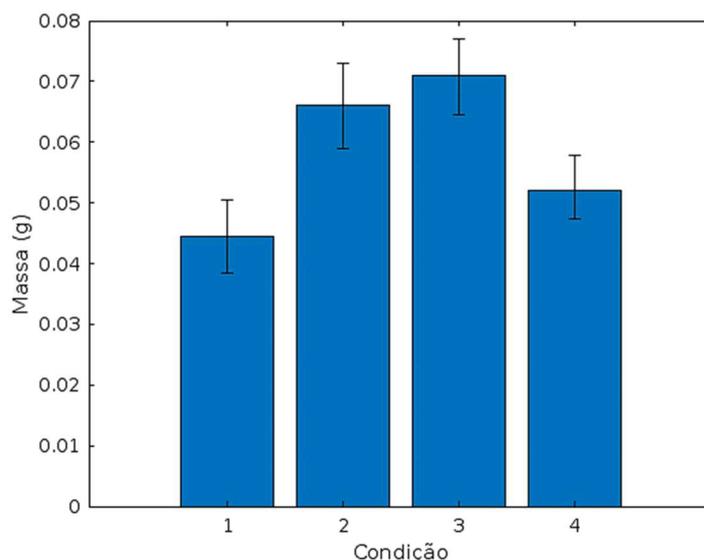
Tabela 2: Massas antes e após a Eletrodeposição.

Condição	Massa antes (g)	Massa após (g)	Massa do filme (g)	Média (g)
1	8,34	8,47	0,14	0,07±4,50E-02
	9,17	9,21	0,04	
	8,26	8,30	0,04	
2	8,30	8,36	0,06	0,06±3,80E-02
	8,11	8,17	0,06	
	8,19	8,26	0,07	
3	7,55	7,63	0,08	0,07±6,3E-02
	8,11	8,18	0,06	
	9,33	9,40	0,06	
4	8,01	8,06	0,04	0,05±2,4E-02
	8,38	8,43	0,05	
	8,79	8,85	0,05	

Fonte: (Autor, 2024).

O desvio padrão da condição 1 (0,045 g) revela-se inconsistente em relação aos desvios das demais amostras apresentando uma variação muito alta. Pode ser observado pela Tabela 2 em que os valores das demais condições foram mais baixos (0,0038, 0,0063 e 0,0024). Tal alteração no desvio ocorreu devido a massa da amostra A1 que foi superior às amostras do mesmo grupo. Essa variação pode ter ocorrido por diversos fatores, como a oscilação da densidade de corrente e da agitação presente durante o experimento. Segundo Costa (2020), tais fatores influenciam diretamente na morfologia e na composição do depósito, levando a inconsistências nos depósitos e elevando o desvio padrão. O Gráfico 1 apresenta a média entre as massas de cada condição. Para o primeiro grupo o valor da massa de A1 não foi considerado para calcular a média devido à discrepância em relação a A2 e A3. Pelo Gráfico 1, percebe-se que ao se considerar apenas a média de A2 e A3 o erro não sofre tanta variação, mostrando que as amostras só com $ZnCl_2$ resultam em menor massa, ou seja, menos recobrimento. Para os demais grupos, nota-se um aumento na média das massas, conseqüentemente maior deposição nas amostras.

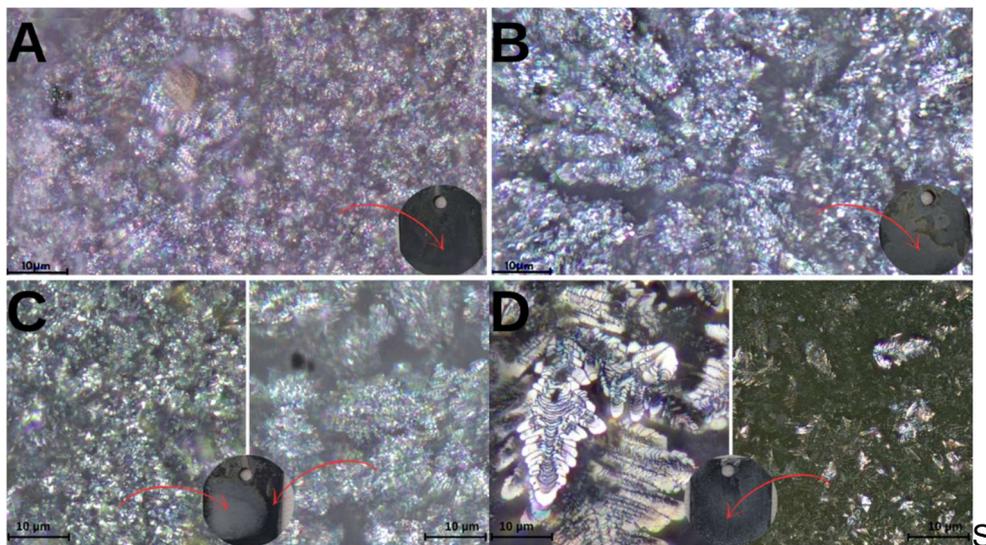
Gráfico 1: Variação da média da massa depositada (g) em função das diferentes condições de eletrodeposição.



Fonte: (Autor, 2025).

A Figura 11, apresenta a imagem microscópica de algumas amostras evidenciando o efeito dos depósitos obtidos. Segundo Ponte (2003) e Tomacuk (2015) os depósitos podem ser planos e brilhantes, rugosos, granulares, dendríticos e ainda pulverulentos (forma de pó). Na figura 11A e 11B pode-se notar o padrão brilhante, típico o de grãos finos, além de indicar do uma distribuição na superfície com cristais ou grãos metálicos. Segundo Tomachuk (2015) a distribuição desses depósitos pode ser relativamente uniforme, aparecendo algumas irregularidades ao longo do filme depositado. Porém, a figura 11B, apresenta padrões mais distintos, sugerindo que a incorporação do silicato de sódio influenciou na morfologia do depósito atuando como um modificador na superfície, afetando a nucleação e o crescimento dos cristais de zinco, resultando em uma estrutura de grãos mais dendríticos.

Figura 11: Depósitos obtidos típicos da eletrodeposição de zinco, além da alteração da morfologia dos depósitos após a incorporação do silicato de sódio e a formação dendritas e irregularidades ao longo do filme: A) Amostra 1 ($ZnCl_2$); B) Amostra 6 ($ZnCl_2 + 50 \text{ mL } Na_2SiO_4$); C) Amostra 8 ($ZnCl_2 + 100 \text{ mL } Na_2SiO_4$) D) Amostra 11 ($ZnCl_2 + 150 \text{ mL } Na_2SiO_4$).



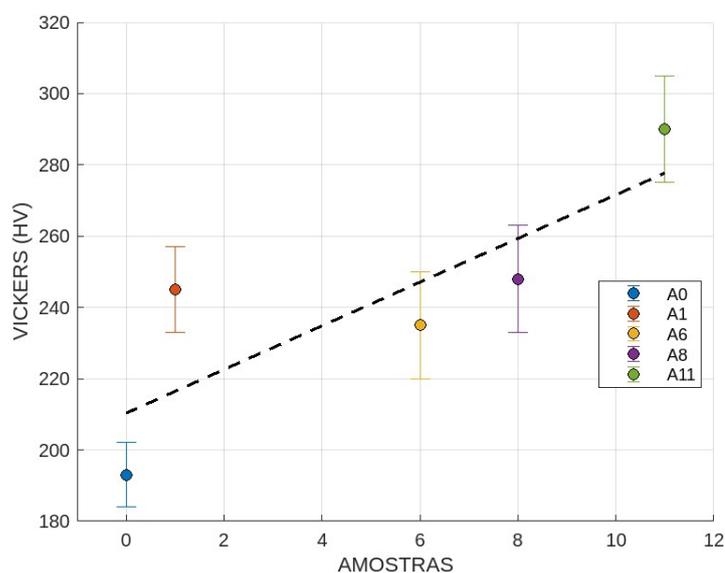
Fonte: (Autor, 2024).

A figura 11C, foi capturada em duas regiões da amostra como indicam as setas. As áreas de depósito indicam uma distribuição irregular do filme, na região mais escura percebe-se a formação de crateras, indicando uma espessura maior do depósito, entretanto com uma formação pulverulenta. Segundo Ponte (2003), a formação pulverulenta ocorre devido a um elevado grau de dispersão, o que faz com que o eletrodo escureça rapidamente assim que a deposição em forma de pó se inicia, resultando em baixa aderência e alta rugosidade. Ele afirma ainda que surge numa região de maior densidade de corrente, correndo nucleação nas bordas. A figura 11D, apresenta uma micrografia com formações dendríticas e uma superfície mais uniforme, sugerindo uma deposição com uma camada mais compacta. As dendritas indicam uma competição entre o crescimento dos grãos e a uniformidade do depósito. Isso pode estar relacionado com a interação química entre o zinco e o silicato. Ponte (2003) destaca alguns fatores que afetam o crescimento das dendritas, incluindo o momento em que o sobrepotencial é excedido e o aumento na densidade de corrente. Ele conclui que isso ocorre devido à formação de um campo de difusão dos íons que serão depositados, o que favorece o surgimento de protuberâncias dendríticas na direção das regiões de maior concentração.

5.1. MICRODUREZA

A dureza média do aço ABNT 1020 sem revestimento (A0) foi de 192,5 HV. As amostras tratadas apresentaram aumentos significativos na dureza. Como pode ser observado pelo Gráfico 2. A dureza média da amostra A1 (revestimento apenas de ZnCl) aumentou para 245,67 HV (incremento médio de 27,6% em relação à A0). Isso pode ser atribuído à maior quantidade de massa depositada, além de que o revestimento de zinco possui dureza maior que o aço base e distribui as tensões de forma mais uniforme.

Gráfico 2: Microdureza associada a incorporação do silicato de sódio. A incorporação do silicato aumento a dureza em até 290 HV para a amostra 11, um aumento de 51,2% em relação a A0, amostra sem filme.



Fonte: (Autor, 2024).

A dureza da amostra A6 (300 mL de zinco + 100 mL de silicato de sódio) ficou cerca de 248,22 HV um incremento de 28,4% em relação a A0. Para A11, obteve-se uma dureza média de 290,93 HV (um crescimento de 51,2% em relação a A0). Uma maior proporção de silicato de sódio, pode ter gerado uma microestrutura com dureza superior. Segundo Ghorbani, et al (2015) que investiga o impacto do uso de nanopartículas de SiO₂ em revestimentos de zinco aplicados por eletrodeposição. Ele demonstra que a adição de silicato de sódio melhora a dureza da superfície devido à incorporação uniforme das partículas de SiO₂ na matriz de zinco. Este efeito é otimizado por parâmetros como o potencial aplicado durante o processo, que influencia a taxa de deposição das partículas. O revestimento também apresenta melhor resistência à corrosão graças à distribuição uniforme das partículas. Além de

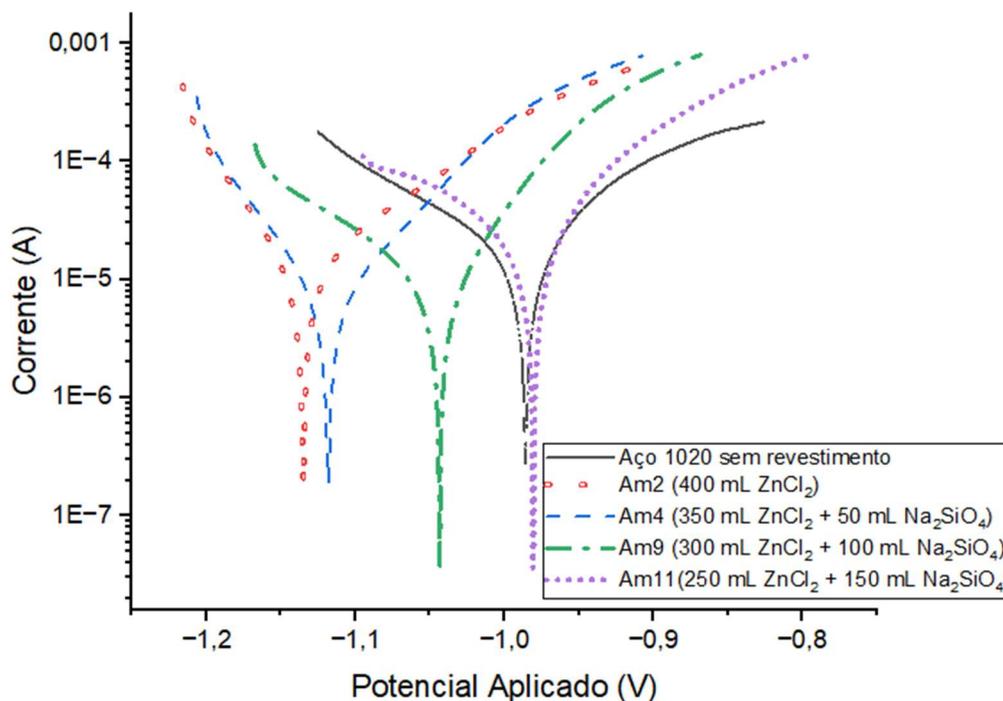
constatar que níveis mais elevados de SiO₂ em nanocompósitos de Zn/SiO₂ aumentam significativamente a dureza do revestimento em até 800 HV, com melhor adesão ao substrato.

Shiohara et al (1991) discute como a adição de partículas de sílica ao banho de eletrodeposição influencia as propriedades dos revestimentos de zinco. Assim a dureza do revestimento também é influenciada pela sílica devido à sua interação com óxido de zinco (Zn(OH)₂), que se forma na superfície das partículas de sílica. Essa interação contribui para a melhoria das propriedades mecânicas, incluindo a resistência à corrosão e o aumento da densidade do revestimento.

5.2. ENSAIO DE POLARIZAÇÃO LINEAR

A resistência a corrosão foi avaliada por meio do experimento de polarização, os dados estão apresentados graficamente na Figura 12.

Figura 12: Curvas de polarização para o aço 1020, em solução NaCl 0,1%. Os potenciais de corrosão mais positivo e menor valor de corrente de corrosão indicam uma menor propensão à corrosão para amostra a2, a4 e a9. A amostra com alta concentração de silicato não obteve melhoria na resposta à corrosão.



Fonte: (Autor, 2025).

$$Efic \% = 100 \times \left(\frac{I_{corr,0} - I_{corr}}{I_{corr,0}} \right) \quad (3)$$

Os valores da eficiência do silicato de sódio foram calculados a partir da equação 3. Os termos $I_{corr,0}$ e I_{corr} representam a densidade de corrente de corrosão em A/cm² na ausência e na presença do do silicato, respectivamente. A Tabela 3 apresenta os valores extraídos das curvas de polarização em termos de Potencial de corrosão (E_{corr}), Corrente de corrosão (I_{corr}) e Resistência a polarização (R_p).

Tabela 3: Parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de Polarização Potenciodinâmica.

Amostra	ba (V/dec)	bc (V/dec)	R_p (Ω)	E_{corr} (V)	I_{corr} (A)	Eficiência(%)
aço_1020	0,16	0,34	1199,90	-0,99	3,89E-05	-
am2	0,13	0,07	1266,30	-1,14	1,62E-05	80,77
am4	0,10	0,07	2045,60	-1,12	8,85E-06	89,50
am9	0,06	0,11	1997,20	-1,04	8,87E-06	89,47
am11	0,13	0,41	486,96	-0,98	8,83E-05	-4,79

Fonte: (Autor, 2025).

Segundo Romerio (2024) ao analisar os dados deve-se levar em consideração que em geral, um potencial de corrosão mais positivo e menor valor de corrente de corrosão indicam uma menor propensão à corrosão e, desta forma, o revestimento será menos suscetível ao processo corrosivo. Portanto, de acordo com a Figura 12 e a Tabela 3, a amostra de aço puro A0 (aço_1020) e a amostra A11 (am11) apresentaram os potenciais de corrosão mais negativos e maiores valores de corrente de corrosão, então, são menos resistentes a corrosão. As amostras A2, A4 e A9 apresentaram os potenciais de corrosão mais positivos e menores valores de corrente de corrosão, sendo estes mais resistentes a corrosão. Sendo que as amostras A2 e A9 apresentaram valores mais baixos de I_{corr} , indicando maior proteção. Além disso, em relação a amostra A11 o excesso de silicato pode alterar a porosidade e aderência do depósito, o que justifica a diferença entre a amostra A9 e A11. O equilíbrio entre cloreto de zinco e silicato de sódio pode influenciar diretamente na resistência do revestimento. No estudo de Sassi et al. (2014), a adição de silicato de sódio ao banho de eletrodeposição de ligas de níquel-tungstênio (Ni-W) resultou em melhorias significativas nas propriedades dos revestimentos produzidos. Levando a formação de um depósito mais homogêneo e compacto. Além de alcançar uma boa estabilidade ao ser imerso por longos períodos em solução de cloreto. Diante disso é possível

afirmar que as concentrações de silicato de sódio apresentaram melhorias em relação ao aço ABNT 1020 sem revestimento, entretanto maiores concentrações não se mostrou eficiente.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, revestimentos de $ZnCl_2$ e Na_2SiO_4 foram obtidos por eletrodeposição, após análises dos resultados é possível concluir que:

A análise mostra que a deposição de zinco nas amostras é dependente das condições de eletrodeposição, com mudanças na densidade da corrente afetando o crescimento dos cristais. O silicato de sódio ajuda a melhorar a deposição aumentando a massa do filme e mudando a forma dos depósitos, que vão de grãos finos e brilhantes para formas dendríticas e mais compactas. Esses resultados mostram que o silicato de sódio influencia bem o processo de eletrodeposição, mudando a forma dos grãos e promovendo uma deposição mais uniforme e controlada.

O experimento de microdureza mostrou que houve um aumento significativo na dureza das amostras após a adição do zinco e do silicato, com a A1 alcançando 245,67 HV (27,6% de incremento) e a A6 chegando a 248,22 HV (28,4% de incremento). A amostra A11, com maior quantidade de silicato de sódio, apresentou uma dureza de 290,93 HV, um aumento de 51,2%. Portanto, o silicato de sódio melhora a dureza e a resistência à corrosão devido à sua interação com o zinco, formando uma microestrutura mais densa e uniforme.

A resistência à corrosão foi estudada por polarização, e os resultados mostraram que o aumento da concentração de silicato de sódio melhora a resistência à corrosão, porém até um certo nível. As amostras que tiveram essa melhora apresentaram menores valores de corrente de corrosão (I_{corr}) e potenciais de corrosão mais positivos. A amostra A11, com excesso de silicato, teve menor resistência devido à alteração da porosidade e aderência do depósito. A adição equilibrada de silicato de sódio melhora a proteção, mas concentrações altas podem reduzir a eficácia, contrastando com resultados de estudos anteriores que indicam melhor eficiência com maiores concentrações.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da morfologia e espessura de revestimentos zinco com silicato de sódio aplicados a aços carbono usando MEV, e análise da resistência à corrosão por impedância eletroquímica.
- Análise da microestrutura de revestimentos silicato de sódio e sua resistência eletroquímica em diferentes condições ambientais.
- Investigação da influência dos parâmetros de eletrodeposição (densidade de corrente, temperatura e composição do banho) na formação de dendritas em camadas de zinco.
- Estudo da adição de compostos como silicato de sódio na deposição de Zn e seu impacto na estrutura dendrítica.
- Avaliação do impacto da variação da densidade de corrente na nucleação e crescimento de dendritas em revestimentos eletrodepositados de cobre, zinco ou níquel.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, P. M. S. et al. Avaliação da influência dos parâmetros na eletrodeposição de zinco na superfície do aço carbono. Universidade Federal do Sul da Bahia, 2020.

CHANG, Y-C. A kinetic model for the anodic dissolution of zinc in alkaline electrolyte with sodium metasilicate additions. *Electrochimica Acta*, v. 41, n. 15, p. 2425-2432, 1996.

COSTA, Josiane Dantas et al. Influência da densidade de corrente e da agitação mecânica no processo de eletrodeposição de ligas Zn-Ni. Research, Society and Development.

DA SILVA, Marielle Mara et al. Desenvolvimento de filmes finos de TiO₂, TiO₂/RGO e TiO₂/RGO/Nb₂O₅ depositados em aço AISI 304 para aplicação como revestimentos anticorrosivos. 2023.

DULTRA, C. A. M. et al. Estudo da corrosão de eletrodepósitos de ligas Zn-Ni em soluções aquosas contendo NaCl 3,5%. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2006.

FERRI, G. L. R. Z. Estudo do desgaste entre aço SAE 1020 e polímeros de baixo atrito. Bauru - SP, 2021.

GHORBANI, M.; SALEHI, F.; RAZAVIZADEH, O. Enhanced hardness and corrosion resistance of Zn/SiO₂ films by electrodeposition. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 162, n. 9, p. D480, 2015.

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION. Relatório técnico. 2019.

KUBIAKI, B. T. Análise da influência dos parâmetros de processo de eletrodeposição na geração de destacamento em camada de cromo duro funcional. 2017.

LAHODNY-ŠARC, O.; KAŠTELAN, L. The influence of pH on the inhibition of corrosion of iron and mild steel by sodium silicate. *Corrosion Science*, v. 21, n. 4, p. 265-271, 1981.

LIMA, Eric Fortunato Soares. Propriedades mecânicas e resistência à corrosão de aços-carbonos aplicados na indústria de petróleo e gás: uma revisão de literatura. 2022.

MAINIER, F. B.; FIGUEIREDO, A. A. M.; FREITAS, A. E. R.; ALENCAR JUNIOR, A. A. M. The use of sodium silicate as a corrosion inhibitor in a saline drilling fluid: a nonaggressive option to the environment. *Journal of Environmental Protection*, v. 7, p. 2025-2035, 2016.

MANIAM, K. K.; PAUL, S. Corrosion performance of electrodeposited zinc and zinc-alloy coatings in marine environment. *Corrosion Materials Degradation*, v. 2, p. 163–189, 2021.

MAPELLI, R. F. Zinco – características e aplicações como elemento no desenvolvimento de tecnologia. *Revista Tecnologia e Tendências*, v. 9, n. 1, p. 86-98, 2014.

MARCHETTI, G. P. Estudo do processo de eletrodeposição por corrente pulsada para zinco e liga ZnFe com partículas de terras-raras. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MARTINS, D. F. Estudo de banhos ácidos para substituição de banho alcalino cianídrico na eletrodeposição de zinco sobre pregos. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MELO, R. L. Eletrodeposição, caracterização e estudos de corrosão de camadas de Ni-Mo-P. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2009.

MOLINA, N. I. Aplicación de técnicas de electrodeposición mediante pulsos de corriente para la obtención de recubrimientos metálicos. 2013. Tese (Doutorado) – Universitat de Barcelona, Barcelona, 2013.

PONTE, H. A. Fundamentos da eletrodeposição: introdução. Departamento de Tecnologia Química, Universidade Federal do Paraná, 1999.

REGONE, N. N. et al. Eletrodeposição pulsada de uma liga Zn-La. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011.

RIBEIRO, J. P. et al. Processos eletrolíticos: fundamentos e aplicações em matrizes ambientais. 2021.

SASSI, W. et al. Study of the electroplating mechanism and physicochemical properties of deposited Ni-W-Silicate composite alloy. *Electrochimica Acta*, v. 117, p. 443-452, 2014.

SHIOHARA, Y. et al. The deposition behavior of electrodeposited zinc-silica composite coating from a sodium nitrate-added bath and the coating characteristics. *Tetsu-to-Hagané*, v. 77, n. 7, p. 878-885, 1991.

SILVA, C. R. P. Variação da composição química da liga Ni-W em função de parâmetros utilizados no processo de eletrodeposição. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2024.

SILVA, Marcos VF et al. Corrosão do aço-carbono: uma abordagem do cotidiano no ensino de química. *Química Nova*, v. 38, n. 2, p. 293-296, 2015.

TOMACHUK, C. R. et al. Ligas de zinco para proteção contra a corrosão. 2018.

TOMACHUK, C. R. et al. Revestimentos de zinco sobre aços e suas aplicações. 2015.

YUAN, L. et al. Effects of additives on zinc electrodeposition from alkaline zincate solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017.

ZOPPAS, J. Contribuição ao estudo da influência do cianeto em soluções alcalinas para eletrodeposição de zinco. 1982. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.