



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA E FÍSICO QUÍMICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA**

**CHIARA ZIMMARO MAZZARI**

**INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS NO  
DESEMPENHO ANTICORROSIVO DE REVESTIMENTO POLIASPÁRTICO**

**FORTALEZA**

**2025**

INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS NO DESEMPENHO  
ANTICORROSIVO DE REVESTIMENTO POLIASPÁRTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Química do Centro de  
Ciências da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial à obtenção do grau de  
Bacharelado em Química.

Orientador: Prof. LD. Francisco Belmino  
Romero.

Coorientador: Dr. Daniel de Castro Girão.

FORTALEZA

2025

INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS NO DESEMPENHO  
ANTICORROSIVO DE REVESTIMENTO POLIASPÁRTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Química do Centro de  
Ciências da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial à obtenção do grau de  
Bacharelado em Química.

Aprovada em: 16/12/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. LD. Francisco Belmino Romero (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Walney Silva Araújo (Orientador  
Profissional)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Otilio Braulio Freire Diógenes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha família e amigos, que sempre acreditaram em mim. Ao meu avô, exemplo de integridade e amor, agradeço por todo o apoio e carinho. À minha mãe, minha maior inspiração e melhor amiga, por ser meu alicerce em todos os momentos. À memória do meu pai e da minha avó, dedico este trabalho na esperança de que seja motivo de orgulho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Instituição FASTEF pelo apoio financeiro, fundamental para a manutenção da bolsa de auxílio durante a graduação.

Ao Prof. LD. Francisco Belmino Romero, minha sincera gratidão pela orientação atenciosa e inspiradora ao longo deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora — Prof. Dr. Walney Silva Araújo, Dr. Otílio Diógenes e Dr. Daniel Girão — agradeço pela generosidade em dedicar seu tempo, bem como pelas valiosas contribuições e sugestões.

À minha família, que sempre acreditou em mim, torceu pelas minhas conquistas e me incentivou a seguir firme na busca pelos meus sonhos.

Ao meu companheiro de vida e grande amor, Leandro Amaral, por estar ao meu lado em cada momento desta caminhada. Seu apoio, carinho e presença constante foram essenciais para que eu superasse os desafios da graduação.

À minha querida amiga Thayná Vasconcelos, cujo sorriso acolhedor e amizade sincera foram um verdadeiro abrigo. Sou eternamente grata por tudo.

À minha grande amiga Samile Sousa, cuja presença e apoio incondicional foram essenciais em praticamente toda a minha trajetória acadêmica. Sou imensamente grata por ter você na minha vida.

Aos amigos e colegas de trabalho do LPC, Carlos Henrique, Ana Aline, Luis Gustavo, Joshua Ribeiro, Mateus Carvalho e Letícia Vasconcelos, que contribuíram imensamente para minha formação profissional e tornaram o dia a dia mais leve e divertido com suas companhias.

Aos colegas de laboratório, meu agradecimento pelo apoio direto na realização deste trabalho, pela disposição e preocupação constante.

E aos grandes amigos da graduação — Artur Craveiro, Rayssa Monteiro, Alice Maria, Carlos Augusto, Artur Vasconcelos e Vitório Augusto— obrigada por tornarem essa jornada tão especial. Vocês iluminaram meus dias e guardo cada momento com muito carinho.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde fui bolsista de iniciação científica, estagiária e onde desenvolvi este trabalho, que além de ambiente profissional foi um segunda casa e me trouxe muito aprendizado e experiência profissional.

"Nosso destino vive dentro de nós. Você só tem  
que ser corajoso o suficiente para vê-lo."  
(Mérida, Valente)

## RESUMO

O presente estudo tem como objetivo investigar a influência da aditivação de nanopartículas à base de grafeno e nano cobre, sobre a performance anticorrosiva de um revestimento poliaspártico comercial. Partindo da premissa de que a nanotecnologia pode aprimorar as propriedades protetivas de revestimentos orgânicos, esta pesquisa avalia comparativamente a formulação pura e a versão aditivada com as referidas nanopartículas. A metodologia experimental consistiu na utilização de substratos de aço carbono, cuja preparação de superfície e aplicação de revestimentos foram realizadas por uma empresa parceira especializada em nanotecnologia, responsável pelo fornecimento das amostras. Posteriormente, as peças foram submetidas a dois cenários distintos de degradação. O primeiro consistiu na exposição ao envelhecimento natural em ambiente de corrosão atmosférica urbana, no campus da Universidade Federal do Ceará (Pici). O segundo cenário empregou ensaios acelerados em câmara de névoa salina (salt spray), simulando um ambiente marinho de alta agressividade. Para uma análise quantitativa do desempenho, foram utilizadas múltiplas técnicas de caracterização. A aderência dos revestimentos ao substrato foi avaliada pelo método de arrancamento (pull-off). As propriedades de barreira e a resistência à penetração de eletrólitos foram investigadas por meio da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE). Adicionalmente, avaliou-se a capacidade do sistema protetivo em retardar a progressão da corrosão a partir de uma incisão deliberada no filme. De forma complementar, realizou-se um acompanhamento visual periódico por meio de registros fotográficos semanais, visando documentar a evolução de defeitos como empolamento, a formação de produtos de corrosão e a progressão geral do processo degradativo. O estudo concluiu que a adição de nanopartículas ao revestimento poliaspártico não melhorou a performance anticorrosiva nas condições avaliadas, tendo, em diversos cenários, um efeito adverso. Nos testes de corrosão atmosférica (UFC), o revestimento puro demonstrou desempenho de barreira excepcional ( $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ), superior aos sistemas aditivados. Contudo, em névoa salina, todos os sistemas (puros e aditivados) apresentaram baixa proteção (abaixo de  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ). Uma limitação crítica identificada em ambas as condições foi a baixa aderência de todas as amostras ao substrato de aço carbono, falhando em atender aos requisitos de aderência (mínimo de 8 MPa) da norma Petrobras N-2943:2022.

**Palavras-chave:** corrosão; revestimentos poliaspárticos; nanopartícula aditiva; aço carbono

## ABSTRACT

The present study aims to investigate the influence of graphene-based and nano-copper nanoparticle additives on the anti-corrosive performance of a commercial polyaspartic coating. Based on the premise that nanotechnology can enhance the protective properties of organic coatings, this research comparatively evaluates the neat formulation and the versions containing these nanoparticles. The experimental methodology involved carbon steel substrates, with surface preparation and coating application performed by a partner company specializing in nanotechnology, which also provided the samples. Subsequently, the specimens were subjected to two distinct degradation scenarios. The first involved natural weathering in an urban atmospheric corrosion environment at the Federal University of Ceará (UFC) Pici campus. The second scenario employed accelerated salt spray chamber tests, simulating a highly aggressive marine environment. To quantitatively analyze performance, several characterization techniques were employed. Coating-to-substrate adhesion was evaluated using the pull-off test method. Barrier properties and resistance to electrolyte penetration were investigated using Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). Furthermore, the protective system's capacity to retard corrosion progression starting from a deliberate scribe in the film was evaluated. In addition, periodic visual inspections were conducted through weekly photographic records to document the evolution of defects such as blistering, the formation of corrosion products, and the overall progression of the degradation process. The study concluded that adding nanoparticles to the polyaspartic coating did not improve anti-corrosive performance under the evaluated conditions and, in several scenarios, had an adverse effect. In atmospheric corrosion tests (UFC), the neat coating demonstrated exceptional barrier performance ( $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ), outperforming the nano-additive systems. However, in the salt spray environment, all systems (both neat and additivated) exhibited poor protection (below  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ). A critical limitation identified in both exposure conditions was the poor adhesion of all samples to the carbon steel substrate, which failed to meet the minimum adhesion requirement (8 MPa) of the Petrobras N-2943:2022 standard.

**Keywords:** corrosion; polyaspartic coatings; additive nanoparticle; carbon steel

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reação de formação do revestimento poliaspártico .....	27
Figura 2 – Representação dos diferentes tipos de falhas identificadas no ensaio de aderência utilizando o método <i>pull-off</i> .....	29
Figura 3 – Padrões visuais para avaliação do grau de corrosão em torno de um risco .....	31
Figura 4 – Amostras durante o ensaio de exposição em câmara de névoa salina. ....	36
Figura 5 – Amostras expostas na Estação de Corrosão Atmosférica. ....	37
Figura 6 – Localização geográfica da Estação Meteorológica Fortaleza -Itaperi .....	37
Figura 7 – Diagrama de Bode (módulo) para as amostras de referência em relação ao tempo; a)B200 b)B300.....	41
Figura 8 – Diagrama de Bode (módulo) para a formulação 1 em relação ao tempo; a)F1 200 b)F1 300.....	42
Figura 9 – Diagrama de Bode (módulo) para a formulação 2 em relação ao tempo ; a)F2 200 b)F2 300.....	42
Figura 10 – Módulo de impedância em 0,01Hz em função do tempo (Câmara de Névoa Salina).....	43
Figura 11 – Evolução do processo corrosivo na região da incisão .....	44
Figura 12 – Ensaio de <i>Pull-Off</i> realizado nas amostras antes e após a exposição à câmara de névoa salina.....	47
Figura 13 – Gráfico da força de adesão (MPa) pré exposição e após 1500h para as amostras submetidas a câmara de névoa salina.....	48
Figura 14 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra B 200.....	49
Figura 15 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra B 300.....	49
Figura 16 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F1 200.....	49
Figura 17 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F1 300.....	50
Figura 18 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F2 200.....	50

Figura 19 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F2 300.....	51
Figura 20 – Dados meteorológicos levantados durante o período de estudo avaliado.....	52
Figura 21 – Diagrama de Bode (módulo) para as amostras de referência em relação ao tempo; a)B200 b)B300 .....	57
Figura 22 – Diagrama de Bode (módulo) para a formulação 1 em relação ao tempo; a)F1 200 b)F1 300.....	58
Figura 23 – Diagrama de Bode (módulo) para a formulação 2 em relação ao tempo; a)F2 200 b)F2 300.....	58
Figura 24 – Módulo de impedância em 0,01Hz em função do tempo (Estação de Corrosão Atmosférica) .....	59
Figura 25 – Evolução do processo corrosivo na região da incisão. ....	60
Figura 26 – Ensaio de <i>Pull-Off</i> realizado nas amostras antes e após a exposição na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC.....	62
Figura 27 – Gráfico da força de adesão (MPa) pré exposição e após 1500h para as amostras expostas na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC. ....	63
Figura 28 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra B200 .....	64
Figura 29 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra B300 .....	64
Figura 30 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F1 200.....	64
Figura 31 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F1 300.....	65
Figura 32 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F2 200.....	65
Figura 33 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F2 300.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos estruturais dos revestimentos orgânicos .....	26
Tabela 2 – Correlação do avanço da corrosão com o grau de degradação.....	31
Tabela 3 – Nomenclatura dos corpos de prova.....	34
Tabela 4 – Medidas de espessura ( $\mu\text{m}$ ) para as amostras do ensaio de névoa salina.....	40
Tabela 5 – Evolução do processo corrosivo na incisão (ensaio de névoa salina, 1500 h).	45
Tabela 6 – Medidas de espessura ( $\mu\text{m}$ ) para as amostras expostas na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC. ....	51
Tabela 7 – Taxa de deposição de cloreto .....	53
Tabela 8 – Taxa de deposição de $\text{SO}_2$ .....	54
Tabela 9 – Classificação de microclima .....	55
Tabela 10 – Classificação do grau de corrosividade para aço carbono .....	56
Tabela 11 – Evolução do processo corrosivo na incisão (Estação de Corrosão Atmosférica, 1500 h).....	61

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI American Iron and Steel Institute

COVs Compostos Orgânicos Voláteis

EIE Espectroscopia de Impedância eletroquímica

ISO Organização Internacional de Normalização

UFC Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$	Micro
$ Z $	Módulo de Impedância
$\Omega$	Ohm

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	18
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
<b>3.1</b>	<b>Corrosão</b> .....	19
<b>3.2</b>	<b>Mecanismo de corrosão do aço carbono</b> .....	19
<b>3.2.1</b>	<i>Meio Aquoso</i> .....	19
<b>3.2.2</b>	<i>Corrosão Atmosférica</i> .....	21
<b>3.2.2.1</b>	<i>Mecanismo Eletroquímico da Corrosão Atmosférica</i> .....	22
<b>3.2.2.2</b>	<i>A Influência do Ambiente na Degradação</i> .....	23
<b>3.2.2.2.1</b>	Umidade .....	23
<b>3.2.2.2.2</b>	Temperatura .....	23
<b>3.2.2.2.3</b>	Salinidade.....	23
<b>3.2.2.2.4</b>	Acidez e Alcalinidade (pH).....	23
<b>3.2.2.2.5</b>	Radiação.....	24
<b>3.2.2.2.6</b>	Velocidade dos Ventos .....	24
<b>3.2.2.2.7</b>	Concentração de Oxigênio .....	24
<b>3.2.2.2.8</b>	Poluentes Atmosféricos.....	24
<b>3.3</b>	<b>Revestimentos</b> .....	25
<b>3.4</b>	<b>Revestimentos Orgânicos Anticorrosivos</b> .....	25
<b>3.5</b>	<b>Revestimento Poliaspártico</b> .....	26
<b>3.6</b>	<b>Revestimentos Nano-Modificados</b> .....	27
<b>3.6.1</b>	<i>Grafeno</i> .....	28
<b>3.6.2</b>	<i>Nano Cobre</i> .....	28
<b>3.7</b>	<b>Aderência</b> .....	29
<b>3.8</b>	<b>Avaliação da Degradação</b> .....	30
<b>3.8.1</b>	<i>Acompanhamento da corrosão a partir de um dano mecânico</i> .....	30
<b>3.8.2</b>	<i>Grau de empolamento</i> .....	31
<b>3.9</b>	<b>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica</b> .....	31
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	33

<b>4.1</b>	<b>Substrato Metálico e Revestimento</b> .....	33
<b>4.2</b>	<b>Preparação dos Corpos de Prova</b> .....	33
<b>4.3</b>	<b>Espessura</b> .....	34
<b>4.4</b>	<b>Dano Mecânico (Incisão)</b> .....	34
<b>4.5</b>	<b>Ensaio de Aderência</b> .....	34
<b>4.6</b>	<b>Análise Superficial</b> .....	35
<b>4.7</b>	<b>Ensaio Acelerado de Corrosão</b> .....	35
<b>4.8</b>	<b>Ensaio de Corrosão Atmosférica</b> .....	36
<b>4.8.1</b>	<b><i>Coletores de Contaminantes Atmosféricos</i></b> .....	38
<b>4.8.1.1</b>	<b><i>Análise de Cloretos</i></b> .....	38
<b>4.8.1.2</b>	<b><i>Análise de Sulfatos</i></b> .....	38
<b>4.8.1.3</b>	<b><i>Análise de Material Particulado</i></b> .....	39
<b>4.9</b>	<b>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica</b> .....	39
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	40
<b>5.1</b>	<b>Ensaio Acelerado de Corrosão</b> .....	40
<b>5.1.1</b>	<b><i>Espessura dos Revestimentos</i></b> .....	40
<b>5.1.2</b>	<b><i>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica</i></b> .....	40
<b>5.1.3</b>	<b><i>Avaliação do avanço da corrosão a partir da incisão</i></b> .....	43
<b>5.1.4</b>	<b><i>Ensaio de Aderência</i></b> .....	46
<b>5.1.5</b>	<b><i>Análise de Superfície</i></b> .....	48
<b>5.2</b>	<b>Ensaio de Corrosão Atmosférica</b> .....	51
<b>5.2.1</b>	<b><i>Espessura do Revestimento</i></b> .....	51
<b>5.2.2</b>	<b><i>Parâmetros atmosféricos e deposição de contaminantes</i></b> .....	51
<b>5.2.3</b>	<b><i>Taxa de Deposição de Contaminantes</i></b> .....	53
<b>5.2.3.1</b>	<b><i>Salinidade e Poluentes</i></b> .....	53
<b>5.2.3.2</b>	<b><i>Umidade e Classificação do Ambiente Corrosivo</i></b> .....	54
<b>5.3</b>	<b>Espectroscopia de Impedância Eletroquímica</b> .....	57
<b>5.4</b>	<b>Avaliação do avanço da corrosão a partir da incisão</b> .....	59
<b>5.5</b>	<b>Ensaio de Aderência</b> .....	62
<b>5.5.1</b>	<b><i>Análise de Superfície</i></b> .....	63
<b>5.6</b>	<b>Ensaio Acelerado x Corrosão Atmosférica</b> .....	66
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	67

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69
--------------------------	----

## 1 INTRODUÇÃO

A corrosão resulta na degradação de materiais, geralmente metálicos, comprometendo a integridade e segurança de estruturas e gerando perdas econômicas substanciais. A exposição a ambientes agressivos, como alta umidade, salinidade, produtos químicos e variações de temperatura, acelera a degradação desses componentes metálicos (Thakur et al., 2023). A compreensão aprofundada desse fenômeno é fundamental para impulsionar a busca por soluções inovadoras, capazes de interromper ou, quando não, retardar a reação de degradação.

Nesse contexto, os revestimentos anticorrosivos, especialmente os de origem orgânica, surgem como uma das estratégias mais versáteis para proteger substratos metálicos e prolongar a vida útil de equipamentos e estruturas. Os revestimentos poliméricos são amplamente utilizados para proteger estruturas metálicas, atuando como uma barreira física que isola a superfície do contato com o ambiente corrosivo. Entre os diversos tipos de polímeros utilizados em revestimentos, os poliaspárticos têm se destacado como uma solução inovadora e ecologicamente correta para a proteção de metais. Sua formulação possui alto teor de sólidos, o que significa menor emissão de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). Além disso, suas propriedades incluem cura rápida, forte adesão ao substrato, durabilidade da cor e excelentes características de barreira contra agentes corrosivos, além de notável resistência a intempéries (Liu et al., 2022). Graças a essas características, os revestimentos poliaspárticos são amplamente empregados na proteção de equipamentos em ambientes industriais agressivos, onde a combinação de resistência mecânica e integridade estrutural é essencial (Weg S.A, 2025).

Este trabalho propõe a modificação de um revestimento poliaspártico com uma nanopartícula à base de grafeno e nano cobre, para aprimorar sua performance na proteção de aço carbono, avaliando a influência dessa aditivação. O desempenho do revestimento aditivado foi testado em dois cenários de exposição: uma estação de corrosão atmosférica situada na UFC, Campus do Pici (Fortaleza, CE – Brasil), e em uma câmara de ensaios acelerados de névoa salina. A avaliação comparativa dessas amostras permitiu verificar a eficácia da nanopartícula na melhoria da resistência do revestimento.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo determinar a influência da incorporação da nanopartícula no desempenho anticorrosivo de um revestimento poliaspártico aplicado sobre aço carbono, através de ensaios de corrosão atmosférica e acelerada.

### 2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a adesão do revestimento ao substrato utilizando o método *pull-off*, conforme a norma ASTM D4541:2022;
- Avaliar a propriedade de proteção contra corrosão dos revestimentos após os ensaios acelerados de Névoa Salina, conforme a norma ASTM B117;
- Avaliar a propriedade de proteção contra corrosão dos revestimentos após os ensaios corrosão atmosférica, conforme as normas ABNT NBR 6209:2007 e ISO 11474:1998 ;
- Avaliar o avanço da corrosão em torno de um dano mecânico (risco), em conformidade com a norma ISO 4628- 8:2005;
- Monitorar a degradação do aço carbono por meio da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica;
- Avaliar formação de bolhas (empolamento) por meio de monitoramento fotográfico periódico;
- Avaliar dados meteorológicos e de poluentes atmosféricos para a classificação do microclima local;
- Comparar a degradação para as amostras submetidas a ensaios acelerados de corrosão e a corrosão atmosférica;

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Corrosão

Corrosão é a deterioração de um material geralmente metálico causada por uma reação química ou eletroquímica com o meio ambiente, podendo ou não, estar associada a esforços mecânicos (Gentil, 2022). Este processo de degradação representa um enorme passivo econômico e gera graves problemas ambientais em setores vitais como os das indústrias aeroespacial, automobilística, petrolífera e de energia (Yelwa et al.,2025).

De acordo com a National Association of Corrosion Engineers (NACE AMPP), o custo anual global da corrosão atinge a marca impressionante de US\$ 3,38 trilhões, o que equivale a aproximadamente 3,5% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial (Passivar, 2025).

A corrosão é intrinsecamente um processo eletroquímico. Ela ocorre através de reações de oxirredução (redox), que envolvem a transferência de elétrons entre um ânodo (onde ocorre a oxidação) e um cátodo (onde ocorre a redução), geralmente em meio aquoso (solução eletrolítica) (Diógenes, 2023).

É um processo espontâneo, contínuo e exergônico (com liberação de energia). Ele atua transformando o metal em sua forma termodinamicamente mais estável— ou seja,, retornando o metal ao seu estado original (minério), porém sob a forma de produtos da corrosão (como óxidos, hidróxidos ou sais) (Callister, 2016).

#### 3.2 Mecanismo de corrosão do aço carbono

##### 3.2.1 Meio Aquoso

Para compreender o processo de corrosão do aço carbono, material em estudo neste trabalho, é necessário conhecer o mecanismo eletroquímico que ocorre quando esse metal é exposto a um meio aquoso.

Nas regiões denominadas anódicas, o ferro metálico sofre oxidação, passando à solução na forma de íons ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ). Essa dissolução ocorre em proporção equivalente às reações de redução que acontecem nas áreas catódicas. A reação anódica característica é expressa por:



A reação (3.1) ocorre em todos os pH, mas a taxa de corrosão varia conforme a redução catódica.

Entre pH 4 e 10, um depósito poroso de óxido ferroso protege a superfície, mantendo o pH em 9,5 sob ele, e a corrosão é controlada pela difusão do oxigênio dissolvido (Jones,1996)

As reações catódicas possíveis são:

- Em soluções mais ácidas, pH abaixo de 4, o óxido é solúvel e a corrosão aumenta, devido à disponibilidade de ( $H^+$ ) para redução por:



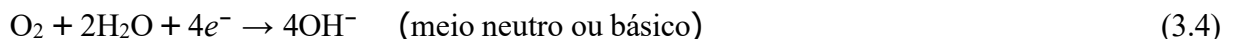
A ausência do depósito superficial aumenta o acesso do oxigênio dissolvido, elevando a taxa de corrosão. Na faixa intermediária de pH, a corrosão é controlada pela difusão uniforme do oxigênio através do depósito, sendo sua redução catódica, sob o depósito, representada por:

- Em meio ácido, o oxigênio dissolvido é reduzido conforme:



As reações (3.2) e (3.3) ocorrem simultaneamente em soluções ácidas com oxigênio dissolvido. A intensidade do processo corrosivo aumenta quanto menor for o valor do pH (maior concentração de  $H^+$ ) e quanto maior for a concentração de oxigênio no meio corrosivo (Gentil,2022).

- Em meio neutro ou básico, a redução do oxigênio dissolvido ocorre como:



O produto de corrosão resulta da combinação entre os íons gerados nas reações anódicas e catódicas. Os produtos das reações anódicas migram em direção ao cátodo, enquanto os produtos catódicos migram ao ânodo, formando, em uma região intermediária, o hidróxido ferroso — proveniente da interação entre íons ferro ( $Fe^{2+}$ ) e íons hidroxila ( $OH^-$ ) (Gentil,2022), conforme a equação:



O hidróxido ferroso [ $Fe(OH)_2$ ] é instável e pode sofrer transformações conforme o teor de oxigênio do meio.

Em meio deficiente de oxigênio, ocorre a formação de magnetita, segundo a equação:

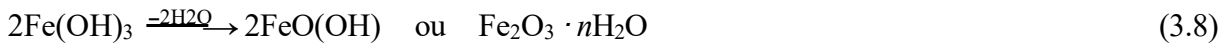


Nessa reação, forma-se a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), um produto de coloração preta (forma anidra) ou esverdeada (forma hidratada), típica de ambientes com baixo teor de oxigênio.

Por outro lado, em meio aerado, com presença de oxigênio e água, o hidróxido ferroso é oxidado, originando o hidróxido férrico [ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ], conforme as reações descritas por (Gentil,2022):



ou ainda:



O composto  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (em que  $n$  representa o número de moléculas de água) é conhecido como ferrugem.

Essas reações explicam as variações de coloração observadas nos fenômenos de corrosão do aço e suas ligas. A coloração alaranjada ou castanho-avermelhada, típica das áreas com maior exposição ao oxigênio, é provocada pela presença do hidróxido férrico [ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ] (Gentil,2022).

### 3.2.2 Corrosão Atmosférica

O processo de corrosão atmosférica é intrinsecamente ligado às condições ambientais, sendo catalisado pela presença de um eletrólito aquoso na superfície do material, originado por chuva, respingos e umidade do ar. A taxa de difusão de oxigênio, um dos principais agentes oxidantes, é acentuadamente maior em filmes finos de água do que em condições de imersão total. Este fato explica por que a zona de respingos (do inglês *splash zone*) exibe uma agressividade corrosiva superior. Em contraste, a ação de lavagem periódica pela chuva ou pela variação de marés pode diminuir a severidade do processo ao diluir e remover sais e poluentes depositados (Jones,1996).

A taxa de degradação atmosférica é modulada por uma gama de variáveis ambientais, incluindo a concentração de poluentes, a salinidade, o pH do eletrólito, a incidência de radiação solar e, crucialmente, os níveis de umidade (Thakur et al.,2023). A variabilidade geográfica desses parâmetros exige que os métodos de proteção contra a corrosão sejam desenvolvidos e especificados com base em uma análise detalhada das condições locais, uma vez que abordagens generalistas se mostram ineficazes.

### 3.2.2.1 Mecanismo Eletroquímico da Corrosão Atmosférica

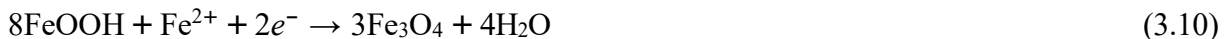
A corrosão atmosférica do aço é um processo eletroquímico que se inicia com a formação de uma fina camada de óxido, composta por uma subcamada interna de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e uma externa de hidróxidos de ferro ( $\text{FeOOH}$ ). Em atmosferas não poluídas, este filme de óxido tende a ser protetor, pois seus poros são preenchidos por produtos de corrosão que limitam o acesso do eletrólito à superfície metálica (Evans & Taylor, 1972).

Na presença de poluentes como o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), a passividade desta camada é comprometida. O  $\text{SO}_2$  reage com a umidade e o oxigênio para formar ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) nos poros do filme, dissolvendo-o parcialmente e gerando sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ). Este sal é higroscópico, absorvendo umidade do ar e mantendo a superfície molhada mesmo em umidades relativas mais baixas, o que acelera significativamente o processo corrosivo ao garantir a presença contínua de um eletrólito (Evans & Taylor, 1972).

Segundo (Jones, 1996; Evans & Taylor, 1972), o mecanismo prossegue através de um ciclo regenerativo, conhecido como "Ciclo Eletroquímico". A dissolução anódica do substrato metálico ocorre sob a camada de magnetita:



A reação catódica correspondente ocorre na interface entre a ferrugem ( $\text{FeOOH}$ ) e a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), onde o próprio hidróxido de ferro atua como agente oxidante, sendo reduzido para formar mais magnetita:



Finalmente, o ciclo se fecha quando a magnetita recém-formada é reoxidada a ferrugem ( $\text{FeOOH}$ ) pelo oxigênio atmosférico que penetra pelas fissuras na camada externa:



Dessa forma, o poluente ( $\text{SO}_2$ ) atua como um catalisador que desestabiliza a camada protetora, permitindo que um ciclo eletroquímico autossustentável se estabeleça, no qual a ferrugem é continuamente consumida e regenerada, perpetuando a corrosão do metal base.

### 3.2.2.2 A Influência do Ambiente na Degradação

#### 3.2.2.2.1 Umidade

A presença de umidade é uma condição indispensável para a corrosão atmosférica, pois forma um fino filme de eletrólito sobre a superfície metálica, meio no qual ocorrem as reações eletroquímicas. Este eletrólito, quando saturado com oxigênio dissolvido, constitui o principal agente corrosivo (Yelwa et al., 2025).

#### 3.2.2.2.2 Temperatura

A temperatura é um fator cinético fundamental que acelera a maioria das reações químicas. De forma análoga, os processos de corrosão, em sua maioria, podem ser termicamente dependentes, intensificando-se, em geral, com o aumento da temperatura do sistema (Callister, 2016). Em condições normais, as taxas de corrosão permanecem baixas, embora a condensação de filmes aquosos possa intensificá-las. A exposição solar eleva a temperatura da superfície, mas não necessariamente acelera o processo. Já em ambientes de alta temperatura e umidade, há aumento significativo da corrosão devido à maior mobilidade iônica e à desestabilização das películas protetoras (Yelwa et al. 2025).

#### 3.2.2.2.3 Salinidade

A elevada agressividade corrosiva das atmosferas marinhas está diretamente associada à sua salinidade, originária de aerossóis de água do mar ricos em cloreto de sódio (NaCl) (Callister, 2016). A notória capacidade de aceleração da degradação metálica por este ambiente deve-se, especificamente, à ação do íon cloreto ( $Cl^-$ ). Este íon é particularmente danoso por sua habilidade de quebrar a passividade dos metais, penetrando na camada de óxido protetora e ativando a superfície metálica mesmo em baixas concentrações. Uma vez iniciada a corrosão, a migração contínua dos cloretos para o substrato sustenta o processo degradativo (Xing, 2018).

#### 3.2.2.2.4 Acidez e Alcalinidade (pH)

A acidez ou alcalinidade do meio impacta diretamente a estabilidade tanto do substrato metálico quanto do revestimento protetor aplicado (Peltier & Thierry, 2024). A passivação da maioria dos metais é favorecida em meios com pH básico (alcalino). Para os metais anfóteros,

no entanto, a condição ótima para a formação da camada passiva ocorre em uma faixa de pH neutra ou ligeiramente básica (Nunes & Lobo, 1990).

#### 3.2.2.2.5 Radiação

A radiação ultravioleta, especialmente a banda UV-B, apesar do alto percentual de radiação UV-A presente no espectro solar, atua como o principal agente de degradação de revestimentos poliméricos em ambientes atmosféricos. O mecanismo de deterioração baseia-se na foto-oxidação, processo que induz a cisão de cadeias e o aumento da reticulação da matriz polimérica. Macroscopicamente, isso resulta em fragilização, perda de brilho, gizamento e fissuramento do filme. A formação de micro e macroporos cria caminhos capilares que permitem a permeação de agentes agressivos até o substrato, desencadeando a corrosão sob o revestimento. Além disso, o aumento da rugosidade superficial favorece a retenção de umidade e o desenvolvimento de corrosão biológica (Kotnarowska, 2018).

#### 3.2.2.2.6 Velocidade dos Ventos

O ar atmosférico transporta umidade, aerossóis salinos, gases industriais e material particulado. Nesse contexto, o regime de ventos influencia significativamente a corrosão, atuando tanto no transporte desses contaminantes — favorecendo efeitos sinérgicos de degradação — quanto pela ação mecânica (abrasão) sobre o material em condições de alta velocidade (Nunes & Lobo 1990; Girão 2019).

#### 3.2.2.2.7 Concentração de Oxigênio

Em meios de pH neutro ou aproximadamente neutro, o oxigênio dissolvido atua como o principal agente despolarizante da reação catódica. Sob estas condições, a velocidade da corrosão é frequentemente controlada pela taxa de difusão do oxigênio até a superfície catódica (Nunes & Lobo, 1990; Yelwa et al., 2025).

#### 3.2.2.2.8 Poluentes Atmosféricos

A agressividade corrosiva de atmosferas urbanas e industriais é intensificada pela presença de poluentes gasosos, com destaque para o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), um subproduto da queima de combustíveis (Evans & Taylor, 1972). Poluentes como o dióxido de enxofre

(SO<sub>2</sub>), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) dissolvem-se na umidade condensada. Este processo forma ácidos corrosivos — por exemplo, o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e o ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) — que resultam na corrosão por chuva ácida. Essa forma de corrosão é extremamente agressiva, atacando não apenas muitos metais, mas comprometendo a integridade de certos revestimentos poliméricos e inorgânicos após exposição prolongada (Branko N & Popov, 2015).

É fundamental notar que, em ambientes reais de operação, os mecanismos corrosivos raramente atuam de forma isolada. Pelo contrário, eles frequentemente interagem, gerando efeitos sinérgicos. Essa combinação de forças faz com que os processos de degradação acelerem a uma taxa muito superior à soma dos efeitos individuais.

### **3.3 Revestimentos**

Os revestimentos são métodos de controle de corrosão que atuam fundamentalmente como uma barreira física, isolando a superfície metálica do meio corrosivo. Além desse mecanismo primário de barreira, eles podem conferir proteção por princípios secundários, como a proteção catódica ou a passivação anódica. Os principais tipos de revestimentos empregados no controle da corrosão classificam-se em: metálicos, não metálicos inorgânicos e orgânicos (Nunes & Lobo, 1990).

### **3.4 Revestimentos Orgânicos Anticorrosivos**

A indústria de tintas e revestimentos foi revolucionada a partir do final do século XX com o advento e a consolidação dos polímeros, que hoje constituem a base das formulações modernas. Essa evolução permitiu a criação de uma vasta gama de produtos em escala global.

Definido por (Nunes & Lobo, 1990), um revestimento orgânico consiste na interposição de uma camada de natureza orgânica entre a superfície metálica e o meio corrosivo. Sua principal função é atuar como barreira física entre o substrato e o meio corrosivo.

Os revestimentos orgânicos são, na verdade, sistemas complexos formados por uma combinação estratégica de três componentes principais: ligante, pigmentos e solvente. Adicionalmente, aditivos podem ser incorporados em menores proporções para conferir propriedades especiais e otimizar o desempenho final do produto (Branko N & Popov, 2015). A Tabela 1 resume as principais funções e propriedades de cada um desses componentes.

Tabela 1 – Elementos estruturais dos revestimentos orgânicos

<b>Componente</b>	<b>Função Primária</b>	<b>Detalhes</b>
<b>Ligante (Resina)</b>	Formação do Filme Contínuo	É o componente fundamental que, após a aplicação e cura, forma a matriz polimérica que adere ao substrato. Sua classificação define a química da tinta (Exemplos: acrílicos, epóxis, poliésteres, poliuretanos e poliaspárticos).
<b>Pigmentos</b>	Estética e Funcionalidade	Partículas sólidas dispersas na matriz. Conferem propriedades estéticas (cor, brilho) e funcionais (proteção anticorrosiva, resistência mecânica e a riscos).
<b>Solvente</b>	Controle da Viscosidade	Composto orgânico ou água, atua dissolvendo as cadeias poliméricas do ligante. É essencial para permitir que o revestimento seja aplicado na forma líquida, facilitando a formação de uma camada uniforme sobre o substrato.
<b>Aditivos</b>	Propriedades Específicas	Compostos adicionados em baixas concentrações para conferir propriedades que a formulação base não possui, como agentes antifúngicos, antiespumantes, secantes, plastificantes e anti-sedimentantes.

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

O ligante é o núcleo do sistema, definindo o desempenho químico e mecânico do filme final. Já os pigmentos têm um papel dual, aprimorando não só a aparência, mas também o desempenho, como a proteção contra a corrosão. O solvente é crucial para a aplicabilidade. Por fim, os aditivos agem como melhoradores de performance, conferindo características altamente específicas à formulação da tinta (Branko N & Popov, 2015).

### 3.5 Revestimento Poliaspártico

Nas últimas décadas, a produção de produtos ambientalmente corretos se tornou uma prioridade, impulsionada principalmente por rigorosas legislações ambientais (Gentil, 2022). Em resposta, a indústria de tintas tem investido pesadamente no estudo e desenvolvimento de novas formulações que não apenas mantenham os padrões de qualidade e desempenho, mas também minimizem o impacto ambiental.

Essa nova geração de revestimentos destaca-se pelo seu baixo teor de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). Dentro dessa categoria, os revestimentos poliaspárticos emergem

como uma alternativa ímpar e altamente eficiente no mercado. Suas propriedades oferecem uma combinação superior de benefícios, incluindo: cura rápida (agilizando o tempo de aplicação e retorno ao uso), forte adesão ao substrato, durabilidade da cor, excelentes características de barreira contra agentes corrosivos e notável resistência a intempéries (Liu et al., 2022). Essa evolução permite que os fabricantes atendam às demandas regulatórias de sustentabilidade sem comprometer a durabilidade e a proteção anticorrosiva dos materiais.

A reação de formação de um revestimento poliaspártico é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Reação de formação do revestimento poliaspártico



Fonte: Adaptada de Assarian, 2019.

Contudo, o alto teor de sólidos eleva a viscosidade da resina polimérica, prejudicando sua reologia. Isso gera mais defeitos de porosidade no revestimento e dificulta a formação de filmes contínuos e de alta barreira. Conseqüentemente, os revestimentos poliaspárticos convencionais não conseguem proporcionar um desempenho anticorrosivo satisfatório em ambientes severos (Liu et al., 2022).

### 3.6 Revestimentos Nano-Modificados

Os aditivos são componentes estratégicos em revestimentos, utilizados em baixas concentrações para aprimorar as propriedades da formulação base e conferir características de desempenho que, de outra forma, não existiriam. Sua inclusão é uma forma simples e eficaz de otimizar o produto final (Branko N & Popov, 2015).

Nesse contexto, a nanotecnologia tem impulsionado o desenvolvimento de uma classe de aditivos de alto desempenho: as nanopartículas (Thakur, 2023). Nanomateriais têm uma alta relação área de superfície para volume e, portanto, podem fornecer propriedades químicas/físicas não oferecidas por materiais de tamanho micro/macro (Farooq et al., 2022). Entre os principais motivos para o impacto positivo do uso desses materiais, destacam-se: a redução na emissão de substâncias químicas, a melhoria da qualidade do produto com menor consumo de matéria-prima e a prevenção de manutenções precoces ou retrabalhos, devido à sua

elevada durabilidade. Além disso, a incorporação de mais de um tipo de nanopartícula nas formulações de revestimento vem sendo investigada na literatura, devido à possibilidade de ocorrência de efeito sinérgico (Zhu et al., 2025).

### **3.6.1 Grafeno**

Dentre as nanoestruturas disponíveis, os materiais à base de carbono têm recebido considerável atenção no campo da proteção anticorrosiva, notabilizando-se pelo baixo custo, estabilidade química e baixo impacto ambiental (Pan et al., 2024).

O grafeno, em particular, exemplifica o potencial desta classe. Sua eficácia como aditivo protetor se deve à combinação de sua inércia química e hidrofobicidade, que criam uma barreira física impermeável. Esta barreira é excepcionalmente eficaz devido às dimensões nanométricas das partículas, que facilitam uma cobertura densa e uniforme do substrato, isolando-o e impedindo seu contato com meios corrosivos (Nayak et al., 2021; Pan et al., 2024).

As notáveis propriedades do grafeno são contrapostas por uma limitação crítica: sua elevada insolubilidade em meios orgânicos e aquosos. A atração mútua entre as camadas, mediada por interações de van der Waals, induz a uma forte aglomeração (Bordignon, 2018). A otimização das propriedades da matriz polimérica está estritamente condicionada à dispersão uniforme das nanopartículas. Atingir essa homogeneidade, contudo, constitui um desafio de processamento primordial. Este obstáculo à dispersão limita a aplicação técnica do material em revestimentos, exigindo o desenvolvimento de estratégias que assegurem sua efetiva incorporação à solução (Wei et al., 2015; Bordignon, 2018).

### **3.6.2 Nano Cobre**

Atualmente, a nanotecnologia do cobre é aplicada na produção de agentes bactericidas, que são incorporados como aditivos em diversos polímeros. Os revestimentos anti-incrustantes representam uma das soluções mais eficazes e viáveis para a bioincrustação (Kang et al., 2025).

O desempenho anti-incrustante é uma métrica crucial para revestimentos na engenharia naval e petroquímica. Isso ocorre porque a deposição de incrustações compromete não apenas a estética, mas também a resistência à corrosão e a integridade mecânica do material (Zhu et al., 2025).

Contudo, a liberação descontrolada de íons metálicos frequentemente resulta em uma "explosão" inicial do agente anti-incrustante, levando à falha prematura do revestimento. Por isso, é fundamental gerenciar rigorosamente a liberação excessiva desses íons: isso aprimora

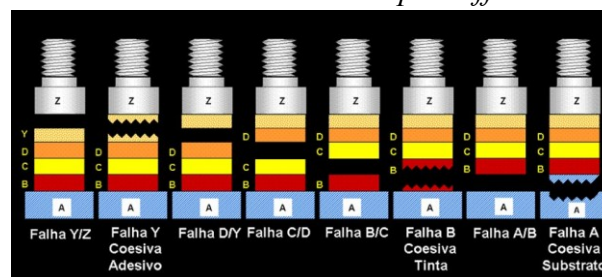
o desempenho dos revestimentos e, simultaneamente, minimiza os danos ao ambiente marinho, uma vez que sais de cobre de tamanho reduzido dissolvem-se facilmente em meio aquoso e apresentam alta toxicidade para organismos aquáticos (Ashraf et al., 2023).

### 3.7 Aderência

A aderência é uma propriedade fundamental para o desempenho de qualquer revestimento, pois define a eficácia da ligação entre o filme protetor e o substrato. Uma falha adesiva compromete todo o sistema de proteção, independentemente das outras qualidades do revestimento.

A fim de quantificar e entender o mecanismo de aderência de um determinado revestimento, diversos tipos de ensaios podem ser utilizados, dependendo da condição e espessura da amostra. Dentre eles, um dos mais utilizados é o ensaio de aderência por método *pull-off*. A realização desse ensaio é baseado na norma ASTM D4541:2022. O mecanismo e o tipo de falha para esse ensaio pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Representação dos diferentes tipos de falhas identificadas no ensaio de aderência utilizando o método *pull-off*



Fonte: Gnecco, 2010.

O sistema de revestimento é composto por camadas (B, C, D) aplicadas sobre um substrato (A), onde o dispositivo de tração (*dolly* - Z) é colado sobre a camada mais externa (D) utilizando o adesivo (Y). A classificação da falha é feita pela letra correspondente à superfície onde ocorreu a ruptura e pela natureza dessa ruptura (coesiva ou adesiva). Uma falha coesiva ocorre dentro de uma camada do material (seja o substrato, uma camada de tinta, ou o adesivo), indicando que a força de tração superou a resistência interna daquele material. Sendo elas:

- B: falha coesiva na primeira demão da tinta;
- C: falha coesiva na segunda demão da tinta;
- D: falha coesiva na terceira demão da tinta;
- Y: falha coesiva no adesivo;

Uma falha adesiva ocorre na interface entre duas camadas distintas, indicando que a força de tração superou a ligação entre elas. Sendo elas:

- A/B: falha adesiva entre o substrato e a primeira demão da tinta;
- B/C: falha adesiva entre a primeira e a segunda demão da tinta
- C/D: falha adesiva entre a segunda e a terceira demão da tinta;
- D/Y: falha adesiva entre a última demão e o adesivo;
- Y/Z: falha adesiva entre o adesivo e o pino (*dolly*);

Muitas vezes, a ruptura é mista, combinando mais de um tipo de falha, seja coesiva e adesiva, ou adesiva em múltiplas interfaces. A força de adesão registrada no teste corresponde sempre à menor força necessária para causar a ruptura em qualquer um desses pontos fracos do sistema.

### 3.8 Avaliação da Degradação

O controle de qualidade de tintas é imprescindível e fundamenta-se na realização de ensaios específicos, aplicados tanto ao produto na condição de entrega (líquido) quanto à película seca. O objetivo é validar a conformidade com as especificações do usuário e as normas técnicas pertinentes, seguindo metodologias padronizadas (Nunes & Lobo, 1990). Dentre os diversos métodos empregados para analisar a degradação de revestimentos, destacam-se:

#### 3.8.1 Acompanhamento da corrosão a partir de um dano mecânico

Segundo a norma ISO 4628-8, avalia-se a corrosão em torno de um risco (incisão) medindo-se a extensão dos produtos de corrosão com auxílio óptico. Os resultados são então calculados e expressos através das Equações 3.12 e 3.13.

O grau de corrosão ( $c$ ), em milímetros, pode ser calculado usando a Equação 3.12:

$$c = \frac{w_c - w}{2} \quad (3.12)$$

Em que:

- $w_c$  é a largura total média da zona de corrosão, em milímetros;
- $w$  é a largura do risco original, em milímetros.

Se a corrosão for não uniforme, pode ser usada a Equação 3.13:

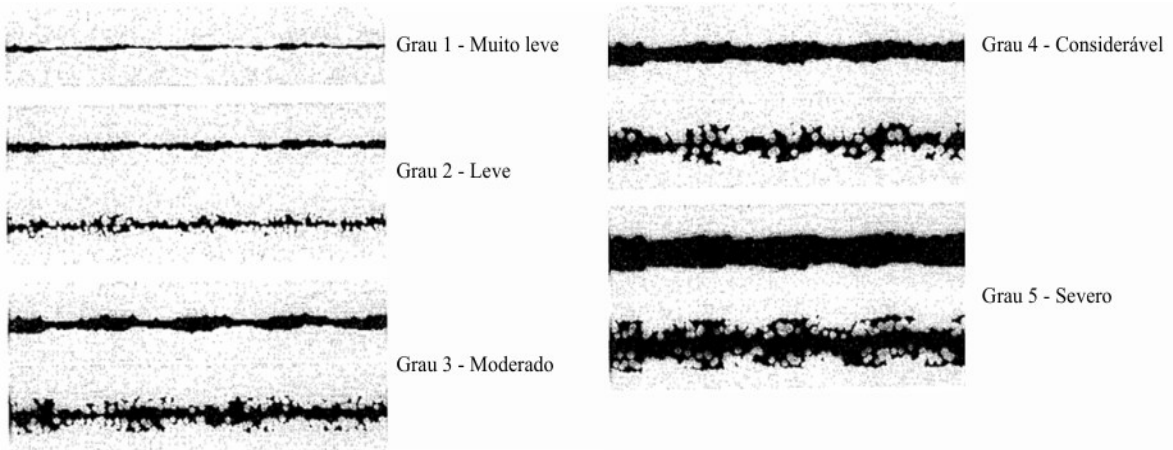
$$c = \frac{A_c - A_1}{2} \times \frac{1}{l} \quad (3.13)$$

Em que:

- $A_c$  é a área de corrosão, incluindo a área do risco, em milímetros quadrados;
- $A_1$  é a área do risco na área avaliada, em milímetros quadrados;
- $l$  é o comprimento do risco na área avaliada, em milímetros.

A Figura 3 apresenta os padrões visuais de referência utilizados nesta avaliação.

Figura 3 – Padrões visuais para avaliação do grau de degradação em torno de um risco



Fonte: Adaptada de ISO 4628-8:2005, 2025.

Com base nos resultados quantitativos e na análise visual, é possível realizar a classificação do avanço da corrosão ao redor da incisão, permitindo a atribuição do grau de degradação correspondente ao avanço observado (Tabela 2).

Tabela 2 – Correlação do avanço da corrosão com o grau de degradação.

Avanço da Corrosão (mm)	Grau de Degradação
0	0
<1	1
2 a 5	2 a 4
>5	5

Fonte: Adaptada de ISO 4628-8, 2025.

### 3.8.2 Grau de empolamento

Defeitos decorrentes da exposição ambiental, fissuras de cura, envelhecimento e a aglutinação de componentes da tinta, entre outros fatores, geram canais que viabilizam o ingresso de agentes agressivos (água, oxigênio e cloretos), acelerando, assim, a degradação do substrato (Lv, 2025). Além disso, a exposição prolongada ao ar livre leva à degradação das ligações poliméricas devido à radiação ultravioleta (UV), reduzindo ainda mais a estabilidade do revestimento (Kotnarowska, 2018). Ao atingirem o substrato, esses agentes causam o descolamento da película, manifestando-se visualmente como empolamento. Simultaneamente,

esse processo intensifica a corrosão oculta e a deterioração física do polímero, gerando fissuras e falhas que se agravam com o tempo. Para monitorar esse defeito, utiliza-se o acompanhamento fotográfico, permitindo medir a quantidade e o tamanho das bolhas com auxílio de um *software* de análise de imagem .

### 3.9 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica consiste em aplicar um pequeno sinal perturbativo de potencial ou corrente sobre um ponto estacionário da curva de polarização e correlação com a resposta em corrente ou potencial, respectivamente. A partir da relação entre o sinal de entrada e a resposta do sistema, calcula-se a impedância. Como esta grandeza é um número complexo que varia conforme a frequência do sinal, seus dados são visualizados através dos Diagramas de Nyquist ou Bode (Vasques, 2016).

O comportamento de impedância de um eletrodo pode ser expresso em gráficos de Nyquist (com  $Z''(\omega)$  em função de  $Z'(\omega)$ ) ou em gráficos de Bode ( $\log |Z|$  e  $\log \varphi$  versus a frequência  $f$  em ciclos por segundo — hertz), onde  $\omega = 2\pi f$  (Jones, 1996).

Em princípio, a espectroscopia de impedância eletroquímica pode determinar uma série de parâmetros fundamentais relacionados à cinética eletroquímica de forma não destrutiva (Jones, 1996). A instrumentação necessária para a execução e interpretação da EIE consiste em um potenciostato, responsável por aplicar um sinal de potencial senoidal no eletrodo de trabalho, em uma ampla faixa de frequências. A resposta é processada por um analisador de resposta, que encaminha os dados para o computador. O gerenciamento, armazenamento e tratamento gráfico dos dados são realizados por software dedicado. O ensaio requer uma célula eletroquímica, tipicamente configurada com três eletrodos: trabalho, referência e contra-eletrodo.

Na avaliação de revestimentos, a técnica permite monitorar parâmetros eletroquímicos fundamentais, como a resistência do revestimento, a resistência à transferência de carga, e as capacitâncias do revestimento e da dupla camada elétrica (Diógenes, 2023). O módulo de impedância pode ser interpretado como a resistência do revestimento em um modelo de circuito equivalente (Bierwagen et al., 2000). A partir desses elementos, extraem-se informações sobre a cinética de degradação e as propriedades de barreira do sistema. Adicionalmente, a análise do diagrama de Bode (módulo) na região de baixa frequência fornece um indicador semiquantitativo da eficácia da proteção por barreira.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Substrato Metálico e Revestimento

As amostras revestidas e o substrato metálico, já com preparação prévia, foram fornecidos por uma empresa de nanotecnologia. Para o substrato, foram utilizadas chapas de aço carbono AISI 1020 (American Iron and Steel Institute (AISI)), com área de  $150 \text{ cm}^2$  e cantos arredondados. Como revestimento, foi empregada a tinta poliaspártica W-POLI HPD 451 da fabricante WEG S.A. em conformidade com a norma Petrobras N-2943:2022 – Anexo G e Petrobras N 2913:2012 – Item 4.5, com a adição da nanopartícula.

### 4.2 Preparação dos Corpos de Prova

A preparação da superfície das chapas seguiu a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 13006:1993. O grau de limpeza esperado foi Sa 2.1/2 conforme especificado pela Organização Internacional de Normalização (ISO) na norma 8501-1:2007, com um perfil de rugosidade de  $75 \mu\text{m}$  (Rz DIN). As bordas dos corpos de prova foram seladas com um epóxi sem solvente de alta espessura para garantir a proteção contra a corrosão por efeito de borda.

Os corpos de prova foram revestidos com a tinta poliaspártica em três formulações distintas, cada uma aplicada em duas espessuras teóricas ( $200 \mu\text{m}$  e  $300 \mu\text{m}$ ) para avaliação comparativa:

- Amostra Referência: Consistiu na aplicação da tinta pura (W-POLI HPD 451, WEG S.A., Santa Catarina, Brasil), sem adição de nanopartículas.
- Formulação 1: Foi preparada com a adição da nanopartícula à base de nano cobre e grafeno na proporção de 1:10 (nano- partícula/tinta).
- Formulação 2: Utilizou a mesma nanopartícula, mas em uma proporção de 1:20 (nanopartícula/tinta).

A Tabela 3 detalha a nomenclatura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de névoa salina e de exposição atmosférica. Para cada ensaio, foi preparada uma amostra de cada tipo de revestimento, totalizando seis corpos de prova por condição.

Tabela 3 – Nomenclatura dos corpos de prova

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>	<b>Espessura da Camada Seca</b>
<b>B200</b>	Revestimento Puro (Referência)	200 $\mu\text{m}$
<b>B300</b>		300 $\mu\text{m}$
<b>F1 200</b>	Formulação 1	200 $\mu\text{m}$
<b>F1 300</b>		300 $\mu\text{m}$
<b>F2 200</b>	Formulação 2	200 $\mu\text{m}$
<b>F2 300</b>		300 $\mu\text{m}$

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

### 4.3 Espessura

As espessuras reais dos revestimentos foram medidas utilizando o medidor de espessura da marca DeFelsko modelo PosiTector 6000. Para cada corpo de prova, foram realizadas 10 medições para obter a média e o desvio padrão. Os valores resultantes, em micrômetros, foram então comparados com as espessuras teóricas fornecidas pela empresa.

### 4.4 Dano Mecânico (Incisão)

Um dano pontual foi realizado em cada corpo de prova para gerar uma resposta local mensurável. As inspeções desses danos foram realizadas semanalmente por meio de imagens digitais obtidas com um scanner Epson Perfection V39 II, utilizando o software Epson ScanSmart.

Ao final do ensaio (1500 h) e após a remoção do revestimento, o grau de corrosão em torno do defeito foi avaliado em conformidade com a norma ISO 4628-8:2005. Esta avaliação é essencial para quantificar o avanço e determinar o tipo de corrosão na área danificada.

### 4.5 Ensaio de Aderência

O teste de aderência, utilizado para medir a força de adesão dos revestimentos aplicados sobre o substrato metálico foi avaliado pelo método *pull-off*, baseado na norma ASTM D4541:2022. Para a realização do ensaio, utilizou-se o equipamento DeFelsko ATA20A-B-P PosiTector Pull-off Adhesion Tester, Automatic.

As medidas de adesão foram realizadas antes e após o período de exposição na câmara de névoa salina e na estação de corrosão atmosférica da UFC. A norma ASTM D 4541:2022 foi utilizada para classificar as falhas do teste de *pull-off* como adesivas ou coesivas.

Para a preparação do ensaio, os *dollys* foram limpos e lixados. A superfície do revestimento, na área de colagem, também foi lixada para garantir melhor fixação. Após a aplicação da cola, aguardou-se um período de cura de 24 horas antes do início dos testes. Para evitar interferência nos resultados futuros, a região exposta foi recoberta com tinta epóxi após a conclusão do ensaio.

#### **4.6 Análise Superficial**

O acompanhamento visual da degradação foi feito semanalmente, por meio de imagens digitais da superfície das amostras revestidas. Essas imagens foram obtidas com um scanner Epson Perfection V39 II (software Epson ScanSmart) antes da realização dos ensaios eletroquímicos, permitindo assim analisar a formação de bolhas (empolamentos) e a evolução do processo corrosivo.

#### **4.7 Ensaios Acelerados de Corrosão**

Os ensaios acelerados foram conduzidos em conformidade com a norma ASTM B1172023a, utilizando o equipamento Q-FOG Cyclic Corrosion Tester CCT 1100 (Figura 4), do Laboratório de Pesquisa em Corrosão. Este procedimento visou replicar as condições agressivas de alta umidade e salinidade características de regiões litorâneas. A solução utilizada para a pulverização salina foi de NaCl 5,0% (m/v), preparada em água destilada. O teste teve uma duração total de 1500 horas (62 ciclos), com a temperatura da câmara controlada em 35 °C.

As amostras revestidas foram identificadas, e a borda, onde o revestimento foi removido para permitir o contato elétrico com o substrato durante os ensaios eletroquímicos, foi recoberta com esmalte após cada ensaio, garantindo isolamento e proteção contra corrosão antes da instalação no equipamento de ensaio.

Figura 4 – Amostras durante o ensaio de exposição em câmara de névoa salina



Fonte: Autora, 2025.

O processo de degradação dos corpos de prova foi assistido por testes de Espectroscopia de Impedância eletroquímica (EIE), utilizados para monitorar as propriedades de barreira dos revestimentos. Além disso, realizou-se uma inspeção visual do dano mecânico induzido por uma incisão, conforme a norma ISO 4628:2005. A coleta de dados e a inspeção foram realizadas inicialmente, após 24 horas de ensaio e, subsequentemente, em intervalos semanais, até a conclusão do teste.

#### **4.8 Ensaio de Corrosão Atmosférica**

O estudo foi conduzido na Estação de Corrosão Atmosférica da (UFC) no Campus Pici, conforme visto na Figura 5, que confere um ambiente urbano.

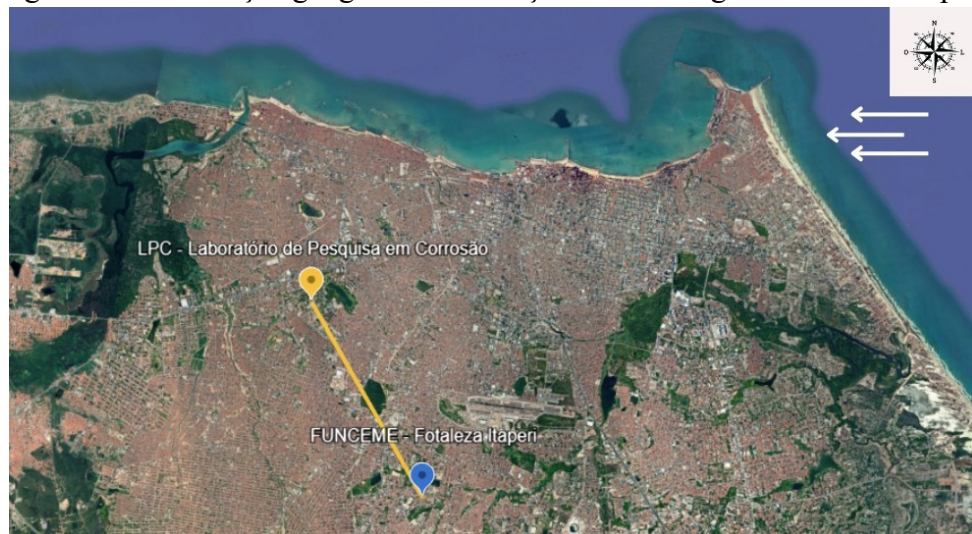
Figura 5 – Amostras expostas na Estação de Corrosão Atmosférica



Fonte: Autora, 2025.

Os dados meteorológicos de temperatura, precipitação, velocidade dos ventos, radiação e umidade relativa foram obtidos mensalmente do banco de dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), referentes à estação Fortaleza-Itaperi (Figura 6). A escolha desta estação meteorológica deve-se ao fato de ser a mais próxima (localizada a 6,025 Km da estação de corrosão atmosférica da UFC) que disponibilizava o conjunto completo de dados necessários para a análise.

Figura 6 – Localização geográfica da Estação Meteorológica Fortaleza -Itaperi



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Os cupons foram expostos em um ângulo de 30°, com a face voltada para o norte geográfico (ilustrado na Figura 5) para maximizar a radiação solar, conforme a norma ABNT NBR 6209:2007.

A exposição ocorreu de 3 de julho a 6 de setembro de 2025, totalizando 1500 horas. Durante este período, os corpos de prova foram aspergidos duas vezes por semana com uma solução de NaCl a 3,0% (m/v), seguindo a norma ISO 11474:1998. As avaliações, por meio de inspeção visual e espectroscopia de impedância eletroquímica, foram realizadas antes da exposição, após 24 horas e, subsequentemente, uma vez por semana até o final do teste. Após cada análise, as amostras retornavam à estação para continuar a exposição.

#### 4.8.1 *Coletores de Contaminantes Atmosféricos*

Para caracterizar a agressividade do ambiente de exposição, foram utilizados amostradores difusivos para quantificar a taxa de deposição de contaminantes atmosféricos. A análise visou determinar a concentração de íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e partículas sedimentáveis, permitindo a classificação do perfil atmosférico local. Os amostradores de contaminantes foram expostos na estação por aproximadamente 70 dias. Ao final do período, o material coletado foi encaminhado ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) para a realização das análises quantitativas.

##### 4.8.1.1 *Análise de Cloretos*

Utilizou-se o método da vela úmida, prescrito pela norma ASTM G140:2019, para determinar a taxa de deposição de cloretos inorgânicos ( $\text{Cl}^-$ ). A quantificação (Equação 4.1) foi realizada por volumetria, utilizando o Método de Mohr (titulação com nitrato de prata), com os resultados expressos em miligramas por metro quadrado por dia ( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ).

$$\text{Cloreto (mg/m}^2 \cdot \text{d)} = \frac{2 \times (A - B) \times \text{Mol} \times 35,5 \times V_t}{V_a \times S \times t} \quad (4.1)$$

Em que A corresponde ao volume de solução titulante gasto na titulação da alíquota (mL); B representa o volume de solução titulante consumido no branco (mL); Mol é a molaridade da solução titulante, devidamente padronizada ( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $V_t$  é o volume total da amostra após diluição (mL);  $V_a$  é o volume da alíquota utilizada (mL); S corresponde à área da gaze exposta ( $\text{m}^2$ ); e t é o tempo de exposição (dias).

Essa equação permite expressar a quantidade de cloreto depositada na forma de

massa por unidade de área e por tempo, fornecendo um parâmetro comparativo entre diferentes condições de exposição atmosférica. O método analítico adotado segue a norma ASTM D4458: 2023b, a qual se baseia na titulação de íons cloreto com solução de nitrato de prata, segundo o procedimento de Mohr.

#### 4.8.1.2 *Análise de Sulfatos*

A taxa de sulfatação total na atmosfera foi medida em conformidade com a norma ASTM D2010:2010. O método gravimétrico emprega uma vela coletora com superfície reativa de dióxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>), que fixa compostos de enxofre. Os resultados são expressos em miligramas por metro quadrado por dia (mg/m<sup>2</sup>·d) (Equação 4.2).

$$\text{Taxa de sulfatação (mg SO}_3\text{/m}^2\text{·d)} = \frac{(A-B) \times 0,343}{S \times t} \quad (4.2)$$

Em que A corresponde à massa de BaSO<sub>4</sub> obtida na vela exposta (mg); B é a massa de BaSO<sub>4</sub> obtida na vela em branco (mg); S é a área da gaze recoberta com a pasta de PbO<sub>2</sub> (m<sup>2</sup>); e t é o tempo de exposição (dias).

As velas permaneceram expostas no mesmo período experimental, de 28 de maio a 06 de agosto, também na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC.

#### 4.8.1.3 *Análise de Material Particulado*

A amostragem de material particulado foi realizada por sedimentação em um recipiente de volume conhecido, conforme a norma ASTM D1739:2017. A taxa de deposição foi expressa em miligramas por metro quadrado por dia (mg/m<sup>2</sup>·d).

## 4.9 **Espectroscopia de Impedância Eletroquímica**

Os ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) foram realizados em um potenciostato/galvanostato multicanal modelo PGSTAT30 AUT.MAC204 (Metrohm Autolab B.V.) e a leitura dos testes no software Nova v.2.1.7.

A EIE foi empregada como técnica não destrutiva para avaliar o desempenho anticorrosivo dos revestimentos, em que sua quantificação é determinada pelo módulo de impedância  $|Z|$ , analisando-se corpos de prova previamente submetidos a ensaios de corrosão atmosférica e de névoa salina.

As medições eletroquímicas foram realizadas em uma célula de três eletrodos convencional, utilizando solução de NaCl 3,5% (m/v) como eletrólito. Uma célula de acrílico foi utilizada para delimitar a área de trabalho exposta em 20 cm<sup>2</sup>.

A configuração dos eletrodos foi a seguinte:

- Eletrodo de Trabalho: Substrato metálico revestido;
- Eletrodo de Referência: Ag(s)/AgCl(s)/Cl<sup>-</sup> (saturado);
- Contra-eletrodo: Rede de platina (área aproximada de 10 cm<sup>2</sup>);

Inicialmente, foram realizadas medições de Potencial de Circuito Aberto (OCP, do inglês *Open Circuit Potential*) durante 1800 segundos. Em seguida, a EIE foi conduzida na faixa de frequência de 10<sup>5</sup> Hz a 0,01Hz , com uma perturbação senoidal de 10mV de amplitude. Para minimizar as interferências externas, todas as medições de impedância eletroquímica foram realizadas dentro de uma gaiola de Faraday.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaios Acelerados de Corrosão

#### 5.1.1 Espessura dos Revestimentos

A Tabela 4 apresenta os valores de espessura para os corpos de prova submetidos ao ensaio de névoa salina.

Tabela 4 – Medidas de espessura ( $\mu\text{m}$ ) para as amostras do ensaio de névoa salina

Amostra	Espessura ( $\mu\text{m}$ )					
	B 200	B 300	F1 200	F1 300	F2 200	F2 300
<b>Média</b>	240,8	224,1	223,7	266,4	245,2	248,6
<b>Desv. Padrão</b>	42,51	27,77	17,64	29,14	31,77	27,77

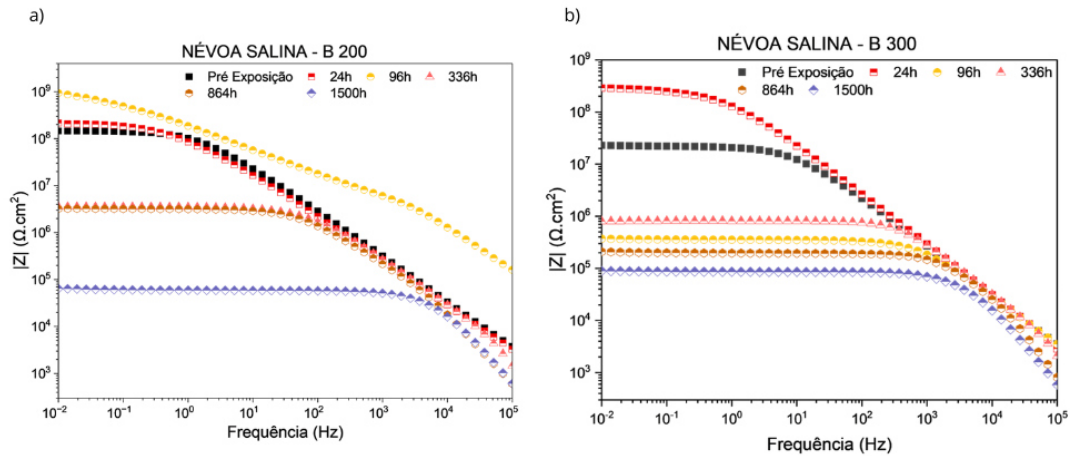
Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Com base nos resultados de espessura dos revestimentos, verifica-se que os valores nominais de 200  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$  não foram alcançados com precisão. Em particular, nenhuma das amostras de revestimento atingiu a espessura média de 300  $\mu\text{m}$ , apresentando apenas valores inferiores ao especificado. Além disso, a análise do desvio padrão indica que a espessura manteve-se uniforme entre todas as amostras.

#### 5.1.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Por meio do diagrama de Bode (módulo), extraem-se informações sobre a impedância associada à resistência do eletrólito (alta frequência) e do revestimento (baixa frequência). Os elevados valores de módulo observados na região de baixa frequência indicam que o revestimento atuou como uma barreira efetiva, proporcionando proteção ao substrato metálico (Silva, 2020). Os resultados do Bode módulo ao longo do tempo de exposição são mostrados nas Figuras 7, 8 e 9.

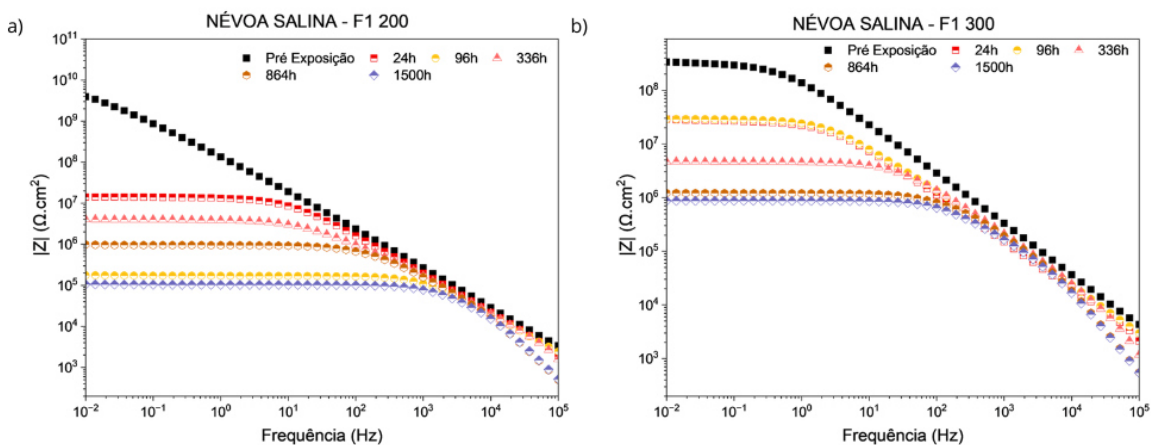
Figura 7 – Diagrama de Bode (módulo) para as amostras de referência em relação ao tempo; a)B200 b)B300



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

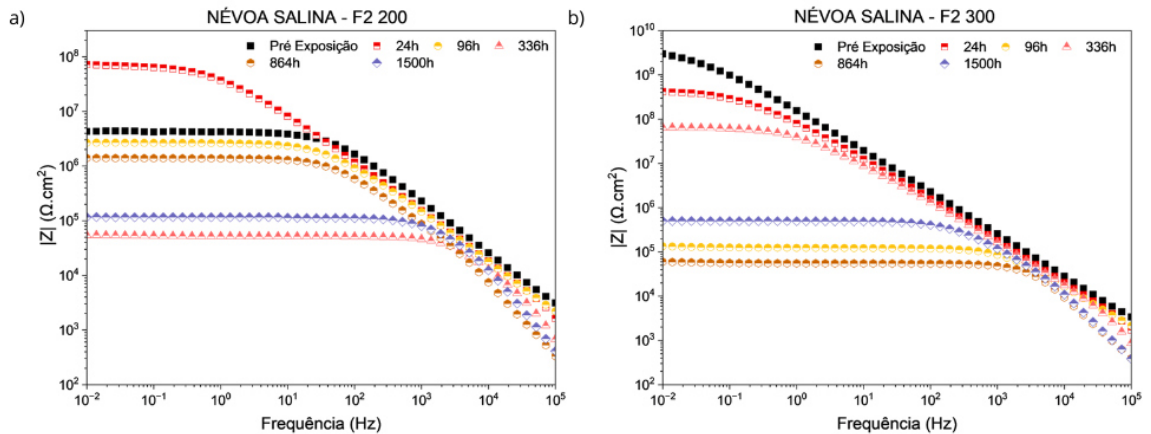
Para as amostras sem a adição de nanopartículas (B200 e B300), os valores do módulo de impedância na região de baixa frequência  $|Z|_{0,01Hz}$  diminuem de aproximadamente  $10^8 (\Omega \cdot \text{cm}^2)$  a  $10^4 (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ , enquanto para as formulações 1 e 2, a variação ocorre de cerca de  $10^9 (\Omega \cdot \text{cm}^2)$  para  $10^5 (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ . Essa tendência indica uma perda progressiva da resistência à corrosão das amostras com o aumento do tempo de exposição. No entanto, a formulação 1 (Figura 8) e formulação 2 (Figura 9) apresentaram valores de impedância iniciais e finais superiores aos das amostras de referência, sugerindo melhor desempenho protetivo e maior integridade da barreira de revestimento ao longo do ensaio para o meio estudado.

Figura 8 – Diagrama de Bode (módulo) para a formulação 1 em relação ao tempo; a)F1 200 b)F1 300



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Figura 9 – Diagrama de Bode (módulo) para a formulação 2 em relação ao tempo ; a) F2 200  
b) F2 300

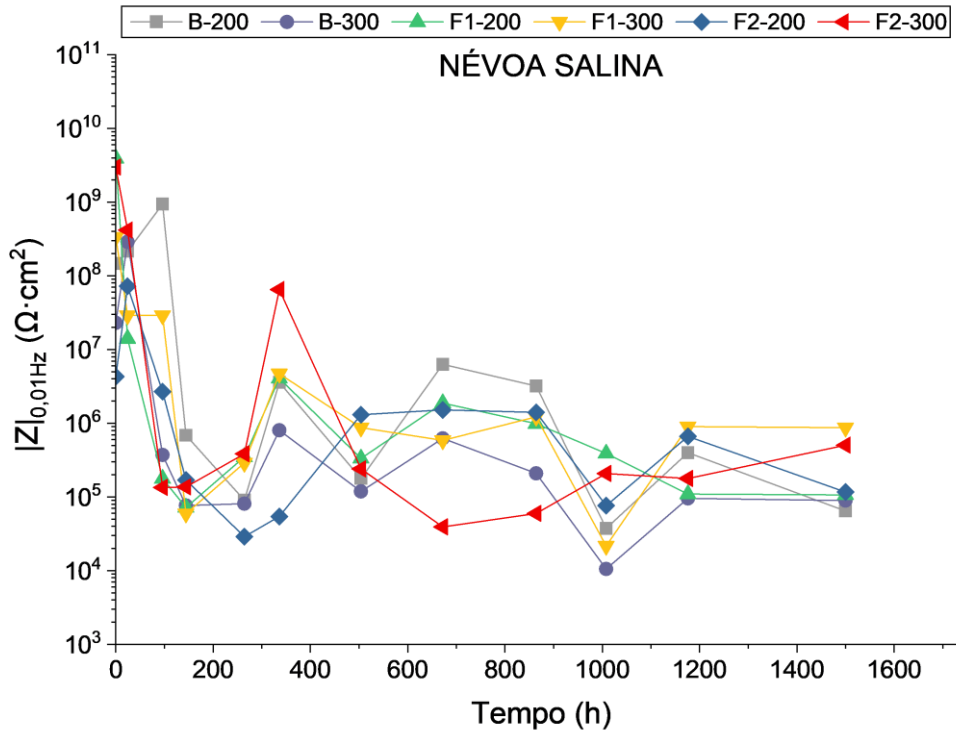


Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Segundo os critérios de classificação propostos por (Amirudin, 1995) para ensaios de EIE, o desempenho de revestimentos é considerado de alto (acima de  $10^9 \Omega \cdot cm^2$ ), intermediária (entre  $10^9$  e  $10^6 \Omega \cdot cm^2$ ) ou de baixo desempenho (abaixo de  $10^6 \Omega \cdot cm^2$ ). Com base neste intermediário, nota-se que, embora nenhuma das formulações (incluindo o revestimento de referência) tenha atingido um desempenho elevado nos ensaios, os resultados permitem estabelecer uma comparação de desempenho relativo entre elas.

A Figura 10, apresenta o logaritmo dos módulos de impedância na menor frequência analisada (0,01 Hz) ao longo do período de exposição das amostras submetidas à câmara de névoa salina, resultado que pode servir como um indicador semiquantitativo da eficiência de barreira do revestimento (Diógenes, 2023) . Observa-se que todas as amostras seguem um comportamento semelhante, caracterizado por uma redução gradual dos valores de impedância ao longo do tempo de ensaio.

Figura 10 –Módulo de impedância em 0,01Hz em função do tempo (Câmara de Névoa Salina)



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

**5.1.3 Avaliação do avanço da corrosão a partir da incisão**

A Figura 11 apresenta o aspecto das incisões antes da exposição, após 1500 h de ensaio na câmara de névoa salina e após a remoção do revestimento.

Figura 11 – Evolução do processo corrosivo na região da incisão

	PRÉ-EXPOSIÇÃO	FINAL	PÓS RETIRADA DO REVESTIMENTO
<b>B 200</b>			
<b>B 300</b>			
<b>F1 200</b>			
<b>F1 300</b>			
<b>F2 200</b>			
<b>F2 300</b>			

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Após 1500 horas de ensaio em câmara de névoa salina, observou-se a formação de uma quantidade significativa de produtos de corrosão em torno à incisão. Apesar da grande quantidade de produtos de corrosão visíveis na região da incisão, a análise do substrato após

a retirada do revestimento revelou que o avanço do ataque corrosivo foi discreto. Essa aparente contradição pode indicar que, embora o processo corrosivo tenha sido iniciado, sua progressão para o interior do metal-base pode ter sido retardada pela barreira do revestimento e/ou pela formação de uma camada de produtos de corrosão estável e aderente, que pode atuar como uma barreira secundária

Para quantificar esse comportamento, foi medido o avanço da corrosão (em mm), permitindo classificar a severidade do ataque corrosivo de acordo com os critérios estabelecidos pela norma ISO 4628-8:2005. Os valores médios de avanço e seus respectivos desvios-padrão estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Evolução do processo corrosivo na incisão (ensaio de névoa salina, 1500 h)

<b>Amostra</b>	<b>B200</b>		<b>B300</b>		<b>F1 200</b>		<b>F1 300</b>		<b>F2 200</b>		<b>F2 300</b>	
<b>Medição</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>
<b>1</b>	0,74	0,56	0,84	0,98	3,46	2,64	4,27	3,17	1,23	1,60	1,34	1,48
<b>2</b>	2,05	1,62	1,94	1,19	7,24	4,96	3,51	4,69	1,28	1,56	2,26	2,29
<b>3</b>	5,48	3,82	4,97	4,12	5,85	5,11	8,88	7,26	2,21	2,25	3,58	3,55
<b>4</b>	3,07	2,64	4,51	2,78	5,04	8,38	6,35	4,83	1,80	2,80	9,37	4,12
<b>5</b>	6,29	3,65	2,04	5,00	4,93	6,12	4,90	3,45	1,27	1,35	2,42	2,03
<b>Média (mm)</b>	3,53	2,46	2,86	2,81	5,30	5,44	5,58	4,68	1,56	1,91	3,79	2,69
<b>Desvio (mm)</b>	2,32	1,38	1,79	1,77	1,38	2,08	2,12	1,62	0,43	0,60	3,22	1,10
<b>Superior + Inferior</b>	<b>5,98</b>		<b>5,67</b>		<b>10,75</b>		<b>10,26</b>		<b>3,47</b>		<b>6,49</b>	
<b>Classificação</b>	<b>2,99</b>		<b>2,84</b>		<b>5,37</b>		<b>5,13</b>		<b>1,74</b>		<b>3,24</b>	

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

























A partir da média dos avanços medidos nas regiões superior e inferior do risco, determinou-se o grau de corrosão e conjunto a análise visual, conforme ilustrado na Figura 3, que exibe a escala visual de referência (graus 1 a 5) para comparação do nível de severidade determinou-se também o grau de degradação.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que as amostras controle (referência) foram classificadas em grau 3 moderado. Já a formulação 1 apresentou um aumento expressivo no avanço da corrosão, sendo classificada em grau 5 (severo). Por fim, na formulação 2 observa-se uma mudança, uma vez que os valores obtidos estão entre grau 1 (pouco avanço) e grau 3 (moderado). Tal variação no comportamento das diferentes formulações evidencia a influência da composição na degradação do revestimento e do substrato metálico, indicando variações na eficiência protetiva nas condições de exposição analisadas.

#### **5.1.4 Ensaio de Aderência**

A avaliação da aderência dos revestimentos, antes e após 1500 horas de exposição em névoa salina, apontou duas conclusões principais. Primeiramente, a análise do modo de falha demonstrou, na grande maioria dos casos, uma ruptura do tipo A/B, classificada pela norma ASTM D 4541:2022 como falha adesiva entre o substrato e a primeira demão do revestimento, demonstrado na Figura 12.

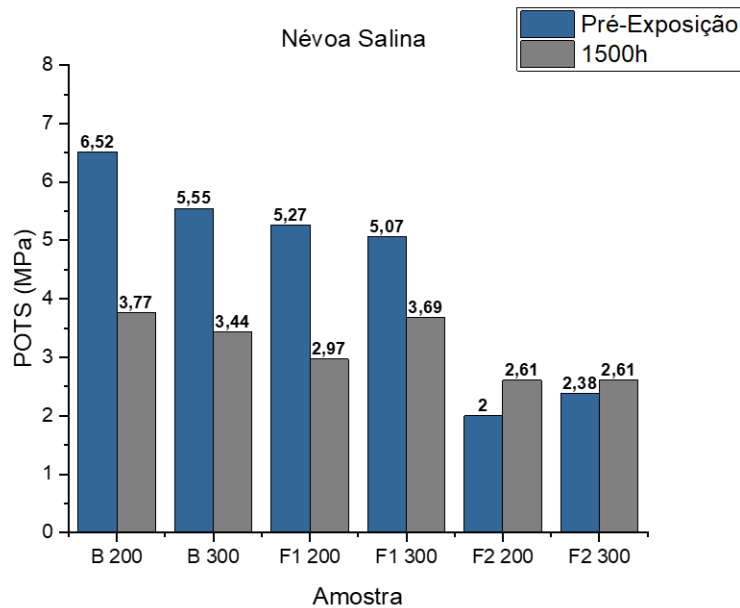
Figura 12 – Ensaio de *Pull-Off* realizado nas amostras antes e após a exposição à câmara de névoa salina

INICIAL						
	B 200	B 300	F1 200	F1 300	F2 200	F2 300
Aço						
Pino						
FINAL						
	B 200	B 300	F1 200	F1 300	F2 200	F2 300
Aço						
Pino						

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Em segundo lugar, no que tange aos valores quantitativos (Figura 13), a força de adesão de todos os revestimentos testados mostrou-se inferior ao limite mínimo de 8 MPa exigido pela norma Petrobras N-2943:2022 para revestimentos poliaspárticos, indicando um desempenho inferior, em relação ao indicado na norma. Além disso, observou-se que o revestimento sem a adição da nanopartícula apresentou valores de adesão superiores quando comparado às amostras aditivadas.

Figura 13 – Gráfico da força de adesão (MPa) pré exposição e após 1500h para as amostras submetidas a câmara de névoa salina



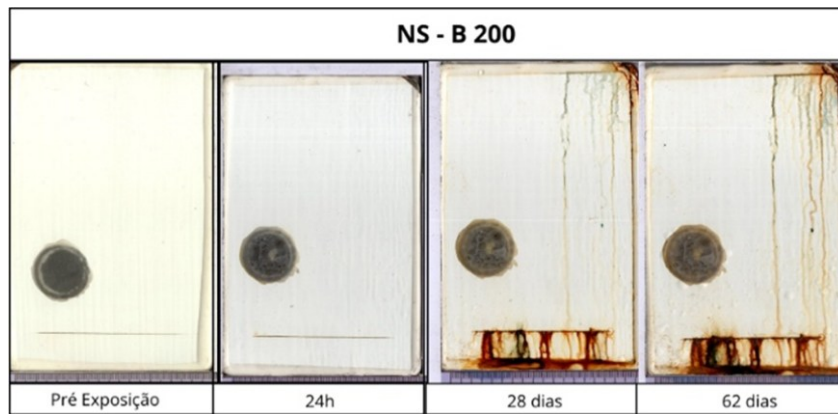
Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

### 5.1.5 Análise de Superfície

O acompanhamento fotográfico dos corpos de prova ao longo do ensaio permitiu a análise da degradação superficial ao longo do período de ensaio. Para o sistema de referência (Figuras 14 e 15), notou-se um leve empolamento (bolhas) a partir de 28 dias. O empolamento é um dos defeitos mais comuns em revestimentos e é caracterizado pela formação de bolhas na película de tinta. Isso acontece devido a uma perda de aderência localizada (seja no substrato ou entre camadas de tinta), geralmente causada por fatores como uma preparação de superfície inadequada, a permeabilidade a agentes corrosivos e a própria formulação do revestimento.

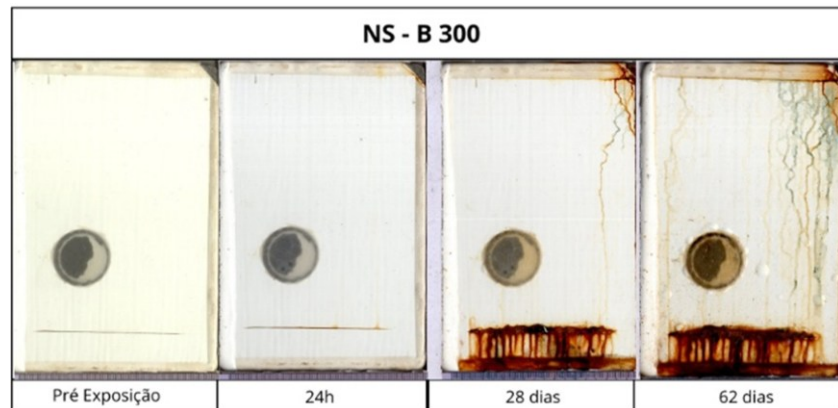
Como esperado para o ambiente agressivo de névoa salina, verificou-se uma severa corrosão na região do risco (incisão), contudo, não foi observada corrosão localizada sob o filme de revestimento, esse compartimento se repetiu em todas as formulações analisadas.

Figura 14 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra B 200



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

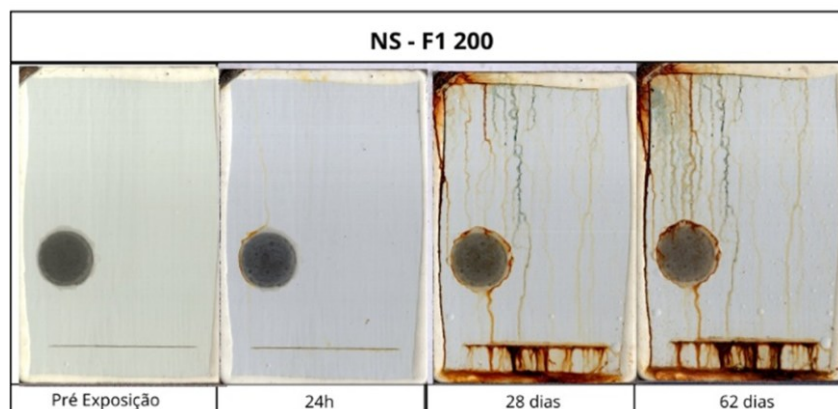
Figura 15 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra B 300



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

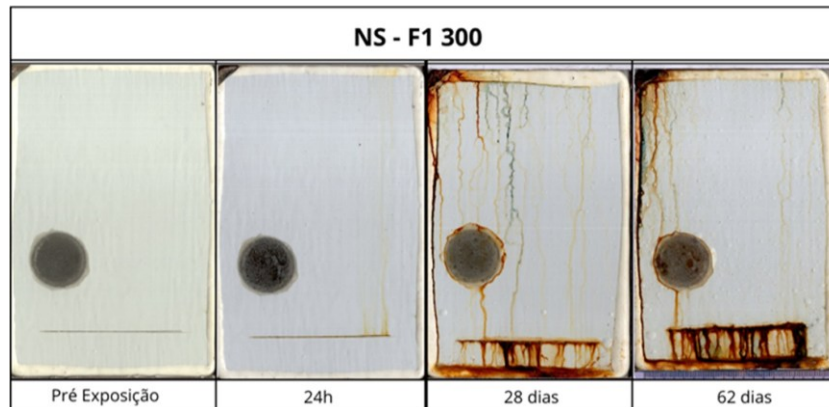
A Formulação 1, em ambas as condições (Figuras 16 e 17), também apresentou leve empolamento (bolhas) nas imagens a partir dos 28 dias.

Figura 16 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F1 200



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Figura 17 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F1 300

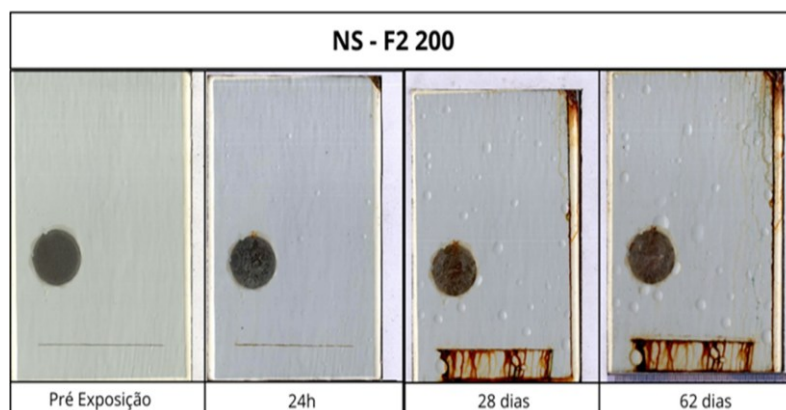


Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Já os corpos de prova com a Formulação 2 (Figuras 18 e 19), em ambas as espessuras, apresentaram um desempenho inferior, com empolamentos visíveis desde as 24 horas de ensaio. A quantidade de bolhas aumentou gradativamente, tornando-se severa ao final das 1500 horas.

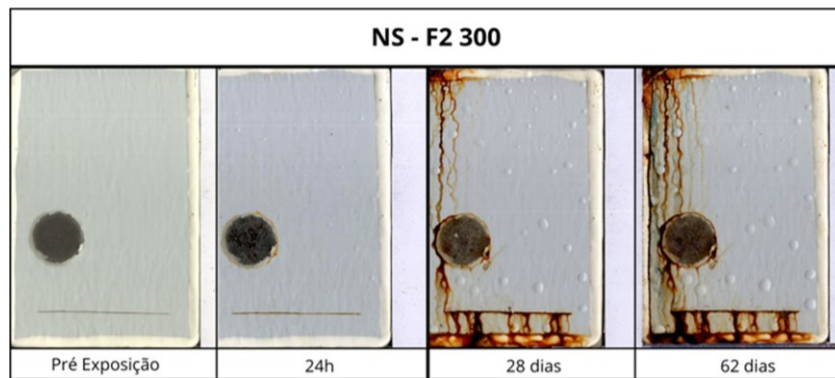
Essa degradação acelerada sugere que a barreira foi comprometida mais rapidamente, possivelmente devido a defeitos na película. Uma característica comum de revestimentos poliaspárticos é seu elevado teor de sólidos, que pode gerar heterogeneidades. No caso da Formulação 2, é provável que a maior quantidade de nanopartículas tenha exacerbado esse problema. O grafeno, presente no aditivo, possui uma forte tendência a aglomerar-se (devido a forças de van der Waals) — um desafio de dispersão já bem conhecido na literatura (Bordignon, 2018). Essas aglomerações podem ter criado pontos de falha na barreira, facilitando a entrada de oxigênio e outros agentes corrosivos do meio agressivo.

Figura 18 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F2 200



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Figura 19 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F2 300



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

## 5.2 Ensaios de Corrosão Atmosférica

### 5.2.1 Espessura do Revestimento

A Tabela 6 apresenta os valores de espessura para os corpos de prova expostos na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC.

Tabela 6 – Medidas de espessura ( $\mu\text{m}$ ) para as amostras expostas na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC

Amostra	Espessura ( $\mu\text{m}$ )					
	B 200	B 300	F1 200	F1 300	F2 200	F2 300
<b>Média</b>	192,3	219,7	217,6	258,5	244,1	242,5
<b>Desv. Padrão</b>	15,30	26,32	34,17	41,51	35,31	21,73

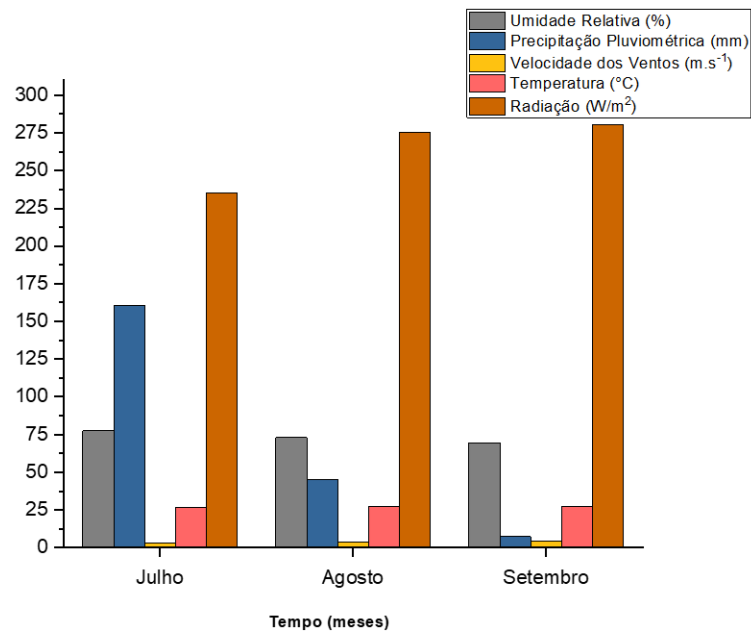
Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Com base nos resultados de espessura dos revestimentos, verifica-se que os valores nominais de  $200 \mu\text{m}$  e  $300 \mu\text{m}$ , assim como nas amostras expostas em câmara névoa salina, não foram alcançados com precisão.

### 5.2.2 Parâmetros atmosféricos e deposição de contaminantes

A Figura 20 apresenta os dados meteorológicos monitorados durante o período experimental (julho, agosto e setembro), compreendendo as variáveis de umidade relativa, precipitação, velocidade dos ventos, temperatura e radiação solar.

Figura 20 – Dados meteorológicos levantados durante o período de estudo avaliado



Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), 2025.

A velocidade média dos ventos foi de  $3,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ao longo da exposição. Quando associada à presença de poluentes, essa condição intensifica os processos de degradação, gerando um impacto muito maior do que o esperado pela atuação isolada de cada fator.

O monitoramento meteorológico do período (apresentado na Figura 20) revelou um regime térmico estável, com temperatura média de  $27,16 \text{ }^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $(73,3 \pm 3,19)\%$ . Registros de umidade relativa próxima a  $80\%$  e temperaturas de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  indicam um cenário favorável à corrosão metálica. Portanto, o fator determinante para a taxa de corrosão é o tempo de umedecimento (Girão, 2019).

A precipitação, no entanto, variou significativamente, marcando um início úmido em julho seguido por uma redução expressiva em agosto e setembro. Já os resultados de radiação, com uma média de  $263,82 \text{ W/m}^2$ , indicam um moderado índice de incidência solar (Embrapa, 2020), a exposição contínua ao UV desencadeia a foto-oxidação da matriz polimérica, resultando na degradação de pigmentos e na quebra de cadeias moleculares. Tais danos manifestam-se através de desbotamento, gizamento e fissuras, deteriorando a capacidade do revestimento de atuar como uma barreira eficaz contra a corrosão (Kotnarowska, 2018). No entanto, esses efeitos não foram observados nas amostras analisadas.

### 5.2.3 Taxa de Deposição de Contaminantes

A caracterização da agressividade atmosférica foi realizada a partir da quantificação de poluentes e do monitoramento da umidade relativa, essenciais para a classificação da

corrosividade global do ambiente, conforme as diretrizes da NBR ISO 9223.

### 5.2.3.1 Salinidade e Poluentes

No presente trabalho, os ensaios foram conduzidos em triplicata, a partir das amostras coletadas nas velas expostas no período de 28 de maio a 06 de agosto (70 dias) na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC. O teor médio de cloreto obtido foi de  $(3,104 \pm 5,4 \cdot 10^{-16})$  mg/L, o que evidencia a reprodutibilidade das medidas experimentais. Ao aplicar o resultado de 3,104 (mg/m<sup>2</sup>·d) na classificação da agressividade atmosférica por salinidade segundo a norma NBR ISO 9223: 2012, o ambiente se enquadra na faixa de  $3 < B \leq 60$  mg/m<sup>2</sup>·d segundo a Tabela 7.

Tabela 7 – Taxa de deposição de cloreto

Taxa de deposição de Cl <sup>-</sup> (mg/m <sup>2</sup> ·d)	Categorias
$B \leq 3$	B0
$3 < B \leq 60$	B1
$60 < B \leq 300$	B2
$300 < B \leq 1500$	B3

Fonte: Adaptada de Costa, 2010.

Tais valores constituem parâmetros consistentes para a análise da agressividade atmosférica na região estudada, indicando uma Categoria B1 (Baixa Salinidade).

O valor médio obtido para a taxa de sulfatação foi de 17,32 mgSO<sub>3</sub>/(m<sup>2</sup>·d), indicando uma deposição significativa de compostos sulfurados no ambiente atmosférico. Ao aplicar o resultado de 17,32 mgSO<sub>3</sub>/(m<sup>2</sup>·d) na classificação da agressividade atmosférica por poluição (baseada na NBR ISO 9223), o ambiente se enquadra na faixa de  $10 < A \leq 35$  mg/m<sup>2</sup>·d, de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 – Taxa de Deposição de SO<sub>2</sub>

Taxa de deposição de SO <sub>2</sub> - A (mg/m <sup>2</sup> ·d)	Categorias
$A \leq 10$	A0
$10 < A \leq 35$	A1
$35 < A \leq 80$	A2
$80 < A \leq 200$	A3

Fonte: Adaptada de Costa, 2010.

Este resultado classifica o ambiente na Categoria A1 (Média Poluição).

O resultado de material particulado sedimentável obtido foi de 3,1 (mg/m<sup>2</sup>·d). Este valor é consistente com uma atmosfera classificada como Urbana ou Industrial.

### 5.2.3.2 Umidade e Classificação do Ambiente Corrosivo

O tempo de umedecimento (TOW, do inglês *Time of Wetness*) é definido como o período em que uma superfície metálica fica coberta por uma película de água líquida, condição essencial para a corrosão atmosférica. A duração do TOW depende diretamente de variáveis climáticas locais, como umidade relativa, frequência de chuvas, neblina e orvalho, temperaturas do ar e do metal, velocidade do vento e insolação (Yelwa et al, 2025).

De acordo com os dados obtidos no presente estudo, tem-se que a média de umidade relativa do ar dos 3 meses de estudo é de 73,3%, sendo ligeiramente inferior ao limiar de 80% utilizado na norma.

De acordo com a Tabela 9, classifica-se o ambiente como T5 (Umidade Extremamente Alta), indicando que a superfície dos materiais permanece úmida por uma fração considerável do tempo, um fator que por si só acelera a corrosão.

Tabela 9 – Classificação de microclima

Categoria	Tempo de superfície úmida ( $\tau$ )	
	horas/ano (h/a)	%
t <sub>1</sub>	$\tau < 10$	$\tau < 0,1$
t <sub>2</sub>	$10 < \tau < 250$	$0,1 < \tau < 3$
t <sub>3</sub>	$250 < \tau < 2500$	$3 < \tau < 30$
t <sub>4</sub>	$2500 < \tau < 5500$	$30 < \tau < 60$
t <sub>5</sub>	$\tau > 5500$	$\tau > 60$

Fonte: Adaptada de Costa, 2010.

Sendo assim, o grau de corrosividade do ambiente estudado para o aço carbono enquadra-se nas categorias C3 (Média), com perda de massa entre 200 e 400 g/m<sup>2</sup>, e C4 (Alta), com perda de massa superior a 400 até 650 g/m<sup>2</sup> segundo a norma ISO 9223 (Tabela 10).

Tabela 10 – Classificação do grau de corrosividade para aço carbono

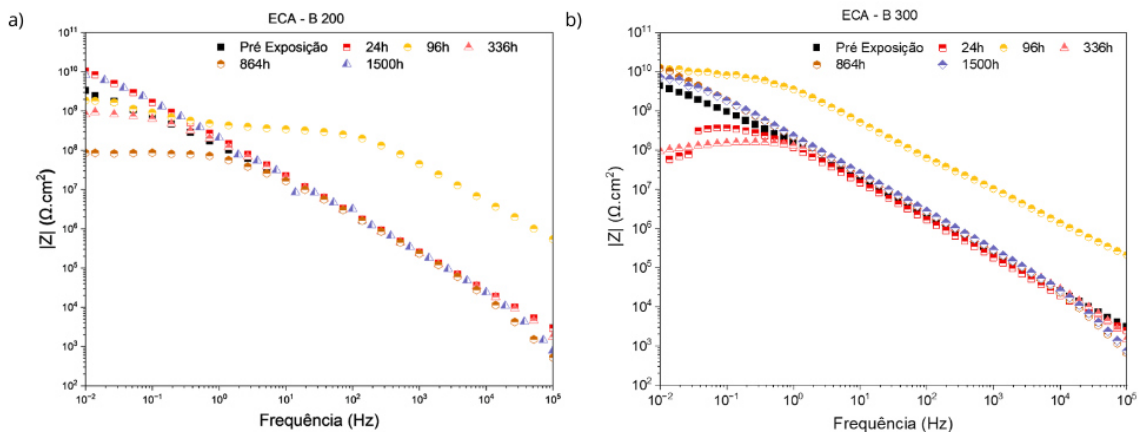
Aço-Carbono															
	t <sub>1</sub>			t <sub>2</sub>			t <sub>3</sub>			t <sub>4</sub>			t <sub>5</sub>		
	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
A <sub>0</sub> -A <sub>1</sub>	1	1	1 ou 2	2	2	3 ou 4	2 ou 3	3 ou 4	4	3	4	5	3 ou 4	5	5
A <sub>2</sub>	1	1	1 ou 2	2	2 ou 3	3 ou 4	3 ou 4	4 ou 5	4	4	5	5	4 ou 5	5	5
A <sub>3</sub>	1 ou 2	1 ou 2	2	2	3	4	4	4 ou 5	5	5	5	5	5	5	5

Fonte: Adaptada de Costa, 2010.

### 5.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A partir da análise dos espectros de impedância de Bode módulo (Figura 21) para as amostras de controle (Referência), especificamente o módulo em baixas frequências ( $|Z|_{0,01Hz}$ ), revelou um desempenho de barreira excelente.

Figura 21 – Diagrama de Bode (módulo) para as amostras de referência em relação ao tempo; a) B200 b) B300

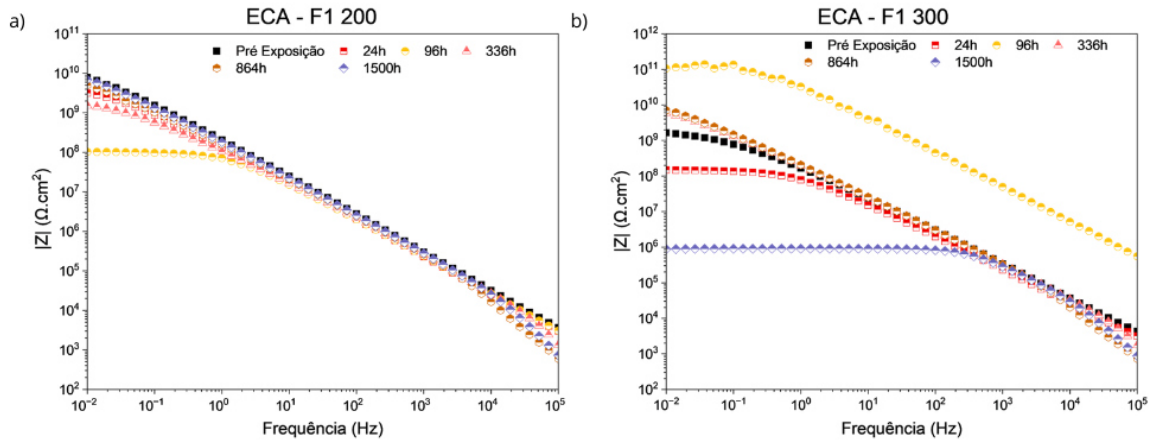


Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Observou-se um aumento deste parâmetro em ambas as amostras após 1500 horas de ensaio. Para a amostra B200, o valor inicial de  $3,38 \times 10^9 \Omega \cdot cm^2$  elevou-se para  $8,33 \times 10^9 \Omega \cdot cm^2$ . De forma similar, na amostra B300, o módulo passou de  $4,39 \times 10^9 \Omega \cdot cm^2$  para  $7,26 \times 10^9 \Omega \cdot cm^2$ . O aumento dos valores de impedância com o tempo é atribuído a formação de óxidos na superfície metálica. A manutenção de valores na ordem de  $10^9 \Omega \cdot cm^2$  indica uma elevada eficiência protetiva, classificando o revestimento, conforme a literatura, como sendo de alto desempenho.

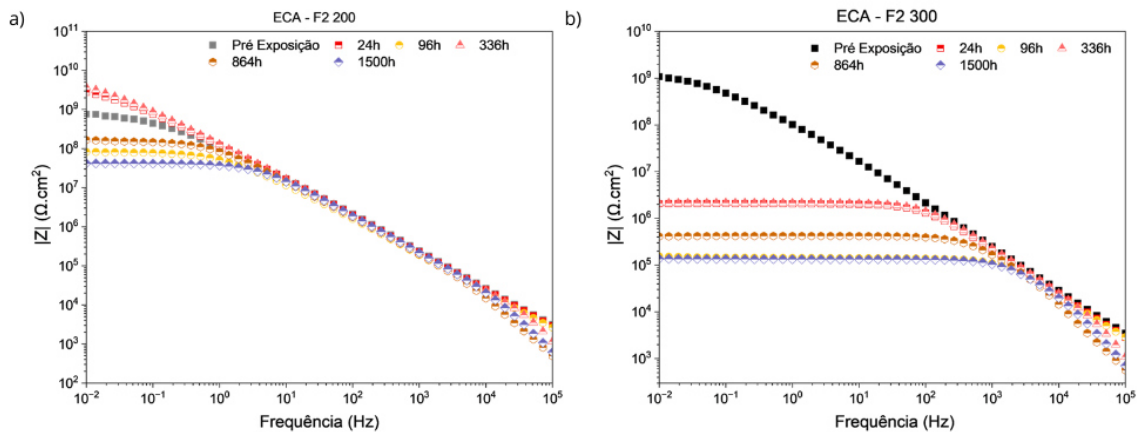
Em contrapartida, os sistemas aditivados com nanopartículas apresentaram comportamentos distintos. Para a Formulação 1 (Figura 22), a amostra F1-200 exibiu alta estabilidade, mantendo o módulo de impedância na mesma ordem de grandeza, com valores de  $7,86 \times 10^9 \Omega \cdot cm^2$  (inicial) e  $6,95 \times 10^9 \Omega \cdot cm^2$  (final). Na amostra, F1-300, observou-se uma degradação severa, com o módulo decaindo drasticamente de  $1,66 \times 10^9 \Omega \cdot cm^2$  para  $8,89 \times 10^5 \Omega \cdot cm^2$ , uma perda de quase quatro ordens de grandeza. Para as amostras da Formulação 2 (Figura 23), a tendência de degradação foi mais generalizada. A amostra F2-200 apresentou um decréscimo moderado, de  $7,67 \times 10^8 \Omega \cdot cm^2$  para  $4,18 \times 10^7 \Omega \cdot cm^2$ . A queda foi ainda mais acentuada na amostra F2-300, que variou de  $1,08 \times 10^9 \Omega \cdot cm^2$  para  $1,36 \times 10^5 \Omega \cdot cm^2$ .

Figura 22 – Diagrama de Bode (módulo) para a formulação 1 em relação ao tempo; a) F1 200  
b) F1 300.



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

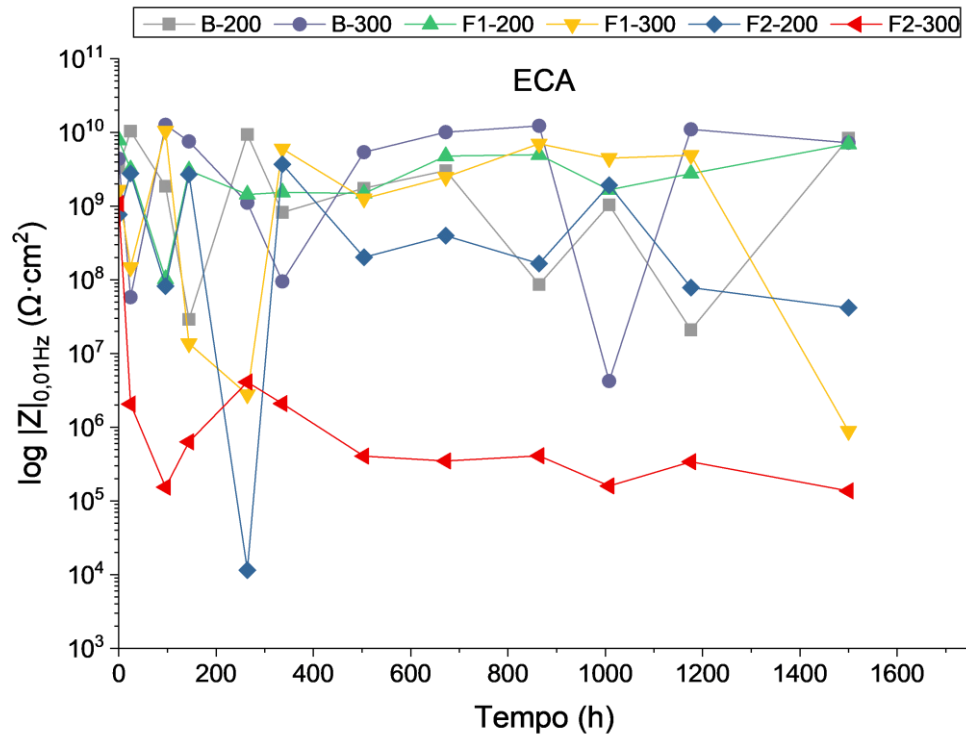
Figura 23 – Diagrama de Bode (módulo) para a formulação 2 em relação ao tempo; a) F2 200  
b) F2 300.



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

A partir da Figura 24, é possível realizar uma análise comparativa geral ao longo do período de exposição.

Figura 24 – Módulo de impedância em 0,01Hz em função do tempo (Estação de Corrosão Atmosférica)



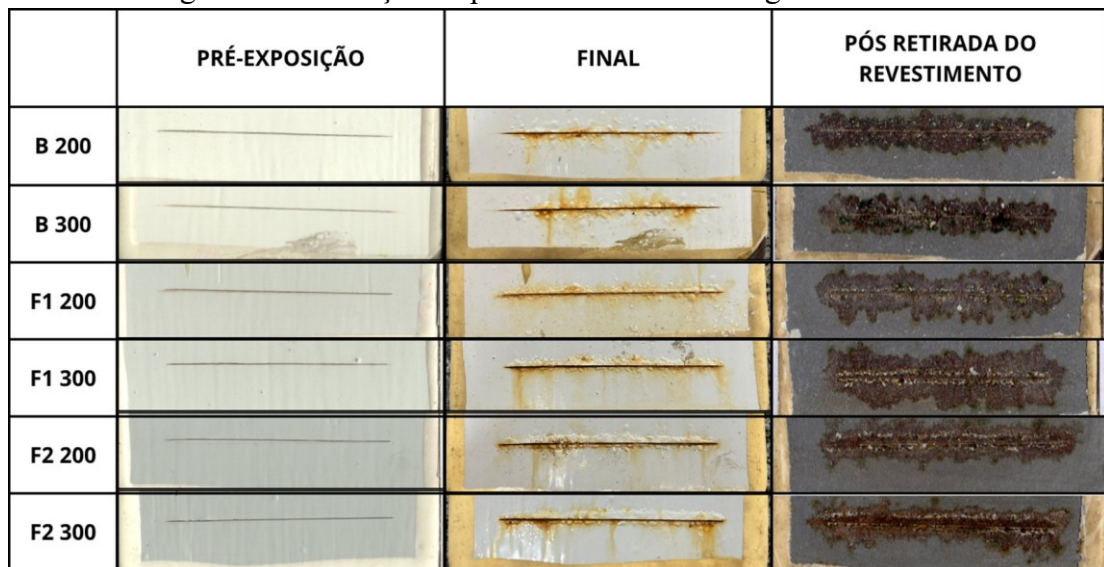
Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

No que tange à influência das nanopartículas, a aditivação não resultou em um aprimoramento do desempenho protetivo do revestimento. Apesar do alto desempenho inicial demonstrado pelo sistema de referência e por algumas formulações aditivadas (notadamente F1-200), a análise comparativa revelou que os revestimentos contendo nanopartículas apresentaram módulos de impedância consistentemente inferiores aos do controle. Este comportamento sugere que, em vez de reforçar, a presença das nanopartículas pode ter introduzido heterogeneidades ou prejudicado a formação de um filme coeso, resultando em um decréscimo das propriedades de barreira nas condições testadas.

#### 5.4 Avaliação do avanço da corrosão a partir da incisão

Após 1500 h de exposição na estação de corrosão atmosférica da UFC, observa-se ausência de degradação visualmente intensa (Figura 25), uma vez que há formação discreta de produtos de corrosão na região da incisão. No entanto, após a retirada do revestimento, verificou-se um avanço expressivo da corrosão a partir do risco, indicando um grau elevado de deterioração do substrato metálico.

Figura 25 – Evolução do processo corrosivo na região da incisão.



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Os valores médios de avanço e seus respectivos desvios-padrão estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Evolução do processo corrosivo na incisão (Estação de Corrosão Atmosférica, 1500 h)

<b>Amostra</b>	<b>B200</b>		<b>B300</b>		<b>F1 200</b>		<b>F1 300</b>		<b>F2 200</b>		<b>F2 300</b>	
<b>Medição</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>
<b>1</b>	4,80	4,99	4,79	4,69	4,72	6,26	5,72	9,15	3,87	3,56	6,13	8,99
<b>2</b>	5,60	6,39	6,26	6,88	7,03	9,00	8,15	8,25	8,82	6,18	5,71	10,78
<b>3</b>	7,72	8,60	12,05	6,02	7,63	8,37	10,39	9,16	5,09	6,51	5,60	5,57
<b>4</b>	6,15	6,28	5,98	6,34	8,58	4,92	7,01	10,45	7,82	7,79	6,88	7,27
<b>5</b>	2,15	6,90	7,24	5,58	5,68	10,41	11,21	6,45	7,15	8,27	5,87	10,11
<b>Média (mm)</b>	5,28	6,63	7,26	5,90	6,73	7,79	8,50	8,69	6,55	6,46	6,04	8,54
<b>Desv. Padrão</b>	2,05	1,31	2,81	0,83	1,54	2,19	2,29	1,48	2,03	1,84	0,51	2,13
<b>Superior + Inferior</b>	<b>11,92</b>		<b>13,17</b>		<b>14,52</b>		<b>17,19</b>		<b>13,01</b>		<b>14,58</b>	
<b>Classificação</b>	<b>5,96</b>		<b>6,58</b>		<b>7,26</b>		<b>8,59</b>		<b>6,51</b>		<b>7,29</b>	













Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

A análise visual e os valores de avanço de corrosão acima de 5 mm confirmam que todas as amostras atingiram o grau 5 (severo) segundo a ISO 4628-8:2005. Essa degradação acentuada demonstra a baixa eficiência protetiva do sistema sob as condições de ensaio, o que está em conformidade com o elevado grau de corrosividade do ambiente, definido pela localização e pelos índices de contaminantes e umidade.













### 5.5 Ensaio de Aderência

A avaliação da aderência dos revestimentos, antes e após 1500 horas de exposição na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC (Figura 26), apontou que para todas as amostras, houve uma falha do tipo A/B, classificada pela norma ASTM D 4541:2022 como falha adesiva entre o substrato e a primeira demão do revestimento.

Figura 26 – Ensaio de *Pull-Off* realizado nas amostras antes e após a exposição na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC

INICIAL						
	B 200	B 300	F1 200	F1 300	F2 200	F2 300
Aço						
Pino						

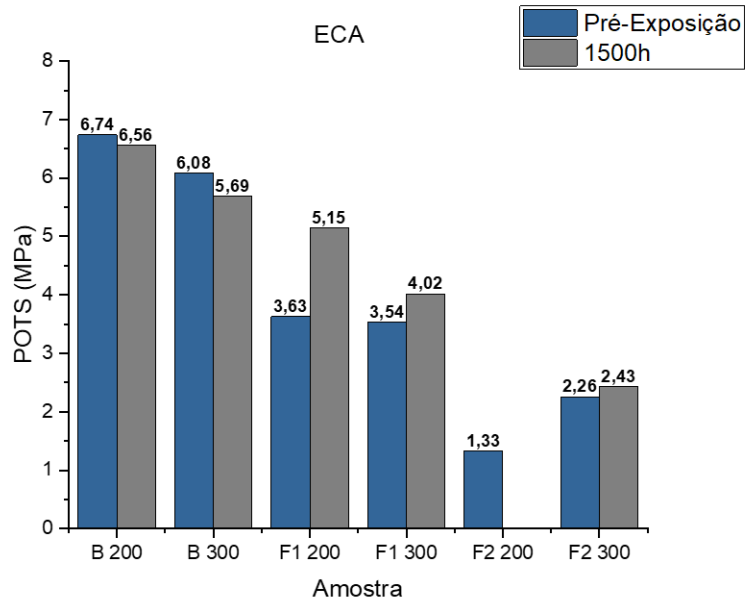
FINAL						
	B 200	B 300	F1 200	F1 300	F2 200	F2 300
Aço						
Pino						

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

De forma análoga ao observado no ensaio de névoa salina, observa-se que os ensaios de aderência revelaram que nenhuma das amostras alcançou o valor mínimo de 8 MPa estipulado

pela norma técnica da Petrobras N-2943:2022 para revestimentos poliaspárticos (Figura 27). Essa baixa adesão pode estar relacionada a falhas no preparo da superfície, à rugosidade inadequada do substrato, além de possíveis incompatibilidades na formulação aditivada com a nanopartícula à base de nano cobre e grafeno.

Figura 27 – Gráfico da força de adesão (MPa) pré exposição e após 1500h para as amostras expostas na Estação de Corrosão Atmosférica da UFC

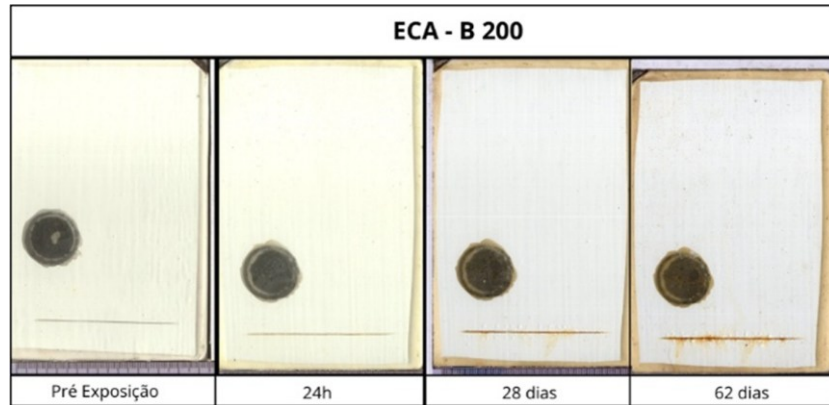


Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

### 5.5.1 Análise de Superfície

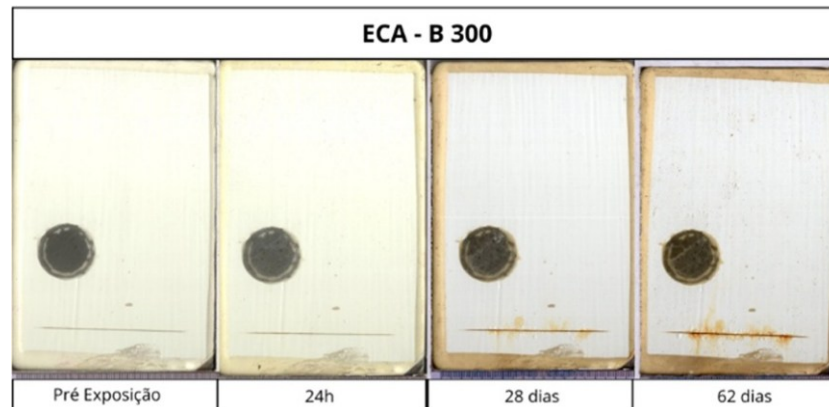
A análise superficial das amostras do sistema de controle (Figuras 28 e 29) expostas à estação de corrosão atmosférica permitiu observar um resultado oposto ao do meio de névoa salina, visto que em nenhuma das imagens foi notada a presença de bolhas. De forma similar ao ensaio de névoa salina, não foi observada a presença de corrosão localizada. Notou-se apenas uma quantidade reduzida de produto de corrosão na região do risco.

Figura 28 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra B200



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

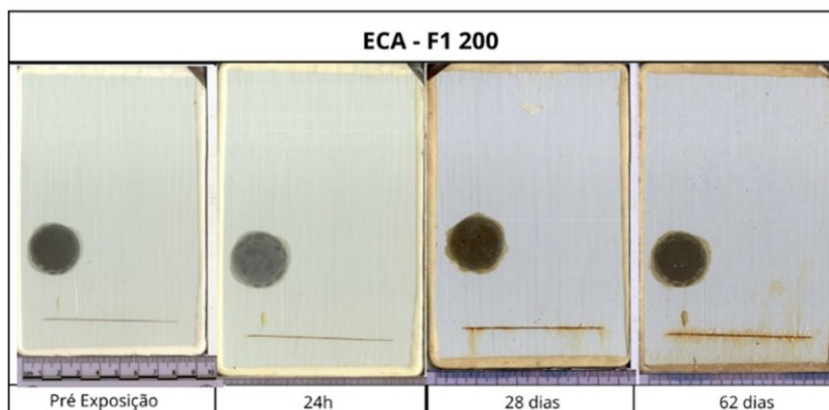
Figura 29 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra B300



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

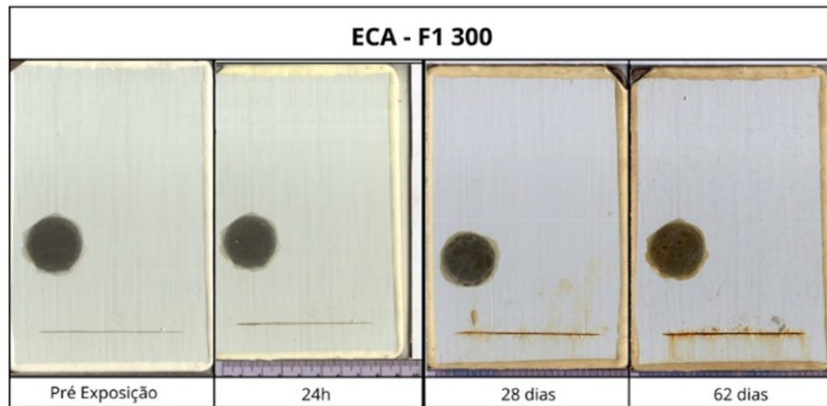
Os corpos de prova com a Formulação 1 (Figuras 30 e 31) não apresentaram empolamentos nem corrosão localizada.

Figura 30 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F1 200



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

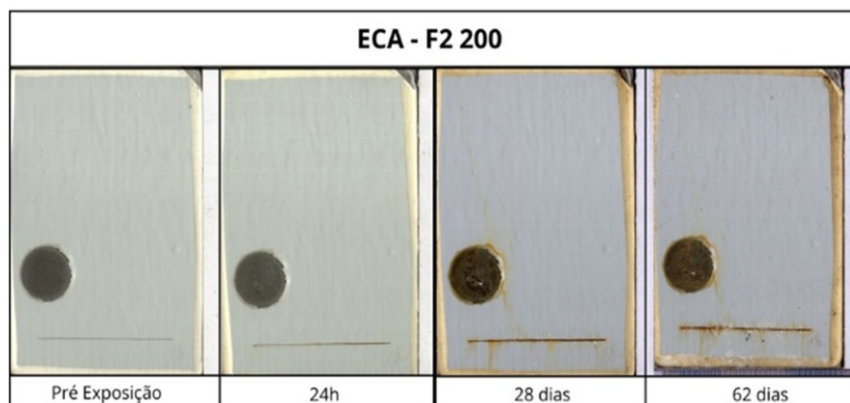
Figura 31 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F1 300



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

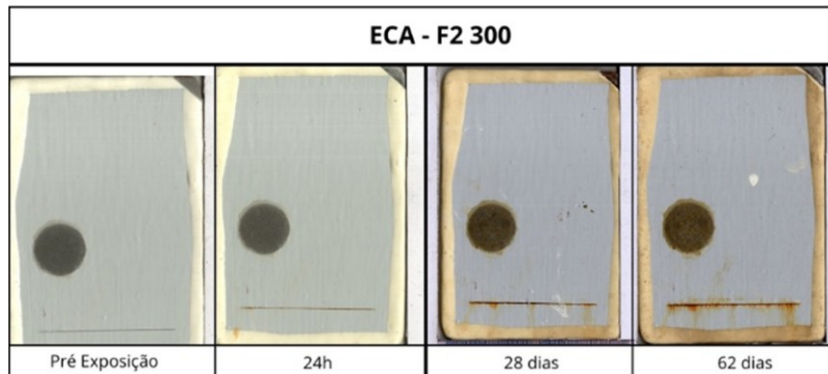
A Formulação 2, que havia apresentado o pior resultado em névoa salina, exibiu um desempenho notavelmente superior na estação de corrosão atmosférica (Figuras 32 e 33). Em contraste direto com o ensaio acelerado, as amostras expostas ao ambiente atmosférico não apresentaram a formação de bolhas. Esse resultado sugere que o revestimento, em todas as suas formulações, obteve um maior desempenho em ambientes urbanos/industriais.

Figura 32 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F2 200



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Figura 33 – Imagens dos corpos de prova ao longo do período de ensaio para a amostra F2 300



Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

## 5.6 Ensaios Acelerados x Corrosão Atmosférica

A comparação de resultados obtidos em ensaios acelerados e em exposição atmosférica é desafiadora, visto que os testes em câmaras aceleradas visam obter, em um curto período, respostas de durabilidade que levariam muito tempo para serem mensuráveis em condições naturais (Girão, 2019). Adicionalmente, na exposição atmosférica, uma grande variedade de fatores pode influenciar o processo corrosivo, tais como umidade, temperatura, velocidade dos ventos, radiação, precipitação e poluentes atmosféricos, entre outros.

Para o presente estudo, a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foi empregada para avaliar a resistência do material e a propriedade de barreira do revestimento. Observou-se que as amostras submetidas à câmara de névoa salina obtiveram menores valores de módulo de impedância na região de baixa frequência: aproximadamente  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$  para as amostras de referência e  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$  para as duas formulações contendo a nanopartícula.

Esse resultado é atribuído ao meio altamente agressivo do ensaio acelerado. Em contraste, os resultados obtidos nas amostras expostas à atmosfera natural foram superiores, com valores de módulo de impedância atingindo até  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$  para as amostras de referência e para a formulação 1 na amostra F1-200. No entanto, algumas amostras apresentaram valores inferiores, especialmente as formulações contendo maiores quantidades de nanopartícula, chegando até  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

Sendo assim, nota-se que para o mesmo tempo de exposição, mas em condições distintas, os resultados de impedância mostram que, dada a agressividade do meio acelerado, seria esperado que as amostras expostas à atmosfera apresentassem maior resistência. Contudo, percebe-se que, dependendo da formulação esses resultados podem se tornar bem similares.

## 6 CONCLUSÃO

A investigação sobre a influência da aditivação de nanopartículas de grafeno e nano cobre em um revestimento poliaspártico demonstrou que a incorporação destes aditivos, nas condições e concentrações testadas, não proporcionou o aumento esperado na proteção anticorrosiva. Pelo contrário, observou-se que a presença das nanopartículas teve um efeito adverso no desempenho do sistema. No ensaio de exposição atmosférica, o revestimento sem aditivos exibiu um excelente desempenho de barreira, com valores de impedância na ordem de  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , enquanto as formulações aditivadas apresentaram um desempenho inferior e maior suscetibilidade à degradação. Embora o sistema de referência tenha funcionado bem como barreira, a corrosão na em torno da incisão foi severa em todas as amostras, o que sugere um efeito sinérgico agressivo entre a humidade e os poluentes locais.

Sob as condições severas da câmara de névoa salina, o desempenho de todos os sistemas foi consideravelmente inferior, com uma queda acentuada nos valores de impedância para patamares abaixo de  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Neste ambiente, o empolamento foi o principal modo de falha visual, sendo drasticamente intensificado em determinadas formulações aditivadas. Outro fator crítico identificado foi a baixa aderência ao substrato de aço carbono; nenhum dos sistemas atingiu o limite mínimo de 8 MPa exigido pela norma Petrobras N-2943:2022, apresentando falhas do tipo adesiva, as quais são proibidas pelos critérios de aceitação normativa.

Estas limitações de desempenho são atribuídas, fundamentalmente, à forte tendência de aglomeração das nanopartículas de grafeno devido às interações de Van der Waals e à elevada área superficial. A aglomeração, aliada a um método de mistura que pode ter sido insuficiente para garantir uma dispersão homogénea, comprometendo a uniformidade do revestimento. Além disso, a provável incompatibilidade química entre as nanopartículas e a matriz poliaspártica resultou numa estrutura heterogénea, facilitando a permeação de agentes corrosivos e reduzindo a eficácia protetiva final do sistema.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13006:1993**. Rio de Janeiro, 1993. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6209**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>.
- AMIRUDIN, A.; THIENY, D. Application of electrochemical impedance spectroscopy to study the degradation of polymer-coated metals. **Progress in Organic Coatings**, v. 26, n. 1, p. 1–28, 1995.
- ASHRAF, P. M.; LEKSHMI, N. M.; CHINNADURAI, S.; ANJITHA, S.; ARCHANA, M.; Vineeth Kumar, C. M.; SANDHYA, K. M.; GOP, A. P. Impact assessment of biofouling resistant nano copper oxide–polyaniline coating on aquaculture cage nets. **Aquaculture and Fisheries**, v. 8, n. 5, p. 538–543, 2023. ISSN 2468-550X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468550X22000028>.
- ASTM International. Método de Ensaio Padrão, **Standard Test Methods for Evaluation of Total Sulfation Activity in the Atmosphere by the Lead Dioxide Technique**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010. Disponível em: [https://www.astm.org/d2010\\_d2010m-98.html](https://www.astm.org/d2010_d2010m-98.html).
- ASTM International. Método de Ensaio Padrão, **Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/d1739-98r17.html>.
- ASTM International. Método de Ensaio Padrão, **Standard Test Method for Determining Atmospheric Chloride Deposition Rate by Wet Candle Method**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. Disponível em: <https://www.astm.org/g0140-02r19.html>.
- ASTM International. Método de Ensaio Padrão, **Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. Disponível em: <https://www.astm.org/d4541-22.html>.
- ASTM International. Prática Padrão, **Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023. Disponível em: <https://www.astm.org/b0117-23.html>.
- ASTM International. Método de Ensaio Padrão, **Standard Test Method for Chloride Ions in Brackish Water, Seawater, and Brines**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023. Disponível em: <https://www.astm.org/d4458-15r23.html>.
- BIERWAGEN, G. P.; HE, L.; LI, J.; ELLINGSON, L.; TALLMAN, D. Studies of a new accelerated evaluation method for coating corrosion resistance — thermal cycling testing. **Progress in Organic Coatings**, v. 39, n. 1, p. 67–78, 2000. ISSN 0300-9440. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944000001065>.
- BORDIGNON, R. Z. **Desempenho tribológico de grafeno funcionalizado como aditivo em óleo lubrificante de baixa viscosidade**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Acesso em: 02 nov. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/189942>.

da Silva, L. R. R.; AVELINO, F.; DIOGENES, O. B. F.; SALES, V. de O. F.; da Silva, K. T.; ARAUJO, W. S.; MAZZETTO, S. E.; LOMONACO, D. Development of bpa-free anticorrosive epoxy coatings from agroindustrial waste. **Progress in Organic Coatings**, v. 139, p. 105449, 2020. ISSN 0300-9440. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944019310173>.

DIÓGENES, O. B. F. **Utilização de lignina acetilada no desenvolvimento de revestimento epóxi anticorrosivo**. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais)) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais.

EVANS, U.; TAYLOR, C. Mechanism of atmospheric rusting. **Corrosion Science**, v. 12, n. 3, p. 227–246, 1972. ISSN 0010-938X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X72906713>.

FAROOQ, S. A.; RAINA, A.; MOHAN, S.; SINGH, R. A.; JAYALAKSHMI, S.; HAQ, M. I. U. Nanostructured coatings: Review on processing techniques, corrosion behaviour and tribological performance. **Nanomaterials**, v. 12, n. 8, 2022. ISSN 2079-4991. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/8/1323>.

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). **Banco de Dados Meteorológicos: Estação Fortaleza-Itaperi**. 2025. Disponível em: <http://www.funceme.br/dados-meteorologicos>.

GENTIL, V. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GIRÃO, D. d. C. **Estudo de revestimentos anticorrosivos epóxi-fosfato de zinco com adição de argilas montmorilonitas: aplicação em usina termelétrica**. Tese (Tese de Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2019. Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.

International Organization for Standardization. Norma Internacional, **Corrosion of metals and alloys – Corrosion tests in artificial atmosphere – Accelerated outdoor test by intermittent spraying of a salt solution (Scab test)**. Geneva: ISO, 1998. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/19321.html>.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 8501-1**. Genebra, Suíça, 2007. Disponível em: <https://www.iso.org>.

JONES, D. A. **Principles and Presentation of Corrosion**. 2. ed. Reino Unido: Pearson, 1996. ISBN 978-0133599930.

JR., W. D. C. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

KANG, F.; ZHU, G.; DING, X.; ZHANG, Y.; ZHAO, Z.; ZHANG, T.; HE, Z.; LIU, F.-Q. In situ growth of two-dimensional mxene/nano-copper metal-organic framework composites for antimicrobial applications in epoxy coatings. **Bioelectrochemistry**, v. 165, p. 108952, 2025. ISSN 1567-5394. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1567539425000556>.

KOTNAROWSKA, D. *et al.* Influence of ageing with uv radiation on physicochemical properties of acrylic-polyurethane coatings. **Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology**, Scientific Research Publishing, v. 8, n. 04, p. 95, 2018.

LIU, Q.; LEI, Y.; ZENG, Q.; LI, C.; SUN, G.; YOU, B.; REN, W. Hydrogenated castor oil modified graphene oxide as self-thixotropic nanofiller in high solid polyaspartic coatings for enhanced anti-corrosion performance. **Progress in Organic Coatings**, v. 167, p. 106836, 2022. ISSN 0300-9440. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944022001333>.

LV, Y.; ZHAO, J.; FAN, B.; MUBEEN, M.; MUBASHAR, M.; ZI, F.; LIU, Y.; WANG, W.; JAWAD, M.; WANG, X.; LIU, S. Functionalized zif-8@zrp nanohybrid for corrosion- and weathering-resistance epoxy composite coating: Critical role of polyaspartic acid. **Chemical Engineering Journal**, v. 524, p. 169145, 2025. ISSN 1385-8947. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894725099887>.

NAYAK, S. R.; MOHANA, K. N. S.; HEGDE, M. B.; RAJITHA, K.; MADHUSUDHANA, A. M.; NAIK, S. R. Functionalized multi-walled carbon nanotube/polyindole incorporated epoxy: An effective anti-corrosion coating material for mild steel. **Journal of Alloys and Compounds**, Elsevier, v. 856, p. 158057, 2021.

NUNES, L. d. P.; LOBO, A. C. O. **Pintura Industrial na proteção anticorrosiva**. Rio de Janeiro: LTC, 1990.

PAN, C.; HE, J.; ZHU, J.; LI, S.; LI, W.; YANG, W.; LI, W. Corrosion control by carbon-based nanomaterials: A review. **ACS Applied Nano Materials**, v. 7, n. 3, p. 2515–2528, 2024.

PASSIVAR. **Corrosão causa perda de 3,5% do PIB mundial**. 2025. Acesso em: 5 out. 2025. Disponível em: <https://passivar.com.br/corrosao-causa-perda-de-35-do-pib-mundial/>.

PELTIER, F.; THIERRY, D. Development of a reliable accelerated corrosion test for painted aluminum alloys used in the aerospace industry. **Corrosion and Materials Degradation**, v. 5, n. 3, p. 427–438, 2024. ISSN 2624-5558. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2624-5558/5/3/19>.

Petrobras. **N-2913: Anexo 4.5**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.petrobras.com.br>.

Petrobras. **N-2943: Anexo G**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.petrobras.com.br>.

POPOV, B. N. **Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems**. Amsterdam: Elsevier, 2015. Acesso em: 02 nov. 2025. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=FiAtBAAAQBAJ>.

STANDARDIZATION, I. O. for. Standard, **ISO 4628-8:2005 — Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance — Part 8: Assessment of degree of delamination and corrosion around a scribe or other artificial defect**. Geneva: [S. n.], 2005.

STANDARDIZATION, I. O. for. Standard, **ISO 9223:2012 — Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation**. Geneva: [S. n.], 2012.

THAKUR, A.; KAYA, S.; KUMAR, A. Recent trends in the characterization and application progress of nano-modified coatings in corrosion mitigation of metals and alloys. **Applied Sciences**, v. 13, n. 2, 2023. ISSN 2076-3417. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/2/730>.

VASQUES, R. B. **Avaliação da resistência à corrosão do aço carbono com revestimento nanocerâmico à base de zircônio**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais)) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

WEG S.A. **W-POLI HPD 451: primer acabamento poliaspártico; produto de alto sólidos, ótima retenção de cor e brilho e secagem extra-rápida**. 2025. WEG Tintas e Vernizes – WEG website. Atende norma Petrobras N 2913 – Item 4.5 – Revestimentos poliaspártico; atende norma Petrobras N 2943 – Anexo G – Requisitos para revestimentos poliaspártico. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Tintas-e-Vernizes/Tinta-Liquida/Industrial-Anticorrosivo/M%C3%A1quinas-e-Equipamentos/W-POLI-HPD-451/p/W-POLI\\_HPDP\\_451](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Tintas-e-Vernizes/Tinta-Liquida/Industrial-Anticorrosivo/M%C3%A1quinas-e-Equipamentos/W-POLI-HPD-451/p/W-POLI_HPDP_451).

WEI, J.; VO, T.; INAM, F. Epoxy/graphene nanocomposites – processing and properties: a review. **RSC Advances**, Royal Society of Chemistry (RSC), v. 5, n. 90, p. 73510–73524, 2015. Acesso em: 02 nov. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C5RA13897C>.

XING, X.; WANG, J.; LI, Q.; HU, W.; YUAN, J. A novel acid-responsive hnts-based corrosion inhibitor for protection of carbon steel. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 553, p. 295–304, 2018. ISSN 0927-7757. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775718304485>.

YELWA, J. M.; MUSA, H.; FASANYA, O. O.; YAHAYA, J. Y. Corrosion-resistant coatings: Advances in deposition methods, nanostructures, and self-healing films. **Academia Materials Science**, v. 2, n. 3, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.20935/AcadMatSci7829>.

ZHU, M.; QIAN, H.; LI, L.; ZHANG, L.; WANG, C.; KANG, J.; GAO, Q. Synergistic enhancement of anti-scaling performance in epoxy resin coatings via the incorporation of modified hexagonal boron nitride and nano-copper oxide. **Progress in Organic Coatings**, v. 208, p. 109494, 2025. ISSN 0300-9440. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944025004436>.