

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS
E DA TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PROCESSOS E TECNOLOGIAS

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MEIOS CORROSIVOS NA
DEGRADAÇÃO DE UM REVESTIMENTO COMERCIAL DE CROMO
DURO UTILIZADO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Camila Favretto

Caxias do Sul, 2026

Camila Favretto

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MEIOS CORROSIVOS NA
DEGRADAÇÃO DE UM REVESTIMENTO COMERCIAL DE CROMO
DURO UTILIZADO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de mestre em Engenharia de Processos, orientado pela Prof.^a Dr.^a Lílian Vanessa Rossa Beltrami e coorientado pela Dr.^a Marielen Longhi.

Caxias do Sul, 2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

F277i Favretto, Camila

Influência de diferentes meios corrosivos na degradação de um revestimento comercial de cromo duro utilizado na indústria alimentícia [recurso eletrônico] / Camila Favretto. – 2026.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2026.

Orientação: Lillian Vanessa Rossa Beltrami.

Coorientação: Marielen Longhi.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Corrosão e anticorrosivos. 2. Eletrólitos. 3. Revestimentos - Processos. 4. Alimentos - Indústria. I. Beltrami, Lillian Vanessa Rossa, orient. II. Longhi, Marielen, coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 620.193:664

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Márcia Servi Gonçalves - CRB 10/1500

Camila Favretto

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MEIOS CORROSIVOS NA
DEGRADAÇÃO DE UM REVESTIMENTO COMERCIAL DE CROMO
DURO UTILIZADO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de mestre em Engenharia de Processos, Prof.^a Dr.^a Lílian Vanessa Rossa Beltrami e coorientado por Dr.^a Marielen Longhi.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 05 DE AGOSTO DE 2026.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Lílian Vanessa Rossa Beltrami - UCS

Coorientadora: Dr.^a Marielen Longhi - UCS

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Lisete Cristine Scienza - UFRGS

Prof.^a Dr.^a Cleide Borsoi - Univates

Prof.^a Dr.^a Camila Baldasso - UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado força e calma nos momentos em que tudo parecia mais difícil, e por ter me acompanhado ao longo de toda essa caminhada.

Aos meus pais, por tudo. Pelo apoio, pelo incentivo, pela paciência e por sempre acreditarem em mim, até quando eu mesma tive dúvidas. Essa conquista é tão minha quanto de vocês.

À minha família, por entenderem minha ausência em tantos momentos e, ainda assim, estarem sempre ao meu lado, torcendo e incentivando.

À minha orientadora, LÍlian, pela orientação ao longo desse trabalho, pela confiança e por todos os ensinamentos que fizeram diferença nessa trajetória. À minha coorientadora, Marielen, pela disponibilidade, pelas contribuições e pelo apoio durante o desenvolvimento deste estudo.

Ao LCOR, por toda a estrutura e suporte, e por ter sido fundamental para a realização deste trabalho.

Aos colegas e professores, pelas trocas, pelas conversas e por todo aprendizado ao longo do caminho.

E, por fim, a todos que de alguma forma fizeram parte dessa fase, meu muito obrigada.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Minerais encontrados na farinha de trigo	33
Tabela 2 - Formulação de massa de <i>wafers</i> utilizada como base neste estudo	38
Tabela 3 - Composição dos eletrólitos e estruturas químicas dos compostos representativos.	39
Tabela 4 - Concentração de cromo total nos eletrólitos após os ensaios eletroquímicos.....	63
Tabela 5 - Classificação comparativa dos eletrólitos quanto ao desempenho corrosivo.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Polarização potenciodinâmica	19
Figura 2 - Exemplo de diagrama de Nyquist utilizado na interpretação de dados de impedância eletroquímica.....	21
Figura 3 - Diagrama de Bode: módulo da impedância ($\log Z $) em função da frequência ($\log f$)	22
Figura 4 - Diagrama de Bode: ângulo de fase ($-\varphi$) em função da frequência ($\log f$)	22
Figura 5 - Esquema representativo do ensaio de névoa salina	23
Figura 6 - Fluxograma do processo produtivo de <i>wafers</i>	32
Figura 7 - Placa de cozimento aberta (1); Placa de cozimento fechada (2); Injeção de massa na placa (3).....	34
Figura 8 - Gráfico da pressão x tempo de cozimento	35
Figura 9 - Imagem ilustrativa da amostra metálica revestida com cromo duro utilizada neste estudo, destacando-se as suas dimensões	37
Figura 10 - Fluxograma das etapas de preparação das amostras estudadas	38
Figura 11 - Fluxograma das etapas de preparação dos eletrólitos utilizados neste estudo.....	39
Figura 12 - Fluxograma das etapas experimentais realizadas neste estudo.....	41
Figura 13 - Imagem ilustrativa de uma célula eletroquímica de três eletrodos conectada ao potenciostato	43
Figura 14 - Evolução da corrosão das amostras de ferro fundido revestidas com cromo duro quando expostas aos ensaios de ASS e NSS	45
Figura 15 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E1 nos dias 1, 42 e 105.....	48
Figura 16 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E2 nos dias 1, 42 e 105.....	49
Figura 17 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E3 nos dias 1, 42 e 105.....	50
Figura 18 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E4 nos dias 1, 42 e 105.....	52
Figura 19 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E5 nos dias 1 e 42.....	53
Figura 20 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E6 nos dias 1, 42 e 105.....	53
Figura 21 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E7 nos dias 1, 42 e 105.....	54
Figura 22 - Módulo da impedância em função do logaritmo da frequência para os diferentes eletrólitos no dia 1.	55
Figura 23 - Módulo da impedância em função do logaritmo da frequência para os diferentes eletrólitos no dia 42	56
Figura 24 - Módulo da impedância em função do logaritmo da frequência para os diferentes eletrólitos no dia 105	57
Figura 25 - MEV-FEG das amostras após 105 horas de imersão nos eletrólitos testados	59
Figura 26 - Imagens de MEV-FEG das amostras imersas nos eletrólitos: E1, E3 e E5.....	60
Figura 27 - Espectros de EDS da amostra íntegra (AI) e das amostras imersas nos eletrólitos.	61
Figura 28 - Distribuição dos elementos detectados por EDS das amostras expostas aos eletrólitos estudados	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 METAIS	13
3.1.1 O ferro	13
3.1.2 O cromo	15
3.2 CORROSÃO DOS METAIS	16
3.2.1 Mecanismos de corrosão	17
3.2.2 Técnicas eletroquímicas para análise da corrosão	18
3.2.3 Ensaios de corrosão acelerada	22
3.2.4 Técnicas complementares de avaliação dos revestimentos	24
3.3 REVESTIMENTOS METÁLICOS	25
3.3.1 Eletrodeposição	26
3.3.2 Cromo duro e cromo decorativo	26
3.4 MATERIAIS E CORROSÃO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.....	29
3.5 PRODUÇÃO DE BISCOITOS TIPO <i>WAFERS</i>	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1 MATERIAIS	37
4.2 MÉTODOS	37
4.2.1 Preparação das amostras	37
4.2.2 Preparação dos eletrólitos	38
4.3 CARACTERIZAÇÃO.....	42
4.3.1 Ensaios de corrosão acelerada	42
4.3.2 Ensaios morfológicos da superfície	42
4.3.3 Ensaios eletroquímicos	43
4.3.4 Espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 ENSAIOS DE CORROSÃO ACELERADA	45
5.2 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO	47
5.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA DAS AMOSTRAS	59
5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS ELETRÓLITOS	63
5.5 CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS	64
6 CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS	66

RESUMO

A corrosão de revestimentos metálicos aplicados em equipamentos da indústria alimentícia pode comprometer a durabilidade dos componentes e a eficiência dos processos, especialmente quando esses materiais permanecem em contato com diferentes substâncias durante a produção. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento corrosivo de um revestimento de cromo duro aplicado sobre ferro fundido, quando exposto a diferentes eletrólitos associados à produção de biscoitos tipo *wafers*. Inicialmente, foram realizados ensaios de névoa salina neutra e acética, nos quais foram avaliadas qualitativamente a evolução da corrosão e as alterações superficiais do revestimento. Posteriormente, as amostras foram submetidas a ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica durante 105 dias de imersão em sete eletrólitos, complementados pela quantificação de cromo total por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente, caracterização por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios X por dispersão de energia, além da avaliação visual das superfícies. Nos ensaios de névoa salina, ambos os meios apresentaram pontos de corrosão após 24 horas de exposição, porém a névoa salina acética apresentou maior ocorrência de produtos de corrosão, enquanto a degradação superficial observada na névoa salina neutra foi menor. Nos ensaios de imersão, os eletrólitos apresentaram diferentes comportamentos eletroquímicos ao longo do período de exposição. O ácido fosfórico apresentou a maior agressividade, com degradação do revestimento antes do final do ensaio, impossibilitando a realização da avaliação eletroquímica no 105º dia, além de apresentar a maior concentração de cromo no meio (5,79 mg/L). O cloreto de sódio e o corante caramelo também apresentaram alterações mais intensas nas superfícies. A análise conjunta dos resultados obtidos pelas diferentes técnicas permitiu estabelecer a ordem de agressividade dos eletrólitos, do mais ao menos agressivo, como: ácido fosfórico, cloreto de sódio, corante caramelo, cacau alcalino, emulsão, farinha de trigo e bicarbonato de sódio. Os resultados demonstraram que a composição dos eletrólitos influenciou o comportamento corrosivo do revestimento de cromo duro, com diferentes níveis de alteração eletroquímica, morfológica e de liberação de cromo. Esses resultados contribuem para a compreensão do comportamento de revestimentos de cromo duro em contato com meios associados à indústria alimentícia e podem auxiliar na avaliação de materiais e no estabelecimento de estratégias de controle da corrosão em equipamentos industriais.

Palavras-chave: Corrosão, Cromo duro, Eletrólitos, Indústria de alimentos.

ABSTRACT

Corrosion of metallic coatings applied to equipment in the food industry can compromise component durability and process efficiency, especially when these materials remain in contact with different substances during production. In this context, this study aimed to evaluate the corrosion behavior of a hard chromium coating applied to cast iron when exposed to different electrolytes associated with wafer biscuit production. Initially, neutral and acetic salt spray tests were performed to qualitatively evaluate the evolution of corrosion and changes in the coating surface. Subsequently, the samples were subjected to electrochemical impedance spectroscopy tests for 105 days of immersion in seven electrolytes, complemented by total chromium quantification using inductively coupled plasma optical emission spectrometry, characterization by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy, and visual evaluation of the surfaces. In the salt spray tests, both media showed corrosion spots after 24 hours of exposure; however, acetic salt spray resulted in a greater occurrence of corrosion products, while the surface degradation observed in neutral salt spray was lower. In the immersion tests, the electrolytes exhibited different electrochemical behaviors throughout the exposure period. Phosphoric acid showed the highest aggressiveness, with coating degradation occurring before the end of the test, which prevented the electrochemical evaluation on the 105th day, in addition to presenting the highest chromium concentration in the medium (5.79 mg/L). Sodium chloride and caramel colorant also showed more pronounced surface changes. The combined analysis of the results obtained using the different techniques allowed the electrolytes to be ranked according to their aggressiveness, from most to least aggressive, as follows: phosphoric acid, sodium chloride, caramel colorant, alkaline cocoa, emulsion, wheat flour, and sodium bicarbonate. The results demonstrated that electrolyte composition influenced the corrosion behavior of the hard chromium coating, resulting in different levels of electrochemical and morphological changes and chromium release. These results contribute to understanding the behavior of hard chromium coatings in contact with media associated with the food industry and may assist in material evaluation and the development of corrosion control strategies for industrial equipment.

Keywords: Corrosion, Hard chromium, Electrolytes, Food industry.

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é o processo de deterioração de um material causado pela interação físico-química com o meio em que está inserido. Esse processo pode ser favorecido por fatores como presença de oxigênio, umidade, contato com substâncias agressivas e temperaturas elevadas. Por ser espontâneo em determinadas condições, pode transformar a superfície metálica, comprometendo sua vida útil e seu desempenho original (Gentil; Ladimir, 2022).

O ferro, assim como outros oxidáveis, é propenso à corrosão quando inserido em ambientes com alta umidade ou agentes oxidantes. Essa suscetibilidade deve-se à formação de óxidos superficiais instáveis, incapazes de criar uma barreira efetiva contra o avanço da corrosão. Embora seja um material de baixo custo e amplamente utilizado, o ferro em condição não protegida enfrenta sérias limitações em ambientes agressivos. Para aumentar sua durabilidade e viabilizar seu uso em aplicações industriais, é fundamental a utilização de revestimentos ou tratamentos de superfície que impeçam ou retardem os processos corrosivos (Ouarga *et al.*, 2023).

O cromo duro é um dos revestimentos utilizados para melhorar propriedades mecânicas de outros materiais, garantindo aumento da vida útil, redução de atrito, aumento na dureza e resistência à corrosão e ao desgaste (Merlo; Léonard, 2021). Na indústria alimentícia encontra-se revestimento à base de cromo presente na produção de biscoitos, especificamente nas placas formadoras de folhas de *wafers*, que são preenchidas com massa e após são fornecidas em elevada temperatura, em torno de 145 °C (Bertolino; Braga, 2017).

O processo industrial de produção de biscoitos é altamente relevante do ponto de vista econômico, uma vez que os biscoitos industrializados estão presentes em aproximadamente 99% dos lares brasileiros. Em 2024, o segmento de biscoitos registrou faturamento de R\$ 33,1 bilhões e consumo superior a 1,5 milhão de toneladas no país, apresentando crescimento de 2,1% em valor e 1,6% em volume em relação ao ano anterior. Esse elevado consumo impõe uma demanda constante e exige que os processos produtivos sejam eficientes e seguros (Abimapi, 2025).

Nesse contexto, a manutenção adequada dos fornos industriais, especialmente das placas metálicas revestidas com cromo duro utilizadas no cozimento dos *wafers*, torna-se fundamental. A identificação e o controle de fatores que favorecem a corrosão desses revestimentos são essenciais não apenas para preservar a integridade dos equipamentos e prolongar sua vida útil, mas também para assegurar a qualidade do produto final e a segurança alimentar dos consumidores.

Além disso, convém que pesquisas científicas estejam alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos na Agenda 2030 da ONU, evidenciando seus impactos potenciais no cotidiano da população (Garlet *et al.*, 2022).

Na dimensão social este estudo contribui para o Objetivo 3, de boa saúde e bem-estar, pois o retardo da corrosão do cromo garante maior segurança ao produto final que é entregue ao consumidor. Isso porque a corrosão pode gerar sais metálicos tóxicos que além de afetarem a saúde podem alterar sabor, aroma e aparência do produto, podendo até ocasionar rancidez (Gentil; Ladimir, 2022).

No âmbito econômico, este estudo poderá contribuir para o Objetivo 9, indústria, inovação e infraestrutura, ao indicar condições que reduzem a degradação do revestimento e podem aumentar a vida útil dos equipamentos. As perdas econômicas associadas à corrosão podem ser diretas, como custos de substituição de peças e manutenção de revestimentos de proteção, ou indiretas, como paradas não programadas, perda de produto, redução de eficiência e contaminação de produtos (Gentil; Ladimir, 2022).

Quanto ao aspecto ambiental, esta pesquisa poderá contribuir com os Objetivos 14 e 15, vida debaixo d'água e vida sobre a terra, respectivamente, ao auxiliar na redução da liberação de resíduos gerados pela degradação do cromo. Na dimensão institucional, pode contribuir técnica e cientificamente com o Objetivo 17, ao produzir resultados que podem apoiar indústrias que utilizam cromo duro em seus processos e favorecer parcerias voltadas à melhoria de desempenho e sustentabilidade.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo investigar a resistência à corrosão de um revestimento de cromo duro aplicado em equipamento utilizado na produção de *wafers*, avaliando sua interação com diferentes meios potencialmente corrosivos associados ao processo produtivo. Busca-se identificar quais eletrólitos intensificam a degradação do revestimento, compreender os mecanismos envolvidos e relacionar esses resultados à durabilidade das superfícies metálicas, à segurança do processo e à melhoria das estratégias de manutenção industrial.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a resistência à corrosão de um revestimento de cromo duro aplicado em equipamentos da indústria de alimentos destinados à fabricação de *wafers*, quando exposto a diferentes meios potencialmente corrosivos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento corrosivo do ferro fundido revestido com cromo duro quando exposto a diferentes eletrólitos compostos por substâncias utilizadas na indústria alimentícia, por meio de técnicas eletroquímicas;
- Identificar e descrever as alterações morfológicas superficiais do revestimento de cromo duro após 105 dias de imersão nos eletrólitos testados, por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura com Emissão de Campo (MEV-FEG) e Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), avaliando-se a presença de trincas, pites, descontinuidades e produtos de corrosão;
- Classificar os eletrólitos testados quanto ao seu potencial de degradação do revestimento de cromo duro, estabelecendo uma ordem de agressividade corrosiva.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 METAIS

Os primeiros metais utilizados pelo homem foram aqueles encontrados em sua forma pura na crosta terrestre, como a prata, o ouro, o cobre e a platina. Não é comum encontrar metais como elementos livres, portanto, são combinados na forma de íons. Algumas bibliografias dividem os metais ferrosos e metais não ferrosos e suas ligas. As ligas metálicas são formadas pela combinação de dois ou mais elementos em diferentes proporções, resultando em propriedades ajustáveis conforme a adição de novos componentes (Pawlicka; Fresqui; Trsic, 2013).

Os metais apresentam tendência a perder elétrons e formar íons positivos quando expostos a determinados ambientes. A formação de compostos metálicos ocorre a partir da interação dos metais com outros elementos (Gentil; Ladimir, 2022). Os materiais metálicos apresentam propriedades mecânicas importantes, como elasticidade, ductilidade, dureza e resistência a diferentes tipos de solicitação, incluindo tração, compressão, flexão, torção e cisalhamento. Também possuem propriedades físicas relevantes para diferentes aplicações, como densidade, condutividade elétrica e térmica, expansão térmica, magnetismo e ponto de fusão (Lesko, 2012). A resistência à corrosão, por sua vez, pode variar de acordo com a composição do material e com as características do meio ao qual ele está exposto.

Entre os diversos metais estudados, o ferro se destaca devido à sua ampla aplicação na indústria para fabricação de equipamentos, máquinas e estruturas. Por isso, sua extração e comercialização desempenham um papel estratégico no comércio mundial. Na construção civil, o ferro é utilizado em armações e estruturas metálicas, garantindo resistência e durabilidade às edificações. Já nas indústrias, é empregado na fabricação de componentes e equipamentos, tornando-se indispensável para o avanço tecnológico (Duarte, 2019).

3.1.1 O ferro

O ferro é um dos metais mais utilizados pela humanidade, a ponto de nomear um período histórico: a Idade do Ferro, marcada pelo avanço na metalurgia e no uso desse material em armas e ferramentas. Antigamente era muito utilizado para a confecção de armas, ferramentas e construções em geral. Atualmente, o ferro continua essencial na produção de

ferramentas, máquinas, meios de transporte e na construção civil (Pawlicka; Fresqui; Trsic, 2013).

O ferro é um metal de transição amplamente utilizado na indústria devido às suas propriedades físicas e químicas. Destaca-se pela sua condutividade elétrica, maleabilidade, ductilidade e resistência mecânica, além de apresentar altos pontos de fusão e ebulição. Seu uso na forma fundida remonta a 1400 a.C., sendo valorizado especialmente por sua versatilidade e desempenho estrutural. No entanto, sua tendência à corrosão em ambientes úmidos impulsionou o desenvolvimento de ligas metálicas com elementos como níquel e cromo, que aumentam sua durabilidade. Estudos indicam que teores superiores a 12% de cromo oferecem ainda mais proteção contra processos corrosivos (Atkins; Jones; Laverman, 2018).

Mehtani *et al.* (2021) analisaram a oxidação de ligas Fe-Cr com teores de cromo entre 0 e 20% e observaram que a resistência à oxidação melhora a partir de 12% de cromo. Isso se deve à formação de óxido de ferro-cromo $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$, que substitui o espinélio $(\text{FeCr}_2\text{O}_4)$ e a magnetita (Fe_3O_4) que são menos estáveis. Esse óxido rico em cromo reduz a taxa de oxidação e melhora a integridade da camada protetora, tornando as ligas mais adequadas para aplicações em altas temperaturas, como em usinas de energia e reatores nucleares.

Nas indústrias utiliza-se muito o ferro fundido que possui carbono e outros metais na sua constituição. O carbono é o constituinte maior do ferro fundido seguido de silício, manganês, fósforo e enxofre (Pawlicka; Fresqui; Trsic, 2013). De acordo com Farayibi, Blüm e Weber (2020), em aplicações industriais também se utiliza o ferro em ligas com cromo, vanádio e molibdênio. A formação de carbonetos de cromo (M_7C_3) e carbonitreto de vanádio (V(C,N)) aumentam a resistência ao desgaste e à corrosão.

Nos últimos anos, alguns estudos têm mostrado que a adição de elementos de liga ao ferro fundido influencia diretamente seu comportamento frente à corrosão. Li, Wang e Zhang (2023) observaram que a presença de cromo contribui para a formação de uma camada superficial mais estável, auxiliando na redução da degradação do material em meios contendo cloretos. De forma semelhante, Zhang, Liu e Chen (2022) relatam que a adição de molibdênio favorece a manutenção dessa camada ao longo do tempo, dificultando o avanço do processo corrosivo, principalmente em condições mais agressivas.

Além disso, Wang, Zhou e Li (2021) verificaram que, mesmo com essas melhorias, o ferro fundido ainda pode apresentar perda de desempenho quando exposto por longos períodos a meios contendo espécies agressivas, como cloretos. Nesses casos, o uso de revestimentos acaba sendo necessário para aumentar a vida útil do material.

Apesar das boas propriedades mecânicas e da ampla aplicação industrial, o ferro

fundido apresenta suscetibilidade à corrosão em determinados ambientes, o que pode comprometer a integridade superficial e reduzir a vida útil dos componentes (Gentil; Ladimir, 2022). Em aplicações industriais, essa limitação torna necessária a utilização de tratamentos superficiais e revestimentos que aumentem a resistência ao desgaste e à corrosão. Entre esses, destaca-se o cromo duro, amplamente empregado para a proteção de superfícies metálicas, cujas características serão apresentadas no próximo item.

3.1.2 O cromo

O cromo em ligas de ferro melhora a resistência à corrosão ao formar carbonetos como M_7C_3 , que atuam como barreiras contra a oxidação. A microestrutura dos aços ferramenta de alto cromo pode ser ajustada conforme a temperatura e a atmosfera de sinterização empregadas no processamento. A combinação de ferro e cromo nessas ligas melhora as propriedades mecânicas e a estabilidade química, sendo utilizada na fabricação de equipamentos para a indústria de alimentos (Farayibi; Blüm; Weber, 2020).

O cromo é amplamente utilizado em máquinas e equipamentos industriais devido à sua dureza, resistência ao desgaste e à corrosão, sendo empregado como revestimento protetor ou decorativo (Fedrizzi *et al.*, 2002). Devido suas características protetivas, o cromo é utilizado como revestimento, pois ocasiona a formação de películas protetoras pela reação que ocorre com os oxidantes do meio corrosivo.

Para obtenção de revestimentos de cromo duro, processos de eletrodeposição são comumente utilizados, aplicando corrente contínua ou corrente pulsada. Gentil e Ladimir (2022) relatam que a morfologia superficial do revestimento pode apresentar trincas, quando utilizado o tipo de corrente contínua, defeitos estes que podem facilitar os processos corrosivos. No processo de eletrodeposição, a peça, que é recoberta com outro material atua como cátodo, e o material a ser depositado atua como ânodo, suspensos em uma solução eletrolítica (Lesko, 2012).

Todos os metais podem receber um revestimento, independentemente de tamanho e forma; o que pode variar é a espessura necessária para a camada de revestimento. O cromo não adere facilmente à maioria dos metais devido a sua capacidade de formar óxidos que aderem na superfície, formando uma camada protetora que impede a adesão de outros materiais. Por isso, sua deposição necessita de um revestimento anterior de ouro, cobre ou níquel (Lesko, 2012).

Nos últimos anos, alguns trabalhos têm focado na relação entre as condições de deposição e o desempenho dos revestimentos de cromo. Baral, Roy e Das (2020) observaram que parâmetros como densidade de corrente e composição do banho influenciam diretamente a morfologia do revestimento, principalmente em relação à formação de trincas. De forma semelhante, Mishra e Balasubramaniam (2020) mostram que essas discontinuidades podem atuar como caminhos preferenciais para a penetração do eletrólito, facilitando o início de processos corrosivos na interface com o substrato.

Além disso, Ganesan, Venkatesh e Kannan (2021) verificaram que o uso de corrente pulsada na eletrodeposição pode gerar revestimentos mais homogêneos e com menor quantidade de defeitos, o que contribui para uma melhor resistência à corrosão quando comparado aos obtidos por corrente contínua.

Neste sentido, estudos voltados à avaliação do comportamento corrosivo de revestimentos de cromo em diferentes meios tornam-se relevantes, especialmente em aplicações da indústria alimentícia, nas quais esses materiais permanecem em contato com diferentes substâncias durante o processamento. A compreensão da interação entre o revestimento e o meio corrosivo permite identificar condições que favorecem a degradação superficial e a perda de desempenho, contribuindo para o aumento da vida útil dos equipamentos e para a confiabilidade do processo.

3.2 CORROSÃO DOS METAIS

A corrosão é um fenômeno natural que compromete as propriedades dos metais, reduzindo sua durabilidade e aumentando os custos na indústria. Para minimizar esses impactos, a escolha dos materiais utilizados em instalações industriais deve ser feita com planejamento adequado. Este fenômeno pode ser observado de diferentes formas, variando conforme o tipo de ataque, as condições ambientais e os fatores mecânicos envolvidos. Elementos como morfologia do desgaste, mecanismo corrosivo, tipo de meio agressivo e localização do ataque influenciam diretamente sua progressão. Os ambientes mais corrosivos incluem atmosferas industriais, águas com alto teor de sais, solos contaminados e produtos químicos agressivos, que aceleram a degradação dos metais. Já alimentos, substâncias fundidas e solventes orgânicos também podem causar corrosão, mas em condições específicas e, geralmente, de forma menos intensa (Gentil; Ladimir, 2022).

A corrosão causa perdas econômicas ao reduzir a eficiência de equipamentos e

comprometer a qualidade dos produtos industriais. O desgaste dos materiais diminui a vida útil das estruturas, elevando os custos de manutenção e substituição de componentes. Além do impacto financeiro, a corrosão pode resultar na contaminação de produtos e no vazamento de substâncias prejudiciais, representando riscos à saúde e ao meio ambiente. Em setores como a indústria química, de transportes e de alimentos, a deterioração de superfícies metálicas pode afetar a segurança e o funcionamento dos sistemas (Hou *et al.*, 2018).

O cromo apresenta elevada resistência à corrosão devido à formação de uma película passiva em sua superfície. Essa película atua como uma barreira entre o metal e o meio, dificultando a continuidade das reações de dissolução. Essa propriedade contribui para o desempenho dos revestimentos de cromo duro, que apresentam elevada resistência à corrosão e ao desgaste (Wang; Ma; Walsh, 2020).

O comportamento do cromo em meio aquoso depende das condições do meio, especialmente do pH e do potencial eletroquímico. Essa relação pode ser avaliada por meio do diagrama de Pourbaix, que permite identificar as condições de estabilidade do cromo metálico e de seus produtos de corrosão (Beverkog; Puigdomenech, 1997).

Para o sistema Cr-H₂O, Beverskog e Puigdomenech (1997) indicaram o Cr₂O₃ como o principal composto sólido estável nas condições aquosas avaliadas. A formação desse óxido está associada à região de passivação do cromo, na qual a presença de um produto sólido sobre a superfície pode limitar a continuidade da dissolução do metal. Dessa forma, o diagrama de Pourbaix auxilia na compreensão da resistência à corrosão do cromo e da influência das condições do meio sobre sua estabilidade (BEVERSKOG; PUIGDOMENECH, 1997).

No caso dos revestimentos de cromo duro, o comportamento frente à corrosão também está relacionado às características do depósito. As condições empregadas durante a eletrodeposição influenciam a estrutura e as propriedades do revestimento, podendo interferir em seu desempenho durante a exposição a meios corrosivos (Wang; Ma; Walsh, 2020).

3.2.1 Mecanismos de corrosão

Conforme mencionado por Gentil e Ladimir (2022), as formas de corrosão podem ser classificadas pela morfologia, causas, fatores mecânicos, meio corrosivo e localização do ataque. Dentre as principais formas estão a corrosão uniforme, que promove perda homogênea de espessura ao longo de toda a superfície, e a localizada, como a corrosão por pite, caracterizada por escavações pontuais e profundas. A corrosão intergranular afeta os contornos dos grãos, comprometendo as propriedades mecânicas, enquanto a transgranular atravessa os

grãos, reduzindo ainda mais a resistência do material. Já a corrosão filiforme ocorre em forma de filamentos superficiais em revestimentos metálicos ou pintados, especialmente em ambientes de alta umidade. Além dessas, existem outras formas de corrosão que são menos comuns.

A corrosão metálica pode ocorrer por mecanismos químicos ou eletroquímicos, dependendo do meio em que o material está exposto. A corrosão química acontece quando o metal reage diretamente com substâncias agressivas, como oxigênio ou dióxido de enxofre, sem a necessidade de um eletrólito, formando óxidos ou outros compostos na superfície (Esmaily *et al.*, 2015). Já a corrosão eletroquímica ocorre na presença de umidade, que cria um filme eletrolítico sobre o metal, permitindo a transferência de íons e elétrons. Esse processo leva à degradação do material por meio de reações anódicas e catódicas e pode ser acelerado pela presença de poluentes como cloretos e sulfatos (Wang; Li; Tian, 2015). Em muitos casos, os dois tipos de corrosão ocorrem juntos, pois poluentes atmosféricos podem iniciar reações químicas antes de se dissolverem na umidade e ativarem processos eletroquímicos (Corvo *et al.*, 2005).

A corrosão atmosférica ocorre quando os metais são expostos a condições ambientais que favorecem reações químicas e eletroquímicas em sua superfície. A umidade relativa é um dos fatores mais influentes, pois afeta diretamente a formação do filme eletrolítico, necessário para a corrosão. Estudos indicam que um aumento na umidade relativa acelera significativamente a corrosão em ligas metálicas (Wang; Li; Tian, 2015). A temperatura também desempenha um papel fundamental, pois quando combinada com alta umidade, eleva a energia de ativação das reações corrosivas e influencia a formação e evaporação do filme eletrolítico (Esmaily *et al.*, 2015). Já a presença de poluentes atmosféricos, como dióxido de enxofre (SO₂) e cloretos, aumenta significativamente a taxa de corrosão ao reagir com a umidade do ar e formar compostos corrosivos sobre a superfície metálica (Castano; De La Fuente; Morcillo, 2007). Além disso, fatores meteorológicos como radiação solar, vento e precipitação afetam a corrosão ao influenciar a deposição de partículas e a remoção de produtos corrosivos na superfície do metal (Corvo *et al.*, 2005).

3.2.2 Técnicas eletroquímicas para análise da corrosão

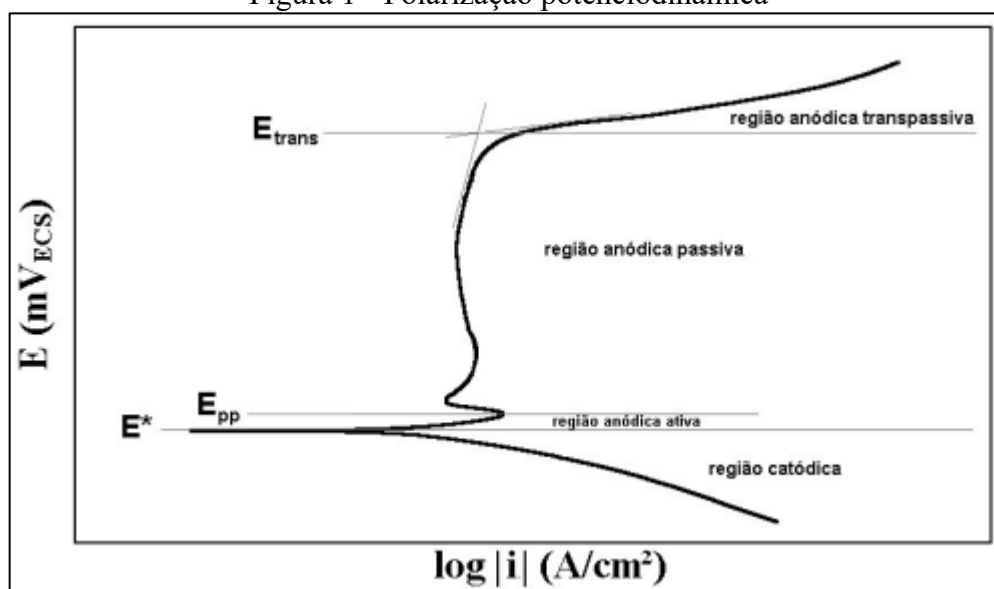
Para minimizar os danos causados pela corrosão, é necessário empregar técnicas de monitoramento em equipamentos suscetíveis a esse fenômeno. Além dos custos de manutenção,

a corrosão pode comprometer o produto, o meio ambiente e a saúde humana. O monitoramento permite acompanhar a deterioração dos materiais e programar inspeções periódicas. Embora essas inspeções exijam paradas programadas e possam gerar perdas temporárias de produção, ainda assim são mais vantajosas do que paradas não planejadas decorrentes de falhas causadas pela corrosão (Jambo; Fófano, 2008).

A corrosão é comum em metais e depende do ambiente em que estão inseridos e da finalidade do seu uso. Uma forma acessível de retardar esse processo é a aplicação de revestimentos sobre as ligas metálicas (Buchheit, 2005). Para avaliar o comportamento corrosivo e a eficácia dos revestimentos, metais e ligas são utilizados testes eletroquímicos, que auxiliam na identificação dos processos de corrosão.

O potencial de circuito aberto (OCP, do inglês *Open Circuit Potential*) é a primeira medição realizada em testes eletroquímicos, representando o potencial de equilíbrio do eletrodo em contato com o eletrólito, sem aplicação de corrente externa. Após a estabilização do potencial de circuito aberto, a polarização potenciodinâmica é empregada para determinar o potencial de corrosão (E_{corr}) e a corrente de corrosão (i_{corr}), permitindo avaliar a taxa de corrosão e a eficiência de inibidores, conforme Figura 1 (Wolyne, 2003).

Figura 1 - Polarização potenciodinâmica



Fonte: Wolyne (2003).

A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS, do inglês *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) é uma técnica utilizada na caracterização de sistemas eletroquímicos e no estudo de processos de corrosão. A técnica permite obter informações sobre o comportamento da interface metal/eletrólito, incluindo parâmetros relacionados à resistência à

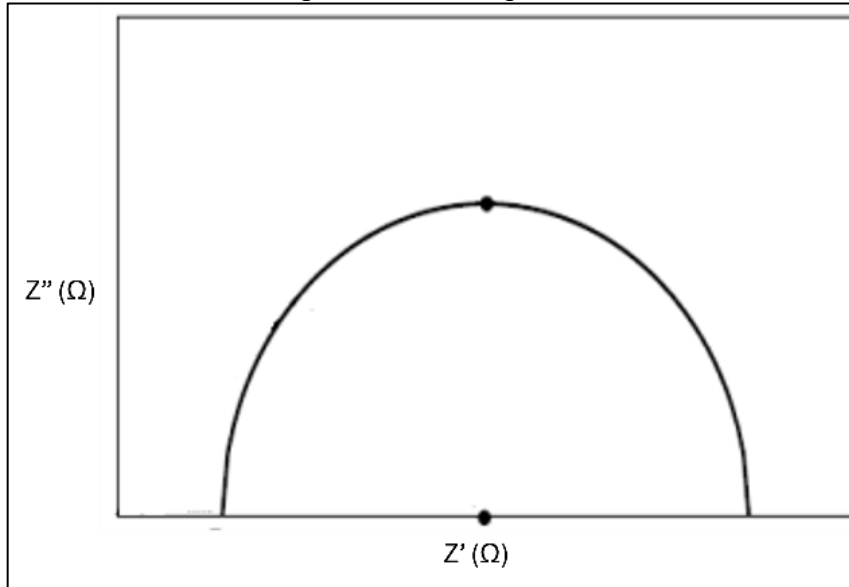
transferência de carga, à capacitância e à resistência à polarização. Também pode auxiliar na avaliação da formação e estabilidade de películas e revestimentos sobre a superfície metálica. Por essas características, a EIS é amplamente empregada na avaliação do comportamento de materiais e revestimentos expostos a diferentes meios corrosivo (Shwetha; Praveen; Devendra, 2024).

A EIS utiliza corrente alternada com diferentes frequências, de altas (MHz) a baixas (mHz), para analisar o comportamento de um sistema eletroquímico. Esta técnica investiga o comportamento de um material em meio corrosivo. Com a EIS é possível medir a taxa de corrosão, ou seja, a velocidade em que o material está se degradando, estudar a resistência à polarização e avaliar a proteção de revestimentos (Wolynech, 2003).

A interpretação das diferentes faixas de frequência nos diagramas de impedância permite relacionar a resposta eletroquímica aos fenômenos que ocorrem no sistema. De modo geral, frequências elevadas, normalmente acima de 10^3 Hz, estão associadas a fenômenos rápidos, como carregamento da dupla camada, oriundas da superfície da amostra. As médias frequências, situadas aproximadamente entre 10^1 e 10^3 Hz, associam-se a fenômenos que necessitam de tempo para ocorrer. Já as baixas frequências, geralmente inferiores a 10^1 Hz, estão associadas aos processos de transferência de carga, difusão e, conseqüentemente, à corrosão (Li *et al.*, 2024; Cristoforetti *et al.*, 2023).

Os dados obtidos a partir da EIS podem ser apresentados, principalmente, pelos gráficos de Nyquist e de Bode. No gráfico de Nyquist, o eixo x representa a parte real da impedância (Z'), associada à resistência do sistema, enquanto o eixo y exibe a parte imaginária da impedância (Z''), relacionada à capacitância e a outros elementos do circuito, ambos medidos em ohms (Ω), conforme Figura 2.

Figura 2 - Exemplo de diagrama de Nyquist utilizado na interpretação de dados de impedância eletroquímica



Fonte: Adaptado de Wolyneec (2003).

A impedância eletroquímica pode ser representada por uma grandeza complexa, conforme a Equação 1.

$$Z = Z' + jZ'' \quad (1)$$

Onde Z representa a impedância total em Ω , Z' corresponde à componente real da impedância em Ω , associada aos efeitos resistivos, Z'' representa a componente imaginária em Ω , relacionada aos efeitos capacitivos e difusionais, e j corresponde à unidade imaginária. O módulo da impedância pode ser calculado pela Equação 2.

$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (2)$$

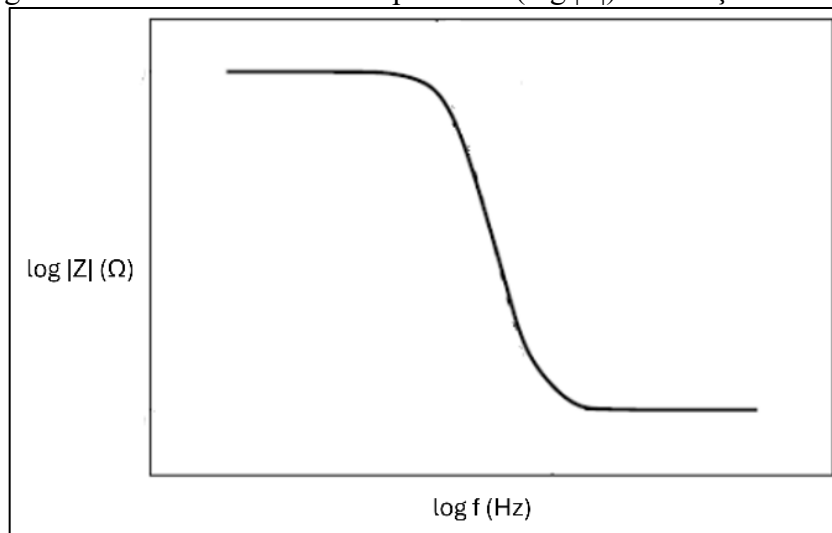
Onde $|Z|$ representa o módulo da impedância em Ω . O ângulo de fase é descrito pela Equação 3.

$$-\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \quad (3)$$

Onde φ representa o ângulo fase em $^\circ$, sendo utilizado para avaliar o comportamento resistivo e capacitivo do sistema eletroquímico (Wolyneec, 2003).

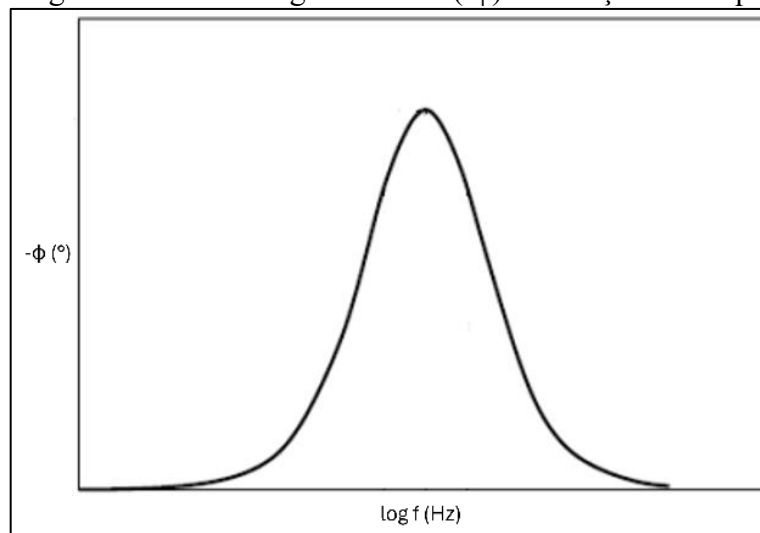
As Figuras 3 e 4 apresentam os gráficos de Bode. Na Figura 3, o módulo da impedância ($|Z|$), expresso em ohms (Ω), é apresentado em função da frequência, expressa em hertz (Hz), ambos em escala logarítmica. Na Figura 4, o ângulo de fase (ϕ), expresso em graus ($^\circ$), é apresentado em função da frequência (Hz), permitindo observar a contribuição dos comportamentos resistivo e capacitivo na resposta eletroquímica do sistema (Wolynech, 2003).

Figura 3 - Diagrama de Bode: módulo da impedância ($\log |Z|$) em função da frequência ($\log f$)



Fonte: Adaptado de Wolynech (2003).

Figura 4 - Diagrama de Bode: ângulo de fase ($-\phi$) em função da frequência ($\log f$)



Fonte: Adaptado de Wolynech (2003).

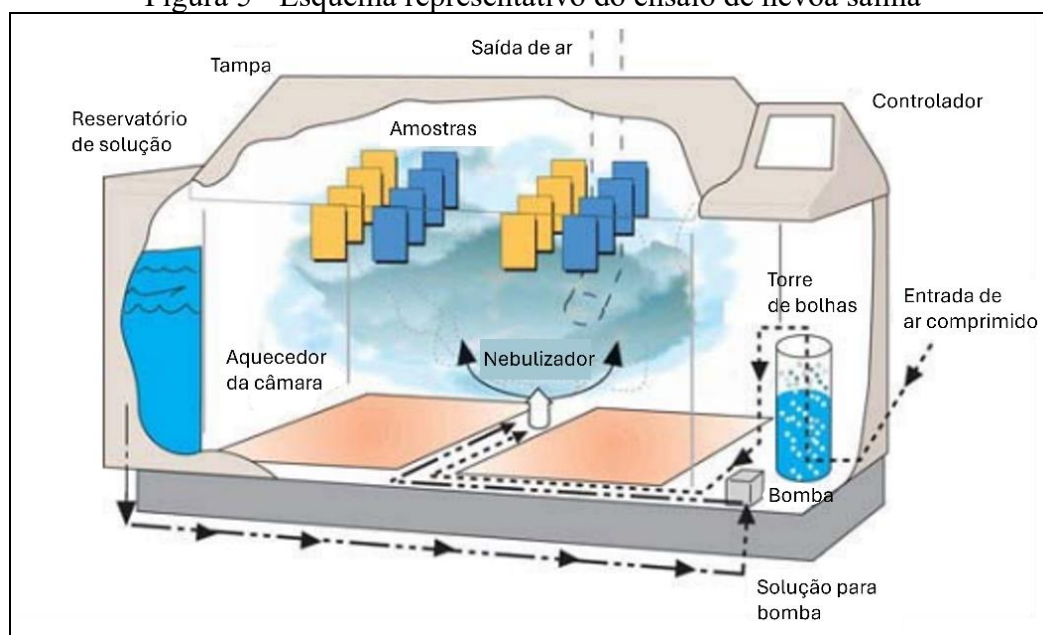
3.2.3 Ensaios de corrosão acelerada

O ensaio de névoa salina regido pela norma ASTM B117 (2011) é amplamente utilizado para avaliar a resistência à corrosão de materiais metálicos e revestimentos. O teste

consiste na exposição contínua das amostras a uma névoa de solução salina em uma câmara fechada, simulando um ambiente agressivo de forma acelerada. A solução utilizada contém cloreto de sódio, com pH entre 6,5 e 7,2, sendo pulverizada a uma temperatura de 35 °C. O ensaio permite comparar o desempenho de diferentes materiais e tratamentos superficiais contra a corrosão atmosférica. O tempo de exposição varia conforme a aplicação e os requisitos do material testado. Uma variação do método é o ensaio de névoa salina acética, no qual o pH da solução é reduzido para 3,1 a 3,3 pela adição de ácido acético. Esse procedimento é utilizado para testar revestimentos metálicos e camadas protetoras submetidas a condições mais agressivas de corrosão.

A Figura 5 apresenta o esquema do ensaio de névoa salina mostrando os principais componentes do equipamento: reservatório de solução, aquecedor, bico atomizador, torre de bolhas, bomba, controlador e disposição das amostras.

Figura 5 - Esquema representativo do ensaio de névoa salina



Fonte: Adaptado de Qian *et al.* (2020).

A aplicação do ensaio de névoa salina em revestimentos de cromo também é descrita na literatura. Nascimento *et al.* (2001) avaliaram o comportamento à corrosão de revestimentos de cromo duro eletrodepositados sobre aço AISI 4340, utilizando, entre outros métodos, o ensaio de névoa salina. Os autores observaram a ocorrência de corrosão após a exposição, relacionando o comportamento à presença de microtrincas no revestimento. Esse resultado evidencia a importância da integridade do revestimento para a proteção do substrato metálico.

3.2.4 Técnicas complementares de avaliação dos revestimentos

A caracterização dos processos de corrosão pode ser realizada por meio de diferentes técnicas, que permitem avaliar as alterações na superfície, a composição e a estrutura dos materiais e dos produtos formados durante a corrosão. Entre as técnicas empregadas estão a microscopia eletrônica de varredura (MEV), a espectroscopia de dispersão em energia (EDS), a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), a espectroscopia Raman, a espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS) e a difração de raios X (DRX). Essas técnicas fornecem informações complementares sobre a morfologia, composição elementar, estrutura e características químicas dos produtos de corrosão. A espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) também pode ser utilizada para determinar a concentração de elementos presentes na solução após a exposição do material (Dwivedi; Lepková; Becker, 2017).

A caracterização de revestimentos metálicos envolve o uso de técnicas para avaliação do material como morfologia, estrutura, propriedades mecânicas, entre outras. Um estudo de Sun *et al.* (2016) verificou a ocorrência de corrosão em diferentes aços compostos por cromo e outros elementos: A – 0,15% de cromo, B – 2,99% de cromo e C – 5,11% de cromo, que foram submetidos a dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio, a fim de simular condições corrosivas que estes materiais enfrentariam em ambientes industriais. Além disso, utilizaram-se altas pressões e temperaturas. A escala de corrosão foi observada por microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV-FEG) e espectroscopia de dispersão em energia (EDS), além disso, outros métodos foram empregados como o teste de névoa salina. Os resultados apresentaram uma taxa de corrosão mais alta para o aço C, o que indica que a presença de cromo não melhora a resistência à corrosão em condições com presença de dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio. Os autores observaram que o aumento da quantidade de cromo nos aços resultou na formação de mais compostos de cromo nos produtos de corrosão. Essa alteração tornou a camada de corrosão mais uniforme e ajudou a reduzir a corrosão localizada, mas não diminuiu a taxa geral de corrosão do material.

Quando o material está imerso em um eletrólito, pode-se avaliar sua migração através de espectrometria de emissão óptica com plasma induzido acoplado (ICP-OES), trata-se de uma técnica utilizada na análise de metais, por permitir a determinação simultânea de diversos elementos com alta sensibilidade e precisão. O método baseia-se na introdução da amostra em um plasma, onde os átomos são excitados e emitem radiações características, possibilitando sua

identificação e quantificação.

3.3 REVESTIMENTOS METÁLICOS

Os revestimentos metálicos são aplicados para diversas finalidades, como proteção contra corrosão, resistência ao atrito e recuperação de materiais. Podem ser obtidos por diferentes métodos, incluindo cladização, imersão a quente, eletrodeposição, cementação, deposição em fase gasosa e redução química. Mesmo em camadas finas, esses revestimentos oferecem proteção eficaz e têm sido cada vez mais aprimorados. Para evitar a corrosão, são amplamente utilizados metais como cromo, níquel, alumínio, zinco, cádmio e estanho, que formam películas protetoras ao reagirem com o meio. O cromo, por exemplo, pode ser aplicado por metalização, eletrodeposição e deposição em fase gasosa (Gentil; Ladimir, 2022).

A proteção dos revestimentos metálicos ocorre principalmente pela formação de uma barreira entre o substrato e o meio corrosivo. De acordo com a relação eletroquímica entre o revestimento e o substrato, esses revestimentos também podem apresentar comportamento anódico ou catódico. Nos revestimentos anódicos, o metal depositado é mais ativo que o substrato e pode atuar como ânodo, sendo consumido preferencialmente quando ocorre uma descontinuidade na camada, proporcionando proteção catódica ao substrato. Já nos revestimentos catódicos, o metal depositado é mais nobre que o substrato e sua proteção dependem principalmente da continuidade da camada. Na presença de poros, fissuras ou outros defeitos que permitam o contato do meio corrosivo com o substrato, pode ocorrer corrosão localizada e formação de um par galvânico entre os materiais (Syrek-Gerstenkorn; Paul; Davenport, 2020).

Na metalização, o material é aquecido e projetado sobre o substrato, podendo ser necessário um selante para reduzir a porosidade. Na eletrodeposição, uma corrente elétrica promove a deposição do metal sobre a superfície do substrato, que funciona como cátodo. Já na deposição em fase gasosa, sais metálicos voláteis reagem com superfícies aquecidas, formando camadas ou ligas, como no caso do cloreto de cromo reagindo com ferro para a obtenção de uma liga (Gentil; Ladimir, 2022).

Alguns fatores afetam estruturalmente o revestimento, tais como a exposição aos raios UV, ciclagem térmica, e a exposição a temperaturas extremas, acima de 80 °C e abaixo de 0 °C. Sujeira, poeira e demais partículas ou fluidos podem enfraquecer o revestimento e comprometer o efeito barreira, além do contato com produtos químicos (Buchheit, 2005).

Sheridan, Watson e Turner (2019) ressaltam que contaminantes ambientais, como partículas de poeira, sais e fluidos industriais, podem aderir à superfície dos revestimentos metálicos, favorecendo reações químicas locais que alteram o pH da interface e aceleram a corrosão sob a camada protetora. Essas interações físico-químicas comprometem a aderência do revestimento, promovendo delaminações, fissuras e formação de bolhas, que expõem o substrato ao ataque corrosivo. Para mitigar esses efeitos, pesquisas recentes buscam desenvolver revestimentos com propriedades autolimpantes ou maior resistência química.

3.3.1 Eletrodeposição

Os primeiros relatos envolvendo eletrodeposição ocorreram no início do século XIX, quando alguns experimentos utilizando pilhas permitiram a eletrodeposição de chumbo e cobre metálico (Garcia; Burleigh, 2013). Desde então, a eletrodeposição tornou-se uma técnica essencial na indústria, sendo aplicada na fabricação de componentes eletrônicos, revestimentos protetores e outros processos.

A eletrodeposição é um processo eletroquímico utilizado para depositar metais, ligas ou compósitos sobre um substrato condutor. O processo ocorre em uma célula eletrolítica, onde uma diferença de potencial ou corrente elétrica promove a redução de íons metálicos presentes na solução, resultando na formação de um revestimento metálico sobre a superfície desejada. Os íons metálicos dissolvidos na solução eletrolítica são reduzidos no cátodo, formando uma camada metálica, enquanto ocorre uma reação de oxidação no ânodo (Zangari, 2018).

De acordo com Shi *et al.* (2021), a eletrodeposição baseia-se na modulação do potencial químico do eletrodo por meio do controle da transferência de elétrons. A espessura e a morfologia dos filmes metálicos ou nanomateriais podem ser ajustadas pela regulação de parâmetros como potencial aplicado, densidade de corrente, concentração do eletrólito, tipo de substrato e tempo de deposição.

3.3.2 Cromo duro e cromo decorativo

Os revestimentos de cromo obtidos por eletrodeposição podem ser classificados em cromo decorativo e cromo duro, também denominado cromo funcional ou de engenharia. O cromo decorativo é aplicado principalmente para conferir brilho e acabamento à superfície, sendo geralmente depositado sobre camadas de níquel. O cromo duro, por sua vez, é empregado

em aplicações funcionais que exigem elevada dureza, resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito. Os dois tipos também se diferenciam pela espessura das camadas, sendo o cromo decorativo aplicado em espessuras reduzidas, enquanto o cromo duro pode apresentar camadas muito mais espessas (Yli-Pentti, 2014).

O cromo duro é um revestimento metálico aplicado por eletrodeposição, onde cromo metálico é depositado a partir de uma solução de ácido crômico sobre um substrato metálico. Esse revestimento é amplamente utilizado em aplicações industriais devido à sua alta dureza, resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito. No entanto, durante a eletrodeposição, ocorre a formação de microtrincas superficiais devido à liberação de hidrogênio no processo. Essas trincas influenciam diretamente a resistência à corrosão, pois servem como pontos de entrada para substâncias corrosivas, facilitando mecanismos como corrosão por pites e corrosão sob tensão (Bolelli *et al.*, 2006).

Além disso, a estrutura cristalina do cromo passa por diferentes transformações, resultando na retenção de tensões residuais, o que pode fragilizar o revestimento. Essas características fazem com que o cromo duro apresente resistência mecânica, mas seja suscetível a falhas estruturais ao longo do tempo (Julve, 2001). De acordo com Pfeiffer *et al.* (2023), essas tensões residuais afetam a resistência mecânica do cromo duro, aumentando a propensão à formação de trincas e falhas estruturais.

Apesar das vantagens associadas ao cromo duro, como alta dureza e resistência ao desgaste, recentes estudos vêm buscando alternativas ou melhorias que resultem em revestimentos mais duráveis e resistentes à corrosão. Rahimi *et al.* (2025) desenvolveram um revestimento de cromo nodular fino e denso, apresentando resistência à corrosão significativamente superior em comparação ao cromo duro tradicional, demonstrando o potencial de avanços tecnológicos para superar as limitações dos processos convencionais.

Um estudo de Fedrizzi *et al.* (2002) apresentou por meio de testes eletroquímicos que o cloreto de sódio afeta a corrosão de revestimentos de cromo duro. Os testes realizados apresentaram que ao entrar em contato com o cloreto de sódio o potencial de corrosão do cromo diminuiu, antes variava entre -200 a -300mV e posteriormente os valores caíram para -600 a -800mV indicando intensificação da corrosão. O estudo reforça que a abrasão e a corrosão localizada contribuem para deterioração deste revestimento. Outro estudo de He, Miao e Xin (2006) comparou a resistência à corrosão de ligas com depósito de cromo com ligas de ferro, níquel e tungstênio em soluções de cloreto de sódio (5% m/m NaCl), ácido sulfúrico (5% m/m H₂SO₄) e hidróxido de sódio (5% m/m NaOH). Os resultados exibiram que em comparação com depósitos de cromo, os depósitos de Fe-Ni-W ofereceram uma resistência superior à

corrosão. Os depósitos de cromo, embora ofereçam boa dureza e resistência ao desgaste, têm uma estrutura que pode ser mais suscetível à degradação em ambientes corrosivos.

Outro estudo de Wang *et al.* (2013), expôs os resultados sobre a corrosão de um revestimento de cromo duro em comparação a um revestimento de Ni-Co-P. Realizou-se um teste de imersão em solução cloreto de sódio 5% durante 168 horas. Durante as primeiras 96 horas a perda de massa das amostras de ambos os revestimentos foi semelhante, indicando resistência à corrosão para ambos. Porém, após às 96 horas a perda de peso do cromo duro se mostrou expressiva, enquanto a do Ni-Co-P manteve-se baixa, apresentando que o revestimento de cromo duro resiste à corrosão até determinado tempo. No final do teste, a perda de massa do revestimento de cromo duro foi de 14,3 mg/cm², enquanto a do Ni-Co-P foi de 6,6 mg/cm². Quanto a integridade dos revestimentos, o cromo duro apresentou uma superfície irregular após 7 dias do início da corrosão, apresentando corrosão também no substrato devido à presença de microfissuras. Já o revestimento de Ni-Co-P manteve-se íntegro e com superfície uniforme, com poucos pontos de corrosão.

Um estudo realizado por Wang *et al.* (2017) avaliou a eficiência do revestimento de cromo duro em substratos de aços M50NiL e CSS-42L, concluindo que a eficiência protetora do revestimento foi superior a 98% para ambos. No entanto, o revestimento aplicado ao aço CSS-42L apresentou 1% a mais de eficiência. Essa diferença foi atribuída ao maior teor de cromo do substrato, que favoreceu a formação de uma camada passiva mais espessa, homogênea e enriquecida em Cr₂O₃. Neste caso, o filme de óxido formado era mais espesso e rico em Cr₂O₃, aumentando a resistência à corrosão. Assim, a composição do substrato tem um papel fundamental na proteção contra corrosão, e aços com maior teor de cromo, como o CSS-42L, demonstraram melhor desempenho na formação de barreiras protetoras.

Na pesquisa de Trejo *et al.* (2021) foi comparado um revestimento de cromo duro, para lâminas de serra de fita na indústria madeireira, com Estelite (liga de cobalto-cromo-tungstênio). O cromo duro apresentou microdureza 24% maior e sua aplicação ocorre em baixa temperatura, evitando alterações na microestrutura do substrato da lâmina de serra, ao contrário Estelite, que exige processos térmicos que podem modificar suas propriedades. A microestrutura do cromo duro, apesar da presença de microtrincas, pode favorecer o escoamento dos cavacos, contribuindo para um corte mais eficiente. Por fim, o cromo duro se mostrou uma alternativa viável como revestimento para lâminas de serra de fita devido suas propriedades.

Wu *et al.* (2021) apresentaram em seu estudo que a resistência à corrosão do cromo duro pode ser reduzida pela presença de microfissuras formadas durante o processo de

eletrodeposição. Essas fissuras atuam como vias preferenciais para a penetração de agentes corrosivos, como íons cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}), comuns em ambientes industriais agressivos. Os autores destacam que esse fator acelera a corrosão do substrato metálico, comprometendo a vida útil do revestimento e favorecendo falhas estruturais. Em condições severas, a penetração contínua do eletrólito pode resultar na formação de manchas de ferrugem e delaminação do revestimento.

3.4 MATERIAIS E CORROSÃO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Atualmente, as indústrias alimentícias necessitam superar diversos desafios para se manterem competitivas, entre eles destaca-se o atendimento e implantação de normas que tornam a empresa qualificada para produzir. O atendimento a normas e a legislações requer que o fabricante cumpra determinados requisitos, como a utilização de matérias-primas de qualidade, a higiene e boas práticas de fabricação e a integridade de instalações e equipamentos. Por este motivo, é importante que seja feita a escolha ideal de equipamentos, analisando principalmente seus materiais constituintes (Santamaria; Tranchida; Di Franco, 2020).

São muitos os benefícios da utilização de equipamentos feitos de metais e suas ligas na indústria alimentícia, entretanto há uma grande preocupação quanto ao seu processo de degradação devido aos grandes custos de manutenção e também perda de produção enquanto este equipamento estiver sendo reparado. Além de reduzir a vida útil dos equipamentos, a degradação dos metais pode interferir no processo produtivo, ocasionando algumas falhas. Outro assunto relevante sobre a degradação destes materiais é que resulta na liberação destes metais, fazendo com que migrem ao produto, podendo causar riscos aos consumidores quando ultrapassarem sua faixa aceitável (Jellesen; Rasmussen; Hilbert, 2006).

Muitos dos equipamentos encontrados nas indústrias alimentícias são de aço inoxidável devido sua alta resistência à corrosão, fenômeno que pode acarretar na contaminação dos alimentos, além de degradar os equipamentos e também devido as suas propriedades mecânicas. O aço inox é uma liga de ferro com geralmente 10% a 30% de cromo presente. Além do cromo outros elementos também podem ser adicionados como níquel, carbono, manganês, molibdênio, silício, titânio, entre outros. Porém, quando expostos a determinados ambientes, tornam-se suscetíveis à corrosão (Santamaria; Tranchida; Di Franco, 2020).

Na revisão realizada por Jellesen, Rasmussen e Hilbert (2006) são apresentadas causas que podem gerar a corrosão do aço inoxidável, sendo elas o contato do metal com produto

alimentício corrosivo ou com o cloro que é utilizado em limpezas de equipamentos. Além disso, também se considera como causa de corrosão a exposição do aço às condições ambientais variáveis e temperatura. Os autores apresentam que Betts, Wells e Litchi (1993) consideram que a concentração de cloreto e a temperatura mais elevada aceleram o processo de corrosão. Também, o processo corrosivo depende da capacidade tampão da solução, quanto mais baixo o pH, ou seja, mais ácido, mais acelerado se torna o processo corrosivo. Por exemplo, o ketchup possui um pH ácido, em torno de 3,5, alta quantidade de cloreto de sódio e seu processo atinge a temperatura de 90 °C, apresentando um ataque severo de corrosão localizada em uma carcaça de bomba feita de aço inox.

Herting, Wallinder e Letgraf (2008) investigaram a liberação de cromo e ferro a partir de aços inoxidáveis com diferentes tipos de acabamento superficial, quando imersos em ácido acético com o objetivo de simular o contato com alimentos. A técnica EIS foi utilizada para avaliar a interação entre o material e o meio. Os resultados mostraram que fatores como o tipo de acabamento, a temperatura e a razão entre a área da superfície e o volume da solução influenciaram significativamente a liberação dos metais. O estudo destaca a importância de considerar essas variáveis na escolha de materiais para contato com alimentos, uma vez que podem impactar diretamente na segurança do consumidor.

Outro estudo de Atapour *et al.* (2019) investigou a interação do aço inox em diferentes soluções, sendo elas proteína do soro de leite, uma solução simulada de leite (SMS) e uma solução salina tamponada com fosfato (PBS). Entre elas, a solução de proteína do soro de leite resultou na maior liberação de ferro, cromo e níquel, causou redução na espessura do óxido superficial, desgaste do material e, quando em agitação, esta solução liberou ainda mais metais. Este estudo exhibe que a composição química do eletrólito desempenha um papel importante no desgaste do aço inox, visto que a solução de PBS não apresentou corrosão, nem desgaste.

Para escolher o material mais adequado para um projeto deve-se analisar o meio corrosivo, considerando sua composição química, pH, temperatura, entre outros. Também deve-se conhecer as condições operacionais, imersão total ou parcial, operação contínua ou intermitente, entre outros. Em resumo, deve sempre ser considerada a compatibilidade entre o material e o meio. Um exemplo disso é que a água com pH de 10 não é corrosiva para o aço-carbono, em temperaturas normais, porém, metais como alumínio, zinco, estanho e chumbo sofrem corrosão quando submetidos à água com este mesmo pH (Gentil; Ladimir, 2022).

Um estudo de Guenbour *et al.* (2006) investigou o comportamento de diferentes materiais em contato com o ácido fosfórico. As ligas testadas foram aço inoxidável austenítico com Mo e N (2418MoN), liga super-austenítica (3127hMo), liga à base de níquel (5923hMo)

e ferro fundido (FCr). Os testes foram realizados em ácido fosfórico 30% P_2O_5 , utilizando carbeto de silício como abrasivo. Foram realizados testes eletroquímicos para avaliar o efeito da temperatura e abrasão. Verificou-se que o aumento da temperatura aumenta a densidade de corrente e a taxa de corrosão, sob o efeito da temperatura, a liga de aço inoxidável austenítico com Mo e N (2418MoN) apresentou melhor resistência à corrosão. Sobre o efeito abrasivo também se observou um aumento na corrente e na taxa de corrosão. Com conclusão, o estudo destaca que ligas com maior teor de cromo, como a liga 2418MoN e o aço fundido 30% Cr, apresentaram melhor desempenho em condições de corrosão devido ao contato com ácido fosfórico.

3.5 PRODUÇÃO DE BISCOITOS TIPO *WAFERS*

Os biscoitos são alimentos básicos produzidos com farinha de trigo que geralmente são servidos como lanches. Possuem baixo teor de umidade, portanto, são conservados por muito tempo se armazenados corretamente. Por sua longa duração, os biscoitos eram levados para viagens marítimas na Idade Média. Outros produtos famosos que levam farinha de trigo na sua composição são pães e bolos. Em comparação ao pão, o biscoito se difere por ser enriquecido com açúcar e gordura, além do teor de umidade ser mais baixo. Em relação ao bolo, o que difere é a consistência da massa e a umidade (Manley, 2011).

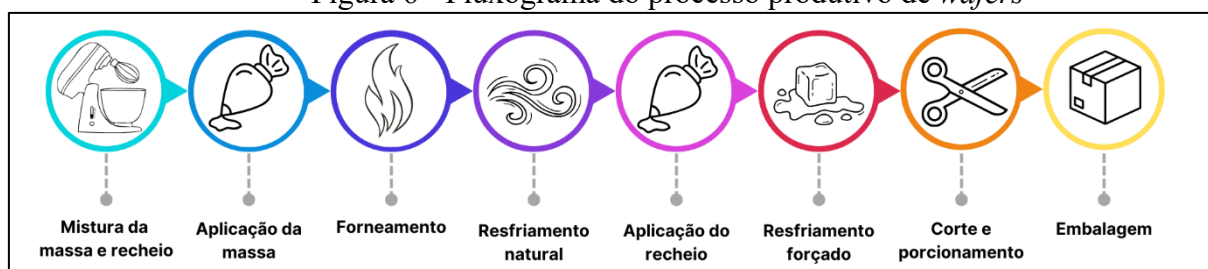
Em 2024, o setor de biscoitos industrializados no Brasil registrou faturamento de R\$ 33,1 bilhões, representando um crescimento de 2,1% em valor e 1,6% em volume em relação ao ano anterior, com consumo superior a 1,5 milhão de toneladas (Somor, 2025). O país também ocupa posição de destaque no cenário internacional, consolidando-se como o quarto maior mercado mundial de biscoitos em volume de vendas, conforme dados de 2023 (Polo Films, 2024).

Os biscoitos tipo *wafers* têm participação expressiva no mercado nacional, tanto pelo consumo interno quanto pelo desempenho nas exportações. Em 2023, o Brasil exportou cerca de 12,1 mil toneladas, o equivalente a aproximadamente US\$ 36,8 milhões, resultado que representou um aumento de 4% em valor em relação ao ano anterior (CNN Brasil, 2024). Além disso, mantiveram-se entre as principais categorias enviadas ao exterior, ao lado de cream cracker, água e sal, rosquinhas e recheados, que juntas somaram US\$ 31,1 milhões em vendas (Revista Fator Brasil, 2024).

Provavelmente, os *wafers*, originaram-se pelos monges que assavam o pão sagrado

entre placas de ferro e eram gravados com símbolos religiosos. Os produtos conhecidos hoje foram criados na Holanda no século XIX. Os fornos para produção de *wafers* foram desenvolvidos após a Primeira Guerra Mundial e as linhas de produção automatizadas surgiram após 1950. Seu sucesso, assim como os demais biscoitos se dá por serem convenientes, baratos, de vida útil longa e, serem compostos por açúcar e chocolate, considerados gostos e fraquezas humanas (Manley, 2011). Normalmente são produzidos a partir de uma massa quase líquida de basicamente farinha de trigo, água e gordura que é forneada em placas de ferro fundido revestidas com cromo duro, resfriada e recheada, conforme fluxograma apresentado na Figura 6 (Bertolino; Braga, 2017).

Figura 6 - Fluxograma do processo produtivo de *wafers*



Fonte: Adaptado de Bertolino e Braga (2017).

A farinha de trigo é o ingrediente base na produção de *wafers*, sendo responsável pela textura e estrutura características desse tipo de produto. Sua composição é formada por carboidratos, principalmente o amido, que é constituído por amilose e, predominantemente, por amilopectina, uma molécula ramificada que interfere nas propriedades da massa durante o preparo. Além do amido, a farinha contém proteínas que ao serem misturadas com água formam o glúten, além de fibras, lipídios, vitaminas e sais minerais como ferro, sódio, potássio, magnésio e fósforo, conhecidos como cinzas, conforme apresentado na Tabela 1 (Manley, 2011).

Tabela 1 - Minerais encontrados na farinha de trigo

Mineral	Quantidade em 100g de farinha de trigo (mg)
Cálcio	25
Ferro	3,6
Magnésio	124
Fósforo	332
Potássio	340
Sódio	2
Zinco	2,78

Fonte: Bertolino e Braga (2017).

A quantidade de cinzas da farinha de trigo deve ser, no máximo, 3%. Essa composição pode variar conforme o tipo de trigo, condições do solo, clima e práticas de cultivo (Manley, 2011). Um alto teor de cinzas prejudica a função do glúten e faz com que o biscoito sofra alterações de cor. Especialmente nos *wafers*, o alto teor de cinzas além de afetar a textura e a cor do produto, dificultará a liberação das folhas das placas de cozimento, pois ficarão mais aderidas ao material (Bertolino; Braga, 2017).

A adição de gordura na formulação de biscoitos proporciona maciez, intensifica aroma, sabor e expansão e facilita o manuseio da massa. Em *wafers*, a gordura, quando combinada ao emulsificante lecitina de soja, atua como desmoldante, facilitando a remoção das folhas da placa de cozimento. A gordura é constituída por trioléina, um triglicerídeo formado por ácido oleico e glicerol. Já a lecitina de soja é composta por diferentes fosfolipídios, sendo a fosfatidilcolina o principal deles. Essa substância possui uma estrutura com glicerol, duas cadeias de ácidos graxos, grupo fosfato e colina, conferindo propriedades emulsificantes que estabilizam a mistura (Bertolino; Braga, 2017).

O bicarbonato de sódio é muito utilizado em biscoitos para ajustar o pH do produto, visto que muitas das matérias-primas utilizadas possuem um caráter ácido, entre 4,0 e 5,0. Então com a adição do bicarbonato de sódio o pH do produto final se mantém em torno de 7,0. Este ingrediente também é responsável pelo crescimento da massa que quando aquecida forma gás carbônico, carbonato de sódio e água. Também é comum a adição de bicarbonato de sódio para dar mais coloração as folhas e para promover um melhor espalhamento da massa na placa de cozimento (Bertolino; Braga, 2017).

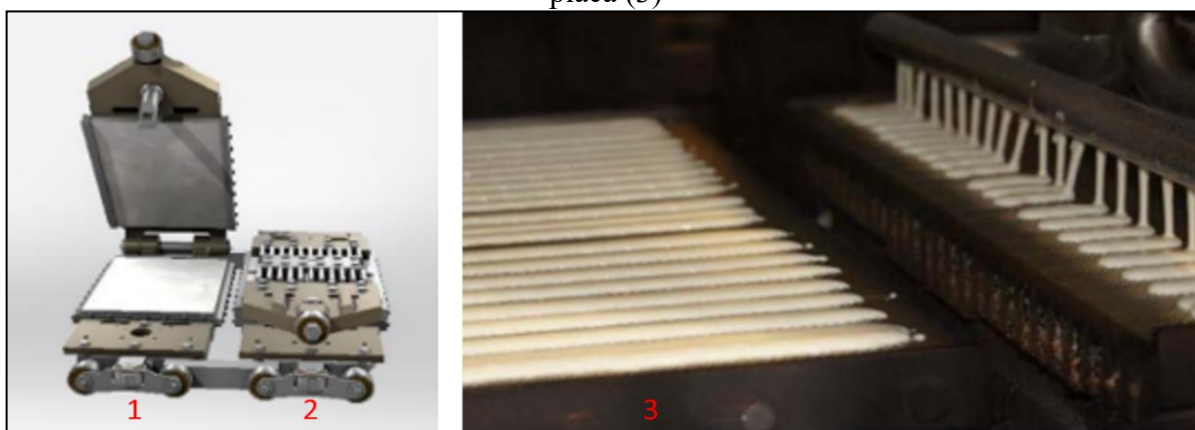
Nos *wafers* de massa sabor chocolate, é comum a adição do corante caramelo, considerado o mais utilizado entre os corantes alimentícios. Ele é obtido a partir do aquecimento de carboidratos, como a glicose presente no xarope de milho (Bertolino; Braga, 2017). O cacau em pó também pode ser utilizado para intensificar a cor da massa. Devido à presença de

gorduras, especialmente triglicerídeos como a trioleína, sua presença pode interferir no sabor e na textura final do produto, por isso é utilizado em conjunto com o corante caramelo (Manley, 2011).

O processo produtivo de *wafers* é considerado um processo por deposição, visto que possui uma massa líquida de viscosidade baixa, entre 18 à 22 segundos, rica em água e com pouca formação de glúten. A água utilizada na produção de biscoitos atua como um catalisador, permitindo que ocorram reações entre os ingredientes. O que define a qualidade das folhas de *wafer* são, basicamente, uniformidade e coloração. Os ingredientes utilizados na receita têm pouco efeito sobre estes parâmetros, o que realmente pode impactar na qualidade das folhas é o estado da superfície das placas de cozimento, ou seja, o estado do revestimento de cromo duro presente no equipamento (Manley, 2011).

Os *wafers* são biscoitos que exigem equipamentos especiais para a produção, principalmente o forno. Os primeiros fornos de *wafer* foram construídos após a Primeira Guerra Mundial, mas a linha de produção em sua totalidade só foi existir em meados de 1950. Considerado o coração do processo, consiste em um par de placas de metal que é travado imediatamente após a massa ser depositada (Manley, 2011). A Figura 7 apresenta a placa de cozimento aberta (1) e fechada com trava (2) e a injeção de massa líquida na placa (3).

Figura 7 - Placa de cozimento aberta (1); Placa de cozimento fechada (2); Injeção de massa na placa (3)

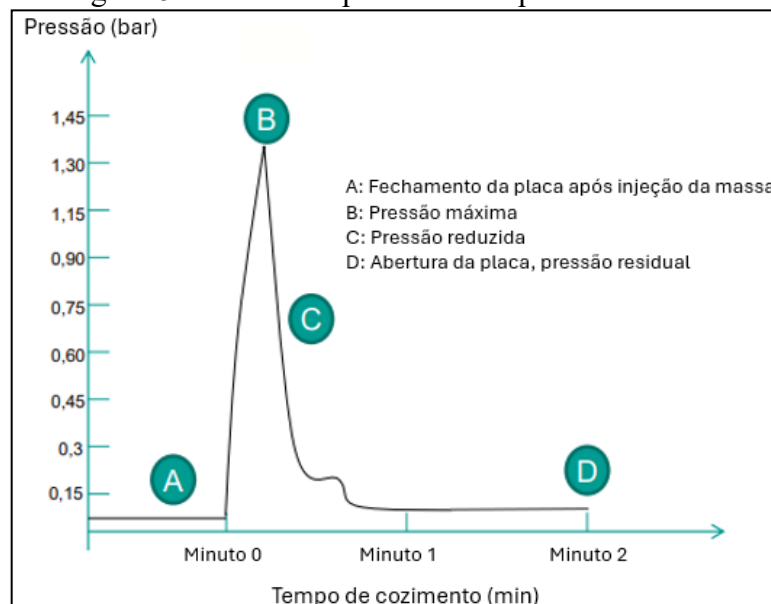


Fonte: Haas (2007).

A massa é expelida do alimentador e depositada em uma placa quente e fechada por outra placa de mesma temperatura para que ocorra o processo de cozimento. Entre as placas, o vapor que fica preso confere pressão à massa e expande-a. Estas placas possuem furos que expulsam o excesso de vapor (Moretto; Fett, 1999). A Figura 8 apresenta a relação entre pressão e tempo de cozimento, considerando o início do processo sendo quando a massa líquida é

depositava na placa de cozimento e a mesma é fechada e travada até o fim do processo, em que a placa de cozimento é aberta e a folha cozida é expulsa.

Figura 8 - Gráfico da pressão x tempo de cozimento



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Ainda hoje, os fornos de *wafer* trabalham da mesma forma, as dimensões mais conhecidas das placas são de 470 x 290 milímetros, que produzem folhas com massa entre 50 e 56 gramas. Os pares de placas são fixados em um transportador formando uma cadeia de geralmente 64 pares de placas. As placas circulam continuamente dentro do forno, sendo aquecidas por chamas de gás direto ou por aquecedores elétricos dispostos nas costas das placas. Quando o par de placas chega à extremidade do forno, a folha é liberada e então recebe uma nova deposição de massa. Para que as placas do forno tenham um bom funcionamento, contribuindo para a qualidade das folhas é importante manter uma periodicidade de limpeza da sua superfície, pois o depósito constante de ingredientes carbonizados acumula-se causando o escurecimento do material (Manley, 2011).

A limpeza das placas de *wafers* deve ser realizada quando a massa cozida, começar a apresentar dificuldades ao se desprender da placa de cozimento, permanecendo grudada no revestimento de cromo duro. Neste momento, ainda é fácil de remover os resíduos e a limpeza é considerada simples. Não se recomenda que sejam limpas apenas algumas placas do conjunto, pois aquelas que não estarão limpas necessitarão de mais gordura adicionada à mistura, sujando com maior rapidez aquelas placas já limpas. O modo de limpeza geralmente consiste em, com o equipamento parado e com as placas em temperatura ambiente, realizar uma escovação no

revestimento de cromo duro. Porém, para sujeiras mais pesadas utiliza-se uma solução de limpeza composta por ácido fosfórico (Haas, 2007).

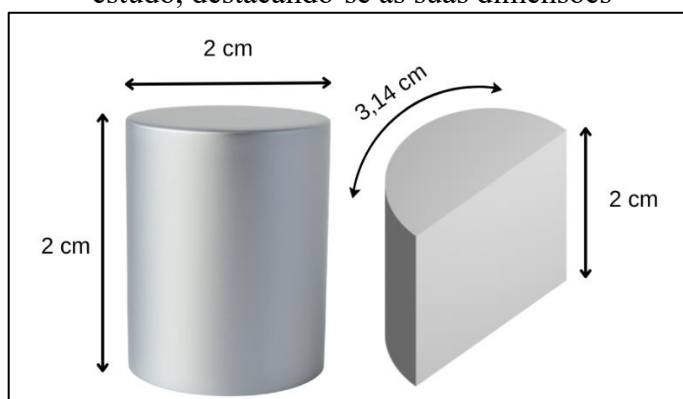
Diante disso, este estudo avalia o comportamento corrosivo do revestimento de cromo duro em contato com diferentes eletrólitos associados à produção de biscoitos tipo *wafer*, considerando a degradação superficial e a possível migração de cromo para o meio. A investigação mostra-se relevante tanto do ponto de vista científico quanto industrial, pois contribui para a compreensão da interação entre revestimentos metálicos e substâncias presentes no processamento de alimentos, permitindo identificar condições mais críticas e possíveis mecanismos de ataque. Estudos nessa área também são importantes para auxiliar na escolha de materiais, na definição de rotinas de limpeza e no controle de processo, reduzindo custos com manutenção e paradas de equipamentos. Além disso, a busca por soluções que diminuam a degradação dos revestimentos e a liberação de metais para o ambiente é importante sob o ponto de vista ambiental e de segurança, reforçando a necessidade de pesquisas aplicadas em contextos industriais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Neste estudo utilizaram-se amostras de cilindros metálicos sólidos, revestidos com cromo duro comercial. Os corpos de prova foram cortados ao meio para facilitar a inserção na célula eletroquímica. A Figura 9 apresenta as dimensões das amostras utilizadas. Os eletrólitos utilizados foram formulados baseando-se em compostos presentes na formulação de biscoitos tipo *wafers*, a fim de garantir que as condições testadas sejam semelhantes às práticas industriais.

Figura 9 - Imagem ilustrativa da amostra metálica revestida com cromo duro utilizada neste estudo, destacando-se as suas dimensões



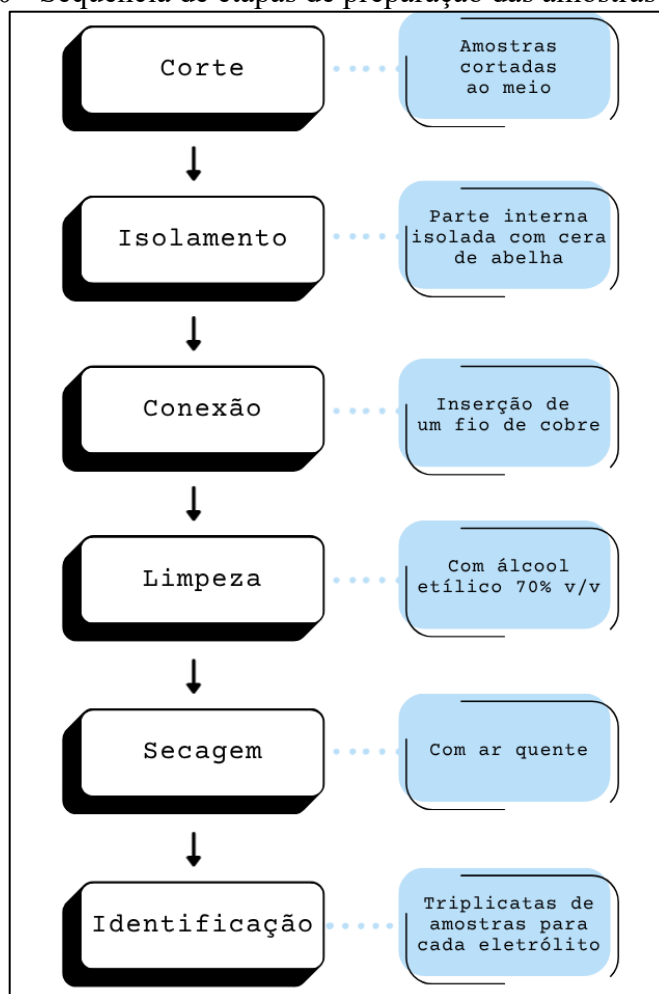
Fonte: elaborado pela autora (2026).

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Preparação das amostras

As amostras cilíndricas utilizadas na pesquisa foram preparadas conforme o fluxograma apresentado na Figura 10. Inicialmente, foram cortadas ao meio para obtenção das dimensões necessárias aos ensaios. Em seguida, a parte interna foi isolada com cera de abelha, a fim de delimitar a área exposta ao meio e evitar interferências durante as análises. Posteriormente, realizou-se a conexão elétrica por meio da inserção de um fio de cobre, garantindo o contato necessário para os ensaios eletroquímicos. As amostras foram então limpas com álcool etílico 70% (v/v), secas com ar quente, identificadas e organizadas em triplicata para cada eletrólito, assegurando a reprodutibilidade dos ensaios.

Figura 10 - Sequência de etapas de preparação das amostras estudadas



Fonte: elaborado pela autora (2026).

4.2.2 Preparação dos eletrólitos

Utilizou-se como eletrólitos para este estudo os ingredientes que compõem a receita para a fabricação da massa de *wafers*. A Tabela 2 apresenta a formulação da massa de *wafers* e os percentuais de cada ingrediente na receita.

Tabela 2 - Formulação de massa de *wafers* utilizada como base neste estudo.

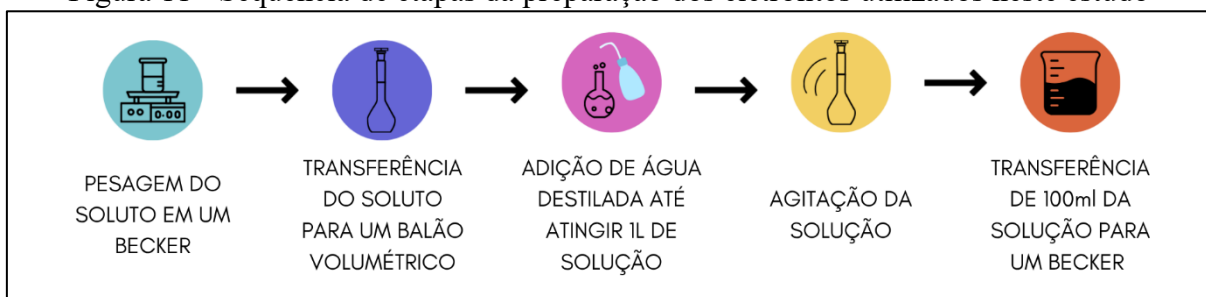
Ingrediente	% m/m
Água	58,9%
Farinha de Trigo	36,3%
Cacau em Pó Alcalino pH 5,8 - 6,5	2,3%
Corante Natural de Caramelo DPC pH 5,8 - 6,5	1,1%
Emulsão (50% Gordura Fluida e 50% Lecitina de Soja)	0,9%
Bicarbonato de Sódio	0,3%
Sal Refinado	0,2%

Fonte: Bertolino e Braga (2017).

Esses compostos entram em contato direto com o equipamento durante o processo produtivo, o que torna sua inclusão na análise relevante. Também foi considerada como eletrólito a solução de limpeza utilizada no equipamento, composta majoritariamente por ácido fosfórico. As concentrações foram definidas com base na representatividade desses componentes na formulação (conforme Tabela 2) ou em condições de uso industrial.

A Figura 11 apresenta o esquema de preparação dos eletrólitos utilizados nos testes eletroquímicos. Inicialmente, o soluto correspondente a cada eletrólito foi pesado em balança analítica, utilizando um copo becker. Em seguida, o material foi transferido para um balão volumétrico, ao qual foi adicionada água destilada até completar o volume de 1 litro de solução. Após, a solução foi homogeneizada por agitação manual e 100 mililitros foram transferidos para um copo becker, sendo então utilizados nas análises e nos ensaios de imersão.

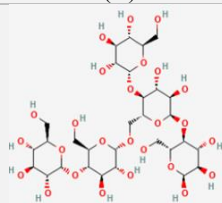
Figura 11 - Sequência de etapas da preparação dos eletrólitos utilizados neste estudo

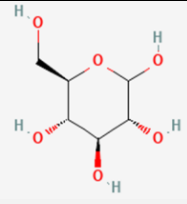
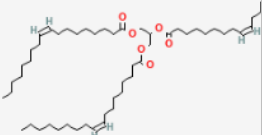
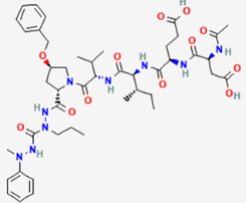
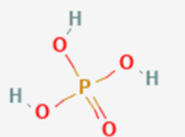
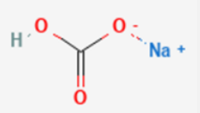
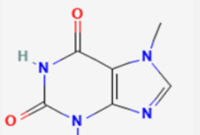


Fonte: elaborado pela autora (2026).

A Tabela 3 apresenta os eletrólitos avaliados, suas concentrações e as estruturas químicas dos compostos representativos considerados em cada caso.

Tabela 3 - Composição dos eletrólitos e estruturas químicas dos compostos representativos

Eletrólito	Composição	Concentração % (m/v)	pH	Composto Representativo	Estrutura Química
E1	Cloreto de sódio	3,5	6,3	NaCl	$\text{Na}^{\oplus}\text{Cl}^{\ominus}$ <p>(A)</p>
E2	Farinha de trigo	3,6	6,5	Amilopectina	 <p>(B)</p>

Eletrólito	Composição	Concentração % (m/v)	pH	Composto Representativo	Estrutura Química
E3	Corante caramelo	1,1	6,0	Glicose	 (C)
E4	Emulsão (50% gordura e 50% lecitina de soja)	0,9	6,1	Trioleína	 (D)
				Fosfatidilcolina	 (E)
E5	Ácido fosfórico	25	1,5	Ácido fosfórico	 (F)
E6	Bicarbonato de sódio	0,3	8,1	Bicarbonato de sódio	 (G)
E7	Cacau alcalino	2,3	7,2	Teobromina	 (H)

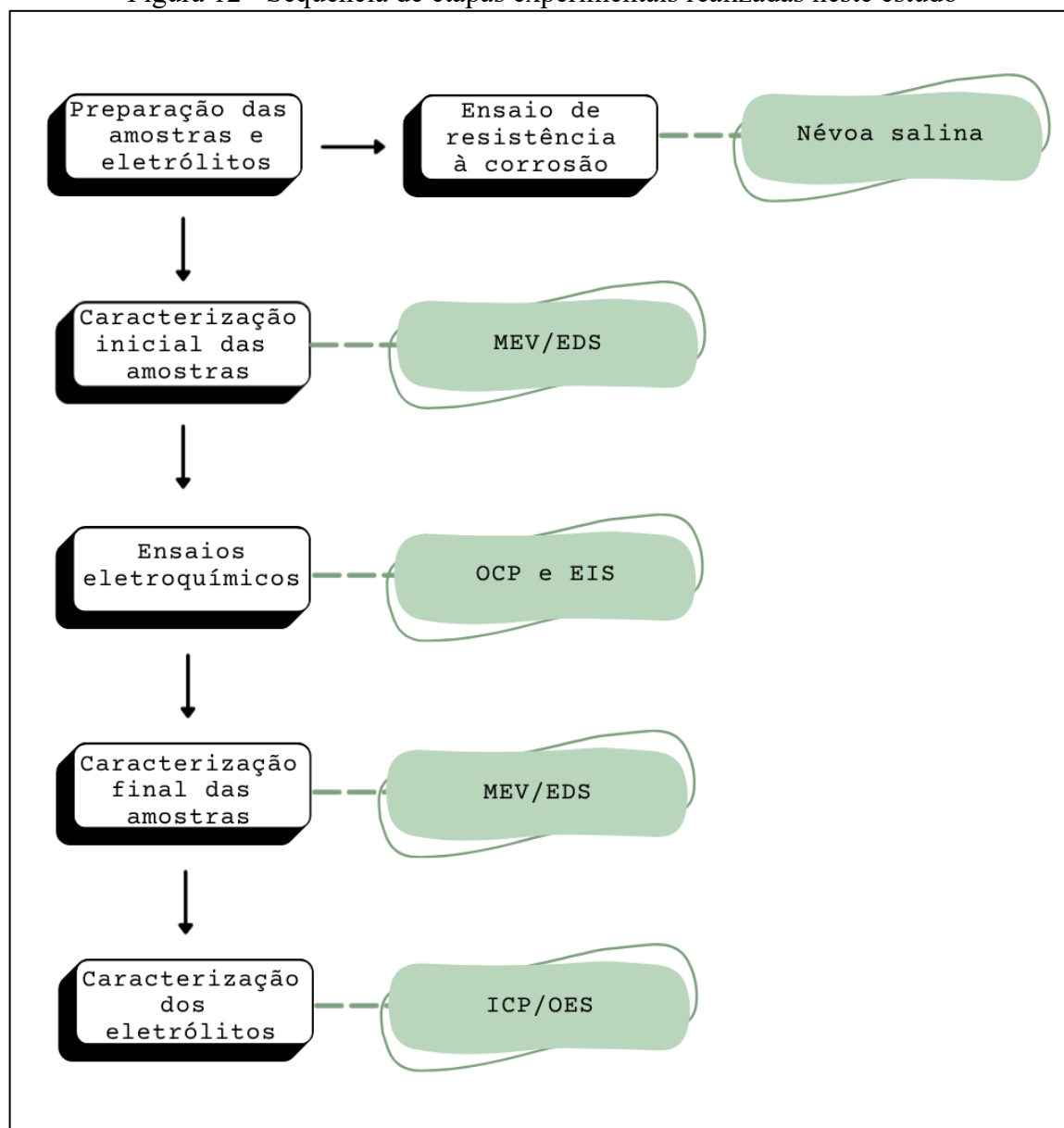
Fonte: Adaptado de PubChem (2026) referente as estruturas químicas A-H.

O fluxograma apresentado na Figura 12 reúne as etapas executadas ao longo deste trabalho, iniciando pela preparação das amostras e dos eletrólitos, conforme descrito anteriormente. Na sequência, foi realizada a caracterização morfológica inicial das amostras, por meio de microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV-FEG) e espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) e, em seguida, foram realizados os ensaios de resistência à corrosão em névoa salina.

O efeito de cada um dos compostos utilizados nos eletrólitos sobre o revestimento de cromo duro foi verificado a partir dos ensaios eletroquímicos (potencial de circuito

aberto – OCP e espectroscopia de impedância eletroquímica – EIS). Após estes ensaios, a morfologia superficial das amostras foi avaliada por MEV-FEG e EDS. Por fim, realizou-se a caracterização dos eletrólitos por Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), a fim de se verificar a concentração de íons de cromo.

Figura 12 - Sequência de etapas experimentais realizadas neste estudo



Fonte: elaborado pela autora (2026).

4.3 CARACTERIZAÇÃO

4.3.1 Ensaios de corrosão acelerada

O ensaio de corrosão acelerada foi realizado por exposição à névoa salina neutra (NSS, do inglês *Neutral Salt Spray*) nas amostras revestidas com cromo duro. Essa análise foi realizada em uma câmara fechada da marca Bass Equipamentos Ltda, modelo USX-6000/2009. O ensaio foi procedido conforme a norma ISO 9227:2022(E) que indica operação com as seguintes condições consideradas críticas: tempo de ensaio de 96 horas, pressão constante do ejetor de 0,7 kgf/cm² a 1,7 kgf/cm², temperatura da câmara 35 °C ± 2 °C, solução de cloreto de sódio de 50g/L ± 5 g/L, faixa de pH de 6,5 a 7,2, volume de névoa coletada de 1,5 mL/h ± 0,5 mL/h, com a amostrada apoiada em ângulo de 20° ± 5° em relação à vertical. Inicialmente, a amostra foi limpa com álcool etílico e as bordas foram protegidas com cera de abelha.

Também foi realizado o ensaio de corrosão acelerada por meio da exposição à névoa salina acética (ASS, do inglês *Acetic Salt Spray*), em uma câmara fechada da marca Equilam, modelo SS 1300. O ensaio foi procedido conforme o item 5.2.3 da norma ISO 9227:2022(E) que indica operação com as seguintes condições consideradas críticas: tempo de ensaio de 96 horas, pressão constante do ejetor de 0,7 kgf/cm² a 1,7 kgf/cm², temperatura da câmara 35 °C ± 2 °C, solução de cloreto de sódio de 50g/L ± 5 g/L + ácido acético 0,2% a 0,3%, faixa de pH de 3,1 a 3,3, volume de névoa coletada de 1,5 mL/h ± 0,5 mL/h, com a amostrada apoiada em ângulo de 20° ± 5° em relação à vertical. Inicialmente foi realizada a limpeza da amostra com álcool etílico e a proteção das bordas foi executada com cera de abelha.

Destaca-se que ambos os ensaios de névoa salina foram realizados em triplicata no Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial (LCOR) da UCS, com duração de 96 horas e avaliações periódicas a cada 24 horas.

4.3.2 Ensaios morfológicos da superfície

4.3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV-FEG)

A avaliação da morfologia das amostras foi realizada no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC) da UCS, utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura

com emissão de campo (MEV-FEG), no equipamento Tescan, modelo Mira3, com uma tensão de aceleração de 15 kV. As amostras foram observadas em vista de topo para identificação da morfologia superficial inicial e final (antes e após os ensaios eletroquímicos).

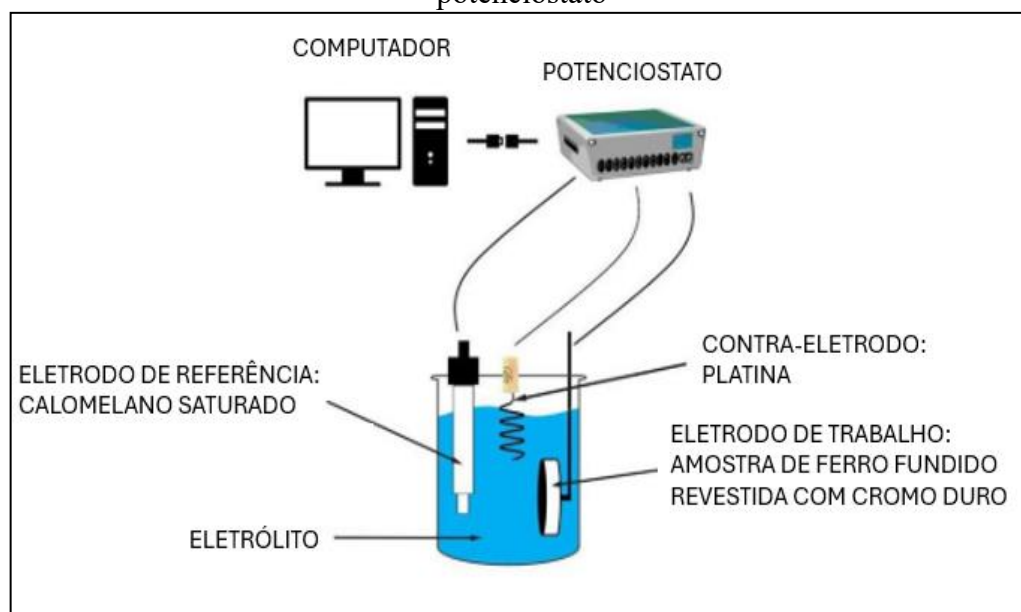
4.3.2.2 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)

O mapeamento elementar das amostras foi avaliado por espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS), utilizando um equipamento da marca Oxford Instruments, modelo X-Maxd, com uma tensão de aceleração de 15 kV e tempo de varredura de 25 minutos. O mesmo é acoplado ao equipamento de MEV-FEG, localizado no LCMIC da UCS.

4.3.3 Ensaios eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos foram realizados com um equipamento potenciostato/galvanostato, modelo *Ivium Stat*. Empregou-se uma célula convencional de três eletrodos, sendo o de referência um eletrodo de calomelano saturado (ECS), o contra-eletrodo um eletrodo de platina e o de trabalho a amostra de ferro fundido revestida com cromo duro. A Figura 13 apresenta o esquema da célula eletroquímica.

Figura 13 - Imagem ilustrativa de uma célula eletroquímica de três eletrodos conectada ao potenciostato



Fonte: Adaptado de Resende *et al.* (2017).

O potencial de circuito aberto (OCP) foi monitorado por aproximadamente 30 min, até a estabilização do sistema, antes das análises de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). Para os ensaios de EIS, foi utilizado o mesmo equipamento e a mesma célula convencional de três eletrodos citada anteriormente. Após a estabilização, o valor do potencial obtido foi inserido manualmente no equipamento como potencial de polarização. As medidas foram realizadas na faixa de frequência de 100 kHz a 10 Hz, com amplitude de 10 mV de valor eficaz (RMS). A área geométrica exposta da amostra foi de 1 cm² e o volume de eletrólito utilizado foi de 100 mL.

As amostras permaneceram continuamente imersas nos respectivos eletrólitos durante 105 dias. As análises eletroquímicas foram realizadas após 1, 42 e 105 dias de imersão, utilizando as mesmas amostras ao longo do período. Os ensaios foram realizados em triplicata, considerando três amostras e três preparações de cada eletrólito. Durante o período de exposição, foi constatada a degradação do revestimento em uma das amostras. As análises foram realizadas com o objetivo de acompanhar a evolução do processo corrosivo nos diferentes eletrólitos.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados no Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial (LCOR) da UCS, em meio sem agitação, naturalmente aerado e à temperatura ambiente, para cada um dos eletrólitos mencionados anteriormente.

4.3.4 Espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)

O teor de cromo presente nos eletrólitos após os ensaios eletroquímicos (considerando 105 dias de imersão das amostras metálicas) foi verificado por meio da técnica de determinação de migração específica de metais pelo método de espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), conforme o Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (SMWW) 3th ed. 2017 método 3030E e 3120B, realizado no Laboratório de Análises e Pesquisas Ambientais (LAPAM) na Universidade de Caxias do Sul.

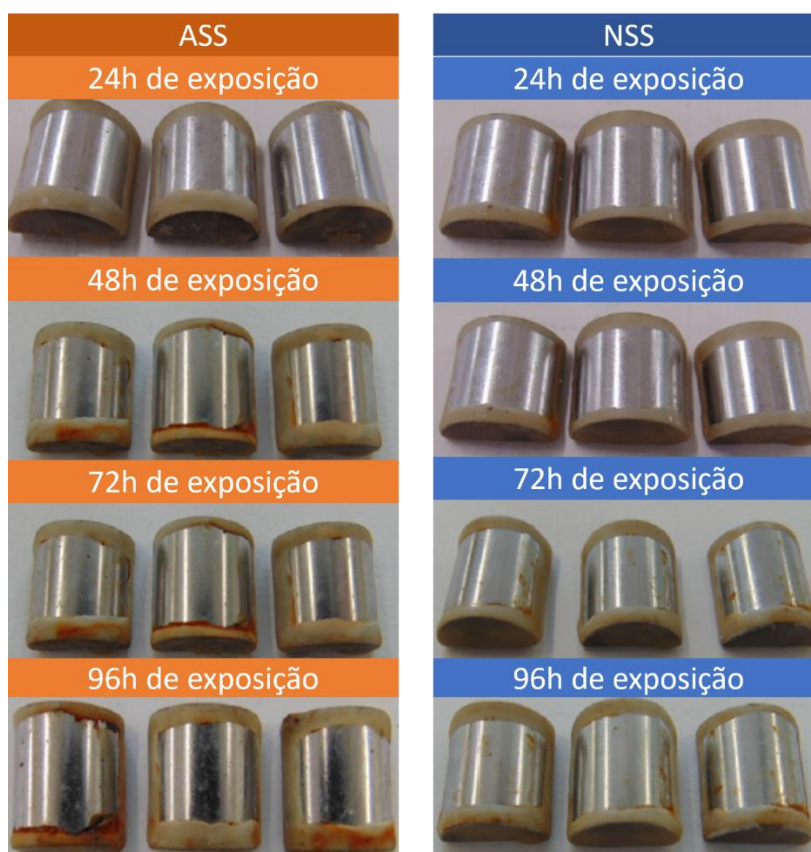
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a leitura dos resultados, as técnicas utilizadas foram interpretadas de forma complementar. Os ensaios eletroquímicos indicaram a evolução da resistência do revestimento ao longo do tempo; as análises morfológicas permitiram observar alterações superficiais associadas à degradação; e a quantificação de cromo nos eletrólitos possibilitou avaliar a possível migração do revestimento para o meio. Dessa forma, a discussão dos resultados considera não apenas o comportamento isolado de cada técnica, mas também a convergência entre os dados obtidos.

5.1 ENSAIOS DE CORROSÃO ACELERADA

Inicialmente, as amostras revestidas com cromo duro foram submetidas aos ensaios de névoa salina acética (ASS) e névoa salina neutra (NSS), com o objetivo de avaliar sua resistência à corrosão em ambientes agressivos. A Figura 14 apresenta os resultados obtidos.

Figura 14 - Evolução da corrosão das amostras de ferro fundido revestidas com cromo duro quando expostas aos ensaios de ASS e NSS



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Pela avaliação qualitativa das imagens, nota-se que a corrosão evoluiu de maneira similar nos dois meios. Na exposição à ASS, pequenos pontos de corrosão se tornaram visíveis após as primeiras 24 horas de ensaio, sendo observada corrosão discreta até 48 horas. Após 72 horas, as amostras passaram a apresentar escoamento localizado de produtos de corrosão de coloração avermelhada. Na exposição à NSS, pequenos pontos de corrosão se tornaram visíveis após as primeiras 24 horas de ensaio, com progressão nas regiões de borda a partir de 48 horas. A corrosão progrediu de forma lenta até o final do ensaio, após 96 horas de exposição.

Nos revestimentos de cromo duro, a corrosão ocorre principalmente de forma localizada, especialmente em regiões com microtrincas, poros e outras discontinuidades características do processo de eletrodeposição. Essas regiões facilitam a penetração do eletrólito e dos íons cloreto, favorecendo a ruptura localizada da camada passiva de cromo e o aparecimento de pontos de corrosão.

Quando o eletrólito atinge o substrato de ferro fundido, a corrosão tende a ocorrer de forma mais intensa devido à maior susceptibilidade do ferro à oxidação. Nesse caso, observa-se a formação de produtos de corrosão avermelhados, relacionados à oxidação do ferro presente no substrato. Assim, o revestimento de cromo atua inicialmente como uma barreira protetora,

porém defeitos estruturais e regiões de menor espessura podem favorecer o avanço do processo corrosivo até o substrato metálico.

Esses resultados sugerem que, nas condições avaliadas, as amostras expostas à ASS apresentaram maior ocorrência de produtos de corrosão, enquanto no NSS a degradação observada na superfície foi menor. Guo *et al.* (2024) relataram comportamento semelhante em ensaios prolongados de névoa salina, mostrando que falhas progressivas da camada protetora expõem regiões críticas do material, especialmente nas bordas e áreas de menor espessura, o que explica a maior vulnerabilidade observada nas amostras de cromo duro.

Além disso, estudos reforçam o papel dos íons cloreto na intensificação da corrosão localizada em materiais metálicos. Loto *et al.* (2025) apontam que a presença de cloretos compromete a estabilidade da camada passiva rica em cromo, favorecendo sua ruptura e acelerando a dissolução do material, o que resulta em maiores taxas de corrosão e na formação de regiões localizadas de ataque.

Os resultados obtidos nos ensaios de névoa salina também contribuem para a compreensão do comportamento do revestimento nos diferentes eletrólitos utilizados nesta pesquisa. Observou-se que o meio ácido empregado no ensaio ASS promoveu degradação mais intensa da superfície revestida em comparação ao NSS, indicando que eletrólitos com menor pH tendem a acelerar os processos corrosivos no cromo duro.

Em meios ácidos, a elevada concentração de íons H^+ favorece as reações de dissolução metálica e contribui para a desestabilização da camada passiva rica em cromo. Associada à presença de íons cloreto, essa condição intensifica a corrosão localizada e favorece a propagação de defeitos superficiais e regiões de ataque preferencial. Dessa forma, os ensaios acelerados auxiliaram na previsão do comportamento do revestimento em meios agressivos e forneceram suporte para a interpretação dos resultados eletroquímicos obtidos posteriormente.

5.2 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO

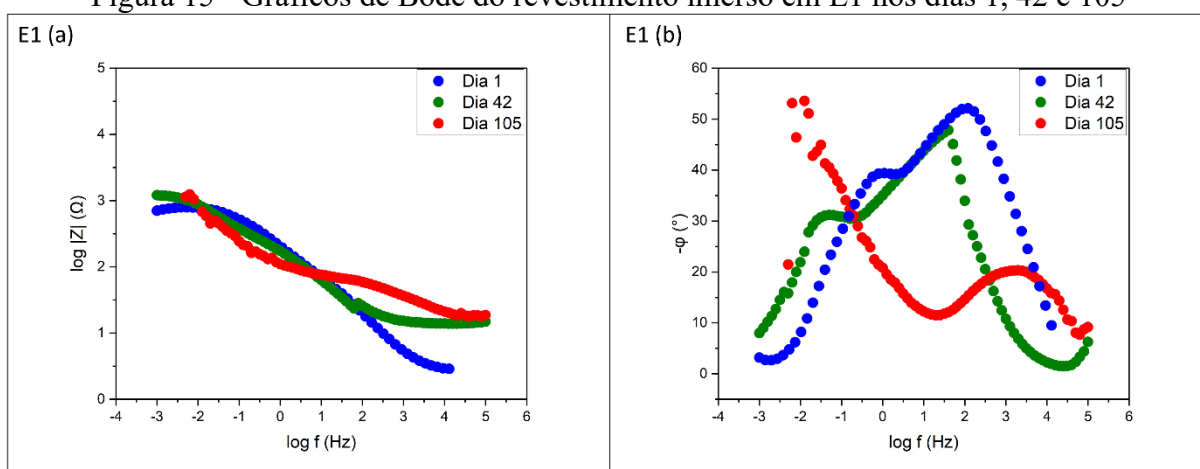
Os ensaios de EIS foram conduzidos com o objetivo de investigar o comportamento corrosivo das amostras após a exposição a diferentes eletrólitos, ao longo de diferentes tempos de imersão. Os resultados são apresentados em diagramas de Bode, onde o primeiro gráfico relaciona o logaritmo do módulo da impedância ($\log |Z|$), expresso em ohms (Ω), em função do logaritmo da frequência ($\log f$), em hertz (Hz); o segundo gráfico relaciona o ângulo de fase (ϕ), em graus ($^\circ$), em função do logaritmo da frequência ($\log f$), em hertz (Hz).

Em um primeiro momento serão apresentados resultados referentes às amostras expostas em cada um dos eletrólitos testados ao longo do tempo. Sequencialmente, serão apresentados os resultados comparativos entre os diferentes eletrólitos em um mesmo tempo de ensaio, a fim de se comparar qual deles promoveu maior ação corrosiva sobre a amostra metálica.

Considerando os diagramas de Bode referentes às amostras expostas ao eletrólito E1, cloreto de sódio, apresentados na Figura 15, observou-se no gráfico (a) que com a progressão do tempo de imersão, há uma redução do módulo da impedância, especialmente em baixas frequências, o que indica perda da proteção do revestimento e avanço da corrosão. O gráfico (b) reforça essa análise, apresentando um pico em médias frequências nos dias 1 e 42, enquanto no dia 105 ocorre o deslocamento do pico para baixas frequências, indicando o avanço da corrosão do revestimento.

Comportamento semelhante foi descrito por Lu *et al.* (2017), que avaliaram a degradação de revestimentos de poliuretano acrílico aplicados sobre aço carbono em solução de cloreto de sódio 3,5% (m/v). No estudo citado, a redução do módulo da impedância em baixas frequências foi atribuída à degradação da barreira protetora do revestimento, indicando o início dos processos corrosivos na interface metal/revestimento. Embora o sistema investigado pelos autores seja um revestimento orgânico, enquanto o presente trabalho analisa um revestimento metálico de cromo duro, em ambos os casos a queda de $\log |Z|$ na região de baixas frequências indica o avanço da corrosão.

Figura 15 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E1 nos dias 1, 42 e 105



Fonte: elaborado pela autora (2026).

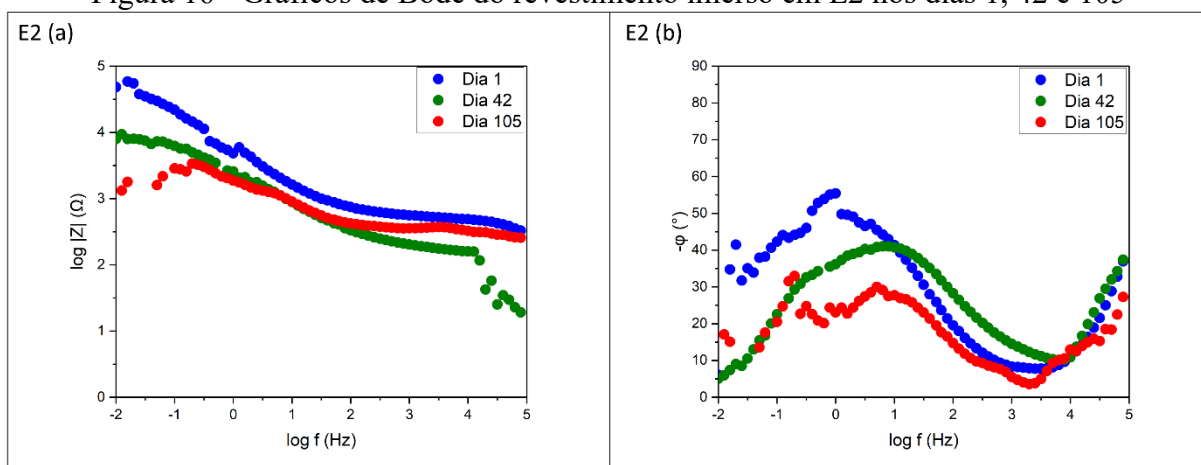
Sobre as amostras expostas ao eletrólito E2, mistura de farinha de trigo, nos diagramas de Bode apresentados na Figura 16 observa-se no gráfico (a) que no dia 1 os valores de módulo

da impedância em baixas frequências são mais elevados quando comparados aos demais tempos, indicando maior resistência inicial do sistema. Com o aumento do tempo de imersão, há uma redução progressiva de $\log |Z|$ nessa faixa de frequência, especialmente após 105 dias, o que sugere comprometimento da integridade do revestimento. Trabalhos recentes que utilizam EIS para avaliação de desempenho anticorrosivo relatam comportamento semelhante, associando a queda do módulo da impedância em baixas frequências à perda gradual da eficiência protetora do sistema (Lazanas; Prodromidis, 2023; Encinas-Sánchez *et al.*, 2023).

No gráfico (b), observa-se que o pico em médias frequências é mais pronunciado no dia 1 e o valor do ângulo de fase é reduzido nos demais tempos de imersão. De acordo com Bongiorno (2024), a diminuição do ângulo de fase indica que o comportamento capacitivo do revestimento é gradualmente comprometido ao longo da exposição, evidenciando a progressão do processo corrosivo.

A farinha de trigo utilizada no eletrólito apresenta elevada concentração de amido, composto principalmente por amilopectina. Fawzy *et al.* (2023) avaliaram a influência da amilopectina no comportamento eletroquímico do aço carbono em meio ácido utilizando técnicas de EIS e polarização potenciodinâmica. Os autores observaram alterações na resposta eletroquímica do sistema devido à interação das moléculas orgânicas com a superfície metálica. Dessa forma, a presença de compostos ricos em amilopectina no eletrólito pode ter influenciado os parâmetros de impedância observados ao longo do tempo de imersão.

Figura 16 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E2 nos dias 1, 42 e 105



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nos diagramas de Bode referentes às amostras expostas ao eletrólito E3, corante caramelo, apresentados na Figura 17, observa-se no gráfico (a) que no dia 42, o módulo da impedância em baixas frequências apresenta valores superiores aos obtidos no dia 1. Em ensaios

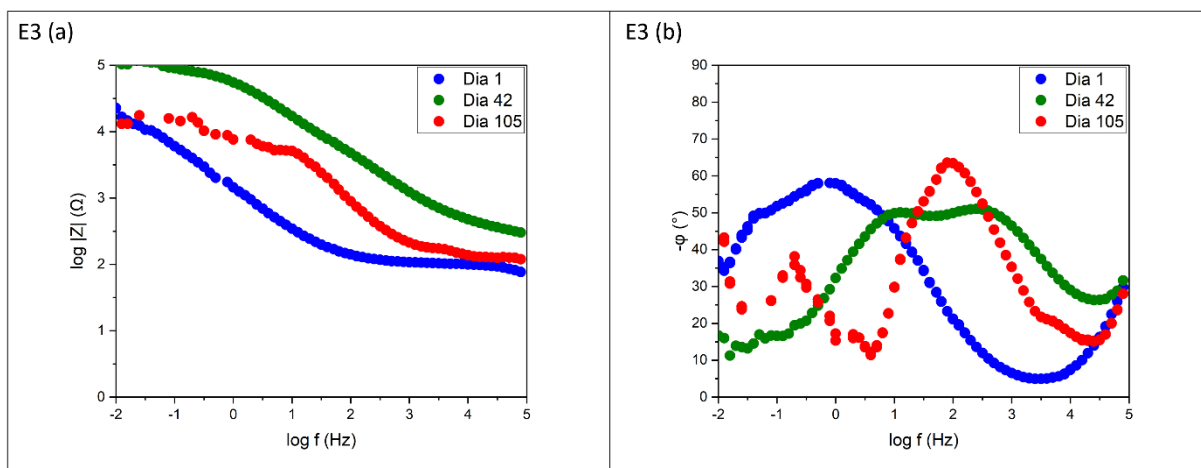
de EIS, essa região está associada à resistência global do sistema à corrosão, sendo comumente utilizada como indicativo do efeito barreira de revestimentos (Cristoforetti *et al.*, 2023).

O aumento de $\log |Z|$ nessa faixa sugere que, no período inicial de imersão, houve formação de produtos de corrosão capazes de preencher microfissuras e descontinuidades do revestimento de cromo, dificultando temporariamente a penetração do eletrólito. Com o aumento do tempo de exposição, no dia 105, observa-se redução do módulo da impedância em baixas frequências em relação ao dia 42. A diminuição de $\log |Z|$ nessa região está relacionada à degradação da camada protetora e ao aumento da atividade eletroquímica na interface metal/eletrólito. Esse comportamento também foi observado em sistemas nos quais os produtos de corrosão promovem proteção temporária da superfície, seguida pela deterioração gradual do revestimento ao longo do tempo de exposição (Wang *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2024).

No gráfico (b), enquanto nos dias 1 e 42 observa-se um perfil mais definido, no dia 105 ocorre alteração na forma da curva, com o aparecimento de mais picos. Esse comportamento indica maior complexidade dos processos eletroquímicos na interface revestimento/eletrólito, podendo estar relacionado ao avanço da degradação do revestimento e à formação de produtos de corrosão na superfície da amostra. Resultados semelhantes foram observados por Wang *et al.* (2025) e Zhu *et al.* (2024), que associaram alterações no perfil das curvas eletroquímicas à deterioração progressiva da camada protetora ao longo do tempo de exposição.

O corante caramelo utilizado no eletrólito é formado a partir da degradação térmica de carboidratos, principalmente derivados da glicose. Liu *et al.* (2016) avaliaram o efeito da concentração de glicose no comportamento corrosivo do titânio puro por meio de EIS e polarização potenciodinâmica, observando que a presença de glicose influenciou a resposta eletroquímica do sistema devido à interação com a camada passiva superficial do material. Dessa forma, compostos derivados da glicose presentes no corante caramelo podem ter contribuído para as alterações observadas nos diagramas de impedância, principalmente na variação do módulo da impedância em baixas frequências e nas mudanças do comportamento capacitivo ao longo do tempo de imersão.

Figura 17 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E3 nos dias 1, 42 e 105



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nos diagramas de Bode referentes às amostras expostas ao eletrólito E4, emulsão, apresentados na Figura 18, observa-se no gráfico (a) que, no dia 42, o módulo da impedância em baixas frequências apresenta valores superiores aos obtidos no dia 1. Esse aumento indica um efeito protetor temporário do revestimento e pode estar relacionado à formação de produtos de corrosão capazes de preencher defeitos superficiais, como microfissuras e poros, dificultando a penetração do eletrólito. Wang *et al.* (2025) também observaram aumento temporário da impedância associado à formação de produtos de corrosão na superfície do revestimento.

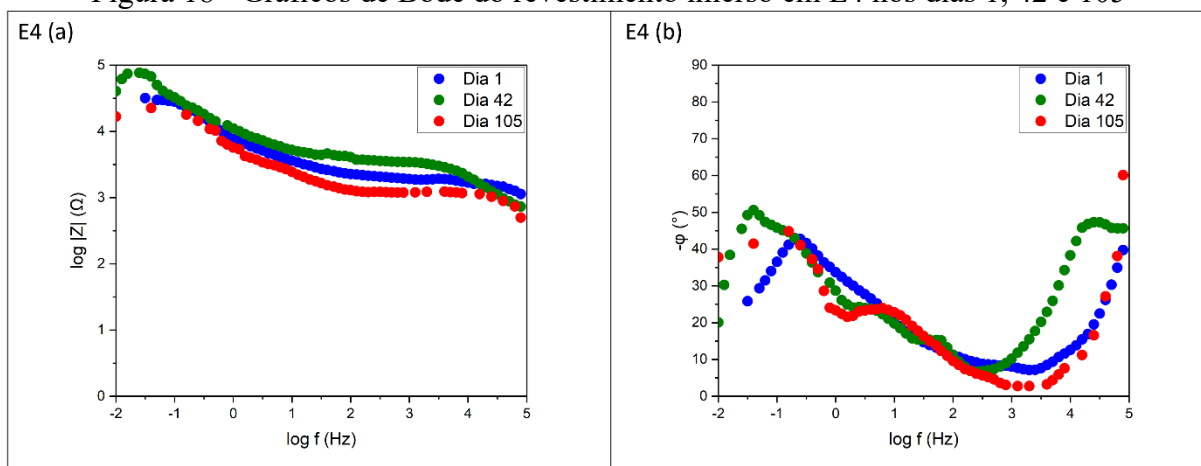
Com o avanço do tempo de exposição, no dia 105, observa-se redução do módulo da impedância em baixas frequências em relação ao dia 42. Esse resultado indica perda desse efeito protetor, associada ao aumento da permeabilidade do revestimento e ao avanço do processo corrosivo. A redução de $\log |Z|$ nessa faixa está relacionada à deterioração da camada protetora e ao aumento da atividade eletroquímica na interface metal/eletrólito (Zhu *et al.*, 2024).

No gráfico (b), enquanto nos dias 1 e 42 visualizam-se picos mais definidos, no dia 105 observa-se alteração na forma da curva, com redução da definição desses picos e mudança na sua distribuição ao longo da faixa de frequências. Entretanto, essas alterações ocorrem de forma discreta, sem indicar degradação acentuada do sistema, o que reforça o comportamento menos agressivo do eletrólito.

A emulsão utilizada no eletrólito contém compostos lipídicos, representados principalmente pela trioleína e pela fosfatidilcolina. Compostos orgânicos dessa natureza podem adsorver sobre superfícies metálicas e favorecer a formação de filmes superficiais, alterando a interação entre o eletrólito e o revestimento. Boutoumit *et al.* (2024), ao avaliarem o comportamento eletroquímico de filmes orgânicos sobre aço carbono por meio de EIS e polarização potenciodinâmica, observaram aumento da resistência à corrosão e redução da

atividade eletroquímica do sistema devido à formação de camadas adsorvidas na superfície metálica. Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento temporário do módulo da impedância observado no dia 42, sugerindo um efeito barreira inicial associado à presença dos compostos orgânicos da emulsão. Com o aumento do tempo de imersão, a redução de $\log |Z|$ em baixas frequências indica perda gradual desse efeito protetor e maior interação do eletrólito com a superfície do revestimento.

Figura 18 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E4 nos dias 1, 42 e 105



Fonte: elaborado pela autora (2026).

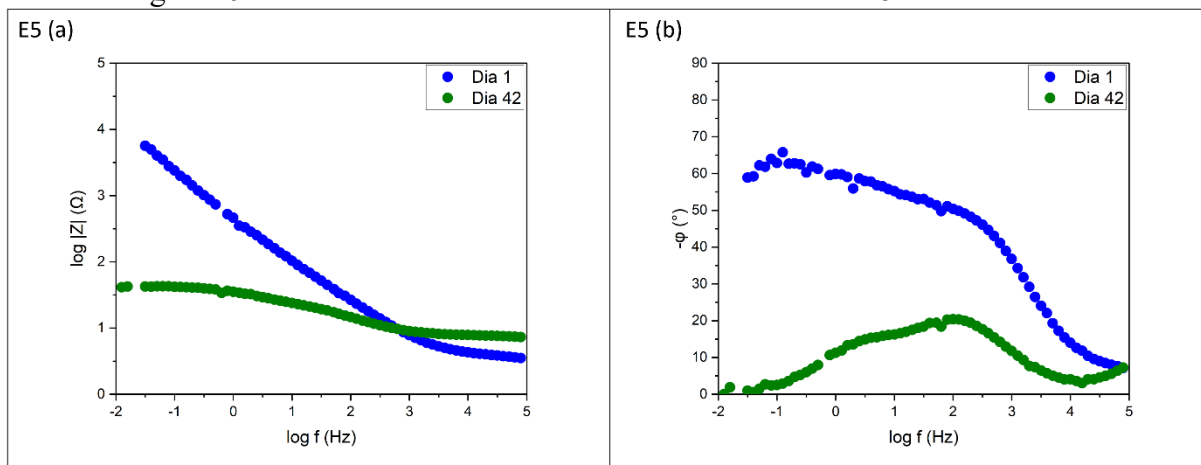
Nos diagramas de Bode referentes às amostras expostas ao eletrólito E5, ácido fosfórico, apresentados na Figura 19, observa-se no gráfico (a) que, no dia 42, ocorre redução do módulo da impedância em toda a faixa de frequências em relação ao dia 1. Esse comportamento indica diminuição da resistência do sistema, evidenciando degradação acelerada do revestimento imerso em E5. Em análises por EIS, a redução de $\log |Z|$ ao longo da faixa de frequências está relacionada à perda da capacidade protetora do revestimento e ao aumento da atividade eletroquímica na interface metal/eletrólito (Zhu *et al.*, 2024).

No gráfico (b), observa-se também diminuição dos valores de ângulo de fase no dia 42. Esse comportamento está associado à perda do caráter capacitivo do revestimento, reforçando a interpretação de degradação do sistema. A redução do ângulo de fase indica maior interação do eletrólito com a superfície metálica e aumento dos processos corrosivos na interface revestimento/eletrólito.

Cabe destacar que não foi possível realizar a análise no dia 105, pois durante a retirada da amostra após o período de imersão verificou-se completa degradação do revestimento de cromo, não sendo mais possível identificar sua presença na superfície. Esse comportamento evidencia a elevada agressividade do eletrólito E5 e a aceleração do processo corrosivo em

meio ácido. Segundo Gentil e Ladimir (2022), meios ácidos favorecem a dissolução de revestimentos metálicos e intensificam os processos eletroquímicos na interface.

Figura 19 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E5 nos dias 1 e 42



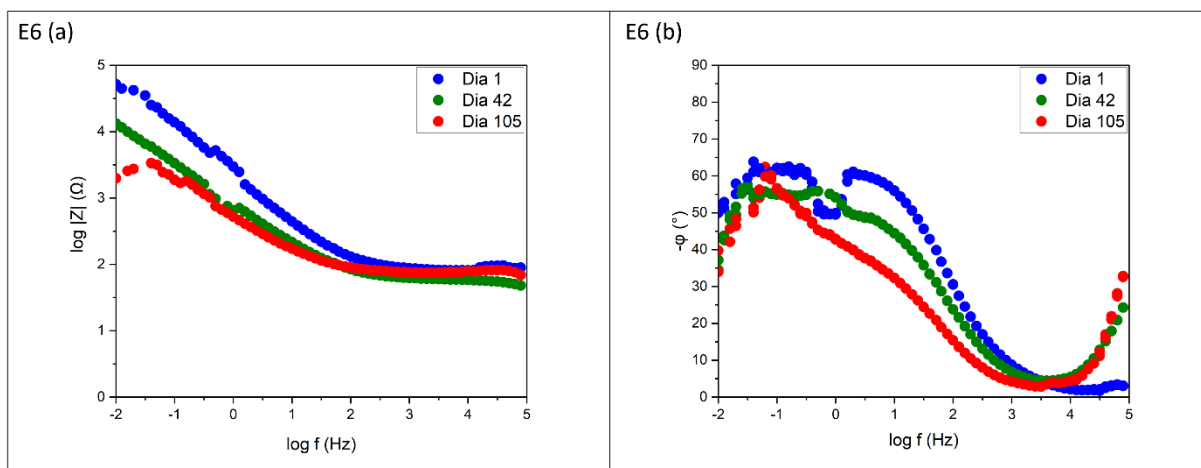
Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nos diagramas de Bode referentes às amostras expostas ao eletrólito E6, bicarbonato de sódio, apresentados na Figura 20, observa-se no gráfico (a) que no dia 42 os valores de módulo da impedância em baixas frequências diminuem em relação ao dia 1. Esse comportamento indica redução da resistência do revestimento frente ao eletrólito, sugerindo o início da degradação da camada protetora. Após 105 dias, essa redução torna-se mais acentuada, evidenciando a progressão do processo corrosivo ao longo do tempo.

No gráfico (b), o ângulo de fase acompanha a tendência observada no módulo da impedância, apresentando modificações ao longo do tempo. Nota-se leve alteração no perfil da curva ao longo da faixa de frequências, porém sem mudanças expressivas. Esse comportamento pode estar relacionado à ocorrência simultânea de diferentes processos eletroquímicos, associados a pequenas variações na interface revestimento/eletrólito.

Estudos relatam que íons bicarbonato podem alterar a estabilidade de filmes superficiais e modificar os mecanismos de corrosão em materiais metálicos devido à interação desses íons com a interface metal/eletrólito. Gao *et al.* (2023) observaram que soluções contendo bicarbonato promoveram alterações nos parâmetros de impedância e na resistência à transferência de carga durante ensaios eletroquímicos. Dessa forma, a redução gradual do módulo da impedância observada ao longo do tempo de imersão pode estar relacionada à perda progressiva da estabilidade da camada protetora do revestimento.

Figura 20 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E6 nos dias 1, 42 e 105

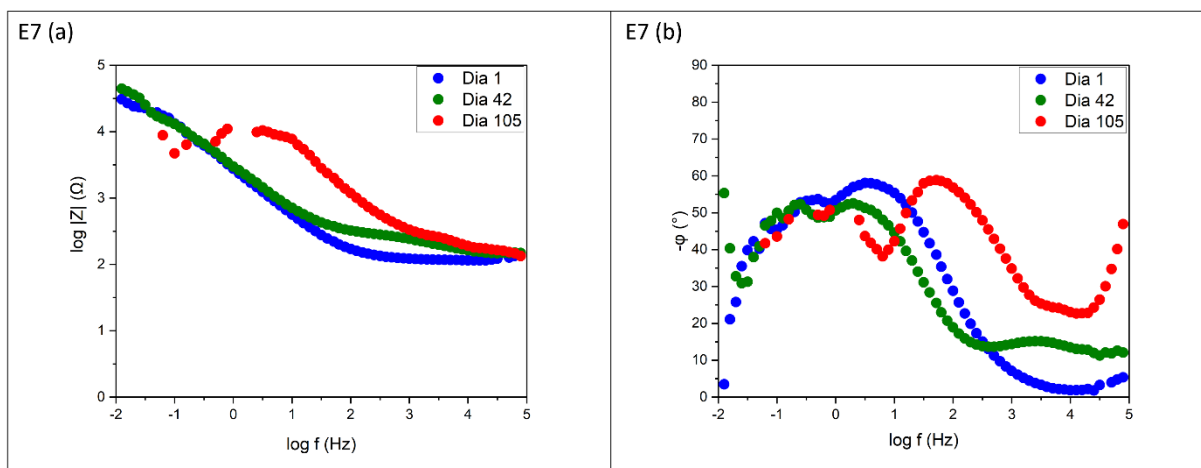


Fonte: elaborado pela autora (2026).

Nos diagramas de Bode referentes às amostras expostas ao eletrólito E7, cacau alcalino, apresentados na Figura 21, observa-se no gráfico (a) que, nos dias 1 e 42, os valores do módulo da impedância permanecem próximos ao longo da faixa de frequências, indicando que nesse período inicial não ocorreram alterações na resistência do sistema. No entanto, no dia 105, verifica-se aumento do módulo da impedância em médias frequências em relação aos demais tempos, sugerindo melhora temporária no comportamento do revestimento. Esse resultado pode estar relacionado à presença de compostos orgânicos do cacau alcalino, principalmente a teobromina. Obot, Obi-Egbedi e Umoren (2010) observaram que a teobromina pode atuar como inibidor de corrosão por meio da adsorção na superfície metálica, formando uma camada superficial capaz de dificultar a transferência de carga e reduzir o contato do eletrólito com o revestimento.

No gráfico (b), observa-se que, no dia 1, o ângulo de fase apresenta um pico definido em médias frequências. No dia 42, esse pico perde definição e apresenta leve deslocamento ao longo da faixa de frequências. Já no dia 105, ocorre novamente aumento dos valores de ângulo de fase, acompanhado de alteração no perfil da curva. Esse comportamento pode estar associado à formação e reorganização de espécies adsorvidas e produtos na superfície do revestimento ao longo do período de imersão. A presença dessas espécies pode contribuir para uma resposta mais resistiva em determinados intervalos de frequência, sem indicar necessariamente estabilidade do sistema.

Figura 21 - Gráficos de Bode do revestimento imerso em E7 nos dias 1, 42 e 105

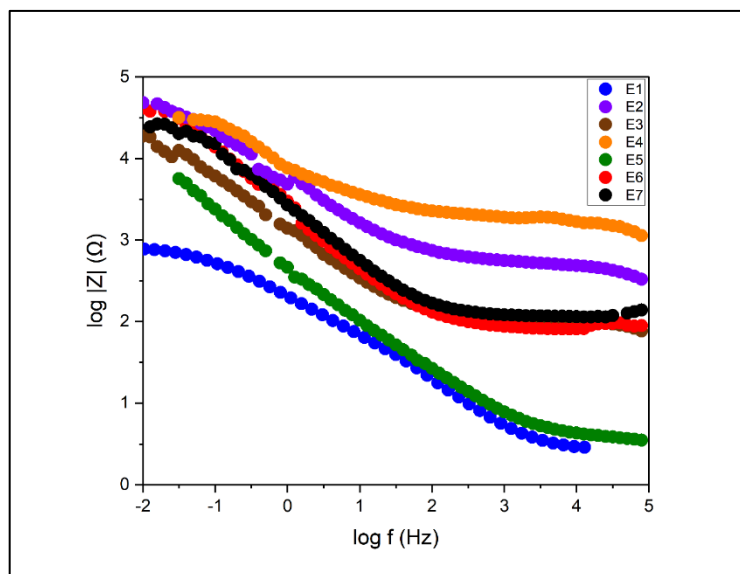


Fonte: elaborado pela autora (2026).

Além da análise individual de cada eletrólito, realizou-se também uma avaliação comparativa, reunindo os resultados em um único gráfico, com o objetivo de evidenciar diferenças e semelhanças no desempenho dos sistemas ao longo do tempo.

A análise comparativa do módulo da impedância no dia 1 de exposição aos eletrólitos evidenciou diferenças no comportamento dos eletrólitos ao longo do ensaio, especialmente na região de baixas frequências. Os eletrólitos E4 e E2 apresentaram os maiores módulos de impedância em baixas frequências, indicando maior resistência à corrosão e melhor efeito barreira. Por outro lado, E1 e E5 exibiram menores valores de impedância, sugerindo maior permeabilidade ao eletrólito e menor proteção superficial. O perfil das curvas indica predominantemente comportamento capacitivo, associado à formação de filmes protetores. Além disso, a amostra exposta ao eletrólito E4 destacou-se por apresentar elevados módulos de impedância mesmo em altas frequências, comportamento associado à maior resistência intrínseca do revestimento e menor permeabilidade ao eletrólito.

Figura 22 - Módulo da impedância em função do logaritmo da frequência para os diferentes eletrólitos no dia 1

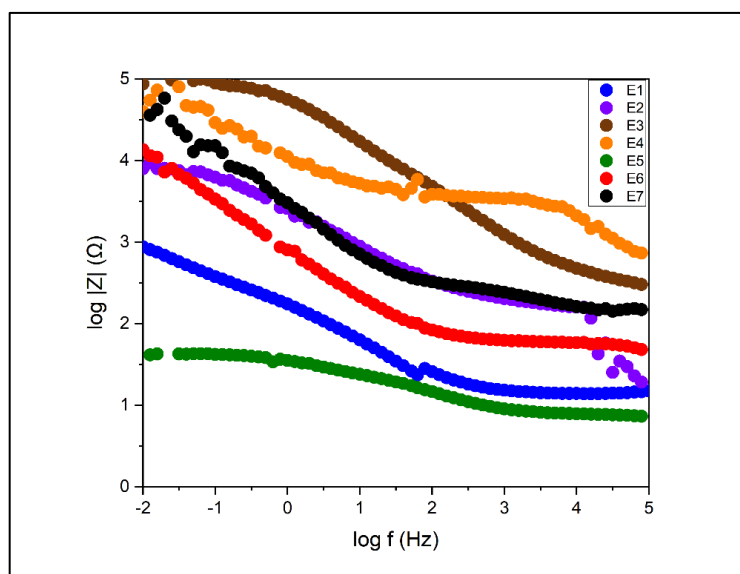


Fonte: elaborado pela autora (2026).

Após 42 dias de imersão, conforme apresentado na Figura 23, observa-se que o eletrólito E3 manteve os valores mais elevados em baixas frequências, seguido por E4 e E7. Em contrapartida, E2 e E6 apresentaram redução nos valores de módulo da impedância, indicando perda de desempenho ao longo do tempo. Os eletrólitos E1 e E5 permaneceram com os menores valores, indicando baixa resistência à corrosão e elevada deterioração do sistema revestimento quando exposto nestes eletrólitos.

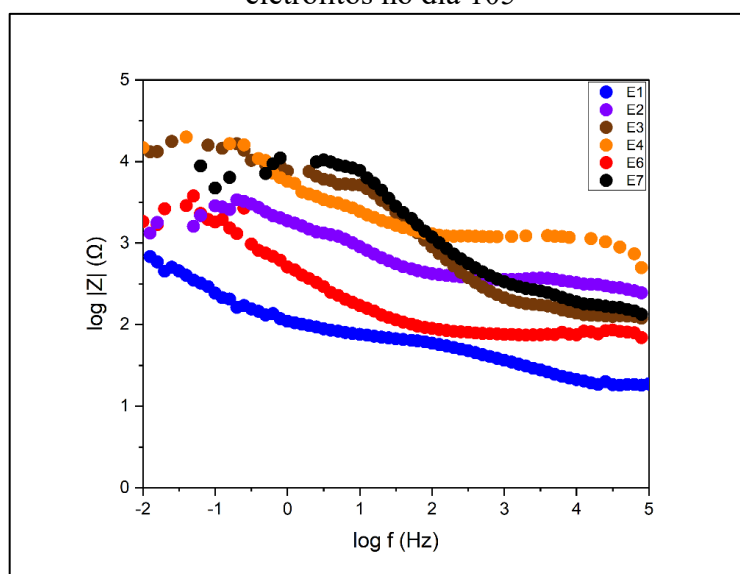
Após 105 dias de imersão, o diagrama de Bode apresentado na Figura 24 deixa evidente que os eletrólitos E4, E3 e E7 apresentaram os maiores valores de módulo da impedância em baixas frequências, indicando elevada estabilidade eletroquímica e melhor manutenção das propriedades de barreira. Por outro lado, E1 apresentou os menores módulos de impedância, evidenciando baixa resistência à corrosão e elevada permeabilidade ao eletrólito após envelhecimento prolongado.

Figura 23 - Módulo da impedância em função do logaritmo da frequência para os diferentes eletrólitos no dia 42



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Figura 24 - Módulo da impedância em função do logaritmo da frequência para os diferentes eletrólitos no dia 105



Fonte: elaborado pela autora (2026).

A análise comparativa dos eletrólitos, baseada nas respostas de módulo da impedância e ângulo de fase obtidas nos ensaios eletroquímicos, permitiu identificar diferenças no comportamento dos meios ao longo do tempo. De forma geral, observou-se a seguinte ordem de desempenho frente à corrosão, do mais ao menos agressivo:

- E5 (ácido fosfórico) – mostrou o comportamento mais crítico, levando à degradação do revestimento antes do final do ensaio, o que inviabilizou as medições no dia 105. Esse

resultado está relacionado ao caráter fortemente ácido do meio, que compromete rapidamente a estabilidade do revestimento (Rotta; Chen; Frankel, 2023).

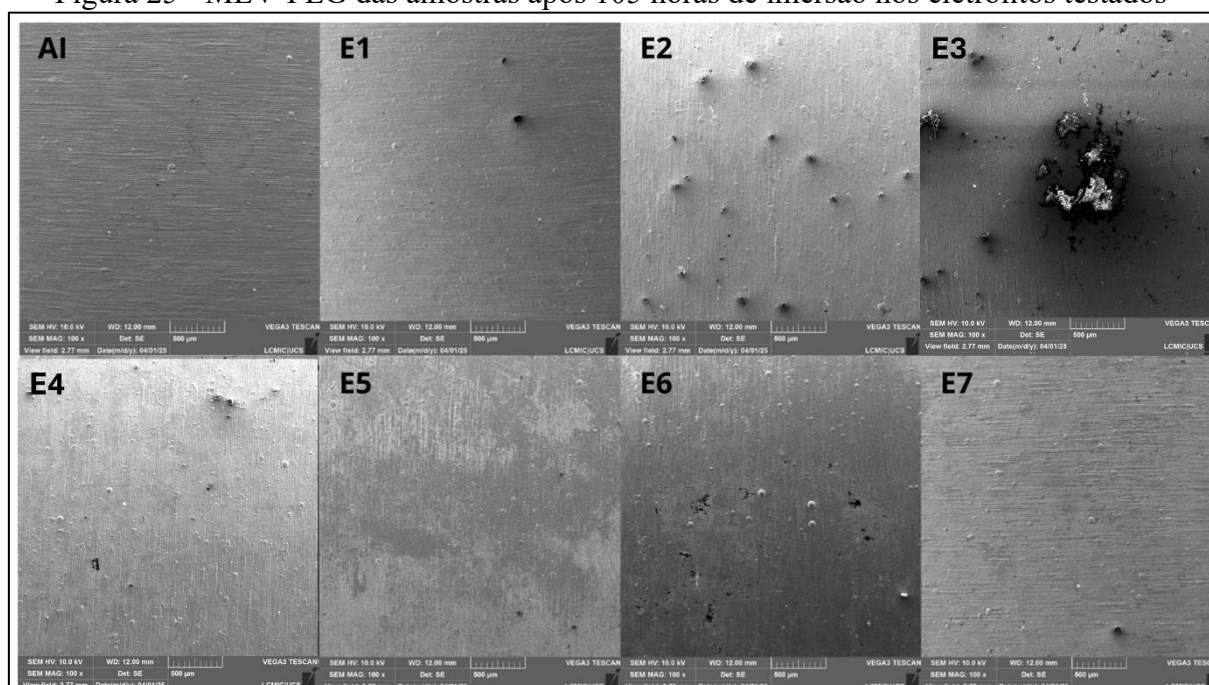
- E1 (cloreto de sódio) – desde o início, apresenta baixos valores de módulo da impedância, caracterizando um meio mais agressivo. Esse comportamento está associado à presença de íons cloreto, que favorecem a ruptura da camada passiva e o desenvolvimento de corrosão localizada (Xue *et al.*, 2019).
- E2 (farinha de trigo) – apresentou comportamento intermediário. Nos primeiros momentos, os resultados indicam certa proteção, possivelmente associada à deposição de material sobre a superfície do revestimento. Esse efeito pode estar relacionado à presença de polissacarídeos, especialmente o amido presente na farinha, que podem se adsorver na superfície e atuar como uma barreira temporária. Com o tempo, observa-se a redução progressiva desses parâmetros, sugerindo a perda dessa proteção inicial, comportamento semelhante ao descrito para sistemas contendo polissacarídeos naturais (Umoren, Ogbeide e Ogbechie, 2010; Sangeetha *et al.*, 2012).
- E4 (emulsão) – manteve elevados valores de módulo da impedância e picos de ângulo de fase bem definidos ao longo de todo o ensaio. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de interfaces óleo/água, que limitam a mobilidade iônica do sistema e reduzem sua ação corrosiva (Jiang *et al.*, 2020).
- E6 (bicarbonato de sódio) – no início do ensaio, os valores de ângulo de fase indicam formação de uma camada protetora. No entanto, essa condição não se mantém, e com o tempo observa-se redução desses valores, evidenciando a perda da passivação inicial (Zhu *et al.*, 2024).
- E3 (corante caramelo) – nos estágios iniciais, indicou a formação de uma barreira protetora, evidenciada pelos altos valores de módulo da impedância e pelos picos de fase mais pronunciados. Com o avanço do tempo de exposição, esses parâmetros diminuem, sugerindo perda gradual dessa camada. Compostos oriundos da caramelização podem atuar como inibidores orgânicos, embora com efeito limitado em exposições prolongadas (Abdel-Gaber, Abd-El-Nabey e Saady, 2006).
- E7 (cacau alcalino) – também apresentou comportamento estável, com altos valores de módulo da impedância e picos de ângulo de fase bem definidos até o final do ensaio. A presença de compostos fenólicos pode explicar esse resultado, uma vez que esses compostos são reconhecidos por sua atuação como inibidores naturais de corrosão, por meio da adsorção na superfície metálica (Yetri *et al.*, 2023; Jiménez-González *et al.*, 2021).

5.3 ANÁLISE MORFOLÓGICA DAS AMOSTRAS

A Figura 25 apresenta as micrografias obtidas por MEV-FEG das amostras após 105 dias de imersão, permitindo avaliar as alterações morfológicas do revestimento de cromo duro em função do eletrólito. Entre os eletrólitos avaliados, a amostra exposta ao eletrólito E6 apresentou a menor alteração morfológica, com superfície uniforme e poucos pontos isolados, sendo classificada como a de menor agressividade. Em E2, observa-se o surgimento de pequenas discontinuidades distribuídas na superfície, indicando início de degradação. A amostra em E4 apresenta maior número de irregularidades e defeitos superficiais, sugerindo avanço do processo corrosivo. Para E7, nota-se uma superfície preservada, porém, com alguns pontos de descontinuidade, caracterizando comportamento intermediário.

No caso de E3, verifica-se a presença de regiões com acúmulo de produtos de corrosão e ataque localizado mais intenso, indicando degradação do revestimento. A amostra em E1 apresenta defeitos pontuais mais evidentes, associados à corrosão. Por fim, o eletrólito E5 mostrou-se o mais agressivo, com superfície bastante heterogênea, regiões extensas alteradas e perda de uniformidade do revestimento.

Figura 25 - MEV-FEG das amostras após 105 horas de imersão nos eletrólitos testados

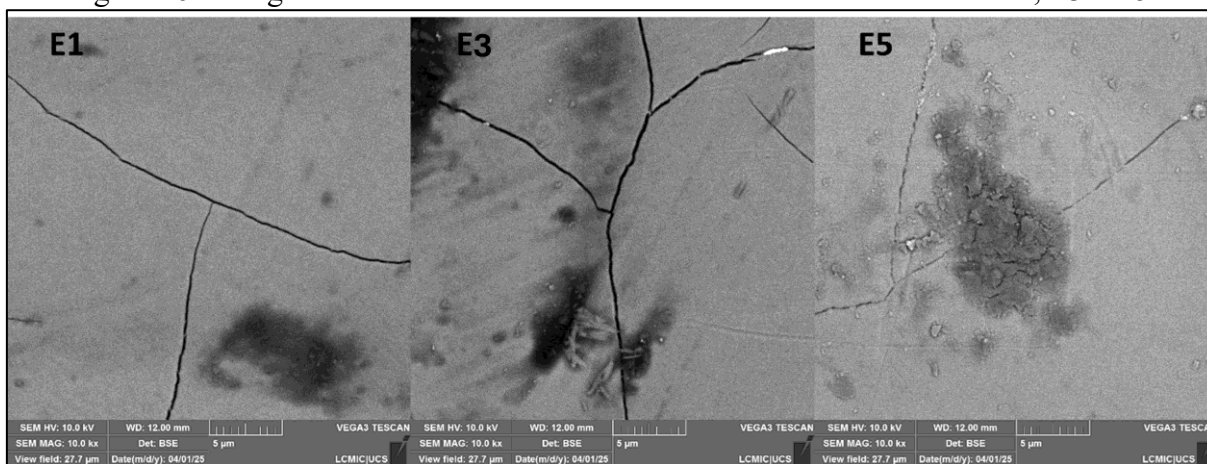


Fonte: elaborado pela autora (2026).

Para melhor visualização das alterações superficiais, foram obtidas imagens em maiores ampliações para algumas condições representativas, apresentadas na Figura 26.

Destacaram-se três condições com alterações morfológicas mais evidentes. Na amostra exposta ao eletrólito E1, observam-se regiões de ataque localizado associadas a trincas superficiais. Na amostra exposta ao eletrólito E3, verificam-se regiões heterogêneas com presença de depósitos sobre a superfície e descontinuidades mais pronunciadas. Já na amostra exposta ao eletrólito E5, observam-se regiões com maior heterogeneidade superficial, além da presença de trincas e áreas irregulares, indicando degradação mais intensa do revestimento.

Figura 26 - Imagens de MEV-FEG das amostras imersas nos eletrólitos: E1, E3 e E5



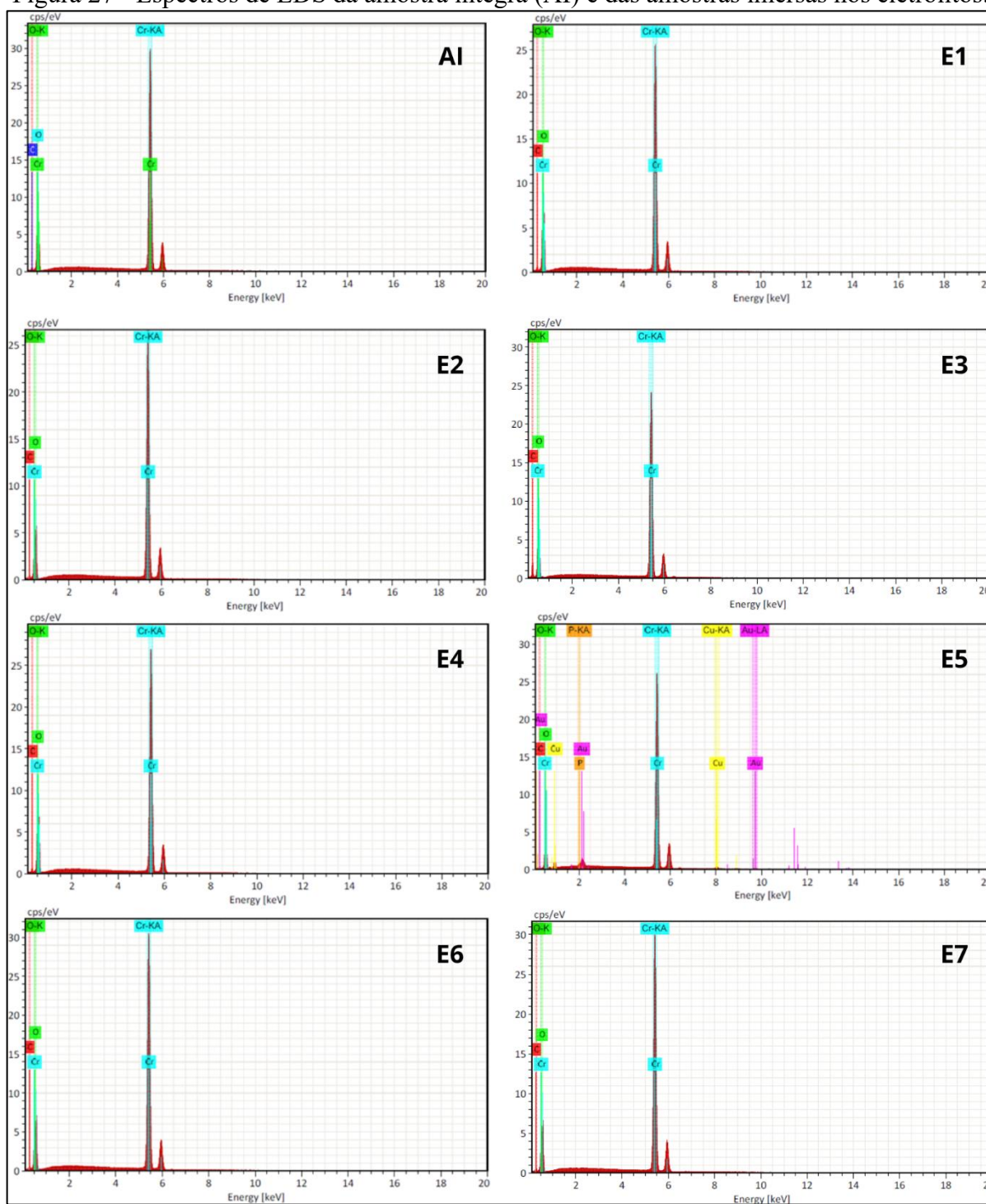
Fonte: elaborado pela autora (2026).

Na Figura 27 são apresentados os espectros de EDS obtidos para superfície da amostra íntegra (AI) e para as amostras imersas nos diferentes eletrólitos. Os picos evidenciam a presença predominante de cromo, característica do revestimento, além de pequenas contribuições de oxigênio e carbono. Observa-se que a maioria das amostras, após o teste de imersão, mantiveram altos teores de cromo, próximos de 99%, com pequenas variações de carbono e oxigênio.

Conforme apresentado na Figura 28, os valores correspondem aos percentuais dos elementos químicos detectados por meio da análise quantitativa de EDS nas superfícies das amostras após o período de imersão. Em E3, foi detectado 87,64% de cromo, acompanhado de 10,31% de carbono e 2,04% de oxigênio, indicando alteração na composição elementar detectada na superfície. E7 também apresentou predominância de cromo (96,83%), com 2,64% de carbono e 0,53% de oxigênio, embora em menor intensidade. A presença de ouro identificada nas análises está associada ao recobrimento superficial realizado para a obtenção das imagens por MEV-FEG, não estando relacionada à formação de produtos de corrosão. Os resultados da análise de EDS indicam que os eletrólitos associados à presença de matéria

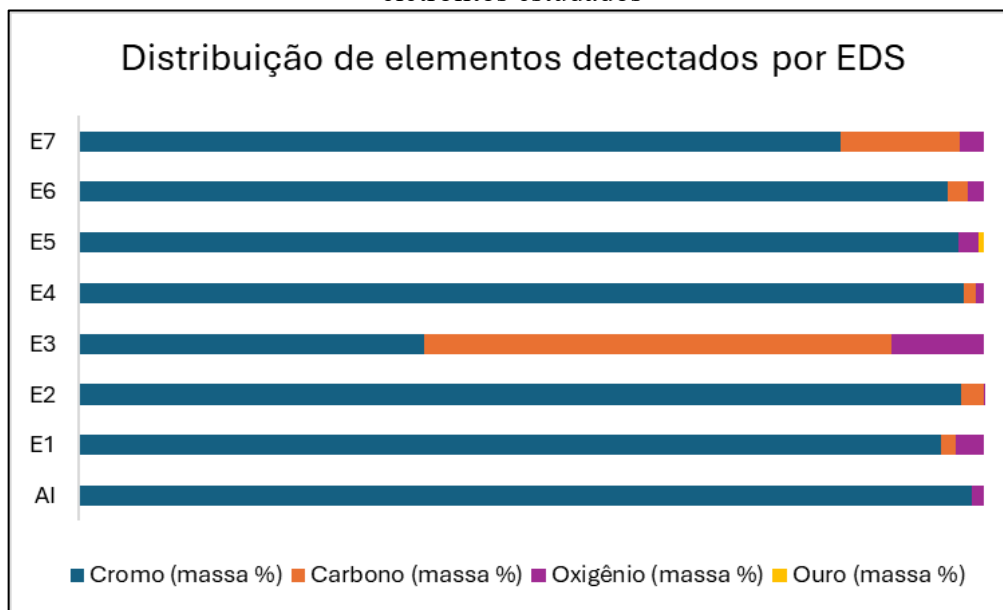
orgânica promoveram maiores alterações na composição elementar detectada na superfície, diferenciando-se dos demais eletrólitos analisados.

Figura 27 - Espectros de EDS da amostra íntegra (AI) e das amostras imersas nos eletrólitos.



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Figura 28 - Distribuição dos elementos detectados por EDS das amostras expostas aos eletrólitos estudados



Fonte: elaborado pela autora (2026).

De forma geral, os resultados obtidos apresentaram comportamento consistente entre si, permitindo estabelecer uma tendência clara de agressividade dos eletrólitos avaliados. Observou-se que o eletrólito E6 promoveu as menores alterações no revestimento, mantendo características próximas à amostra íntegra, seguido por E2, que apresentou apenas modificações discretas. Na sequência, o eletrólito E4 indicou início de degradação superficial, enquanto E7 apresentou alterações mais evidentes, caracterizando um comportamento intermediário.

Os eletrólitos E3 e E1 mostraram maior intensidade de ataque, com formação de produtos de corrosão, presença de pites e discontinuidades mais pronunciadas. Por fim, o eletrólito E5 destacou-se como o mais agressivo, evidenciado pela perda de integridade do revestimento, elevada heterogeneidade superficial e alterações composicionais mais intensas. Assim, pela análise morfológica das amostras, a ordem geral conforme agressividade dos eletrólitos, do mais ao menos agressivo, foi: E5 (ácido fosfórico), E3 (corante caramelo), E1 (cloreto de sódio), E4 (emulsão), E7 (cacau alcalino), E2 (farinha de trigo) e E6 (bicarbonato de sódio).

5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS ELETRÓLITOS

Os eletrólitos foram caracterizados quanto à presença de cromo total, associado à possível migração do revestimento após 105 dias de imersão das amostras. Os resultados estão apresentados na Tabela 4. Observou-se que os eletrólitos E1, E4 e E6 apresentaram concentrações inferiores ao limite de quantificação do método ($< 0,01$ mg/L), indicando que, nessas condições, não houve liberação detectável de cromo para o meio. Em contrapartida, os eletrólitos E2, E3 e E7 apresentaram concentrações mensuráveis, com valores de 0,05 mg/L, 0,09 mg/L e 0,02 mg/L, respectivamente.

O eletrólito E5 apresentou comportamento distinto, com concentração de 5,79 mg/L, valor superior aos demais. Esse resultado indica maior capacidade de promover a dissolução do revestimento, caracterizando-o como o meio mais agressivo entre os avaliados. Esse comportamento pode estar relacionado ao caráter ácido do eletrólito, que favorece a instabilidade da camada passiva rica em óxidos de cromo, facilitando a liberação de espécies metálicas para a solução. Estudos recentes mostram que, em meios ácidos, a ruptura parcial dessa camada pode intensificar a dissolução do cromo e aumentar sua concentração no eletrólito (Fujimura *et al.*, 2023).

Tabela 4 - Concentração de cromo total nos eletrólitos após os ensaios eletroquímicos

Eletrólito	Cromo Total (mg Cr/L)
E1	$< 0,01$
E2	0,05
E3	0,09
E4	$< 0,01$
E5	5,79
E6	$< 0,01$
E7	0,02

Fonte: elaborado pela autora (2026).

5.5 CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de integrar os resultados obtidos pelas diferentes técnicas empregadas, foi proposta uma classificação comparativa dos eletrólitos com base em uma escala qualitativa de agressividade, variando de 1 (menor agressividade) a 5 (maior agressividade), conforme observação e consideração da autora. Essa classificação considerou, de forma conjunta, os resultados dos ensaios eletroquímicos (EIS), da análise visual após imersão, das observações por MEV/EDS e da quantificação de cromo por ICP-OES. A concordância entre as técnicas permitiu estabelecer um ranking consistente dos eletrólitos, apresentado na Tabela 5, organizado do mais ao menos agressivo.

Tabela 5 - Classificação comparativa dos eletrólitos quanto ao desempenho corrosivo

Ranking	Eletrólito	Composição	EIS	Visual	MEV-FEG e EDS	ICP-OES	Resultado Geral
1º	E5	Ácido fosfórico	5	5	5	5	5,00
2º	E1	Cloreto de sódio	4	4	3	2	3,25
3º	E3	Corante caramelo	1	3	4	4	3,00
4º	E7	Cacau alcalino	1	3	2	2	2,00
5º	E4	Emulsão	2	2	2	2	1,75
6º	E2	Farinha de trigo	2	1	1	3	1,75
7º	E6	Bicarbonato de sódio	2	1	1	2	1,25

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Os resultados obtidos pelas diferentes técnicas apresentaram boa concordância, o que reforça a consistência da análise e evidencia a importância de uma avaliação integrada, principalmente em meios complexos e de grande variabilidade como os da indústria alimentícia.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o comportamento corrosivo de um revestimento de cromo duro quando exposto a diferentes eletrólitos associados à produção de biscoitos tipo *wafers*, utilizando ensaios eletroquímicos, análises de migração de cromo por ICP-OES, caracterização por MEV-FEG, EDS e avaliação visual das amostras após imersão prolongada. A abordagem combinada permitiu identificar as diferenças de desempenho do revestimento em cada meio.

Os resultados evidenciaram variações no comportamento corrosivo em função do eletrólito. O ácido fosfórico destacou-se como o meio mais agressivo, com redução acentuada do módulo da impedância, maior liberação de cromo para o meio e alterações superficiais marcadas por pites, fissuras e perda de uniformidade do revestimento. O cloreto de sódio e o corante caramelo também apresentaram sinais importantes de degradação, embora por mecanismos e intensidades distintos. Já os eletrólitos contendo cacau alcalino, emulsão, farinha de trigo e bicarbonato de sódio também apresentaram evidências de corrosão, porém, em menor intensidade. A análise conjunta dos resultados permitiu estabelecer uma classificação do potencial corrosivo dos meios, evidenciando a coerência entre as técnicas empregadas e reforçando a confiabilidade das interpretações.

De forma geral, verificou-se que meios de caráter ácido e com presença de compostos orgânicos favorecem a intensificação dos processos corrosivos, enquanto eletrólitos neutros ou levemente alcalinos tendem a preservar a integridade do revestimento de cromo duro. Os resultados obtidos contribuem para a avaliação do desempenho de revestimentos de cromo duro em contato com ingredientes da indústria alimentícia, oferecendo subsídios para a seleção de materiais e para o estabelecimento de estratégias de controle de corrosão em ambientes industriais.

REFERÊNCIAS

ABDEL-GABER, A. M.; ABD-EL-NABEY, B. A.; SAADY, M. A. Inhibitive action of some carbohydrate compounds on the corrosion of steel in acidic medium. *Corrosion Science*, v. 48, n. 9, p. 2765–2779, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BISCOITOS, MASSAS ALIMENTÍCIAS E PÃES & BOLOS INDUSTRIALIZADOS (ABIMAPI). *Setor de biscoitos, massas e pães cresce 4% no Brasil em 2024*. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://abimapi.com.br/setor-de-biscoitos-massas-e-paes-cresce-4-no-brasil-em-2024/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM B117: Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.

ATAPOUR, M.; SHARIFI, M.; ALIOFKHAZRAEI, M.; RAHIMI, E. Metal release from stainless steel 316L in whey protein and simulated milk solutions under static and stirring conditions. *Food Control*, v. 101, p. 163-172, 2019.

ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. *Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente*. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

BARAL, A.; ROY, S.; DAS, S. Influence of plating parameters on microstructure and properties of hard chromium coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 404, p. 126467, 2020.

BERTOLINO, M. T.; BRAGA, A. *Ciência e tecnologia para fabricação de biscoitos: handbook do biscoiteiro*. São Paulo: Varela, 2017.

BETTS, A. J.; WELLS, D. B.; LICHTI, K. A. Issues affecting the corrosion behaviour of stainless steel in New Zealand food processing industries. *The Food Technologist*, v. 28, n. 3, p. 10–15, 1993.

BEVERSKOG, B.; PUIGDOMENECH, I. Revised Pourbaix diagrams for chromium at 25–300 °C. *Corrosion Science*, v. 39, n. 1, p. 43–57, 1997.

BOLELLI, G.; CANNILLO, V.; LUSVARGHI, L.; RICCÒ, S. Mechanical and tribological properties of electrolytic hard chrome and HVOF-sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 200, n. 9, p. 2995-3009, 2006.

BONGIORNO, A. Advances in electrochemical impedance spectroscopy for corrosion protection evaluation of organic coatings. *Materials and Corrosion*, v. 75, n. 5, p. 735–748, 2024.

BOUTOUMIT, A.; EL HADI, M. A.; EL AATMANI, M.; BOUYANZER, A.; HAMMOUTI, B.; RADI, S. Electrochemical, structural and thermodynamic investigation of a green corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid medium. *Coatings*, v. 14, n. 7, p. 783, 2024.

BUCHHEIT, R. G. Corrosion resistant coatings and paints. In: *Handbook of environmental degradation of materials*. [s.l.]: William Andrew Publishing, 2005. p. 367–385.

CASTANO, J. G.; DE LA FUENTE, D.; MORCILLO, M. A laboratory study of the effect of NO₂ on the atmospheric corrosion of zinc. *Atmospheric Environment*, v. 41, p. 8681–8696, 2007.

CNN BRASIL. Brasil exporta 31 mil toneladas de biscoitos no 1º semestre, diz associação. 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/brasil-exporta-31-mil-toneladas-de-biscoitos-no-1o-semester-diz-associacao/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

CORVO, F.; MINOTAS, J.; DELGADO, J.; ARROYAVE, C. Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime. *Corrosion Science*, v. 47, p. 883–892, 2005.

CRISTOFORETTI, A.; ROSSI, S.; DEFLORIAN, F.; FEDEL, M. On the limits of the EIS low-frequency impedance modulus as a tool to describe the protection properties of organic coatings exposed to accelerated aging tests. *Coatings*, v. 13, n. 3, p. 598, 2023.

DUARTE, H. A. Ferro: um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. *Química Nova*, v. 42, n. 10, p. 1146–1153, 2019.

DWIVEDI, D.; LEPKOVÁ, K.; BECKER, T. Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. *RSC Advances*, v. 7, n. 8, p. 4580–4610, 2017.

ENCINAS-SÁNCHEZ, V.; MACÍAS-GARCÍA, A.; DE MIGUEL, M. T.; PÉREZ, F. J.; RODRÍGUEZ-REGO, J. M. Electrochemical impedance analysis for corrosion rate monitoring of sol-gel coatings exposed to molten nitrate salts. *Materials*, v. 16, n. 2, p. 546, 2023.

ESMAILY, M.; SVENSSON, J. E.; FAJARDO, S.; BIRBILIS, N.; FRANKEL, G. S.; VIRTANEN, S.; ARRABAL, R.; THOMAS, S.; JOHANSSON, L. G. Influence of temperature on the atmospheric corrosion of the Mg-Al alloy AM50. *Corrosion Science*, v. 90, p. 420–433, 2015.

FARAYIBI, P. K.; BLÜM, M.; WEBER, S. Densification of a high chromium cold work tool steel powder in different atmospheres by SLPS. *Materials Science & Engineering A*, v. 777, p. 139053, 2020.

FAWZY, A.; FARAG, A. A.; ABD EL-MAKSoud, S.; MOURAD, A. H. I. Experimental and computational exploration of chitin, pectin, and amylopectin as carbohydrate polymers for corrosion inhibition of mild steel in HCl solution. *Polymers*, v. 15, n. 4, p. 891, 2023.

FEDRIZZI, L.; ROSSI, S.; BELLEI, F.; DEFLORIAN, F. Wear-corrosion mechanism of hard chromium coatings. *Wear*, v. 253, n. 11–12, p. 1173–1181, 2002.

GANESAN, M.; VENKATESH, K.; KANNAN, K. Effect of pulse current on the microstructure and corrosion resistance of electrodeposited chromium coatings. *Surface Engineering*, v. 37, n. 5, p. 449–462, 2021.

- GAO, M.; LI, Y.; ZHANG, X.; WANG, J.; CHEN, Z. Effect of chloride and bicarbonate ions on corrosion behavior of carbon steel in anaerobic environment. *Engineering Failure Analysis*, v. 154, p. 107586, 2023.
- GARCIA, J. C.; BURLEIGH, T. D. The beginnings of gold electroplating. *Electrochemical Society Interface*, v. 22, n. 2, p. 36, 2013.
- GARLET, V.; CEZAR, F. V.; BARROS, T. A. B. C.; ÁVILA, L. V. Objetivos de desenvolvimento sustentável: uma análise das principais características das publicações. *RISUS*, v. 13, n. 1, p. 14–26, 2022.
- GENTIL, V.; LADIMIR, J. C. *Corrosão*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.
- GUENBOUR, A.; BENBACHIR, A.; KACEMI, A.; EL HACHIMI, M. Study of corrosion–erosion behaviour of stainless alloys in industrial phosphoric acid medium. *Applied Surface Science*, v. 253, n. 5, p. 2362–2366, 2006.
- GUO, Q.; LI, Y.; ZHANG, H.; WANG, J.; LIU, X. Corrosion evolution and mechanical property deterioration of Q355NH weathering steel under marine atmospheric environment. *Construction and Building Materials*, v. 411, p. 134193, 2024.
- HAAS BRASIL. *Manual de utilização do equipamento*. Curitiba: Haas Brasil, 2007.
- HERTING, G.; WALLINDER, I. O.; LEYGRAF, C. Corrosion-induced release of chromium and iron from ferritic stainless steel. *Journal of Food Engineering*, v. 87, n. 2, p. 291–300, 2008.
- HOU, X.; GAO, L.; CUI, Z.; YIN, J. Corrosion and protection of metal in the seawater desalination. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 108, p. 022037, 2018.
- JAMBO, H. C. M.; FÓFANO, S. *Corrosão: fundamentos, monitoração e controle*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.
- JARQUÍN PASCUA, M.; LÓPEZ HERNÁNDEZ, M.; GUILLÉN CASTILLO, W.; LACAYO ROMERO, M. Remoción de Cromo, Hierro y Manganeseo de aguas contaminadas utilizando criogeles como adsorbente. *Revista Torreón Universitario*, v. 10, n. 27, p. 130–139, 2021.
- JELLESEN, M. S.; RASMUSSEN, A. A.; HILBERT, L. R. A review of metal release in the food industry. *Materials and Corrosion*, v. 57, n. 5, p. 387–393, 2006.
- JIANG, H.; DUAN, W.; LI, C.; YANG, Y.; ZHANG, M.; LIU, Y. Real-time analysis of the stability of oil-in-water Pickering emulsion. *Molecules*, v. 25, n. 12, p. 2904, 2020.
- JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, J. E.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, J. G.; NERI-FLORES, M. A.; DOMÍNGUEZ-PATÍÑO, G.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, M. A. Assessment of cocoa bean shell as corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, v. 56, n. 7, p. 627–638, 2021.

JULVE, E. Overview of industrial chrome plating. *Annals of the Royal Spanish Society of Chemistry*, v. 97, n. 1, p. 19–27, 2001.

LAZANAS, A. C.; PRODROMIDIS, M. I. Electrochemical impedance spectroscopy: a tutorial. *ACS Measurement Science Au*, v. 3, n. 3, p. 162-193, 2023.

LESKO, J. *Design industrial: guia de materiais e fabricação*. São Paulo: Blucher, 2012.

LI, Shenghui; HU, Suhang; WANG, Fangnian; ZHANG, Fan; HU, Wei; ZHAO, Xuhui; TANG, Yuming; ZUO, Yu. Study on correlation between the protection performance of coatings and phase angles. *Electrochimica Acta*, v. 480, p. 143887, 2024.

LI, X.; WANG, Y.; ZHANG, H. Effect of chromium on corrosion resistance of iron-based alloys in chloride-containing environments. *Corrosion Science*, v. 208, p. 110640, 2023.

LIU, S.; ZHANG, Y.; LI, J.; WANG, F.; YAN, C. Effect of glucose concentration on electrochemical corrosion behavior of pure titanium TA2 in Hanks' simulated body fluid. *Materials*, v. 9, n. 11, p. 874, 2016.

LOTO, R. T.; OLADIPUPO, S.; FOLARIN, T.; OKOSUN, E. Impact of chloride concentrations on the electrochemical performance and corrosion resistance of austenitic and ferritic stainless steels in acidic chloride media. *Discover Applied Sciences*, v. 7, 2025.

LU, F.; SONG, B.; HE, P.; WANG, Z.; WANG, J. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) study on the degradation of acrylic polyurethane coatings. *RSC Advances*, v. 7, n. 23, p. 13742-13748, 2017.

MANLEY, D. *Manley's technology of biscuits, crackers and cookies*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.

MEHTANI, H. K.; KHAN, M. I.; JAYA, B. N.; PARIDA, S.; PRASAD, M. J. N. V.; SAMADJAR, I. The oxidation behavior of iron-chromium alloys: the defining role of substrate chemistry on kinetics, microstructure and mechanical properties of the oxide scale. *Oxidation of Metals*, v. 96, p. 413–443, 2021.

MERLO, A.; LÉONARD, G. Magnetron sputtering vs. electrodeposition. *Materials*, v. 14, n. 14, p. 3823, 2021.

MISHRA, S.; BALASUBRAMANIAM, R. Role of microcracks in corrosion behavior of hard chromium coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 29, n. 6, p. 3804–3812, 2020.

MORETTO, E.; FETT, R. *Processamento e análise de biscoitos*. São Paulo: Varela, 1999.

OBOT, I. B.; OBI-EGBEDI, N. O.; UMOREN, S. A. Theobromine as an eco-friendly inhibitor for corrosion of mild steel in hydrochloric acid: electrochemical and theoretical investigation. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 5, n. 7, p. 994-1007, 2010.

OUARGA, A.; ZIRARI, T.; FASHU, S.; LAHCINI, M.; BEN YUCEF, H.; TRABADELO, V. Corrosion of iron and nickel based alloys in sulphuric acid: challenges and prevention strategies. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 22, p. 348–362, 2023.

PAWLICKA, A.; FRESQUI, E. F.; TRSIC, M. *Curso de química para engenharia*: v. 2. Barueri: Manole, 2013.

PFEIFFER, W.; KOPLIN, C.; REISACHER, E.; WENZEL, J. Residual stresses and strength of hard chromium coatings. *Materials Science Forum*, v. 681, p. 133-138, 2011.

POLO FILMS. O mercado de biscoitos em 2024. 2024. Disponível em: <https://polofilms.com.br/blog/o-mercado-de-biscoitos-em-2024-uma-mordida-no-futuro-crocante/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

PUBCHEM. Amylopectin. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/439207>. Acesso em: 20 abr. 2025. (B)

PUBCHEM. Glucose. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5793>. Acesso em: 25 mar. 2025. (C)

PUBCHEM. Glyceryl trioleate. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5497163>. Acesso em: 25 mar. 2025. (D)

PUBCHEM. Phosphatidylcholine. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/644148>. Acesso em: 25 mar. 2025. (E)

PUBCHEM. Phosphoric acid. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1004>. Acesso em: 18 abr. 2025. (F)

PUBCHEM. Sodium bicarbonate. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/516892>. Acesso em: 18 abr. 2025. (G)

PUBCHEM. Sodium chloride. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5234>. Acesso em: 18 abr. 2025. (A)

PUBCHEM. Theobromine. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5429>. Acesso em: 25 mar. 2025. (H)

QIAN, Xiyang; JIN, Kunpeng; LU, Shenjie; LV, Longjin. Research on salt spray test of power facilities based on standardized laboratory construction. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 782, n. 3, p. 032013, 2020

RAHIMI, E.; NIJDAM, T.; JAHAGIRDAR, A.; BROITMAN, E.; MOL, A. Advanced nodular thin dense chromium coating: superior corrosion resistance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 17, n. 5, p. 8588-8600, 2025.

RESENDE, Cristiane; DINIZ, Adriano Fernando; MARTELLI, Patrícia Benedini; BUENO, Alysson Helton Santos. Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão para concretos em ambientes contaminados com CO₂ e íons cloretos. *Revista Virtual de Química*, v. 9, n. 2, p. 699–716, 2017.

REVISTA FATOR BRASIL. 31 mil toneladas de biscoitos brasileiros são exportadas no 1S24, diz ABIMAPI. 2024. Disponível em: <https://www.revistafatorbrasil.com.br/2024/07/23/31-mil-toneladas-de-biscoitos-brasileiros-sao-exportadas-no-1s24-diz-abimapi/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

ROTTA, L.; CHEN, X.; FRANKEL, G. S. Phosphate ion effects on passivity breakdown and corrosion of steel in acidic media. *Electrochimica Acta*, v. 446, p. 142190, 2023.

SANGEETHA, M.; RAJENDRAN, S.; SRINIVASAN, S. Green corrosion inhibitors: an overview. *Zaštita Materijala*, v. 53, n. 1, p. 3–19, 2012.

SANTAMARIA, M.; TRANCHIDA, G.; DI FRANCO, F. Corrosion resistance of passive films on different stainless steel grades. *Corrosion Science*, v. 173, p. 108778, 2020.

SHERIDAN, R. J.; WATSON, S.; TURNER, A. Understanding particle-induced degradation of protective coatings. *Progress in Organic Coatings*, v. 130, p. 104–114, 2019.

SHI, Y.; LEE, C.; TAN, X. Y.; YANG, L.; XU, J.; YAN, Q. Atomic-level metal electrodeposition: synthetic strategies, applications, and catalytic mechanism in electrochemical energy conversion. *Small Structures*, v. 3, n. 3, p. 2100185, 2022.

SHWETHA, K. M.; PRAVEEN, B. M.; DEVENDRA, B. K. A review on corrosion inhibitors: types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment. *Results in Surfaces and Interfaces*, v. 16, p. 100258, 2024.

SOMOR. Setor de biscoitos, massas e pães cresce 4% no Brasil em 2025. 2025. Disponível em: <https://somor.com.br/noticias/setor-de-biscoitos-massas-e-paes-cresce-4-no-brasil-em-2025/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

SUN, J.; LIU, W.; ZHANG, Y.; YAN, C.; WANG, F. Effect of chromium on corrosion behavior of P110 steels under carbon dioxide environment. *Materials*, v. 9, n. 3, p. 200, 2016.

SYREK-GERSTENKORN, Berenika; PAUL, Shiladitya; DAVENPORT, Alison J. Sacrificial thermally sprayed aluminium coatings for marine environments: a review. *Coatings*, Basel, v. 10, n. 3, art. 267, 2020.

TREJO, J.; CHÁVEZ, J.; CORTÉS, F.; CAMPILLO, B.; HERNÁNDEZ, L. Comparative study of coatings with cobalt-chromium-tungsten alloy deposited by thermal spray processes. *Mechanics of Materials*, v. 152, p. 103637, 2021.

UMOREN, S. A.; OGBEIDE, O. O.; OGBECHIE, A. O. Inhibition of mild steel corrosion in acidic medium using starch derivatives. *Corrosion Science*, v. 52, n. 9, p. 2762–2770, 2010.

WANG, F.; LI, X.; ZHANG, J.; LIU, Y.; WU, Z. Structure and corrosion properties of chromium coating fabricated by brush plating. *Applied Surface Science*, v. 423, p. 695–703, 2017.

- WANG, L.; ZHOU, X.; LI, J. Corrosion behavior of alloyed cast irons in aggressive environments: role of alloying elements. *Surface and Coatings Technology*, v. 426, p. 127789, 2021.
- WANG, S.; MA, C.; WALSH, F. C. Alternative tribological coatings to electrodeposited hard chromium: a critical review. *Transactions of the IMF*, v. 98, n. 4, p. 173–185, 2020.
- WANG, S.; LI, Y.; ZHANG, H.; CHEN, X.; LIU, J. Effect of corrosion product on corrosion behavior of PEO coating in NaCl solution. *Corrosion Science*, v. 242, p. 112488, 2025.
- WANG, X.; ZHANG, D.; LI, T.; ZHAO, Y. Corrosion resistance in sodium chloride solution of Ni-Co-P coatings. *Physics Procedia*, v. 50, p. 191-198, 2013.
- WANG, X. M.; LI, X. G.; TIAN, X. L. Influence of temperature and humidity on atmospheric corrosion of zinc. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 10, p. 8361–8373, 2015.
- WOLYNEC, S. *Técnicas eletroquímicas em corrosão*. 3. ed. São Paulo: EDUSP, 2003.
- WU, M.; XU, B.; LIU, Y.; ZHANG, H.; WANG, J. Study on wear and corrosion resistance of HVOF coatings. *Coatings*, v. 11, n. 12, p. 1457, 2021.
- XUE, H.-B.; HAN, E.-H.; DONG, J.-H. Effect of chloride ions on corrosion behavior of carbon steel. *Corrosion Science*, v. 152, p. 1–10, 2019.
- YETRI, Y.; HUSIN, H.; SARI, M.; ISMAIL, N.; NURHAFIDAH, T. A corrosion inhibition through the adsorption of cacao (*Theobroma cacao*) peels extract on steel surfaces: experimental and DFT results. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 16, n. 5, p. 104705, 2023.
- YLI-PENTTI, A. Films and coatings: technology and recent development. In: COMPREHENSIVE MATERIALS PROCESSING. [S. l.]: Elsevier, v. 4, 2014.
- ZANGARI, G. Fundamentals of electrodeposition. In: SCHLESINGER, M.; PAUNOVIC, M. *Modern electroplating*. 5. ed. New Jersey: Wiley, 2018. p. 1–43.
- ZHANG, Y.; LIU, Q.; CHEN, J. Influence of molybdenum addition on corrosion behavior of ferrous alloys: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 19, p. 3054–3065, 2022.
- ZHU, W.; LI, X.; LIU, X.; BAI, L.; WANG, X.; LI, A.; HAN, Y.; WEI, C.; DONG, J.; GUO, Z.; LIU, J.; NAN, D. Enhancing the corrosion resistance of waterborne epoxy coatings with functionalized biochar. *RSC Advances*, v. 14, p. 39747-39758, 2024.

Neste trabalho foram utilizadas as ferramentas de inteligência artificial ChatGPT e Google Gemini como apoio na reescrita de trechos do texto para tornar a escrita mais clara e fluida. Cabe ressaltar que a geração de textos técnico-científicos não foi realizada por meio dessas ferramentas, sendo todo o embasamento teórico, por intermédio de análise dos resultados e interpretações de responsabilidade exclusiva da autora.