



INSTITUTO FEDERAL
Piauí



PPGEM

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
MATERIAIS E PROCESSOS INDUSTRIAIS

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS E
PROCESSOS INDUSTRIAIS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

RODRIGGO CRUZ ALVES MESQUITA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DO LÍQUIDO DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU
COMO INIBIDOR VERDE DE CORROSÃO EM AÇO BAIXO CARBONO**

TERESINA

2025

RODRIGGO CRUZ ALVES MESQUITA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DO LÍQUIDO DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU
COMO INIBIDOR VERDE DE CORROSÃO EM AÇO BAIXO CARBONO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos Industriais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais e Processos Industriais.
Área de concentração: Engenharia de Materiais e Processos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Haroldo Reis Alves de Macedo

**TERESINA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Mesquita, Rodriggo Cruz Alves

M578e Estudo da eficiência do líquido da casca da castanha de caju como inibidor verde de corrosão em aço baixo carbono / Rodriggo Cruz Alves Mesquita. - 2025.

66 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Haroldo Reis Alves de Macedo.

1. Aço carbono. 2. Corrosão. 3. Inibidor verde. 4. LCC. I.Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

RODRIGGO CRUZ ALVES MESQUITA

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DO LÍQUIDO DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU
COMO INIBIDOR VERDE DE CORROSÃO EM AÇO BAIXO CARBONO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos Industriais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais e Processos Industriais.

Aprovada em: 30/10/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Haroldo Reis Alves de Macedo (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. José Ribeiro dos Santos Júnior
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Dedico este trabalho a Deus, a Nossa Senhora,
à minha esposa, aos meus pais, amigos e
mestres.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores e servidores do IFPI, do Campus Teresina Central, pois todos contribuíram, direta ou indiretamente, para o alcance deste resultado, em especial o meu orientador, Prof. Dr. Haroldo Reis, que dispôs de seu tempo e de sua sabedoria para me auxiliar neste processo, e à FAPEPI, pelo incentivo e pela colaboração.

Agradeço também à minha família, que deu todo o apoio necessário para que eu tivesse a oportunidade de chegar até aqui; à minha esposa, Ana Clara Moraes, que foi meu alicerce e meu apoio ao longo do tempo. A Ele, meu Deus, entrego todo o meu coração e a minha gratidão, pois me deu força e resiliência e, por intercessão de Nossa Senhora, permitiu-me viver os meus sonhos.

Educar é mais que ensinar: é tocar o outro com a beleza do saber.

Cineas Santos

RESUMO

A corrosão de metais impõe perdas econômicas relevantes, com estimativas clássicas entre 3% e 4% do PIB de diversos países, e pressiona a adoção de soluções sustentáveis. Este trabalho avaliou a viabilidade do Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC) como alternativa “verde” para proteção anticorrosiva aplicada ao aço ASTM A36. O estudo comparou cinco condicionamentos de superfície: L (base anticorrosiva formulada com LCC), C (tinta comercial), Z (tinta rica em zinco), G (galvanização) e S (sem proteção), imersos em solução salina (NaCl 0,6 mol/L) por 24, 72 e 168 h. A avaliação envolveu inspeção visual e técnicas complementares (microscopia óptica/ImageJ, dureza por lápis, rugosidade, UV-Vis e FRX). O sistema G apresentou desempenho inicial robusto até 72 h, seguido de degradação acentuada em 168 h. A base L manteve integridade moderada no curto prazo e atuou predominantemente como revestimento de efeito barreira, reduzindo o contato entre o substrato metálico e o eletrólito. As curvas de UV-Vis indicaram aumento de absorbância com o tempo para L, C, Z e, sobretudo, S, o que confirmou a intensificação da lixiviação e a formação de produtos de corrosão, mais pronunciadas na ausência de proteção. O estudo concluiu que o LCC, na formulação investigada, apresentou potencial técnico como componente de sistemas anticorrosivos por barreira física, especialmente para exposições de curta a média duração, ao aliar apelo ambiental a desempenho superior ao da tinta comercial avaliada. O trabalho recomendou a otimização da formulação e da espessura do filme, bem como a ampliação de ensaios eletroquímicos, para consolidar a aplicação em escala industrial.

Palavras-chave: aço carbono; corrosão; inibidor verde; LCC; sustentabilidade.

ABSTRACT

Metal corrosion imposes significant economic losses, with classic estimates ranging between 3% and 4% of the GDP of various countries, and puts pressure on the adoption of sustainable solutions. This study evaluated the viability of Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) as a “green” alternative for corrosion protection applied to ASTM A36 steel. The study compared five surface conditions: L (anti-corrosion base formulated with CNSL), C (commercial paint), Z (zinc-rich paint), G (galvanizing), and S (no protection), immersed in saline solution (0.6 mol/L NaCl) for 24, 72, and 168 h. The evaluation involved visual inspection and complementary techniques (optical microscopy/ImageJ, pencil hardness, roughness, UV-Vis, and XRF). System G showed robust initial performance up to 72 h, followed by significant degradation after 168 h. The L base maintained moderate integrity in the short term and acted predominantly as a barrier coating, reducing contact between the metallic substrate and the electrolyte. The UV-Vis curves showed an increase in absorbance over time for L, C, Z, and especially S, confirming the intensification of leaching and the formation of corrosion products, more pronounced in the absence of protection. The study concluded that CNSL, in the formulation investigated, showed technical potential as a component of physical barrier anti-corrosion systems, especially for short to medium-term exposures, by combining environmental appeal with superior performance compared to the commercial paint evaluated. The study recommended optimizing the formulation and film thickness, and expanding electrochemical testing, to consolidate its industrial-scale application.

Keywords: carbon steel; corrosion; green inhibitor; CNSL; sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Amostra L: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo.....	41
Figura 2	- Amostra C: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo.....	42
Figura 3	- Amostra Z: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo.....	43
Figura 4	- Amostra G: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo.....	44
Figura 5	- Amostra S: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo.....	45
Figura 6	- Amostra L da peça nº 7×100: ampliação (1), tratamento de imagem (2) e contagem (3).....	46
Figura 7	- Amostra C da peça nº 9×100: ampliação (1), tratamento de imagem (2) e contagem (3).....	49
Figura 8	- Variação do parâmetro R_a em função do tempo de exposição em solução salina.....	50
Figura 9	- Variação do parâmetro R_t em função do tempo de exposição em solução salina.....	50
Figura 10	- Espectros UV-Vis das soluções de imersão após 24 h de exposição das amostras L, C, Z, G e S.....	52
Figura 11	- Espectros UV-Vis das soluções de imersão após 72 h de exposição das amostras L, C, Z, G e S.....	53
Figura 12	- Espectros UV-Vis das soluções de imersão após 168 h de exposição das amostras L, C, Z, G e S.....	54
Figura 13	- Variação da espessura em função do tempo (24 h, 72 h e 168 h) das amostras L, C e Z.....	57
Figura 14	- Certificado do aço ASTM A36.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Patentes identificadas sobre inibidores verdes de corrosão.....	29
Tabela 2 – Classificação dos grupos de amostras conforme o tipo de tratamento superficial.....	37
Tabela 3 – Comparação das áreas e da distribuição de inclusões em filmes de revestimento.....	47
Tabela 4 – Dureza de ruptura.....	49
Tabela 5 – Teores médios de óxidos (%) nas tintas L, C e Z.....	55
Tabela 6 – Taxa de corrosão por intervalo de tempo nas amostras L, C e Z ($\mu\text{m/h}$).....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A36	Aço ASTM A36
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Amostra A	Superfície tratada com base + LCC
Amostra B	Superfície tratada com tinta comercial
Amostra C	Superfície tratada com tinta rica em zinco
Amostra G	Superfície tratada com galvanização
Amostra S	Superfície sem tratamento
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DP	Desvio Padrão
EDXRF	Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva
FRX	Fluorescência de Raios X
HB	Dureza Brinell (<i>Brinell Hardness</i>)
HV	Dureza Vickers (<i>Vickers Hardness</i>)
LCC	Líquido da Casca da Castanha de Caju
MO	Microscopia Óptica
PVA	Polímero Vinílico (polímero sintético)
R_a	Rugosidade média aritmética
R_t	Altura total do perfil (rugosidade)
UV	Ultravioleta
UV-Vis	Ultravioleta e Visível

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
±	Mais ou menos
>	Maior que
°C	Graus Celsius
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
C%	Carbono (%)
CaO	Óxido de Cálcio
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
Cu%	Cobre (%)
Fe%	Ferro (%)
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
g/mol	Gramas por mol
kgf	Quilograma-força
K ₂ O	Óxido de Potássio
mL	Mililitros
mm	Milímetro
Mn%	Manganês (%)
MnO	Óxido de Manganês
NaCl	Cloreto de Sódio
nm	Nanômetro

n°	Número
P%	Fósforo (%)
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
S%	Enxofre (%)
Si%	Silício (%)
SiO ₂	Dióxido de Silício
SO ₃	Trióxido de Enxofre
TiO ₂	Dióxido de Titânio
ZnO	Óxido de Zinco
µm ²	Micrômetro quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	AÇO E SUAS LIGAS.....	19
3.2	CORROSÃO E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO.....	20
3.3	CORROSÃO ATMOSFÉRICA E CLASSIFICAÇÕES AMBIENTAIS....	22
3.4	INIBIDORES DE CORROSÃO.....	23
3.5	INIBIDORES VERDES E PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA.....	26
3.6	RESUMO DO PROCESSO DE PROSPECÇÃO DE PATENTES.....	28
3.7	ESPÉCIE ARBÓREA <i>ANACARDIUM OCCIDENTALE</i>	30
3.8	LÍQUIDO DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU (LCC).....	31
3.9	REVESTIMENTOS E AMBIENTES CORROSIVOS CONTROLADOS.....	33
3.10	ENSAIOS DE DUREZA POR LÁPIS E INTEGRIDADE DO FILME.....	34
4	METODOLOGIA.....	35
4.1	BASE POLIMÉRICA.....	35
4.2	EXTRAÇÃO DO LCC.....	35
4.3	AMOSTRAS METÁLICAS.....	36
4.4	SOLUÇÃO CORROSIVA.....	38
4.5	FORMULAÇÃO DA BASE ANTICORROSIVA.....	38

4.6	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX).....	38
4.7	ANÁLISE SUPERFICIAL E INSPEÇÃO VISUAL.....	39
4.8	ENSAIO DE DUREZA LÁPIS.....	39
4.9	RUGOSIDADE.....	39
4.10	ESPECTROSCOPIA UV-Vis.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1	INSPEÇÃO VISUAL.....	40
5.2	CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL POR MO.....	46
5.3	ENSAIO DE DUREZA LÁPIS.....	48
5.4	RUGOSIDADE.....	49
5.5	ESPECTROSCOPIA UV-Vis.....	52
5.6	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX).....	55
5.7	VELOCIDADE DE CORROSÃO.....	56
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61
	APÊNDICE.....	66

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um processo natural e gradual que promove a deterioração de materiais metálicos em função da interação com o ambiente. Embora seja frequentemente associada à oxidação, outros mecanismos também podem contribuir para esse fenômeno, que se destaca como um dos maiores desafios da engenharia devido às expressivas perdas anuais em escala global. Estima-se que os custos com corrosão correspondam a 3% a 4% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial, o que representa valores superiores a 2,5 trilhões de dólares por ano, segundo estudos da NACE International (2016). Essas perdas afetam principalmente os setores de infraestrutura, transporte, energia e indústria de base, gerando prejuízos com manutenção, substituição de componentes e paralisações produtivas (Yamaguchi et al., 2014).

Tradicionalmente, técnicas como cromatização e fosfatização têm sido aplicadas com o intuito de prolongar a vida útil dos materiais. No entanto, apesar de sua eficiência, essas estratégias apresentam desvantagens relevantes: a cromatização envolve o uso de sais de cromo hexavalente, de alta toxicidade e com impactos ambientais significativos; já a fosfatização gera um alto volume de resíduos e riscos à saúde humana (Pereira Neto et al., 2008; Zand et al., 2014).

Além dessas limitações, a própria galvanização por imersão a quente pode induzir alterações nas propriedades mecânicas dos metais, uma vez que a elevação da temperatura durante o processo interfere na resistência mecânica (Byrne et al., 2021). Nesse contexto, torna-se urgente a busca por soluções inovadoras que conciliem desempenho anticorrosivo e sustentabilidade. Pesquisas recentes têm enfatizado tecnologias capazes de reduzir impactos ambientais e riscos à saúde, destacando o papel de inibidores de corrosão obtidos de fontes naturais, conhecidos como inibidores “verdes” (Komalasari et al., 2018; Verma et al., 2018).

Esses compostos atuam por meio de mecanismos de fisissorção e quimissorção, formando uma película protetora na superfície metálica que dificulta a progressão do ataque corrosivo (Miralrio et al., 2020). Entre as alternativas em estudo, o Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC) desponta como um candidato promissor. Extraído como coproduto do processamento do cajueiro, o LCC apresenta composição rica em compostos fenólicos, como ácido anacárdico, cardol, 2-metilcardol e cardanol, moléculas com reconhecido potencial de interação química,

o que pode favorecer a formação de camadas protetoras contra a corrosão (Lomonaco et al., 2009; Mazzetto et al., 2009).

Explorar o uso de um resíduo de baixo valor agregado não apenas contribui para a valorização de recursos renováveis, como também reforça práticas alinhadas à sustentabilidade e à economia circular. Diante desse cenário, a problemática que orienta esta pesquisa consiste em verificar a capacidade do LCC de atuar como inibidor de corrosão sustentável, avaliando se apresenta desempenho comparável ou superior ao das técnicas convencionais, ao mesmo tempo em que contribui para a minimização de impactos ambientais e riscos à saúde.

Para responder a essa questão, este estudo tem como objetivo geral investigar a viabilidade do LCC como inibidor de corrosão “verde”, com vistas a contribuir para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis na proteção de superfícies metálicas. De forma específica, pretende-se: avaliar sua eficácia na formação de películas protetoras em meios corrosivos; caracterizar as propriedades químicas do LCC e sua relação com a atividade inibidora; e comparar seu desempenho com métodos tradicionais, como tintas comerciais, tintas ricas em zinco e fosfatização, considerando não apenas a eficiência, mas também os aspectos ambientais e de saúde associados.

A hipótese que norteia esta investigação é que o LCC, em função de seus compostos ativos, é capaz de formar uma barreira protetora eficiente sobre superfícies metálicas, reduzindo a corrosão de maneira sustentável e competitiva em relação às técnicas convencionais. Assim, espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para ampliar o estado da arte sobre inibidores “verdes”, ao mesmo tempo em que ofereçam uma alternativa de valor agregado a um coproduto abundante da indústria do caju. Os resultados visam não apenas demonstrar o comportamento anticorrosivo do LCC, mas também fundamentar seu potencial de aplicação industrial como alternativa sustentável aos revestimentos convencionais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a viabilidade do LCC como inibidor de corrosão “verde”, visando contribuir para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis na proteção de superfícies metálicas contra o processo corrosivo, com minimização de impactos ambientais e riscos à saúde humana.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a eficácia do LCC como inibidor de corrosão, analisando seu desempenho na formação de uma camada protetora em superfícies metálicas submetidas a condições corrosivas;
- Investigar as propriedades químicas do LCC, com ênfase nos compostos fenólicos, como ácido anacárdico, cardol, 2-metilcardol e cardanol, a fim de compreender sua influência na capacidade do líquido de atuar como inibidor de corrosão;
- Comparar o desempenho do LCC com métodos tradicionais de prevenção da corrosão, tais como cromatização e fosfatização, destacando os benefícios ambientais e à saúde proporcionados pelo uso do LCC em termos de toxicidade, geração de resíduos e impacto geral no meio ambiente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A corrosão metálica é um fenômeno de caráter eletroquímico amplamente estudado e, ainda assim, uma das principais causas de perdas econômicas e estruturais na engenharia moderna. Diversos estudos estimam que o custo anual da corrosão varia entre 3% e 4% do PIB de diversos países, o que representa trilhões de dólares em prejuízos com manutenção, reparo e substituição de equipamentos e estruturas metálicas (Fontana, 2005; Gentil, 2007; NACE, 2016). Essa perda econômica não se limita aos custos diretos: abrange interrupções operacionais, desperdício de energia e impactos ambientais associados ao descarte de materiais corroídos e à produção de novos componentes.

Além do impacto financeiro, a corrosão representa risco à segurança e à confiabilidade estrutural, afetando pontes, dutos, embarcações e instalações industriais. A magnitude desses efeitos justifica o interesse crescente em estratégias sustentáveis de mitigação, especialmente para metais de uso intensivo, como o aço carbono. Esse material, amplamente empregado em infraestrutura e construção civil, combina resistência mecânica, disponibilidade e baixo custo, mas apresenta alta suscetibilidade à degradação em ambientes agressivos (Silva; Mei, 2010; Moliterno; Brasil, 2015). Diante desse cenário, o desenvolvimento de revestimentos e inibidores de origem renovável, capazes de reduzir o impacto ambiental e prolongar a vida útil das estruturas, constitui uma necessidade técnica e científica de grande relevância na atualidade.

3.1 AÇO E SUAS LIGAS

O aço é uma liga metálica composta essencialmente por ferro (Fe) e carbono (C), podendo conter elementos como manganês (Mn), silício (Si), fósforo (P), enxofre (S) e cromo (Cr), que conferem propriedades mecânicas e químicas específicas à sua microestrutura (Moliterno; Brasil, 2015). A combinação entre resistência, ductilidade e facilidade de conformação fez do aço um dos materiais mais versáteis da engenharia moderna, presente em edifícios, pontes, viadutos, ferrovias, automóveis, navios, aeronaves e equipamentos industriais de pequeno e grande porte (Azevedo; Campos, 2007). Essa ampla aplicação decorreu não apenas de suas propriedades mecânicas, mas também do baixo custo de produção e do

domínio consolidado das técnicas de fabricação ao longo das últimas décadas.

Entre as diversas classes de aço, destaca-se o ASTM A36, classificado pela ASTM International (2019) como um aço estrutural de baixo carbono, amplamente empregado em construções soldadas, plataformas *offshore* e usinas de energia (Eka Utami; Ellyanie; Nasution, 2019). O A36 apresenta boa soldabilidade, alta tenacidade e resistência mecânica satisfatória, o que o torna essencial para o desenvolvimento de estruturas metálicas em larga escala. Em razão dessas características, esse material é amplamente utilizado em edificações civis, tanques, navios e sistemas de transporte (ASTM, 2019).

Contudo, o baixo teor de elementos de liga, que confere ao A36 sua boa conformabilidade, também o torna altamente suscetível à corrosão em ambientes agressivos, como atmosferas marinhas, industriais ou ácidas (Benhiba et al., 2021). Essa vulnerabilidade impõe a necessidade de medidas protetivas, como revestimentos poliméricos, galvanização ou aplicação de inibidores de corrosão, a fim de garantir maior durabilidade e segurança estrutural.

A relevância econômica e social do aço é igualmente expressiva. Segundo a *World Steel Association*, o consumo global de aço em 2023 alcançou 1,76 bilhão de toneladas, das quais cerca de 52% foram destinadas à construção civil e à infraestrutura (World Steel Association, 2024). Esses dados reforçam o papel estratégico da indústria siderúrgica no desenvolvimento urbano e industrial contemporâneo. Entretanto, o crescimento do consumo e a exposição de estruturas a ambientes de alta umidade, salinidade e poluição atmosférica representam um desafio crescente de degradação, especialmente em países de clima tropical e extensa faixa litorânea, como o Brasil, cuja costa ultrapassa 7 mil quilômetros. Nesses contextos, a corrosão atmosférica se torna um dos principais mecanismos de deterioração, exigindo o uso sistemático de revestimentos e inibidores anticorrosivos para prolongar a vida útil das estruturas metálicas e reduzir impactos econômicos e ambientais.

3.2 CORROSÃO E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

A corrosão é um processo natural e espontâneo de deterioração de materiais metálicos, resultante de reações eletroquímicas entre o metal e o ambiente (Fontana, 2005; Gentil, 2007). Considerada como o processo inverso da metalurgia extrativa,

que transforma minérios em ligas metálicas, a corrosão reverte esse ciclo, convertendo metais em seus estados oxidados ou hidroxilados (Kobzar; Fatyeyeva, 2021). O processo envolve a formação de regiões anódicas, nas quais o metal sofre oxidação, e de regiões catódicas, nas quais ocorre a reação de redução, geralmente do oxigênio dissolvido na solução eletrolítica. A presença de eletrólitos, como sais, umidade e contaminantes químicos, acelera a dissolução do metal e a formação de produtos de corrosão.

As consequências da corrosão são amplas e abrangem falhas prematuras, riscos à segurança, paralisações de processos industriais e altos custos de manutenção e reposição de componentes (Quadros; Rodrigues; Silva, 2020). Em setores estratégicos, como a construção civil, o transporte e a indústria do petróleo, o avanço da corrosão pode comprometer a integridade de estruturas e representar ameaças ao meio ambiente (Popoola et al., 2013). Esses impactos reforçam a importância de compreender os mecanismos corrosivos e de desenvolver métodos adequados de prevenção e controle.

Diversos modos de corrosão podem ocorrer em ligas metálicas, dependendo do ambiente, do tipo de metal e da presença de agentes corrosivos. A corrosão uniforme é a forma mais comum e se distribui de maneira homogênea pela superfície, reduzindo gradualmente a espessura do material (Kayser; Nowak, 1989). Já a corrosão localizada é mais crítica, ocorrendo em pontos específicos da superfície metálica, e pode se manifestar como corrosão por pites (PIT), galvânica, em frestas ou sob tensão (Uhlig, 2011; Milella, 2012). A corrosão galvânica surge quando dois metais de potenciais distintos entram em contato elétrico na presença de um eletrólito. A corrosão em frestas ocorre em regiões confinadas, onde a difusão de oxigênio é limitada e o pH local se torna ácido. A corrosão sob tensão decorre da combinação de esforços mecânicos e de um ambiente agressivo. Já a corrosão microbiologicamente influenciada é causada por microrganismos que alteram as condições eletroquímicas locais.

Entre todas as formas, a corrosão por pites (*pitting* ou PIT) é uma das mais severas e de difícil detecção. Ela se inicia com a ruptura do filme passivo protetor e evolui para perfurações em formato de cone ou de taça, com boca estreita e profundidade crescente (Gentil, 2007). No interior do pite, ocorre acidificação local e aumento da concentração de íons cloreto, o que acelera o processo de dissolução metálica. Pites metaestáveis podem repassar; entretanto, pites estáveis crescem

de forma autocatalítica, podendo causar perfurações rápidas e falhas catastróficas em componentes estruturais. Essa característica torna a corrosão por pites um foco constante de pesquisa e de prevenção na engenharia de materiais.

O ambiente é um dos fatores mais determinantes no comportamento corrosivo. Fatores como oxigênio dissolvido, salinidade, umidade relativa, pH ácido e contaminantes atmosféricos intensificam o processo corrosivo (Ahn et al., 2013; Fayomi et al., 2018). A molhabilidade da superfície metálica também influencia a velocidade de corrosão: superfícies hidrofílicas facilitam a formação e a retenção de películas de eletrólito, enquanto superfícies mais hidrofóbicas reduzem a adsorção de soluções corrosivas (Mantel; Wightman, 1994; Drelich et al., 2011).

3.3 CORROSÃO ATMOSFÉRICA E CLASSIFICAÇÕES AMBIENTAIS

A corrosão atmosférica é uma das formas mais comuns de deterioração e ocorre na presença de uma fina película de umidade condensada sobre o metal, que atua como eletrólito (Mansfeld, 1982). Trata-se de um processo intermitente, que cessa durante períodos de secagem efetiva e reinicia quando a umidade relativa aumenta. Essa umidade pode ter origem na chuva, na neblina, no orvalho, na neve ou no vapor d'água atmosférico (Attwood, 1992; Wolyniec et al., 1992).

A intensidade da corrosão atmosférica depende de variáveis como temperatura, poluentes e umidade relativa. A ISO 9223 (2012) classifica os ambientes em seis categorias principais de corrosividade: rural, urbano, industrial, marinho, marinho-urbano e marinho-industrial, de acordo com o nível de agressividade do ambiente. A norma NBR 14643 (ABNT, 2001) complementa essa classificação, estabelecendo faixas que vão de C1 (muito baixa) a C5 (muito alta) para diferentes metais, incluindo aço carbono, alumínio, cobre e zinco.

O intemperismo natural é o método mais realista para avaliar o comportamento de revestimentos, pois submete o material, simultaneamente, a fatores agressivos como luz solar, chuva, poluentes e variações térmicas (Appleman, 1990). Entretanto, esse processo é demorado, o que motivou o desenvolvimento de ensaios acelerados em laboratório (Gardner, 1998). O ensaio de névoa salina (ASTM B117, 2019) é o método mais tradicional, pois simula condições marítimas por meio da pulverização contínua de uma solução de cloreto de sódio (NaCl a 5%) a 35 ± 2 °C. Esses ensaios permitem reproduzir, em tempo reduzido, reações típicas

da corrosão atmosférica e comparar o desempenho de diferentes revestimentos.

No contexto brasileiro, a extensa faixa litorânea e as condições de temperatura e umidade elevadas tornam o país especialmente vulnerável à corrosão atmosférica (Vianna, 1980). Segundo o IBGE (2010), cerca de 23,6% da população brasileira vive em áreas costeiras e, no Nordeste, mais da metade da população reside em regiões metropolitanas litorâneas, incluindo Fortaleza, Recife e Salvador, que estão entre as dez maiores cidades do país (PBMC, 2017). Estudos como o Brasil 2040 (SAE, 2015) alertam para o agravamento desses impactos devido à elevação do nível do mar, o que tende a intensificar a corrosividade em zonas urbanas costeiras.

A classificação ambiental tem importância prática, pois orienta o projeto e a manutenção de estruturas metálicas em função da agressividade atmosférica. Sica et al. (2007) determinaram, por meio do índice de Brooks, que a cidade de São Luís (MA) apresenta uma atmosfera classificada como agressiva, com taxa de deterioração moderada a alta (índice 4,7). De modo semelhante, Costa et al. (2025) observaram que Cubatão apresenta a maior taxa média de corrosão (0,0616 mm/ano), seguida de Praia Grande (0,0294 mm/ano) e São Paulo (0,0164 mm/ano). Esses resultados reforçam que o ambiente atmosférico exerce influência direta sobre o desempenho dos materiais metálicos e que o controle da corrosão é essencial em regiões costeiras e industriais.

3.4 INIBIDORES DE CORROSÃO

Entre as estratégias mais eficientes para reduzir a degradação de metais, destacam-se os inibidores de corrosão, definidos como substâncias ou misturas químicas que, mesmo em pequenas concentrações, são capazes de diminuir ou eliminar a taxa de corrosão de um metal exposto a um meio agressivo (Gentil, 2022). Esses compostos atuam por diferentes mecanismos: podem modificar o meio corrosivo, tornando-o menos agressivo, ou interagir diretamente com a superfície metálica, formando uma camada passiva ou uma barreira protetora que dificulta a transferência de íons e elétrons entre o metal e o eletrólito (Sastri; Ghali; Elboujdaini, 2007).

A utilização de inibidores é amplamente consolidada em setores industriais como o petroquímico, o químico, o de tratamento de águas e o de geração de

energia, nos quais a prevenção da corrosão é essencial para a segurança e a durabilidade dos equipamentos (Chauhan et al., 2022). Esses compostos podem ser classificados em sintéticos e naturais, de acordo com sua origem e composição química.

Os inibidores sintéticos, como sais de aminas, fosfatos, cromatos e nitritos, apresentam alta eficiência e ação passivante comprovada, porém estão associados a riscos ambientais e toxicológicos. O uso contínuo de compostos à base de cromo hexavalente (Cr^{6+}), por exemplo, foi gradualmente restringido devido à sua toxicidade e à bioacumulação no meio ambiente (Raja et al., 2016; Chauhan et al., 2022). A crescente preocupação ambiental e as regulamentações internacionais sobre o uso de substâncias perigosas, como as normas REACH e RoHS, impulsionaram o desenvolvimento de alternativas ecologicamente corretas.

Nesse contexto, os inibidores naturais, também conhecidos como inibidores verdes, têm ganhado destaque por sua biodegradabilidade, baixo custo, abundância e reduzido impacto ambiental (Zhao; Yang; Fan, 2011; Foauda et al., 2014). Esses inibidores são obtidos de plantas, extratos vegetais, óleos essenciais ou coprodutos agroindustriais, como cascas, sementes, folhas e resíduos de frutas, e agem por meio da adsorção de moléculas orgânicas contendo heteroátomos (O, N, S) e grupos funcionais aromáticos, que interagem com a superfície metálica e reduzem a reação corrosiva (Raja et al., 2016).

Estudos comprovam a eficácia de extratos vegetais no controle da corrosão em diferentes metais. Parthipan et al. (2018) demonstraram que o extrato de alho (*Allium sativum*) apresenta alto desempenho como inibidor natural para aço carbono em meio ácido. De forma semelhante, extratos de cravo, canela e manjerição apresentaram eficiência significativa em sistemas aquosos e salinos (Chitra et al., 2010). A presença de antioxidantes fenólicos nesses extratos contribui para neutralizar espécies reativas do meio, formando filmes protetores estáveis e retardando o processo de oxidação (Esmaily et al., 2015).

A composição química dos óleos essenciais utilizados como inibidores depende de diversos fatores, como a espécie vegetal, a idade, a parte colhida, a origem geográfica, o tipo de solo, o clima, o uso de agroquímicos e o tempo de armazenamento (Borges et al., 2019). Essa variabilidade influencia diretamente o teor de compostos ativos, como flavonoides, terpenos e fenóis, responsáveis pela adsorção e pela formação de películas protetoras sobre o metal. O estudo dessas

variáveis é essencial para padronizar a eficiência dos inibidores naturais e estabelecer condições ideais de extração e de aplicação.

Os inibidores verdes podem atuar de forma anódica, catódica ou mista. Os anódicos reduzem a taxa de dissolução do metal, enquanto os catódicos limitam a reação de redução do oxigênio. Já os mistos combinam ambos os efeitos, garantindo maior proteção global. Sua ação ocorre principalmente por fisissorção, quando a adsorção é governada por forças de Van der Waals, ou por quimissorção, quando há formação de ligações químicas entre o inibidor e a superfície metálica (Salleh et al., 2021).

Para avaliar a eficácia dos inibidores, são realizados ensaios laboratoriais e ambientais. O ensaio de exposição atmosférica é o mais representativo, pois simula o comportamento real dos materiais frente a fatores como radiação solar, chuva, variações térmicas e poluentes (Appleman, 1990). No entanto, devido à longa duração desses testes, são empregados ensaios acelerados, que reproduzem condições agressivas em menor tempo (Gardner, 1998). Dentre eles, o ensaio de névoa salina (ASTM B117) é o mais utilizado, por simular atmosferas marinhas por meio da pulverização contínua de uma solução de NaCl a 5%, sob temperatura de 35 ± 2 °C. Esses ensaios permitem comparar, de forma controlada, o desempenho de diferentes revestimentos e inibidores.

Além das condições laboratoriais, a classificação ambiental é fundamental para compreender a corrosão e a atuação dos inibidores. A NBR 14643 (ABNT, 2001) e a ISO 9223 (2012) estabelecem categorias de corrosividade atmosférica que variam de C1 (muito baixa) a C5 (muito alta). Estudos brasileiros mostram que regiões litorâneas e industrializadas, como São Luís (MA), Cubatão e Praia Grande, apresentam os maiores índices de corrosividade, com taxas médias de 0,03 a 0,06 mm/ano (Sica et al., 2007; Costa et al., 2025).

De acordo com o IBGE (2010), aproximadamente 23,6% da população brasileira vive em áreas litorâneas, o que intensifica a exposição de edificações e estruturas metálicas à umidade, a sais e a poluentes. No Nordeste, oito das nove capitais estão situadas na faixa costeira, e cidades como Fortaleza, Recife e Salvador figuram entre as dez maiores do país (PBMC, 2017). O estudo Brasil 2040 (SAE, 2015) aponta que, apenas no estado do Rio de Janeiro, áreas avaliadas em cerca de R\$ 109 bilhões poderão ser afetadas até 2040 devido à elevação do nível do mar. Esses dados reforçam a importância de desenvolver revestimentos e

inibidores anticorrosivos adaptados às condições ambientais brasileiras, especialmente para aplicações em ambientes marinhos e urbanos.

Dessa forma, os inibidores de corrosão, em especial os de origem natural, despontam como uma alternativa tecnológica promissora, alinhada às exigências contemporâneas de sustentabilidade e de desempenho ambiental. A consolidação dessa abordagem depende de estudos que integrem a caracterização química, ensaios de desempenho e análise ambiental, permitindo a prospecção e a aplicação prática de formulações ecologicamente corretas em sistemas metálicos expostos à corrosão.

3.5 INIBIDORES VERDES E PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Os inibidores de corrosão são substâncias capazes de reduzir a taxa de deterioração dos metais em ambientes agressivos, atuando na interface metal–meio corrosivo. De modo geral, podem ser classificados em inorgânicos e orgânicos. Os inorgânicos, como sais de amônio, fosfatos e nitritos, apresentam elevada eficiência, principalmente em meios ácidos, e foram amplamente utilizados durante décadas (Bacca et al., 2020). No entanto, seu emprego tem sido progressivamente limitado devido à geração de resíduos tóxicos, aos custos de descarte e aos impactos ambientais significativos, tornando-os incompatíveis com os atuais princípios de sustentabilidade industrial (Zand et al., 2014).

Com a crescente restrição ao uso de substâncias tóxicas, os inibidores orgânicos, também chamados de inibidores verdes, vêm se consolidando como uma alternativa promissora. Por serem derivados de fontes naturais e renováveis, como extratos vegetais, óleos essenciais e coprodutos agroindustriais, apresentam biodegradabilidade, baixo custo e reduzido impacto ambiental (Verma et al., 2018; Salleh et al., 2021). Esses compostos são ricos em moléculas orgânicas contendo grupos funcionais e heteroátomos, como oxigênio, nitrogênio, enxofre e fósforo, os quais atuam como centros ativos de adsorção, bloqueando as reações de oxidação e redução responsáveis pela corrosão (Dhaybia et al., 2017; Chaouiki et al., 2018).

O mecanismo de atuação dos inibidores verdes baseia-se na adsorção das moléculas sobre a superfície metálica, formando um filme protetor que impede o contato direto entre o substrato e o eletrólito. Inicialmente, ocorre a fisorção, um processo físico de aderência controlado por forças de Van der Waals.

Posteriormente, estabelece-se a quimissorção, caracterizada pela formação de ligações químicas entre os orbitais do metal e os pares de elétrons das moléculas do inibidor (Raja et al., 2016; Singh et al., 2019; Miralrio et al., 2020). Essa barreira adsorvida reduz a transferência de íons, dificulta a difusão de espécies agressivas e retarda as reações anódicas e catódicas que promovem a corrosão.

Estudos recentes comprovam a eficiência desses compostos em diferentes sistemas metálicos. Joseph, Fayomi e Adenigba (2017) observaram eficiência de aproximadamente 90% no uso do extrato de *Lecaniodiscus cupanioides* para a proteção do aço em meio ácido. Singh, Gupta e Gupta (2019) relataram que o extrato da casca de lichia (*Litchi chinensis*) alcançou eficiência de 97,4% em solução de H₂SO₄. Varvara et al. (2020) verificaram proteção superior a 94% em ligas de bronze expostas à chuva ácida com extrato da castanha-da-índia, enquanto Deyab, Mohsen e Guo (2022) obtiveram até 96% de eficiência com o uso de sementes da mesma planta em ligas de cobre. Tais resultados demonstram que os inibidores verdes não apenas substituem os sintéticos, mas, em alguns casos, apresentam desempenho equivalente ou superior.

A composição química dos extratos vegetais influencia diretamente o desempenho anticorrosivo. Compostos fenólicos, terpenos e alcaloides presentes nesses materiais favorecem a adsorção e a formação de filmes protetores estáveis sobre o metal (Salleh et al., 2021). Borges et al. (2019) destacaram que fatores como a espécie vegetal, a idade, a parte colhida, a origem geográfica, as condições de cultivo e o tempo de armazenamento alteram a proporção dos compostos ativos, o que exige a padronização dos processos de extração e a caracterização química para garantir reprodutibilidade e eficiência industrial.

O uso de resíduos agroindustriais como fonte de inibidores tem relevância ambiental e econômica, pois transforma rejeitos em produtos de alto valor agregado. Substâncias como extratos de tabaco, casca de banana, hena, óleo de palma e outros resíduos vegetais já demonstraram significativa capacidade de reduzir a corrosão em aço carbono e ligas metálicas (El-Hosary et al., 1972; Komalasari et al., 2018; Najem et al., 2022). Esse enfoque sustentável contribui para a economia circular, reduz o impacto ambiental e fomenta a inovação na engenharia de superfícies.

A prospecção tecnológica surge como etapa essencial no desenvolvimento de novos inibidores, pois permite identificar compostos promissores, rotas de obtenção,

aplicações potenciais e lacunas tecnológicas. Santos et al. (2021) ressaltaram que a prospecção científica e tecnológica de materiais anticorrosivos representa um pilar fundamental do desenvolvimento sustentável, uma vez que orienta investimentos em pesquisa e inovação para substituir produtos tóxicos por alternativas ecológicas. No contexto do LCC, essa abordagem assume papel estratégico, pois o composto se enquadra como um coproduto agroindustrial abundante e renovável, capaz de gerar impacto positivo na cadeia produtiva do caju e fortalecer o aproveitamento integral de resíduos vegetais no Nordeste brasileiro.

Os inibidores verdes, portanto, representam uma alternativa tecnicamente eficiente e ambientalmente segura para a proteção de metais, alinhando-se aos objetivos globais de sustentabilidade e à valorização de biomateriais de origem natural. A combinação entre eficiência anticorrosiva, disponibilidade de matérias-primas renováveis e potencial de inovação tecnológica torna essa classe de compostos um campo fértil para pesquisa aplicada e desenvolvimento industrial, especialmente em países com forte vocação agrícola, como o Brasil.

3.6 RESUMO DO PROCESSO DE PROSPECÇÃO DE PATENTES

A pesquisa foi conduzida entre setembro e dezembro de 2023, utilizando a plataforma *Google Patents* como principal base de dados. O objetivo foi identificar registros tecnológicos relacionados a inibidores de corrosão verdes, com ênfase no LCC como potencial agente anticorrosivo de origem natural.

Durante o levantamento, empregaram-se os termos de busca “inibidor de corrosão verde” e “LCC”, sem restrições de tempo ou de localização geográfica, de modo a abranger o maior número possível de registros. Foram identificadas 11 patentes que utilizam matérias-primas naturais com potencial anticorrosivo, como extratos de palmiste, mamona, cacau, neem, copaíba, *Ixora coccinea* e *Phyllanthus amarus*, entre outros.

A análise evidenciou que o maior número de registros é de titularidade da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), indicando o interesse acadêmico no desenvolvimento de soluções sustentáveis para a proteção de metais. Contudo, não foram encontrados pedidos de patente diretamente relacionados ao uso do LCC como inibidor de corrosão, o que revela uma lacuna tecnológica e uma oportunidade de inovação e de proteção intelectual nessa área.

Para validação e complementação dos resultados, foi realizada uma segunda verificação manual dos títulos no *Google Patents*, com a localização dos *links* diretos e dos números de depósito correspondentes (Tabela 1).

Tabela 1 – Patentes identificadas sobre inibidores verdes de corrosão

Patente	Número	Google Patents (link)
Protetor de material metálico biodegradável desenvolvido à base de microemulsão contendo o tensoativo ocs aditivado com dbs para aplicação comercial em oleodutos	BR102016017142B1	https://patents.google.com/patent/BR102016017142B1/pt
Solução aquosa contendo extrato de <i>euphorbia tirucalli</i> como inibidor natural de corrosão	BR102019010579A2	https://patents.google.com/patent/BR102019010579A2/pt
Obtenção de sistemas nanoautoemulsificantes utilizando óleo das sementes de <i>azadirachta indica</i> a. juss para aplicação como inibidor de corrosão	BR102014022875A2	https://patents.google.com/patent/BR102014022875A2/pt
Inibidor de corrosão em pó obtido a partir da casca da amêndoa de cacau	BR102019006077A2	https://patents.google.com/patent/BR102019006077A2/pt
Sistema automicroemulsificante contendo óleo de copaíba industrializado para aplicação em química verde	BR102014031459A2	https://patents.google.com/patent/BR102014031459A2/em
Processo de obtenção de nanopartículas biopoliméricas contendo óleo e extratos de <i>azadirachta indica</i> a. juss (neem), nanopartículas biopoliméricas e micropartículas em pó	WO2014113860A1	https://patents.google.com/patent/WO2014113860A1/pt

Fonte: Autor (2025).

Em síntese, o levantamento realizado no último trimestre de 2023 confirmou o avanço das pesquisas em inibidores naturais de corrosão, mas também destacou que o LCC ainda não foi explorado tecnologicamente em pedidos de patente. Tal

constatação reforça seu potencial inédito e estratégico para futuras investigações científicas e para a proteção de propriedade intelectual, especialmente no contexto da valorização de coprodutos agroindustriais do Nordeste brasileiro.

3.7 ESPÉCIE ARBÓREA *ANACARDIUM OCCIDENTALE*

O cajueiro (*Anacardium occidentale*) é uma árvore pertencente à família *Anacardiaceae*, originária do Brasil e amplamente cultivada em regiões tropicais da África e da Ásia. No território brasileiro, sua presença é marcante no Nordeste e no Centro-Oeste, tanto pelo valor econômico quanto pela tradição cultural associada ao consumo da castanha e do pseudofruto (Assunção; Mercadante, 2003).

A parte mais conhecida do cajueiro é a castanha, amplamente comercializada no mercado alimentício. Contudo, há um coproduto que vem despertando interesse crescente: o LCC, também chamado internacionalmente de *Cashew Nut Shell Liquid* (CNSL). Esse líquido corresponde a cerca de 25% do peso da castanha e caracteriza-se por sua viscosidade, coloração escura e propriedades cáusticas (Mazzetto et al., 2009).

A composição do LCC é rica em fenóis de cadeia longa, principalmente ácido anacárdico, cardol, 2-metilcardol e cardanol. O ácido anacárdico apresenta propriedades antibacterianas e antioxidantes; o cardol e o 2-metilcardol são altamente reativos; e o cardanol se destaca pela biodegradabilidade e ampla aplicabilidade (Lomonaco et al., 2009; Lubi; Thachill, 2000). Essa combinação confere ao líquido grande versatilidade, sendo utilizado na produção de resinas, adesivos, tintas, retardantes de chama e polímeros (Bijwe et al., 2005).

Além do potencial tecnológico, há também relevância em termos socioeconômicos. O estado do Ceará concentra cerca de 70% da capacidade de beneficiamento da castanha no Brasil, empregando mais de 20 mil pessoas na agroindústria e garantindo renda indireta a aproximadamente 280 mil trabalhadores rurais (Mazzetto et al., 2009). Valorizar o LCC como matéria-prima significa não apenas agregar valor a um resíduo, mas também fortalecer cadeias produtivas locais e fomentar o desenvolvimento sustentável.

Do ponto de vista da proteção contra a corrosão, o LCC é considerado promissor porque suas moléculas fenólicas apresentam forte capacidade de adsorção em superfícies metálicas. Essa característica possibilita a formação de

uma camada protetora que dificulta a penetração de agentes agressivos, funcionando como um inibidor de corrosão natural. O cardanol, em especial, é apontado como o composto mais atrativo por combinar biodegradabilidade e estabilidade química (Mazzetto et al., 2009). Assim, o estudo do LCC se mostra oportuno, tanto pelo potencial técnico quanto pelo impacto positivo que pode gerar em termos econômicos e ambientais.

3.8 LÍQUIDO DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU (LCC)

Entre os inibidores de corrosão de origem natural, destaca-se o LCC, um coproduto abundante no Brasil e também presente em outros países tropicais onde o cajueiro se adaptou. O LCC é extraído a partir da casca, e não da castanha, representando uma pequena fração do peso total do fruto. Durante muito tempo, esse líquido foi considerado um resíduo de baixo valor agregado, frequentemente descartado ou subutilizado pelas agroindústrias de beneficiamento. Contudo, pesquisas mais recentes revelaram que o LCC é uma fonte rica em compostos fenólicos de cadeia longa, o que lhe confere alto potencial de aplicação tecnológica e ambiental (Lomonaco et al., 2009; Mazzetto et al., 2009).

Do ponto de vista químico, o LCC é composto principalmente por ácido anacárdico, cardol, 2-metilcardol e cardanol, substâncias que apresentam elevada reatividade e afinidade por superfícies metálicas (Lomonaco et al., 2009). Os ácidos anacárdicos são reconhecidos por suas propriedades biológicas e antioxidantes; os resorcinóis, cardol e 2-metilcardol atuam como intermediários importantes em rotas de síntese orgânica; e o cardanol, por sua cadeia insaturada, permite múltiplas modificações químicas que favorecem a formação de polímeros, resinas e compósitos (Lubi; Thachill, 2000; Patel et al., 2006). Essa diversidade química singular torna o LCC uma matéria-prima multifuncional, de elevado interesse tecnológico e ambiental.

O potencial anticorrosivo do LCC decorre da presença de grupos hidroxila e carboxila, que possibilitam interações químicas e físicas com superfícies metálicas e matrizes poliméricas, originando uma película protetora aderente, capaz de dificultar a difusão de íons e retardar o processo corrosivo. Pesquisas nacionais demonstram que o LCC pode substituir parcialmente polímeros sintéticos em bases anticorrosivas, reduzindo a dependência de solventes e pigmentos inorgânicos e promovendo

formulações mais sustentáveis (Lubi; Thachill, 2000; Patel et al., 2006). Essa característica o coloca como uma alternativa viável de inibidor verde de origem regional, especialmente no contexto do Nordeste brasileiro, onde há ampla disponibilidade de matéria-prima e infraestrutura agroindustrial para seu aproveitamento.

Além de sua aplicação como inibidor de corrosão, o LCC tem sido explorado há décadas em diferentes setores industriais. Ele é utilizado na produção de resinas fenólicas, adesivos, tintas, materiais de atrito (como pastilhas de freio), isolantes elétricos, retardantes de chama e impermeabilizantes (Bijwe et al., 2005). Mais recentemente, estudos também têm investigado o uso de seus derivados em aplicações biomédicas, devido às propriedades anti-inflamatórias, antifúngicas, bactericidas e antitumorais (Lomonaco et al., 2009). Esse amplo espectro de aplicações evidencia que o LCC evoluiu de um coproduto descartável para um recurso químico estratégico, capaz de atender às demandas da indústria moderna por matérias-primas renováveis e ambientalmente seguras.

No contexto socioeconômico, o LCC apresenta relevância significativa, especialmente nas regiões produtoras de caju do Nordeste brasileiro. Seu aproveitamento integral contribui para o fortalecimento das cadeias locais de produção, gera renda para pequenos produtores e estimula o desenvolvimento regional sustentável. Além disso, o uso do LCC se insere plenamente nos princípios da economia circular, pois transforma um resíduo agroindustrial em um insumo de alto valor agregado. Em vez de ser descartado, com potenciais impactos ambientais, o líquido passa a ser reutilizado em aplicações industriais diversas, reduzindo desperdícios e maximizando o aproveitamento de recursos naturais.

Assim, o estudo do LCC como inibidor verde de corrosão é relevante sob múltiplas perspectivas. Do ponto de vista científico, possibilita compreender os mecanismos de adsorção e de interação de compostos fenólicos com superfícies metálicas. Sob o aspecto industrial, amplia o leque de aplicações de um material já consolidado por sua versatilidade química. Do ponto de vista social e ambiental, reforça o compromisso com o uso racional de recursos renováveis e a valorização de resíduos agroindustriais brasileiros. Em síntese, o LCC se consolida como uma alternativa sustentável e tecnicamente promissora para formulações anticorrosivas de nova geração, integrando inovação tecnológica, responsabilidade ambiental e desenvolvimento regional.

3.9 REVESTIMENTOS E AMBIENTES CORROSIVOS CONTROLADOS

Outra linha de combate à corrosão envolve o uso de revestimentos protetores, uma estratégia consolidada e amplamente empregada em diversos setores industriais. Esses sistemas têm como objetivo principal isolar a superfície metálica do contato direto com o meio agressivo, funcionando como barreiras físicas e, em alguns casos, também químicas. O princípio é relativamente simples: ao recobrir o metal com uma ou mais camadas de material, reduz-se o transporte de espécies corrosivas, como oxigênio, cloretos e umidade, prolongando consideravelmente a vida útil da estrutura.

Entre os diferentes tipos de revestimentos, destacam-se os sistemas multicamadas, formados por *primers*, intermediários e acabamentos. Cada camada exerce uma função específica: o *primer* garante a adesão ao substrato e pode conter pigmentos anticorrosivos; a camada intermediária reforça a espessura da proteção e contribui para a resistência mecânica; já a camada de acabamento geralmente oferece resistência química, estabilidade frente à radiação ultravioleta e até função estética. Esse modelo em camadas sucessivas resulta em desempenho robusto e é considerado um dos métodos mais confiáveis de proteção anticorrosiva em estruturas de grande porte, como navios, pontes e plataformas offshore (Hegedus, 2004; Montemor, 2014).

Nos últimos anos, os revestimentos poliméricos ganharam espaço devido às suas propriedades diferenciadas. Poliuretanos e epóxis, por exemplo, são amplamente utilizados pela capacidade de formar películas contínuas, resistentes à abrasão e ao ataque químico. Esses polímeros oferecem ainda vantagens adicionais, como resistência antimicrobiana, estabilidade térmica e boas características dielétricas, o que os torna aplicáveis em ambientes altamente agressivos e em diferentes ramos da indústria, desde oleodutos e tanques de armazenamento até estruturas civis expostas à ação da chuva e da maresia (Álvarez-Paino et al., 2017). Há também uma tendência de incorporar nanopartículas funcionais a esses polímeros, possibilitando a criação de revestimentos inteligentes, com capacidade de autorreparação de microfissuras, mudança de cor como indicador de falha ou até liberação controlada de inibidores de corrosão.

A eficácia dos revestimentos, contudo, não pode ser presumida apenas pela formulação teórica, sendo indispensável sua avaliação em condições controladas.

Para isso, realizam-se ensaios de laboratório que simulam ambientes corrosivos. Os ensaios gravimétricos são os mais tradicionais: consistem em expor amostras metálicas revestidas e não revestidas a soluções agressivas, medindo a perda de massa ao longo do tempo. Os ensaios eletroquímicos, como a polarização potenciodinâmica e a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), permitem analisar a cinética das reações de oxidação e redução, indicando se o revestimento atua de forma mais intensa na proteção anódica, catódica ou mista. Já os ensaios de imersão reproduzem o contato contínuo com soluções como NaCl ou HCl, avaliando a resistência do revestimento em longos períodos de exposição (Quattrocioni et al., 2022).

Esses métodos oferecem duas grandes vantagens: a possibilidade de acelerar o processo de corrosão, obtendo resultados em prazos menores, e o controle rigoroso das variáveis envolvidas, como temperatura, pH e concentração de sais. Isso garante que o desempenho dos inibidores ou dos revestimentos seja testado de maneira comparável e repetível. Embora não substituam totalmente os ensaios de campo, os testes laboratoriais constituem a etapa inicial fundamental para validar novas tecnologias.

3.10 ENSAIOS DE DUREZA POR LÁPIS E INTEGRIDADE DO FILME

A dureza por lápis (NBR 14535) é um ensaio amplamente utilizado para avaliar a resistência superficial de revestimentos orgânicos. O teste utiliza lápis com diferentes durezas, de 6B a 9H, para verificar a capacidade do filme de resistir a riscos superficiais. A dureza está diretamente associada à integridade do revestimento e à sua resistência mecânica, sendo um indicador importante de durabilidade. Em combinação com análises de microscopia óptica, a dureza auxilia na interpretação da formação de filmes compactos e na correlação com a resistência à corrosão.

A inclusão desse parâmetro na revisão bibliográfica reforça o embasamento metodológico da pesquisa, pois evidencia a importância de avaliar não apenas a proteção química, mas também as propriedades mecânicas do filme. Quanto maior a dureza, menor a probabilidade de microfissuras e menor a permeabilidade a eletrólitos, fatores críticos para o desempenho anticorrosivo.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi desenvolvida com o intuito de avaliar o desempenho anticorrosivo de revestimentos aplicados sobre o aço-carbono A36, utilizando formulações alternativas à base de polímero sintético e de inibidor de origem natural, obtido a partir do coproduto do LCC.

O conjunto de procedimentos experimentais foi planejado para permitir a análise comparativa entre diferentes sistemas de proteção superficial, incluindo revestimentos comerciais, galvanizados e a formulação desenvolvida neste estudo. As etapas envolvidas, desde o preparo da base polimérica até a confecção e a aplicação dos revestimentos nas superfícies, foram criteriosamente monitoradas.

Os resultados obtidos visaram contribuir para o entendimento da eficácia dos revestimentos em ambientes salinos e para a validação do potencial inibidor do LCC como alternativa sustentável em sistemas anticorrosivos.

4.1 BASE POLIMÉRICA

A base polimérica foi preparada com água destilada, bicarbonato de sódio (10 g) e amido de milho (30 g), aquecidos em fogão convencional até a formação de uma mistura espessa. Após o resfriamento à temperatura ambiente, adicionaram-se 40 g de polímero sintético (PVA), resultando em um sistema adesivo semelhante às formulações de “cola branca” relatadas em tutoriais práticos (Márcia Cris, 2019) e em estudos sobre matrizes amido/PVA para adesivos aquosos (Wu et al., 2017; Watcharakitti et al., 2022).

O material obtido apresentou características físico-químicas compatíveis com o uso como base polimérica de revestimentos anticorrosivos, oferecendo proteção física por barreira e estabilidade coloidal adequada para a incorporação do inibidor verde (LCC). A preparação resultou em aproximadamente 850 mL de solução final, com perda estimada de 15% do volume inicial devido à evaporação durante o aquecimento.

4.2 EXTRAÇÃO DO LCC

O LCC técnico utilizado neste estudo correspondeu a um coproduto obtido a

partir do processamento industrial das cascas da castanha de caju (*Anacardium occidentale*), amplamente empregado em aplicações industriais, como resinas, revestimentos, aditivos e agentes anticorrosivos. O LCC técnico caracterizou-se por apresentar composição química predominantemente formada por compostos fenólicos de cadeia longa, com destaque para cardanol, cardol e derivados alquilados, além de baixo teor de ácido anacárdico, em comparação ao LCC natural.

De acordo com descrições técnicas disponibilizadas por fornecedores comerciais e pela literatura técnica associada à comercialização do produto, o processo de obtenção do LCC técnico envolveu o tratamento térmico das cascas, promovendo a descarboxilação parcial do ácido anacárdico e sua conversão em cardanol. Esse processo resultou em um material com menor acidez, maior estabilidade química e menor reatividade corrosiva, características desejáveis para aplicações industriais, especialmente em formulações de revestimentos e sistemas anticorrosivos.

A redução do teor de ácido anacárdico no LCC técnico contribuiu para a diminuição de sua agressividade química, além de favorecer a adsorção controlada dos compostos fenólicos sobre superfícies metálicas, potencializando sua atuação como inibidor de corrosão. Tais características justificaram a escolha do LCC técnico neste trabalho, uma vez que sua composição química esteve alinhada aos objetivos de desenvolvimento de um sistema anticorrosivo de menor toxicidade e menor impacto ambiental, quando comparado a inibidores convencionais.

O óleo técnico resultante foi utilizado como agente inibidor na formulação da base anticorrosiva desenvolvida neste estudo, visando avaliar sua eficiência na proteção do aço-carbono ASTM A36 em meio corrosivo.

4.3 AMOSTRAS METÁLICAS

Foram confeccionadas 45 amostras de aço-carbono ASTM A36, cada uma com área superficial de 6,45 cm² (1 × 1 polegada). O acabamento foi realizado por lixamento manual com lixa d'água de granulometria 220, conforme a ABNT NBR 13245:2011, para o preparo de superfícies metálicas antes da aplicação de revestimentos, seguido de lavagem com água destilada e secagem com jato de ar quente. O material apresentou boa conformabilidade e resistência mecânica, características típicas do aço estrutural ASTM A36 (ver Apêndice).

Tabela 2 – Classificação dos grupos de amostras conforme o tipo de tratamento superficial

Grupo	Descrição do tratamento superficial
L	Base polimérica com inibidor LCC
C	Base comercial anticorrosiva
Z	Base rica em zinco
S	Aço sem base (controle)
G	Aço galvanizado

Fonte: Autor (2025).

Antes da imersão, todas as amostras foram caracterizadas quanto à rugosidade, à espessura do revestimento e à inspeção visual, estabelecendo parâmetros comparativos iniciais. Posteriormente, as amostras foram submetidas à imersão em solução salina por períodos de 24 h, 72 h e 168 h. De cada grupo, três amostras (uma por tempo de imersão) foram selecionadas para cada tipo de ensaio:

- Rugosidade superficial: determinação dos parâmetros R_a e R_t ;
- Espessura do revestimento: medição pelo método magnético;
- Inspeção visual: avaliação do aspecto superficial e da presença de bolhas, fissuras e oxidação.

Todas as análises foram realizadas antes e após os períodos de imersão, permitindo a avaliação comparativa do desempenho de cada sistema de revestimento.

Para o ensaio de espectrofotometria UV-Vis, foram utilizadas 15 amostras, correspondentes a três de cada grupo experimental, representativas dos três tempos de imersão. Esse ensaio permitiu estimar a concentração de espécies metálicas dissolvidas no meio salino.

Além das 45 amostras principais, foram preparadas três amostras adicionais (10×10 cm; área de 100 cm^2), confeccionadas com o mesmo material e a mesma formulação das amostras dos grupos L, C e Z. Essas amostras foram destinadas ao ensaio de dureza por lápis, utilizado para avaliar a resistência superficial do filme de revestimento.

4.4 SOLUÇÃO CORROSIVA

O meio corrosivo foi preparado a partir de cloreto de sódio (NaCl) P.A., na concentração de $0,6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, obtida pela dissolução de 35,064 g de NaCl em 1.000 mL de água destilada. O preparo foi replicado até atingir um volume total de 6.525 mL, distribuído em 45 alíquotas de 145 mL, utilizadas para a imersão individual das amostras metálicas.

O pH médio da solução foi 6, valor que deverá ser monitorado periodicamente, considerando que soluções salinas neutras ($\text{pH} \approx 7$) tendem a reproduzir o ambiente de maresia de regiões semiáridas, como Mossoró (RN), cuja salinidade média atmosférica é estimada em $3,4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (aproximadamente $0,058 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ de NaCl).

4.5 FORMULAÇÃO DA BASE ANTICORROSIVA

A formulação final consistiu na junção de 50 mL da base polimérica com 10 mL de LCC técnico, originando um sistema híbrido de proteção físico-química. Para aplicação sobre as amostras de aço, utilizou-se a diluição de 100 mL dessa base com 25 mL de catalisador para tintas poliuretânicas automotivas (Lazzudur Endurecedor 061 – Sherwin-Williams) e 25 mL de solvente aguarrás (Suvinil), garantindo homogeneidade e fluidez adequadas.

O revestimento foi aplicado com auxílio de compressor de ar, utilizando pistola de pintura do tipo *spray* convencional, com pressão de 30 psi e distância média de 20 a 25 cm entre o bico e a superfície metálica, sendo mantido em repouso até a secagem completa à temperatura ambiente, por 24 h, antes dos ensaios.

4.6 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

A análise da composição química dos revestimentos foi realizada por FRX por energia dispersiva (EDXRF), no Laboratório de Materiais do IFPI, Campus Teresina Central, utilizando o equipamento portátil Thermo Scientific Niton™ XL3t Ultra. Foram analisadas três amostras representativas, correspondentes aos grupos L (base polimérica + LCC), C (tinta comercial) e Z (tinta rica em zinco). Os fragmentos foram coletados manualmente das superfícies metálicas tratadas. As leituras foram realizadas no modo analítico *Mining*, com tempo de leitura de 120 s por ponto. A

técnica permitiu identificar os principais elementos metálicos constituintes, auxiliando na caracterização e na comparação entre os diferentes sistemas de revestimento.

4.7 ANÁLISE SUPERFICIAL E INSPEÇÃO VISUAL

Foram analisadas cinco amostras por grupo (L, C, Z, S e G), antes e após os períodos de imersão (24, 72 e 168 h) em solução de NaCl $0,6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Após cada etapa, as amostras foram lavadas com água destilada, secas com ar quente e examinadas por microscopia óptica e inspeção visual direta, com medições complementares de espessura realizadas com o medidor magnético HW300-PRO e processamento digital das imagens no *software* ImageJ. Essa análise permitiu avaliar alterações morfológicas, perda de massa e integridade do filme protetor.

4.8 ENSAIO DE DUREZA LÁPIS

O ensaio de dureza por lápis foi conduzido conforme a ABNT NBR 14535:2008, no Laboratório de Materiais e Revestimentos (IFPI), em ambiente controlado, a $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $50 \pm 5\%$. Foram utilizadas três amostras adicionais ($10 \times 10 \text{ cm}$; 100 cm^2), correspondentes aos revestimentos L, C e Z, confeccionadas com a mesma formulação das amostras principais. O ensaio permitiu classificar a resistência ao risco superficial e a coesão do filme protetor.

4.9 RUGOSIDADE

As medições de rugosidade foram realizadas com rugosímetro digital, em cinco condições de superfície (L, C, Z, S e G), avaliando os parâmetros rugosidade média aritmética (R_a) e altura total do perfil (R_t), com percurso de 4 mm e comprimento de amostragem de 0,8 mm. Foram realizadas cinco repetições por superfície, antes e após os ensaios de corrosão, permitindo comparar o desgaste e a degradação topográfica induzidos pelo ambiente eletrolítico.

4.10 ESPECTROSCOPIA UV-Vis

As amostras A, B, C, G e S foram imersas em solução salina de NaCl 0,6 mol·L⁻¹ por 24, 72 e 168 h, intervalos escolhidos para representar exposições de curta, média e longa duração, conforme metodologia empregada em estudos de corrosão acelerada (Oliveira et al., 2020; Azevedo et al., 2021). Após cada período, uma amostra por grupo (totalizando 15 amostras) foi retirada para análise em espectrofotômetro UV-Vis Thermo Scientific Evolution 220, utilizando cubetas de quartzo com caminho óptico de 1 cm. As medições foram realizadas no Laboratório de Físico-Química do IFPI, com espectros registrados entre 250 e 600 nm, permitindo avaliar a lixiviação dos revestimentos e a presença de produtos de corrosão metálica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INSPEÇÃO VISUAL

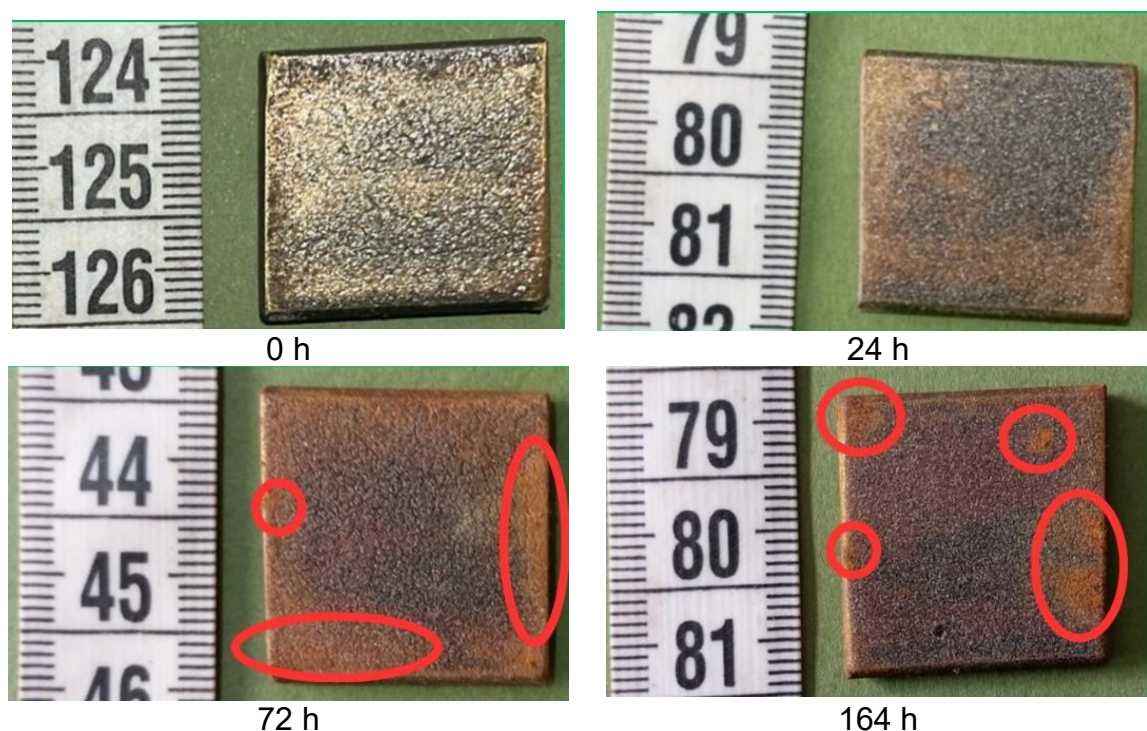
A análise de corrosão das amostras revestidas com as tintas L, C, Z, G e S foi apresentada nas Figuras 1, 2, 3, 4 e 5, organizadas em sequência, da esquerda para a direita, correspondendo às condições antes da exposição e após os períodos de imersão de 24, 72 e 168 h. Essa organização permitiu uma avaliação visual comparativa da evolução do processo corrosivo ao longo do tempo, possibilitando a análise do desempenho dos diferentes sistemas de revestimento frente ao meio salino.

De modo geral, observou-se que o início do processo corrosivo ocorreu preferencialmente nas regiões de borda e nas extremidades das amostras metálicas, independentemente do tipo de revestimento aplicado. Esse comportamento esteve associado ao denominado efeito de canto (*edge effect*), fenômeno amplamente reportado em ensaios de corrosão por imersão, no qual as bordas apresentam maior densidade de corrente eletroquímica em função da descontinuidade geométrica do revestimento e da maior exposição do substrato metálico ao eletrólito. Nessas regiões, o filme protetor tendeu a apresentar menor espessura e menor uniformidade, favorecendo trocas eletrônicas mais intensas e o início localizado do ataque corrosivo. Assim, a progressão da corrosão observada nas extremidades não deve

ser interpretada exclusivamente como falha do revestimento, mas como uma limitação inerente à geometria das amostras e às condições do ensaio em meio salino.

No caso das amostras revestidas com a base formulada contendo LCC, a análise visual indicou que o mecanismo predominante de proteção não se caracterizou por uma atuação eletroquímica típica de inibidores de corrosão dissolvidos no meio, mas, sim, pela formação de uma barreira física contínua. Essa barreira atuou reduzindo o contato direto entre a superfície metálica e o eletrólito, retardando o início e a progressão do processo corrosivo. Observou-se que, nas regiões em que o filme permaneceu íntegro, houve atraso significativo na manifestação de produtos de corrosão, sugerindo que a proteção conferida pelo LCC esteve associada principalmente à repulsão à água e à limitação da difusão de íons agressivos, como os íons cloreto presentes na solução salina.

Figura 1 – Amostra L: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo

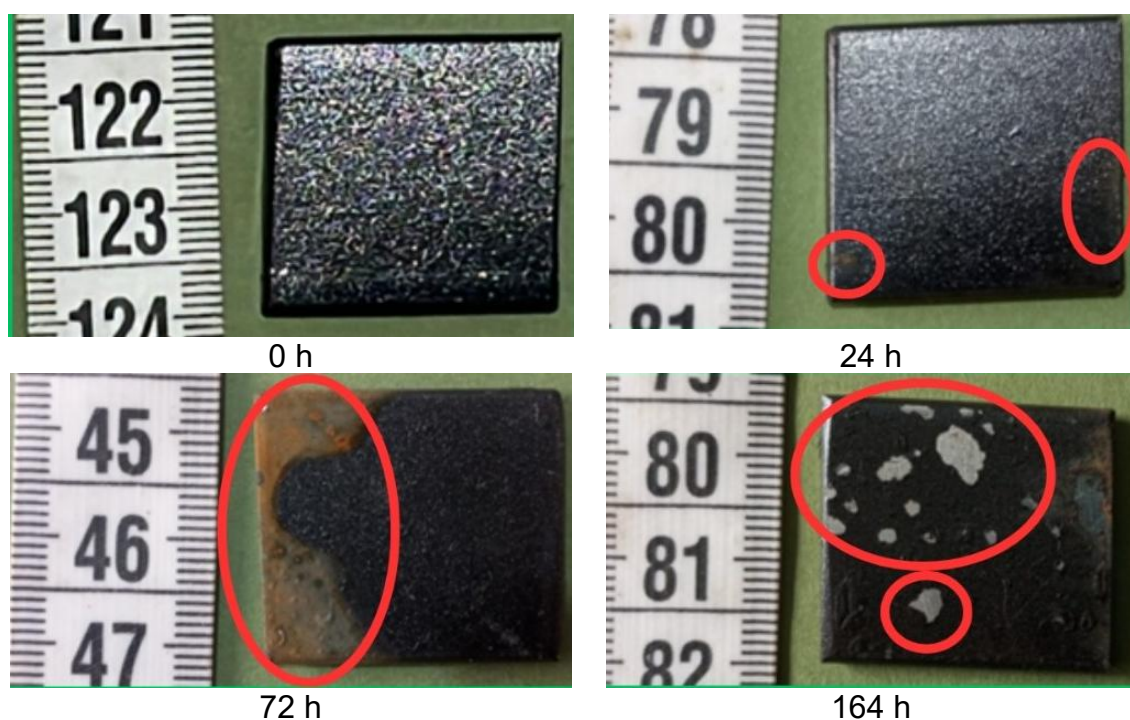


Fonte: Autor (2025).

Na Figura 1, representando a amostra L, a superfície apresentou aspecto metálico protegido, com brilho sutil, sem sinais de oxidação e com a camada de tinta íntegra e uniforme. Após as primeiras 24 h, surgiram sinais iniciais de oxidação em

algumas áreas, indicados por alterações de coloração que evidenciaram o início do ataque químico; ainda assim, não houve presença de pontos de ferrugem. Em 72 h, tornou-se evidente a evolução da corrosão: as manchas associadas à oxidação do ferro, de coloração marrom, apresentaram maior extensão do que a superfície ainda revestida, indicando perda progressiva do desempenho protetivo do filme sobre a peça. Ao alcançar 168 h, a corrosão mostrou-se amplamente disseminada, com oxidação generalizada e predominância de coloração marrom-avermelhada, característica de ferrugem. Assim, a tinta L apresentou desempenho limitado ao longo da exposição ao meio corrosivo, provavelmente em razão de sua baixa resistência à névoa salina e a ambientes agressivos, o que indicou restrições de uso em aplicações externas ou industriais.

Figura 2 – Amostra C: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo

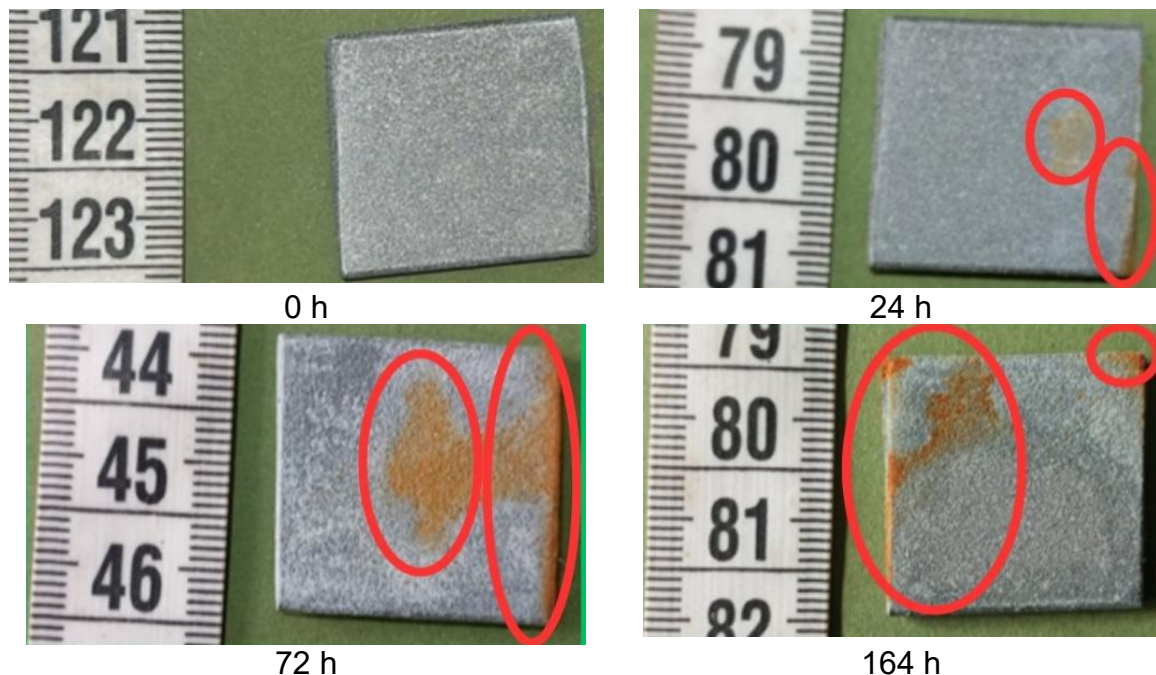


Fonte: Autor (2025).

Na Figura 2, na condição inicial, a peça apresentou superfície homogênea, com uniformidade e brilho, sem indícios de bolhas ou descascamento. Após 24 h de exposição, ainda foi possível observar a peça íntegra, com uma discreta mancha no canto esquerdo, indicando o início de uma falha no processo protetivo. Observou-se avanço considerável em 72 h, quando a tinta começou a perder a capacidade de

proteção, sendo nítido que a região mais vulnerável correspondeu ao lado esquerdo da peça, especialmente na parte superior e nas bordas. Uma possível causa foi a espessura de filme insuficiente nessas áreas. Em 168 h, a amostra apresentou falhas acentuadas, com descascamento total em algumas regiões, evidenciando falta de aderência da tinta, exposição do metal de base e corrosão avançada, o que indicou que a tinta não ofereceu proteção efetiva em ambiente corrosivo. As falhas iniciaram-se pela corrosão nas bordas e evoluíram progressivamente para descascamento e corrosão mais generalizada, evidenciando a fragilidade do sistema de revestimento C.

Figura 3 – Amostra Z: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo

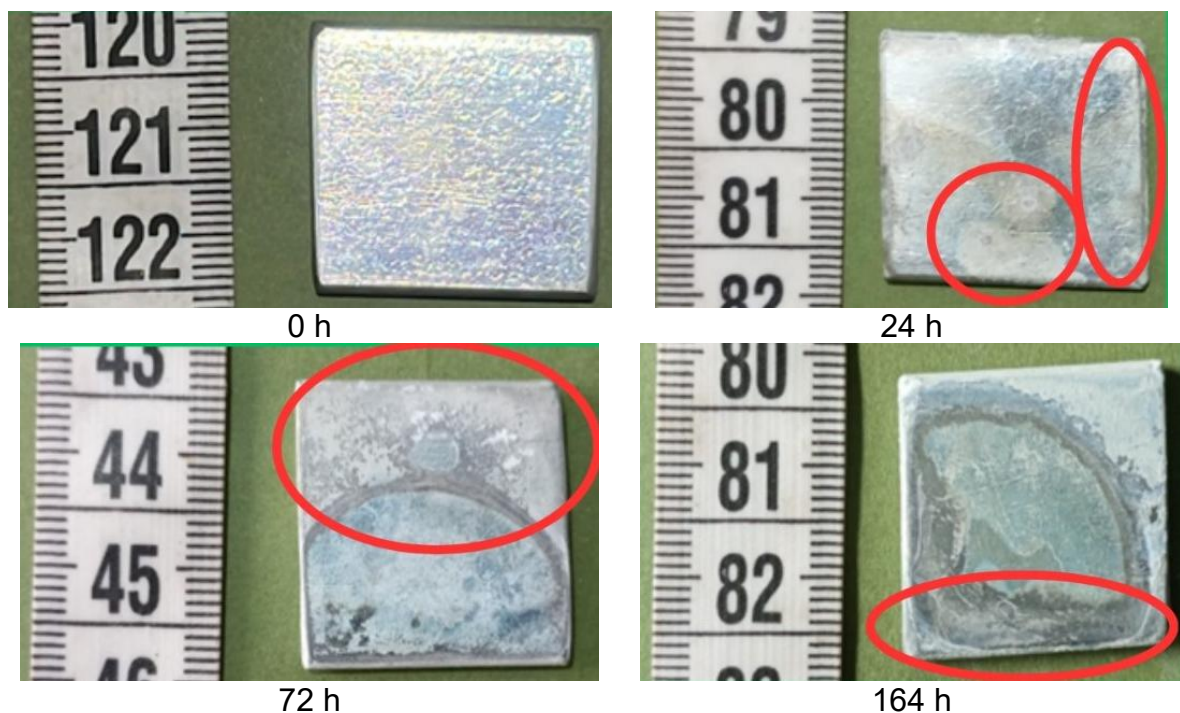


Fonte: Autor (2025).

Na Figura 3, na condição inicial, a peça apresentou a tinta íntegra e uniforme, sem sinais de corrosão, com boa aderência e cobertura, indicando condição adequada de proteção antes da exposição. Após 24 h, observaram-se os primeiros sinais na forma de manchas pontuais de corrosão, evidenciando uma falha inicial da barreira protetiva e corrosão leve nas bordas da amostra. Com o avanço do tempo para 72 h de exposição, tornou-se significativamente mais evidente a progressão do processo, com formação de óxidos de ferro; além das bordas, a região central também passou a apresentar falhas de modo mais acentuado, indicando perda

relevante da capacidade de proteção do revestimento. Em 168 h, observou-se a condição mais crítica, com extensa formação de produtos corrosivos em praticamente toda a superfície e, em algumas áreas, exposição total do metal de base, evidenciando perda quase completa da função de barreira e falha generalizada do sistema de revestimento.

Figura 4 – Amostra G: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo

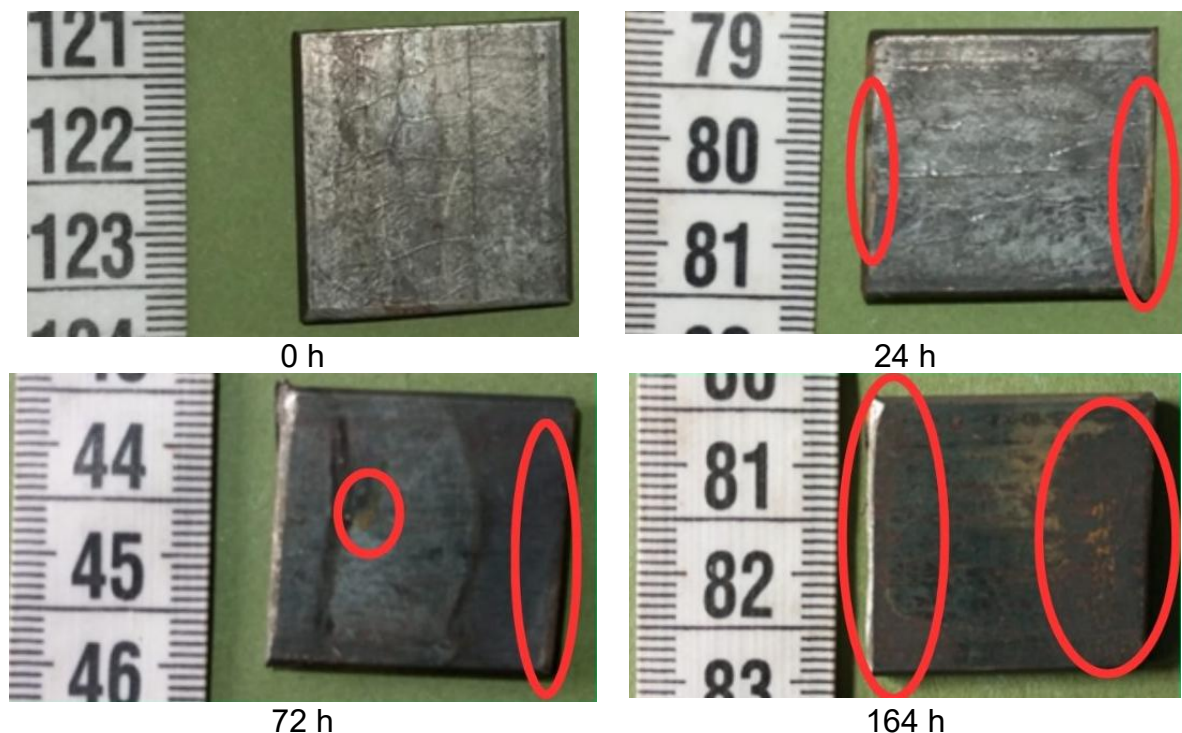


Fonte: Autor (2025).

A peça da amostra G, representada na Figura 4, evidenciou o desempenho do material galvanizado. Na condição inicial, apresentou brilho característico da galvanização, ausência de pontos de corrosão visíveis e textura uniforme e íntegra. Além disso, a camada de zinco encontrava-se ativa, o que assegurou proteção ao aço de base. Após 24 h de exposição salina, observou-se a formação de manchas brancas e azuladas, provenientes de produtos de corrosão do zinco. Esses primeiros sinais de corrosão branca foram indicativos da formação de hidróxidos e/ou carbonatos de zinco, acompanhados de perda do brilho inicial. Em 72 h, verificou-se evolução significativa do processo corrosivo, indicando desgaste progressivo da galvanização. Notou-se o aumento das áreas com corrosão branca, o desenvolvimento de zonas circulares de ataque e vestígios de degradação parcial da

camada de zinco. Em 168 h, tornou-se evidente a presença extensa de produtos de corrosão, com possível exposição do aço de base, início de corrosão avermelhada em pontos aleatórios e ocorrência de áreas escuras e irregulares, associadas à perda severa da camada protetiva de zinco. Essa degradação elevou a probabilidade de corrosão direta do aço de base.

Figura 5 – Amostra S: aspecto inicial (antes da imersão) e após 24 h, 72 h e 168 h de exposição ao meio corrosivo



Fonte: Autor (2025).

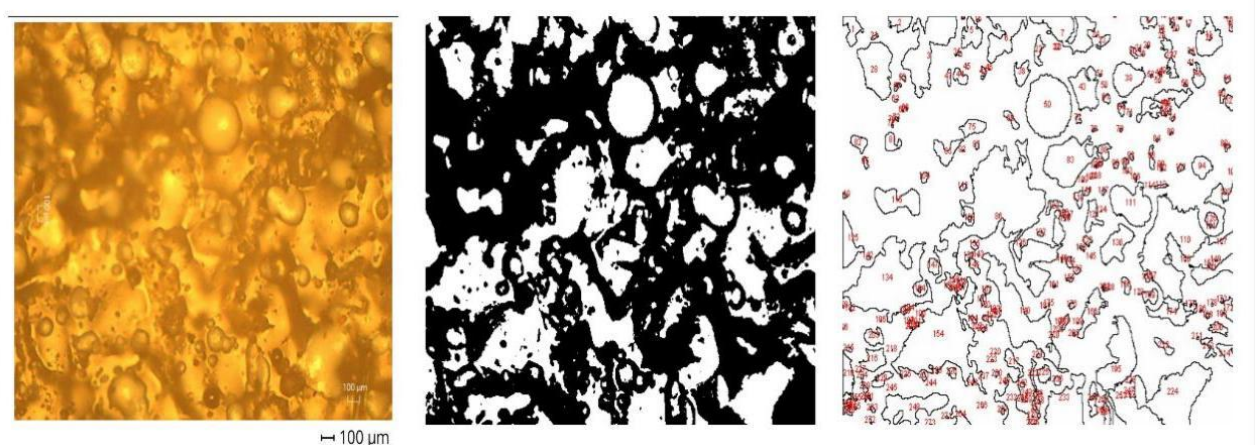
Na análise da amostra S, representada na Figura 5, observou-se, inicialmente, uma superfície metálica limpa, com marcas de usinagem, sem indícios de corrosão ou manchas. Após 24 h, ocorreu leve escurecimento da peça e alteração de coloração decorrente da oxidação inicial do ferro, com os primeiros sinais de degradação superficial associados ao rompimento da camada passiva do aço. Em 72 h, o escurecimento da superfície tornou-se mais acentuado e surgiram mais pontos avermelhados; a corrosão ainda se manteve moderada, com manifestações mais visíveis nos cantos e nas bordas. Em 168 h, verificou-se um quadro mais severo, com escurecimento generalizado, ampla presença de manchas avermelhadas e produtos de oxidação, com formação de ferrugem cobrindo quase toda a amostra. Dessa forma, a integridade superficial do aço foi comprometida por

corrosão generalizada e ativa. A exposição do aço a um meio agressivo, em condição de completa vulnerabilidade, resultou em degradação significativa, reforçando a importância da escolha de um sistema de proteção superficial adequado.

5.2 CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL POR MO

Das amostras L, foi selecionada a peça de número 7 para explanar possíveis defeitos de superfície, enquanto, na amostra C, foi selecionada a peça de número 9. Ambas são apresentadas nas Figuras 6 e 7, em uma sequência composta por imagem obtida por MO, tratamento de imagem no *software* ImageJ e contagem de bolhas realizada no próprio *software*. As análises por MO foram realizadas com aumento de 100×, permitindo a observação direta da superfície das amostras. As micrografias obtidas apresentaram campo de visão real de aproximadamente 640 µm de largura por 512 µm de comprimento, conforme a escala de referência inserida nas imagens. Essa dimensão possibilitou a avaliação detalhada da morfologia, da presença de defeitos superficiais e da distribuição de produtos de corrosão ao longo do tempo de exposição em solução salina.

Figura 6 – Amostra L da peça nº 7×100: ampliação (1), tratamento de imagem (2) e contagem (3)



Fonte: Autor (2025).

A análise por MO corroborou as observações visuais, evidenciando que as regiões próximas às bordas apresentaram maior densidade de defeitos, pites e

degradação do filme protetor. Esse comportamento esteve relacionado ao efeito de canto, no qual ocorre intensificação local das reações eletroquímicas anódicas e catódicas, decorrente da maior disponibilidade de sítios ativos e da menor eficiência de cobertura do revestimento nas extremidades. Esse efeito contribuiu para a formação de ataques localizados, mesmo em sistemas que mantiveram desempenho satisfatório nas regiões centrais da amostra.

Figura 7 – Amostra C da peça nº 9×100: ampliação (1), tratamento de imagem (2) e contagem (3)



Fonte: Autor (2025).

O ensaio de MO foi realizado, e os dados foram coletados no *software* ImageJ, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação das áreas e da distribuição de inclusões em filmes de revestimento

Parâmetro	Amostra L	Amostra C	Unidade
Número de partículas	$2,75 \times 10^2$	$2,05 \times 10^2$	—
Área total	$1,665 \times 10^9$	$1,767 \times 10^9$	μm^2
Tamanho médio por partícula	$6,055 \times 10^6$	$8,621 \times 10^6$	μm^2
Área média estimada	35,25%	44,87%	—
Maior partícula (área máx.)	$2,080 \times 10^8$	$3,659 \times 10^8$	μm^2
Menor partícula (área mín.)	$2,130 \times 10^4$	$2,098 \times 10^4$	μm^2

Fonte: Autor (2025).

Confirmou-se, por meio da observação microscópica, a presença de microbolhas de ar nas peças pintadas, indicando falhas na uniformidade e no

desempenho da camada de tinta. Esse fenômeno pode estar associado ao aprisionamento de ar durante a pulverização, quando gotículas impactantes arrastam bolhas para o interior da película, as quais se expandem e se rompem durante a secagem, formando defeitos visíveis (Domnick et al., 2011). Essas microbolhas foram quantificadas e caracterizadas a partir das imagens obtidas por microscopia, com auxílio do *software* ImageJ, por meio da contagem e da medição das bolhas nas amostras L e C, conforme apresentado nas Figuras 6 e 7.

Na amostra L, foram detectadas $2,75 \times 10^2$ microbolhas e, na amostra C, $2,05 \times 10^2$ microbolhas. Apesar de a amostra L apresentar quantidade superior em relação à amostra C, a área total ocupada pelas microbolhas na amostra C foi maior, atingindo $1,767 \times 10^9 \mu\text{m}^2$, em comparação com $1,665 \times 10^9 \mu\text{m}^2$ na amostra L. Esses resultados indicaram que, embora menos numerosas, as microbolhas da amostra C apresentaram maiores dimensões, conforme evidenciado pelo tamanho médio por partícula apresentado na Tabela 3, que foi de aproximadamente $8,621 \times 10^6 \mu\text{m}^2$ na amostra C, em comparação com $6,055 \times 10^6 \mu\text{m}^2$ na amostra L.

Ademais, a área máxima observada para microbolhas na amostra C ($3,659 \times 10^8 \mu\text{m}^2$) foi superior à da amostra L ($2,080 \times 10^8 \mu\text{m}^2$), indicando maior ocorrência de microbolhas isoladas de maior tamanho na amostra C. As áreas mínimas, por sua vez, foram comparáveis entre as duas amostras, em torno de $2,1 \times 10^4 \mu\text{m}^2$. Esses resultados mostraram que a amostra C apresentou microbolhas maiores e que ocuparam área total superior à da amostra L, comprometendo a resistência mecânica e a impermeabilidade da camada de tinta. Como consequência, houve contribuição para o surgimento de regiões vulneráveis, permitindo a penetração de agentes corrosivos até a superfície metálica e reduzindo a durabilidade da peça.

5.3 ENSAIO DE DUREZA LÁPIS

O ensaio de dureza lápis foi realizado, e os dados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dureza de ruptura

Amostra	Dureza de ruptura
L	< 6B
C	HB
Z	< 6B

Fonte: Autor (2025).

A dureza ao romper indicou o último lápis que não produziu impressões visíveis na película. Assim, quanto mais próxima a classificação estiver do tipo “H”, maior será a resistência mecânica do revestimento à deterioração superficial. As amostras L e Z apresentaram dureza abaixo de 6B, o que indicou uma superfície macia, com baixa resistência à abrasão ou à ação mecânica. Esse comportamento pode estar associado à natureza química do ligante na formulação, bem como à presença de espessantes e plastificantes, que tendem a tornar as películas mais flexíveis, porém menos resistentes ao risco. Embora isso prejudique a durabilidade, tais características são desejáveis em aplicações que exijam maior ductilidade, especialmente em peças estruturais, que estão sujeitas à dilatação térmica e a vibrações.

Por outra via, a amostra C apresentou dureza do tipo HB, superior às demais, sugerindo que sua composição provavelmente contou com maior concentração de resinas mais rígidas e/ou menor teor de aditivos flexibilizantes, resultando em uma película com maior rigidez e melhor resistência a marcações por ação mecânica. Assim, esse revestimento mostrou-se uma opção adequada para objetos frequentemente expostos, como corrimãos, portas ou painéis.

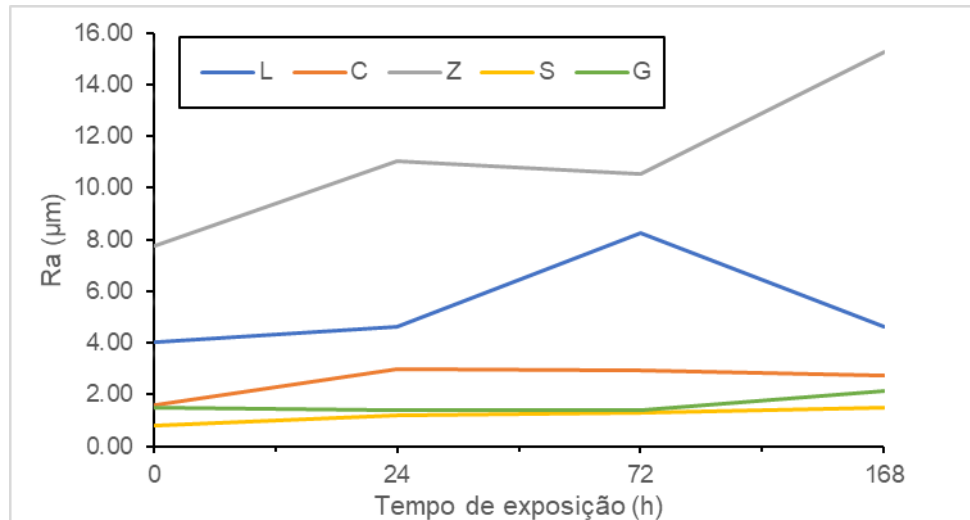
Dessa forma, os resultados obtidos forneceram subsídios relevantes para a seleção do tipo de tinta mais apropriado, em função das diferentes exigências de desempenho e proteção. A amostra C mostrou-se mais indicada para superfícies sujeitas a atrito ou manipulação, por apresentar maior resistência ao risco. Já as amostras L e Z configuraram alternativas mais adequadas para situações que exijam maior flexibilidade ou acomodação de movimentações do substrato.

5.4 RUGOSIDADE

A variação dos parâmetros de rugosidade média (R_a) e da altura total do perfil

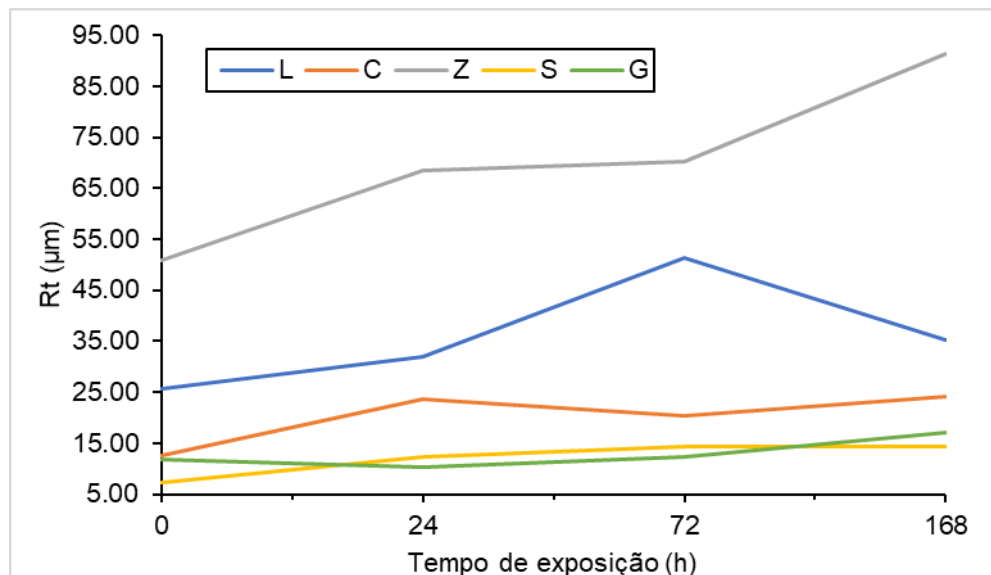
(R_t) ao longo do tempo de exposição foi apresentada nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 – Variação do parâmetro R_a em função do tempo de exposição em solução salina



Fonte: Autor (2025).

Figura 9 – Variação do parâmetro R_t em função do tempo de exposição em solução salina



Fonte: Autor (2025).

De forma complementar à análise quantitativa dos parâmetros R_a e R_t , a avaliação da evolução da rugosidade superficial permitiu inferir o mecanismo predominante de proteção conferido pelos diferentes sistemas de revestimento. Variações mais discretas desses parâmetros, especialmente nos períodos iniciais de

exposição, estiveram associadas à atuação de filmes protetores com efeito barreira, enquanto aumentos acentuados refletiram degradação superficial e formação de produtos de corrosão.

Observou-se que, de modo geral, todos os grupos apresentaram aumento progressivo dos valores de rugosidade com o tempo de imersão, indicando o avanço dos processos de degradação superficial. No entanto, o comportamento entre os sistemas foi distinto, refletindo diferenças nas formulações dos revestimentos e nas características de aderência e nivelamento.

A amostra Z apresentou os maiores valores de rugosidade, com R_a variando de aproximadamente 8,0 μm para cerca de 15,0 μm e R_t atingindo aproximadamente 90 μm ao final de 168 h. Esse crescimento acentuado foi coerente com a formação de produtos de corrosão volumosos, típicos de revestimentos ricos em zinco, cuja microestrutura porosa favoreceu o acúmulo e o destacamento de partículas.

A amostra L exibiu comportamento intermediário, com aumento de R_a até cerca de 8,0 μm em 72 h e redução subsequente para aproximadamente 5,0 μm em 168 h. Esse padrão sugeriu a formação e posterior estabilização da camada protetora, possivelmente associadas à adsorção de compostos fenólicos do LCC e à melhora da integridade do filme após o período inicial de exposição.

A amostra C apresentou valores baixos e relativamente estáveis de rugosidade (R_a entre 1,6 e 2,5 μm ; R_t inferior a 25 μm), indicando bom nivelamento e resistência à ação corrosiva, o que refletiu a eficácia da formulação industrial e do agente nivelante presente na tinta.

Já a amostra G manteve rugosidade reduzida ($R_a \approx 1,5 \mu\text{m}$; $R_t < 20 \mu\text{m}$) durante todo o período, confirmando a estabilidade superficial do zinco depositado, que atuou como barreira e ânodo de sacrifício.

Por fim, a amostra S exibiu os menores valores absolutos de R_a e R_t no início (0,8 e 7 μm), mas apresentou leve aumento ao longo de 168 h, coerente com a formação inicial de óxidos de ferro e microirregularidades típicas do processo corrosivo em substrato sem revestimento.

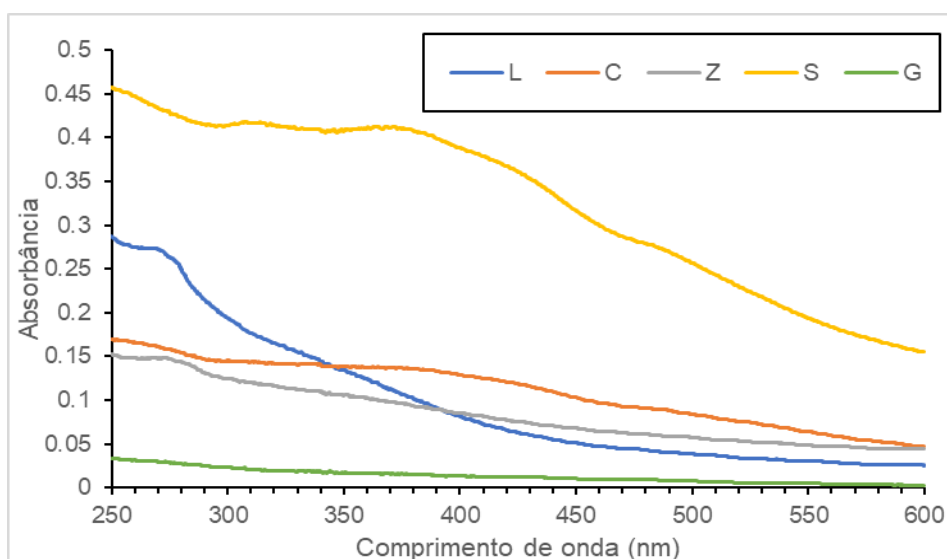
Esses resultados permitiram classificar o desempenho das amostras quanto ao aumento médio de rugosidade após 168 h como: aço sem revestimento < galvanizado < comercial < base com LCC < rica em zinco. Assim, confirmou-se que os sistemas comercial e galvanizado mantiveram melhor acabamento superficial, enquanto o sistema rico em zinco apresentou maior degradação textural.

Em particular, a manutenção de valores de rugosidade relativamente estáveis nas amostras revestidas com a base L nos tempos iniciais de exposição reforçou a interpretação de que o sistema atuou predominantemente como barreira protetora, dificultando o contato direto entre o eletrólito e a superfície metálica. Esse comportamento foi característico de revestimentos com ação física e caráter hidrofóbico, diferindo do mecanismo clássico de inibidores solúveis, cuja atuação esteve associada à adsorção eletroquímica direta sobre o metal. Assim, os resultados de rugosidade corroboraram a interpretação de que o LCC, na formulação estudada, contribuiu principalmente para a formação de um filme protetor por barreira.

5.5 ESPECTROSCOPIA UV-Vis

A espectroscopia UV-Vis foi utilizada para avaliar a presença de espécies corrosivas dissolvidas na solução salina após diferentes períodos de imersão (24 h; Figura 10, 72 h; Figura 11 e 168 h; Figura 12), permitindo correlacionar a liberação de íons metálicos e de fragmentos dos revestimentos com o tempo de exposição. A análise comparativa dos espectros forneceu informações sobre o comportamento de degradação de cada sistema protetivo e sobre a eficácia das barreiras formadas sobre o aço-carbono A36.

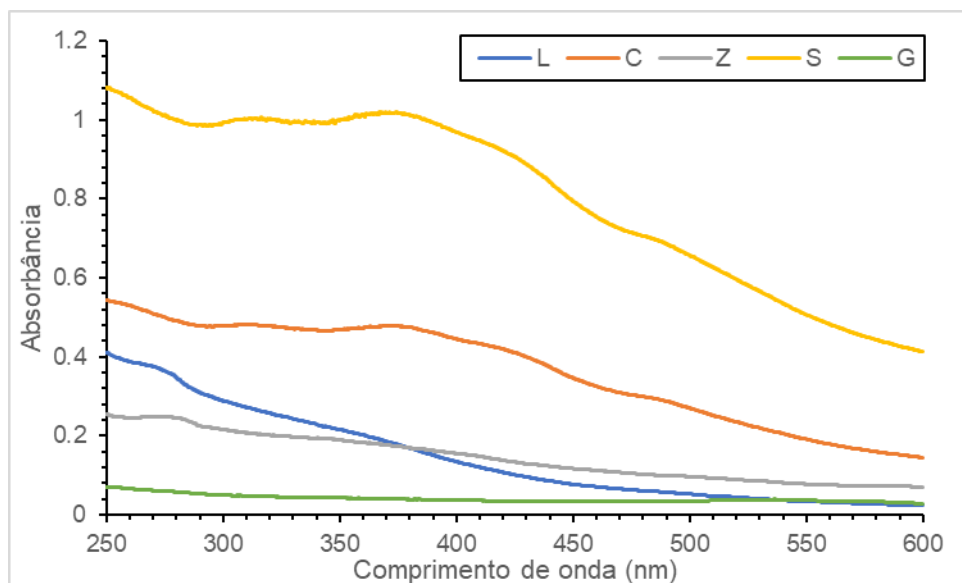
Figura 10 – Espectros UV-Vis das soluções de imersão após 24 h de exposição das amostras L, C, Z, G e S



Fonte: Autor (2025).

Nos espectros obtidos após 24 h, observou-se baixa absorvância em todas as amostras revestidas, indicando mínima interação entre o meio e o filme protetor. A amostra galvanizada apresentou praticamente uma linha de base, com valores de absorvância inferiores a 0,05, refletindo excelente desempenho inicial. As tintas comercial e rica em zinco exibiram valores ligeiramente mais elevados (entre 0,10 e 0,20), compatíveis com o início de processos de hidratação e liberação residual de partículas finas. A amostra com base contendo LCC apresentou valores intermediários, próximos de 0,25, indicando baixa permeabilidade inicial e bom comportamento de barreira. Já o aço sem revestimento apresentou o maior nível de absorvância, em torno de 0,45, evidenciando liberação imediata de íons ferro e formação inicial de produtos de corrosão no meio.

Figura 11 – Espectros UV-Vis das soluções de imersão após 72 h de exposição das amostras L, C, Z, G e S

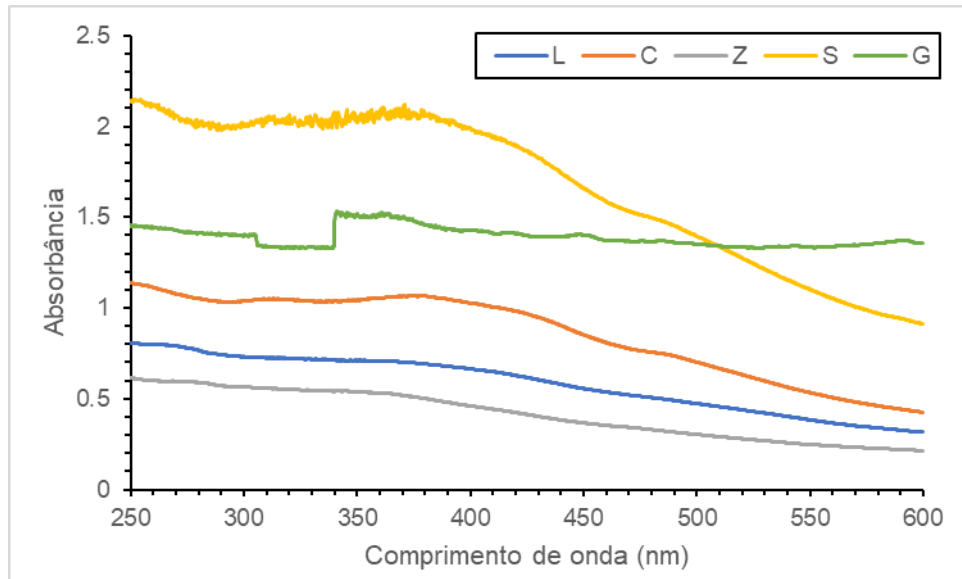


Fonte: Autor (2025).

Após 72 h, a diferença entre os sistemas tornou-se mais evidente. As amostras rica em zinco e com base contendo LCC apresentaram aumento moderado da absorvância, com valores entre 0,4 e 0,7 em regiões próximas de 300 nm, indicando liberação controlada de íons metálicos e início da deterioração do filme superficial. A tinta comercial manteve-se relativamente estável, com valores inferiores a 0,6, demonstrando maior uniformidade da película protetora. O galvanizado apresentou discreto aumento (até 0,10), o que pode estar associado à

formação superficial de hidróxidos de zinco, mas ainda mantendo elevada eficiência de barreira. Por outro lado, o aço sem revestimento apresentou valores de absorvância superiores a 1,0 em todo o espectro, evidenciando intensa lixiviação de íons ferro e produtos de corrosão, confirmando a ausência de proteção efetiva.

Figura 12 – Espectros UV-Vis das soluções de imersão após 168 h de exposição das amostras L, C, Z, G e S



Fonte: Autor (2025).

Ao final de 168 h, os resultados indicaram estágio avançado de degradação dos sistemas. A amostra S manteve os maiores níveis de absorvância, ultrapassando 2,0, o que indicou liberação intensa de produtos de corrosão e de íons metálicos no meio. A amostra G, embora tenha apresentado aumento expressivo ($\approx 1,4$), ainda mostrou melhor desempenho comparativo, sugerindo transição da proteção catódica para a liberação parcial de Zn^{2+} após consumo parcial da camada protetora. A amostra C apresentou valores intermediários ($\approx 1,0$), mantendo desempenho superior às formulações alternativas. A amostra L apresentou valores semelhantes, próximos de 0,9, indicando eficácia moderada e comportamento estável até 72 h, com redução de desempenho em 168 h, possivelmente devido à saturação da película. Por fim, a amostra Z revelou aumento acentuado da absorvância ($\approx 1,5$), associado à elevada porosidade e à liberação de partículas de zinco e ferro em suspensão, corroborando os resultados anteriores de rugosidade e perda de massa.

A análise comparativa dos espectros UV-Vis mostrou que a absorbância cresceu proporcionalmente ao tempo de exposição, refletindo o aumento da concentração de espécies dissolvidas provenientes dos revestimentos e da corrosão do aço. A tendência observada pôde ser resumida como: galvanizado < comercial < base com LCC < rica em zinco < aço sem revestimento.

Os resultados de espectroscopia UV-Vis indicaram aumento progressivo da absorbância ao longo do tempo, associado à lixiviação de espécies do revestimento e à presença de produtos de corrosão no meio. Entretanto, não foi observada evidência clara de atuação do LCC como inibidor ativo dissolvido no eletrólito, uma vez que não houve estabilização ou redução significativa da concentração de espécies metálicas na solução. Esse comportamento sugeriu que o LCC não atuou predominantemente por mecanismos de inibição eletroquímica clássica, mas, sim, como componente de um filme protetor com função de barreira, que retardou a corrosão enquanto manteve sua integridade física.

5.6 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

Os resultados da Tabela 5 retrataram os dados coletados por FRX, com tempo de leitura de 120 s, e resultados expressos em %.

Tabela 5 – Teores médios de óxidos (%) nas tintas L, C e Z

Óxido (%)	L (média)	C (média)	Z (média)
Al ₂ O ₃	0,15	0,35	26,2
SiO ₂	0,25	0,25	1,2
P ₂ O ₅	1,3	0,05	1
SO ₃	0,25	0,3	0,15
K ₂ O	0,2	0,1	0
CaO	0,35	1,7	1,1
TiO ₂	0	0,1	0
MnO	0	1,6	0
Fe ₂ O ₃	0,1	39,4	0,45
ZnO	0	1,3	66,85

Fonte: Autor (2025).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5, o grupo L (L.1 e L.2) apresentou baixa concentração geral. Os principais componentes foram P_2O_5 (1,2–1,4%) e, em menores teores, SiO_2 , SO_3 , K_2O e CaO . Esses resultados sugeriram um material pouco mineralizado, com traços de fósforo e sílica, indicando a presença de fosfatos em uma matriz com baixo conteúdo inorgânico. Em comparação com as amostras C e, principalmente, Z, essa composição não se destacou do ponto de vista econômico, por corresponder a uma tinta mais simples, com teor relativamente elevado de fosfato (P_2O_5), porém sem elevada proporção de óxidos metálicos de maior custo ou com função anticorrosiva específica.

Enquanto o grupo C (C.1 e C.2) apresentou alto teor de ferro, com Fe_2O_3 na faixa de 38,8–40,0%, valor significativamente dominante, caracterizando um revestimento rico em óxidos de ferro. Além disso, foram identificados outros óxidos em menores teores, como CaO ($\approx 1,7\%$), MnO ($\approx 1,6\%$) e ZnO ($\approx 1,3\%$). Esse perfil composicional foi compatível com a presença de pigmentos inorgânicos à base de óxidos de ferro, com contribuições secundárias de manganês e zinco, os quais podem estar associados a aditivos/pigmentos ou a impurezas provenientes das matérias-primas. Com base nesses dados, a amostra C demonstrou potencial para bom desempenho anticorrosivo, com uso de constituintes de menor custo relativo (como óxidos de ferro e manganês), além de apresentar relevância técnica para aplicações em estruturas metálicas industriais.

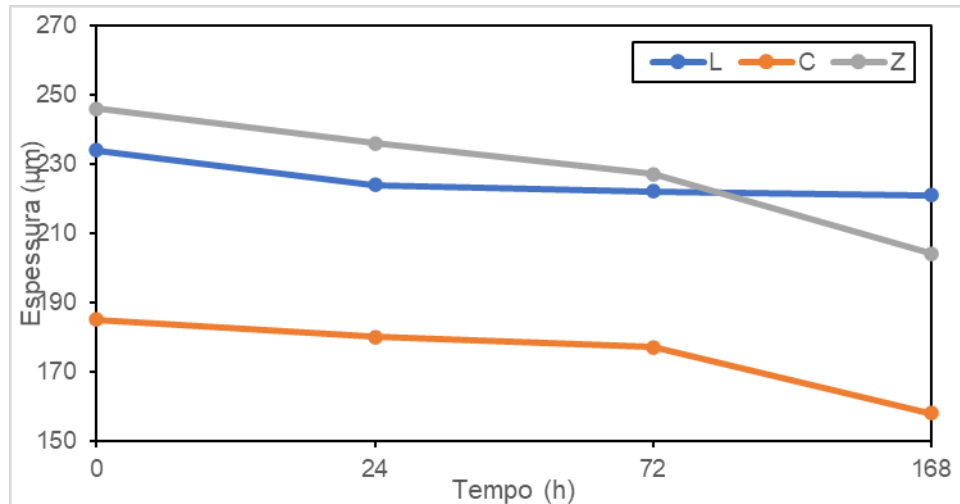
No grupo Z (Z.1 e Z.2), observou-se elevado teor de zinco, expresso como ZnO , na faixa de 66,4–67,3%, configurando o principal componente. Além disso, foi identificado Al_2O_3 entre 25,0 e 27,4%, também em teores elevados. Em menores proporções, foram detectados SiO_2 , P_2O_5 , SO_3 , CaO e Fe_2O_3 . Esses resultados evidenciaram que a amostra Z correspondeu a um revestimento altamente rico em zinco, com presença significativa de Al_2O_3 , o que a posicionou, entre as formulações avaliadas, como a tinta de maior valor comercial, especialmente para aplicações de proteção catódica. Dessa forma, esse tipo de tinta pode atuar como alternativa à galvanização a fogo em determinadas aplicações, desde que atendidas as condições de projeto, preparo superficial e espessura especificada do revestimento.

5.7 VELOCIDADE DE CORROSÃO

Na Figura 13, apresenta-se o gráfico que avaliou, no eixo X, o tempo (0, 24,

72 e 168 h) e, no eixo Y, a espessura (μm), com uma linha correspondente a cada amostra.

Figura 13 – Variação da espessura em função do tempo (24 h, 72 h e 168 h) das amostras L, C e Z



Fonte: Autor (2025).

O eixo Y foi invertido com o intuito de representar a perda de espessura ao longo do tempo. As amostras C e Z apresentaram as maiores perdas e, no último intervalo (168 h), a amostra C sofreu redução mais intensa (Tabela 6).

Tabela 6 – Taxa de corrosão por intervalo de tempo nas amostras L, C e Z ($\mu\text{m}/\text{h}$)

Intervalo	L ($\mu\text{m}/\text{h}$)	C ($\mu\text{m}/\text{h}$)	Z ($\mu\text{m}/\text{h}$)
0–24 h	0,417	0,208	0,417
24–72 h	0,042	0,062	0,188
72–168 h	0,01	0,198	0,24

Fonte: Autor (2025).

Ao analisar o comportamento geral, observou-se que todas as amostras apresentaram perda de espessura, indicando que o processo corrosivo esteve ativo. A amostra L apresentou a menor perda, o que foi determinante para que exibisse o melhor desempenho em relação às demais. A amostra C apresentou desempenho intermediário, com aceleração do processo corrosivo no intervalo final. Já a amostra Z apresentou a maior perda de espessura, indicando menor eficiência frente à corrosão. Quanto à velocidade de corrosão por intervalos, a amostra L demonstrou

redução contínua da taxa de perda de espessura ao longo das faixas de tempo, enquanto, nas amostras C e Z, observou-se aumento significativo da corrosão nas últimas 96 h. Esses resultados indicaram que a amostra L foi a mais resistente no período analisado, ao passo que a amostra Z foi a mais afetada pelo meio corrosivo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final dos ensaios, a narrativa indicou que houve resistência inicial à corrosão nesse meio específico. Por meio de FRX, foram obtidos dados da composição química das tintas das amostras L, C e Z. Com base nesses resultados, observou-se que a amostra L apresentou potencial do ponto de vista econômico quando comparada às demais, em razão de sua menor complexidade composicional. Essa constatação foi justificada pela ausência de metais como Zn, Fe ou Ti, associados a maior custo industrial.

Outro ponto relevante foi a resistência ao escoamento de água, na qual a rugosidade desempenhou papel fundamental. Quanto mais rugosa a superfície, maior tende a ser o atrito com o fluido e, conseqüentemente, maior a resistência ao fluxo. Ao longo do estudo, a tinta L apresentou valores médios de rugosidade ($R_a = 4,019 \mu\text{m}$) que posicionaram essa superfície dentro da faixa considerada adequada para aplicação de revestimentos, conforme práticas industriais consolidadas e respaldadas por normas como a ISO 8503-1 e diretrizes da NACE/SSPC.

A integração dos resultados indicou baixo desempenho quanto à resistência ao risco, sugerindo que a formulação gerou película relativamente macia, característica desejável em aplicações que demandam maior flexibilidade. Por outro lado, também foi evidenciado potencial relevante quanto ao desempenho anticorrosivo por efeito barreira, associado à boa aderência e à resistência ao escorrimento, o que contribuiu para avaliação positiva do sistema L.

Quando se trata da seleção de um revestimento para uma superfície, é crucial considerar aderência, preparo superficial e rendimento da tinta. Nesse contexto, uma rugosidade adequada, com R_a entre 1,0 e 5,0 μm , conforme a ISO 8503-1, tende a favorecer boa aderência sem consumo excessivo de tinta. Em função dessas propriedades, a tinta L mostrou-se promissora como *primer*, cumprindo a função de camada intermediária entre o substrato e a tinta de acabamento. Isso reforçou o potencial da formulação desenvolvida a partir do LCC, cujo desempenho técnico foi notório, além de sua contribuição ambiental, em razão da proposta sustentável.

Dessa forma, os resultados indicaram que é viável utilizar o LCC como alternativa de matéria-prima na fabricação de tintas. Cabe salientar que o modo de preparo da tinta da amostra L é conhecido e empregado na indústria, particularmente em sistemas aquosos à base de PVA/amido, o que pode facilitar sua

implementação em termos de mão de obra e reprodutibilidade do processo. Além disso, os dados sugeriram que o LCC apresentou potencial para competir com soluções comerciais, especialmente em aspectos relacionados a aderência e acabamento. Assim, investir no uso do LCC representou não apenas uma decisão técnica, mas também uma escolha alinhada à tendência de desenvolvimento de materiais com menor impacto ambiental, reforçando a relevância e o caráter inovador desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AHANGAR, M.; IZADI, M.; SHAHRABI, T.; MOHAMMADI, I. O efeito sinérgico do acetato de zinco no comportamento protetor do lignossulfonato de sódio para prevenção da corrosão do aço macio em eletrólito de NaCl a 3,5% em peso: estudos de superfície e eletroquímicos. **Journal of Molecular Liquids**, v. 314, p. 113617, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113617>
- ALIBAKHSHI, E.; HADDADI, S. A.; MOTLAGH, A. L.; et al. Epóxi revestimento nanocompósito à base de fosfato de cálcio e zinco com propriedades de mitigação de corrosão de barreira/ativa dupla. **Progress in Organic Coatings**, v. 163, p. 106677, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106677>
- ÁLVAREZ-PAINO, M.; MUÑOZ-BONILLA, A.; FERNÁNDEZ-GARCÍA, M. Polímeros antimicrobianos no nanomundo. **Nanomaterials**, v. 7, p. 48, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano7020048>
- APPLEMAN, B. R. Survey of accelerated test methods for anti-corrosive coating performance. *Journal of Coatings Technology*, v. 62, n. 787, p. 17–25, 1990. Disponível em: https://lib3.dss.go.th/fulltext/scan_ebook/j_coating_1990_v62_n787.pdf Acesso em: 2 out. 2025.
- ASSIS, B. V. R. D.; MEIRA, F. O.; PINA, V. G. S. S.; ANDRADE, G. F. D.; COTRIM, B. A.; RESENDE, G. O. D.; D'ELIA, E.; SOUZA, F. C. D. Inhibitory effect of Piper nigrum L. extract on the corrosion of mild steel in acidic media. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 5, p. 1830–1840, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150105>
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM A36/A36M-19. Especificação padrão para aço estrutural de carbono. **West Conshohocken**, PA, EUA: ASTM, 2019. DOI: https://doi.org/10.1520/A0036_A0036M-19
- ATTWOOD, S. C. J. Corrosion and coatings. **Journal of the Oil and Colour Chemist's Association**, v. 75, n. 4, p. 128–137, 1992. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257725403_Atmospheric_Corrosion_Rates_of_Copper_Galvanized_Steel_Carbon_Steel_and_Aluminum_in_the_Metropolitan_Region_of_Salvador_BA_Northeast_Brazil Acesso em: 2 out. 2025.
- AZEVEDO, C. R. F.; CAMPOS, B. A. Breve história da metalografia. **Revista Metalurgia e Materiais ABM**, v. 3, n. 7, p. 23–31, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258098489_Breve_historia_da_metalografia Acesso em: 3 out. 2025.
- BENHIBA, F.; SEBBAR, N. K.; BOURAZMI, H.; et al. Desempenho de inibição de corrosão de 4-(prop-2-inoil)-[1,4]-benzotiazin-3-ona contra aço macio em solução de HCl 1 M: estudos experimentais e teóricos. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, p. 25800–25818, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.091>
- BIJWE, J.; NIDHI, N.; MAJUMDAR, B. K.; SATAPATHY, B. K. Wear behavior of

friction materials based on CNSL–polymer composites: synergistic effect of ingredients. **Wear**, v. 259, p. 1068–1076, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.054>

BORGES, R. S.; SÁNCHEZ ORTIZ, B. L.; PEREIRA, A. C. M.; et al. Óleo essencial de *Rosmarinus officinalis*: uma revisão de sua fitoquímica, atividade anti-inflamatória e mecanismos de ação envolvidos. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 229, p. 29–45, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2018.09.038>

BYRNE, C.; et al. Estudo das propriedades anticorrosivas sobre aço SAE 1010 de extratos aquosos de plantas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13052>

CHAOUKI, A.; et al. Compreendendo a inibição da corrosão do aço-carbono em meio ácido por novas benzonitrilas. **Journal of Molecular Liquids**, v. 266, p. 603–616, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.103>

CHAUDHARI, A. B.; TATIYA, P. D.; HEDAO, R. K.; KULKARNI, R. D.; GITE, V. V. Poliuretano preparado a partir de poliéster-amidas de óleo de nim para revestimentos anticorrosivos autocurativos. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, p. 10189–10197, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie400942c>

CHITRA, S.; PARAMESWARI, K.; SIVAKAMI, C.; SELVARAJ, A. Sulpha Schiff Bases como inibidores de corrosão para aço macio em ácido sulfúrico 1M. **Chemical Engineering Research Bulletin**, v. 14, n. 1, p. 1–6, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3329/cerb.v14i1.3766>

COSTA, J. S.; CAMPOS, J. C.; PRADO, E. P.; LINS, V. F. C. Corrosão atmosférica em três cidades paulistas com diferentes níveis de poluição industrial. **Química Nova**, v. 48, n. 1, p. 95–102, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20250069>

DATTA, A.; MUKHERJEE, S. Evolução estrutural e morfológica em filmes metal-orgânicos e multicamadas. **Boca Raton: CRC Press**, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18161>

DEYAB, M. A.; MOHSEN, Q.; GUO, L. Aesculus hippocastanum seeds extract as eco-friendly corrosion inhibitor for desalination plants: experimental and theoretical studies. **Journal of Molecular Liquids**, v. 361, p. 119594, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119594>

DOMNICK, J.; et al. Investigação do processo de secagem de uma película de tinta à base de água para aplicações automotivas. **Engenharia Química Processos**, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S025527011000214X> Acesso em: 5 out. 2025.

DRELICH, J.; CHIBOWSKI, E.; MENG, D. D.; TERPILOWSKI, K. Superfícies e materiais hidrofílicos e superhidrofílicos. **Soft Matter**, v. 7, p. 9804–9828, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1039/c1sm05849e>

FAYOMI, O. S. I.; AKANDE, I. G.; OLUWOLE, O. O.; DARAMOLA, D. Efeito da quitosana solúvel em água no comportamento de corrosão eletroquímica do aço macio. **Chemical Data Collections**, v. 17–18, p. 321–326, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2018.10.006>

FORSYTH, M.; HINTON, B. Rare earth-based corrosion inhibitors. **Cambridge: Woodhead Publishing**, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098954>

GARDNER, G. ASTM's new coating test method addresses interactive effects of weathering and corrosion. **Journal of Protective Coatings & Linings**, v. 15, n. 9, p. 50–62, 1998. Disponível em: <https://www.paintsquare.com/library/articles/astm-new-coating-test-method-addresses-interactive-effects-of-weathering-and-corrosion>
Acesso em: 5 out. 2025.

GENTIL, V. Corrosão. 3. ed. **Rio de Janeiro: LTC**, 2007.

GENTIL, V. Corrosão. **Rio de Janeiro: LTC**, 2022.

HEGEDUS, C. R. Uma perspectiva holística da tecnologia de revestimentos. **JCT Research**, v. 1, p. 5–20, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02699613>

IBGE. Censo Demográfico 2010: Aglomerados Subnormais – Primeiros Resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/92/cd_2010_aglomerados_subnormais.pdf. Acesso em: 5 out. 2025.

ISO. ISO 9223: Corrosão de metais e ligas — Corrosividade de atmosferas — Classificação, determinação e estimativa. 2012. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/53499.html>. Acesso em: 29 mar. 2022.

JOSEPH, O. O.; FAYOMI, O. S. I.; ADENIGBA, O. A. Effect of Lecaniodiscus cupaniodes extract in corrosion inhibition of normalized and annealed mild steels in 0.5 M HCl. **Energy Procedia**, v. 119, p. 845–851, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.097>

KAYSER, J. R.; NOWAK, A. S. Perda de capacidade devido à corrosão em pontes de vigas de aço. **Journal of Structural Engineering**, v. 115, n. 6, p. 1525–1537, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:6\(1525\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:6(1525))

KOBZAR, Y. L.; FATYEYEVA, K. Ionic liquids as green and sustainable steel corrosion inhibitors: recent developments. **Chemical Engineering Journal**, v. 425, p. 131480, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131480>

LATTIMAN, B. H.; ALVES, K. M. P. Corrosão: princípios, análises e soluções. **Curitiba: Intersaberes**, 2020.

LOMONACO, D.; et al. Estudo do LCC técnico e seus principais componentes como novas larvicidas verdes. **Química Verde**, v. 11, p. 31–33, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1039/B807593D>

LUBI, M. C.; THACHILL, E. B. Cashew nut shell liquid: A versatile monomer for polymer synthesis. **Designed Monomers and Polymers**, v. 3, p. 123–153, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1163/156855500300107048>

MANSFELD, F. New approaches to atmospheric corrosion research using electrochemical techniques. In: PARKINS, R. N. **Corrosion Processes**. London; New York: Applied Science Publishers, 1982. p. 1–76.

MAZZETTO, S. E.; et al. Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 732–741, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300029>

MELCHERS, R. E. Modelo probabilístico para corrosão marinha de aço para avaliação de confiabilidade estrutural. **Journal of Structural Engineering**, v. 129, p. 1484–1493, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:11\(1484\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:11(1484))

MILELLA, P. P. Fatigue and corrosion in metals. **Springer Science & Business Media**, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-88-470-2334-4>

MOLITERNO, A.; BRASIL, R. M. L. F. Elementos para projetos em perfis leves de aço. 2. ed. **São Paulo: Blucher**, 2015.

MONTEMOR, M. F. Revestimentos funcionais e inteligentes para proteção contra corrosão: uma revisão dos avanços recentes. **Surface and Coatings Technology**, v. 258, p. 17–37, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.031>

NIKRAVESH, B.; RAMEZANZADEH, B.; SARABI, A. A.; KASIRIHA, S. M. Evaluation of the corrosion resistance of an epoxy-polyamide coating containing different ratios of micaceous iron oxide/Al pigments. **Corrosion Science**, v. 53, p. 1592–1603, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.01.010>

PATEL, R. N.; BANDYOPADHYAY, S.; GANESH, A. Cashew nut shell liquid (CNSL): a versatile monomer for polymer synthesis. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 847–854, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.028>

PBMC. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ**, 2017.

POPOOLA, L. T.; GREMA, A. S.; LATINWO, G. K.; GUTTI, B.; BALOGUN, A. S. Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation. **International Journal of Industrial Chemistry**, v. 4, n. 1, p. 1–15, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-35>

QUADROS, G. P.; RODRIGUES, L. M.; SILVA, S. N. D. Avaliação eletroquímica da cafeína como inibidor de corrosão do alumínio em meio ácido. In: Práticas de corrosão. **Belém: RFB Editora**, 2020. p. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.46898/rfb.9786599175107.10>

QUATTROCIOCCHI, D. G. S.; SANTORO, A. S.; FONSECA, T. N. M.; CONCEIÇÃO

JÚNIOR, V.; PAES, L. W. C.; CAMPOS, V. R. Técnicas experimentais e teóricas aplicadas ao estudo de inibidores orgânicos de corrosão em meio ácido. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, e57811932321, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32321>

RAJA, P. B.; ISMAIL, M.; GHOREISHIAMIRI, S.; et al. Reviews on corrosion inhibitors: a short view. **Chemical Engineering Communications**, v. 203, p. 1145–1156, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/00986445.2015.1133919>

ROCHA, J. C. D.; GOMES, J. A. D. C. P. Inibidores de corrosão naturais — Proposta de obtenção de produtos ecológicos de baixo custo a partir de resíduos industriais. **Matéria**, v. 22, n. 1, p. 1–10, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170005.0263>

ROSSENBECK, B.; EBBINGHAUS, P.; STRATMANN, M.; GRUNDMEIER, G. Corrosão proteção de Zn-fosfato contendo revestimentos de dispersão aquosa em aço: parte 1: projeto e análise de modelo de látex à base de água sobre ferro substratos. **Corrosion Science**, v. 48, n. 11, p. 3703–3715, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.12.010>

APÊNDICE

Figura 14 – Certificado do aço ASTM A36

GRUPO SIMEC

COOPERATIVA SUACORONICA DO ESPRITO SANTO S.A.

RUA LEOPOLDINA, 900 - Bairro das Leopoldinas, 800 - CEP 29140-075

Jardim América, ES, Brasil - Tel.: (027) 326-6356 / 6203 / 6386 / 6355

CNPJ n. 28.617.631/0001-35 Ins. Estadual 008243263

CERTIFICADO DE QUALIDADE

QUALITY CERTIFICATE

Genitor (Customer): FERROES L.T.D.A

Produção (Production): 101982 - B 014 X 12 (80) 7007 MR 250 LUM 1,1

Produção (Production): 108359 - C 114 X 14 (80) 7007 MR 250 LSTMA

Produto (Order Number): 100236

Nº do Fichal (Nº): 000211760

Data Emissão (Date): 19/07/2024

Partição

Designação	1 E	1 R	A	D	RE	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Nb	% Cu	% Cr	% Ni	% Sn	% Mo	% Al	% V
Produtor	(MPa)	(MPa)	%	280°	(Jv/Ls)													
101982	E499802	328,00	456,00	30,0	-	0,13	0,75	0,15	0,012	0,005	0,001	0,23	0,03	0,07	0,035	0,014	0,009	0,001
120773	E569401	322,00	444,00	24,0	-	0,13	0,69	0,15	0,017	0,004	0,000	0,29	0,09	0,08	0,020	0,014	0,009	0,002
108359	E572601	350,00	471,00	27,0	-	0,13	0,64	0,14	0,020	0,005	0,000	0,32	0,09	0,07	0,014	0,015	0,007	0,001

Propriedades Mecânicas

MECHANICAL PROPERTIES

Observação:

1. Este documento é válido para o produto especificado no pedido. Os resultados são válidos para o produto especificado no pedido.

2. A SIMEC não se responsabiliza por erros de interpretação ou uso indevido dos resultados.

3. Quando requisitado o teste de impacto Charpy V1000, a SIMEC não se responsabiliza por erros de interpretação ou uso indevido dos resultados.

4. Quando requisitado o teste de impacto Charpy V1000, a SIMEC não se responsabiliza por erros de interpretação ou uso indevido dos resultados.

Análise Química - Chemical Analysis (%)

INCLUSÃO ASTM E45

Designação	1 E	1 R	A	D	RE	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Nb	% Cu	% Cr	% Ni	% Sn	% Mo	% Al	% V
Produtor	(MPa)	(MPa)	%	280°	(Jv/Ls)													
101982	E499802	328,00	456,00	30,0	-	0,13	0,75	0,15	0,012	0,005	0,001	0,23	0,03	0,07	0,035	0,014	0,009	0,001
120773	E569401	322,00	444,00	24,0	-	0,13	0,69	0,15	0,017	0,004	0,000	0,29	0,09	0,08	0,020	0,014	0,009	0,002
108359	E572601	350,00	471,00	27,0	-	0,13	0,64	0,14	0,020	0,005	0,000	0,32	0,09	0,07	0,014	0,015	0,007	0,001

Legenda / Legend

1 E - Limite de Escoamento / Yield Point

1 R - Limite de Resistência / Tensile Strength

A - Alongamento / Elongation

D - Dobramento / Bend

RE - Trabalho a Frio / Cold Formability

TG - Trabalho a Quente / Hot Formability

ASTM E112 - Medida de Inclusão / Inclusion Measurement

Legenda / Legend

1 E - Limite de Escoamento / Yield Point

1 R - Limite de Resistência / Tensile Strength

A - Alongamento / Elongation

D - Dobramento / Bend

RE - Trabalho a Frio / Cold Formability

TG - Trabalho a Quente / Hot Formability

ASTM E112 - Medida de Inclusão / Inclusion Measurement

Assinatura / Signature:

Juliana Freitas Canali

Analista de Qualidade

Assinatura / Signature:

Juliana Freitas Canali

Analista de Qualidade