

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**LUIZA BERTUZZO SOCCOLOSKI**

**DESEMPENHO COMPARATIVO DE REVESTIMENTOS METÁLICOS EM  
ESTRUTURAS FOTOVOLTAICAS: RESISTÊNCIA À CORROSÃO E PROPRIEDADES  
MECÂNICAS APÓS ENSAIOS ACELERADOS**

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

**LUIZA BERTUZZO SOCCOLOSKI**

**DESEMPENHO COMPARATIVO DE REVESTIMENTOS METÁLICOS EM  
ESTRUTURAS FOTOVOLTAICAS: RESISTÊNCIA À CORROSÃO E  
PROPRIEDADES MECÂNICAS APÓS ENSAIOS ACELERADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lílian Vanessa Rossa Beltrami

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

## RESUMO

A crescente expansão dos sistemas de energia fotovoltaica (FV) exige materiais de fixação e suporte com alta durabilidade, especialmente em ambientes de elevada corrosividade, como áreas industriais e costeiras. O presente trabalho teve como objetivo avaliar comparativamente o desempenho de três revestimentos metálicos comerciais (Galvanizado a Fogo, Magnelis® e ZAR 345), quando aplicados sobre o aço, considerando-se a resistência à corrosão acelerada (Névoa Salina Neutra) e a manutenção da propriedade mecânica de tração do substrato após ensaio de corrosão acelerada. Os materiais avaliados distinguem-se pela composição química de seus revestimentos. O aço Galvanizado a Fogo consiste em zinco puro aplicado por imersão a quente, o ZAR e o Magnelis® são constituídos por ligas de zinco-alumínio-magnésio, em diferentes formulações e massas de camada. A metodologia adotada envolveu a caracterização inicial dos materiais, a exposição em ensaios de Névoa Salina Neutra por 1032 h e a subsequente avaliação da degradação mecânica através de ensaios de tração. Os resultados demonstraram que o desempenho protetivo está ligado à combinação entre a massa de revestimento por área e o mecanismo de proteção específico de cada material. Tanto o Galvanizado a Fogo (486 g/m<sup>2</sup>) quanto o Magnelis® (310 g/m<sup>2</sup>) apresentaram notável eficácia, resistindo às 1032 h de exposição sem manifestar corrosão vermelha. Entretanto, a cinética de degradação diferiu: o Galvanizado apresentou corrosão branca em 24 h, enquanto o Magnelis® manteve-se inalterado até 192 h. O desempenho do Galvanizado a Fogo foi garantido pela sua robusta massa de camada, que ofereceu um reservatório superior para a proteção catódica. Por sua vez, o sucesso do Magnelis® foi atribuído à formação de produtos de corrosão estáveis que promovem um mecanismo de proteção ativa e autorreparadora. Em contraste, o revestimento ZAR 345 (290 g/m<sup>2</sup>) apresentou a falha mais crítica, com corrosão vermelha em 72 h, confirmando que sua reserva de material foi insuficiente para sustentar a regeneração protetiva em condições severas. A análise das propriedades mecânicas quantificou essa degradação, revelando que a falha do ZAR 345 resultou em uma queda na ductilidade do substrato (de 34,5% para 23,5%), caracterizando fragilização, enquanto os demais revestimentos preservaram integralmente suas propriedades mecânicas originais. Conclui-se que o Magnelis® e o Galvanizado a Fogo são materiais tecnicamente adequados para o uso em estruturas fotovoltaicas em ambientes de alta corrosividade, e reforça-se a importância de considerar a massa de camada como um parâmetro de especificação inegociável para ligas (Zn-Al-Mg).

Palavras-chave: Corrosão Acelerada; Revestimentos Metálicos; Zinco-Alumínio-Magnésio; Estruturas Fotovoltaicas; Propriedades Mecânicas.

## ABSTRACT

The growing expansion of photovoltaic (PV) energy systems requires fastening and support materials with high durability, especially in highly corrosive environments, such as industrial and coastal areas. The present study aimed to comparatively evaluate the performance of three commercial metallic coatings (Hot-Dip Galvanized, Magnelis®, and ZAR 345) when applied to steel, considering the resistance to accelerated corrosion (Neutral Salt Spray) and the maintenance of the tensile mechanical property of the substrate after accelerated corrosion testing. The evaluated materials are distinguished by the chemical composition of their coatings. Hot-Dip Galvanized Steel consists of pure zinc applied by hot immersion, while ZAR and Magnelis® are composed of zinc-aluminum-magnesium alloys, in different formulations and layer masses. The adopted methodology involved the initial characterization of the materials, exposure in Neutral Salt Spray tests for 1032 hours, and the subsequent evaluation of mechanical degradation thru tensile tests. The results demonstrated that the protective performance is linked to the combination between the coating mass per area and the specific protection mechanism of each material. Both Hot-Dip Galvanized (486 g/m<sup>2</sup>) and Magnelis® (310 g/m<sup>2</sup>) showed remarkable effectiveness, withstanding 1032 hours of exposure without exhibiting red corrosion. However, the degradation kinetics differed: Galvanized showed white corrosion at 24 hours, while Magnelis® remained unchanged until 192 hours. The performance of Hot-Dip Galvanizing was ensured by its robust layer mass, which provided a superior reservoir for cathodic protection. In turn, the success of Magnelis® was attributed to the formation of stable corrosion products that promote an active and self-repairing protection mechanism. In contrast, the ZAR 345 (290 g/m<sup>2</sup>) coating exhibited the most critical failure, with red corrosion in 72 hours, confirming that its material reserve was insufficient to sustain protective regeneration under severe conditions. The analysis of mechanical properties quantified this degradation, revealing that the failure of ZAR 345 resulted in a drop in substrate ductility (from 34.5% to 23.5%), characterizing embrittlement, while the other coatings fully preserved their original mechanical properties. It is concluded that Magnelis® and Hot-Dip Galvanized materials are technically suitable for use in photovoltaic structures in highly corrosive environments, and the importance of considering layer mass as a non-negotiable specification parameter for (Zn-Al-Mg) alloys is reinforced.

**Keywords:** Accelerated Corrosion; Metallic Coatings; Zinc-Aluminum-Magnesium; Photovoltaic Structures; Mechanical Properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição da estrutura fotovoltaica.....	14
Figura 2 – Fluxo de trabalho.....	26
Figura 3 – Corpo de prova de tração, conforme ABNT NBR 6892:2020.....	28
Figura 4 – Metalografia amostras íntegras .....	30
Figura 5 – Amostras íntegras.....	32
Figura 6 – Amostras após 24h de NSS .....	33
Figura 7 – Amostras após 72 h de NSS .....	34
Figura 8 – Amostras após 168 h de NSS .....	35
Figura 9 – Amostras após 192 h de NSS .....	36
Figura 10 – Amostras após 240 h de NSS .....	37
Figura 11 – Amostras após 600 h de NSS .....	38
Figura 12 – Amostras após 768 h de NSS .....	39
Figura 13 – Amostras após 1032 h de NSS .....	40
Figura 14 – Síntese de resultados para as amostras ZAR, Galvanizado a Fogo e Magnelis®.	45

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Desempenho de Revestimentos de Zinco por Ambientes Corrosivo .....	20
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações dos revestimentos.....	31
Tabela 2 – Propriedades mecânicas ZAR 345.....	42
Tabela 3 – Propriedades mecânicas Galvanizado a Fogo.....	42
Tabela 4 – Propriedades mecânicas Magnelis®.....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABINOX	Associação Brasileira do Mercado de Aços Inoxidáveis
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
FV	Fotovoltaica
GI	<i>Galvanized Iron</i>
ICZ	Instituto Cadeia do Zinco
IEA-PVPS	<i>International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAMEC	Laboratório de Ensaios Mecânicos
LCOR	Laboratório de Corrosão
LDH	<i>Layered Double Hydroxides</i>
LE	Limite de Escoamento
LRT	Limite de Resistência à Tração
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NSS	<i>Neutral Salt Spray</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UCS	Universidade de Caxias do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
ZAR	Zincagem de Alta Resistência

## LISTA DE SÍMBOLOS

Zn	Zinco
Al	Alumínio
Mg	Magnésio
Fe	Ferro
h	Horas
g/m <sup>2</sup>	Gramas por metro quadrado
µm	Micrômetro
mm	Milímetros
°C	Graus Celsius
MPa	Megapascal
TW	Terawatt
%	Porcentagem

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	12
1.2	OBJETIVO GERAL .....	12
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICO.....	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	ESTRUTURAS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	14
2.2	CORROSÃO.....	16
<b>2.2.1</b>	<b>Tipos de corrosão em estruturas para sistemas fotovoltaicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Classificação de ambientes corrosivos .....</b>	<b>18</b>
2.3	REVESTIMENTO UTILIZADOS EM ESTRUTURAS DE SISTEMAS FV.....	20
<b>2.3.1</b>	<b>Galvanização a fogo: revestimento em zinco puro.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Pré galvanização: revestimento em ligas de Zn-Al-Mg.....</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
3.1	MATERIAIS.....	25
3.2	MÉTODOS .....	26
3.3	CARACTERIZAÇÃO .....	27
<b>3.3.1</b>	<b>Caracterizações Metalográficas.....</b>	<b>27</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Ensaio de Corrosão Acelerada .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Ensaio Mecânicos .....</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>29</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS MATERIAIS .....	29
<b>4.1.1</b>	<b>Análise Metalográfica.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Análise dos revestimentos protetores.....</b>	<b>31</b>
4.2	ENSAIO DE CORROSÃO ACELERADA.....	31
4.3	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	41
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA .....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>

<b>ANEXO A – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO AÇO ZAR 345.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO B – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO AÇO GALVANIZADO A FOGO .</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO C – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO MAGNELIS® .....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente procura por fontes alternativas de energia impulsionou o uso de sistemas fotovoltaicos em larga escala. Conforme relatório publicado pela IEA-PVPS (2024), mais de 1,6 TW estavam em operação pelo mundo no início do mesmo ano. As projeções indicam que até 2033 o mercado FV atinja US\$ 590 bilhões, com destaque para aplicações residenciais (Straits Research, 2025).

Perante este cenário, torna-se cada vez mais essencial o aprimoramento de revestimentos anticorrosivos, visto que a corrosão é uma das principais causas de perda de eficiência nos sistemas fotovoltaicos (Vinturini, 2019). Em sua maioria, essas estruturas são fabricadas em aço carbono e protegidas por revestimentos metálicos, como a galvanização a fogo. Entretanto, a exposição contínua em ambientes agressivos – como regiões costeiras, zonas industriais ou locais com alta umidade – levanta preocupações quanto a perda de eficiência desses revestimentos a longo prazo. Em resposta, revestimento a base de ligas de Zn-Al-Mg, como o ZAR e o Magnelis®, vêm sendo cada vez mais desenvolvidos, oferecendo resistência superior à corrosão e maior estabilidade mecânica frente ao envelhecimento prematuro (Costa et al., 2021).

Entretanto, apesar dos avanços, ainda existem lacunas quanto ao impacto direto da corrosão nas propriedades mecânicas desses materiais, especialmente quando aplicados em sistemas estruturais submetidos a esforços mecânicos contínuos. O que levanta a seguinte questão: como os diferentes revestimentos metálicos influenciam o desempenho mecânico de perfil de aço após a exposição a ambientes extremamente agressivos? A resposta dessa pergunta poderá orientar decisões mais seguras na escolha de materiais que são expostos ao tempo (Vinturini, 2019).

A fim de responder a esse questionamento, esta pesquisa foi conduzida com base em um delineamento experimental. Foram utilizados perfis metálicos de aço com diferentes tipos de revestimento (galvanizado a fogo, ZAR e Magnelis®), cotidianamente utilizados por uma empresa especializada em estruturas fotovoltaicas (Alfix Estruturas Metálicas). Os corpos de prova foram submetidos à névoa salina neutra (NSS, do inglês neutral salt spray), regulado pelas normas ISO 9227-2017. Posteriormente, as amostras foram avaliadas por meio do ensaio de tração, conduzidos nos laboratórios da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Para garantir uma base comparativa confiável, as amostras íntegras também foram submetidas aos mesmos ensaios mecânicos aplicados às amostras expostas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A realização deste estudo se justifica pela necessidade de investigar a durabilidade de revestimentos metálicos utilizados em sistemas expostos a condições severas, como os sistemas fotovoltaicos. Ao relacionar a resistência à corrosão do revestimento com o comportamento mecânico do substrato metálico após a exposição à corrosão acelerada, será possível identificar quais dos revestimentos testados oferecem maior proteção ao aço, mesmo com a ação de agentes agressivos. Além disso, a análise dos resultados obtidos permitirá estimar com mais precisão a durabilidade dos diferentes revestimentos em campo. Os resultados poderão contribuir diretamente a fabricantes, projetistas e instaladores, orientando escolhas mais seguras e economicamente viáveis para aplicações em longo prazo.

Adicionalmente, esta pesquisa dialoga com a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), contribuindo para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O estudo alinha-se ao ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), ao buscar garantir a integridade e a longevidade da infraestrutura necessária para a geração de energia renovável. Relaciona-se também ao ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao promover o desenvolvimento de infraestruturas resilientes capazes de suportar ambientes agressivos sem falhas prematuras. Por fim, contempla o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), visto que a identificação de revestimentos com maior vida útil reduz a necessidade de substituições frequentes e manutenções corretivas, reduzindo o desperdício de materiais metálicos e o impacto ambiental associado à produção de novas estruturas.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de diferentes revestimentos metálicos (ZAR, Galvanizado a Fogo e Magnelis®) aplicados sobre o aço utilizado em estruturas para sistemas fotovoltaicos, com ênfase na resistência à corrosão e nas propriedades mecânicas, visando à durabilidade em ambientes simulados potencialmente agressivos.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICO

- a) Avaliar o desempenho das amostras de aço com diferentes revestimentos metálicos quanto à exposição a ambientes simulados de corrosão acelerada para prever o comportamento dos revestimentos ao longo do tempo.

- b) Analisar a integridade estrutural e as propriedades mecânicas dos materiais revestidos antes e após os ensaios exposição a ambientes simulados de corrosão acelerada.
- c) Indicar critérios técnicos, a partir da relação dos resultados obtidos, para seleção de revestimentos mais eficientes conforme a classe de agressividade do ambiente.

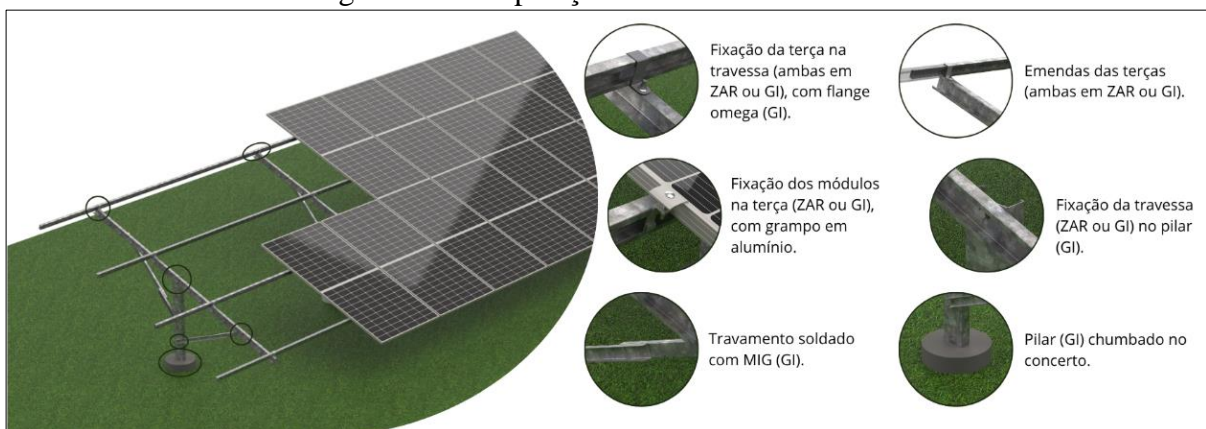
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o crescimento acelerado da energia solar – inclusive em sistemas flutuantes com estruturas expostas em ambientes agressivos -, a proteção anticorrosiva tornou-se essencial para assegurar a longevidade dos componentes metálicos. Estudos como o de Heredia et al. (2025) demonstram a severa degradação do aço carbono em ambientes agressivos, devido à exposição contínua, e reforçam a necessidade de aprimoramento de revestimentos protetores para condições extremas. Este referencial teórico reúne os principais conceitos relacionados à corrosão em estruturas metálicas aplicadas a sistemas fotovoltaicos, abordando os fatores que influenciam o processo corrosivo, a classificação dos ambientes segundo normas técnicas e alguns dos principais revestimentos utilizados atualmente, como o galvanizado convencional, ZAR e Magnelis®.

### 2.1 ESTRUTURAS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

As estruturas para sistemas fotovoltaicos são os elementos responsáveis pela fixação e sustentação dos módulos solares, garantido o posicionamento ideal para maximizar a captação de radiação e estabilidade do conjunto. Geralmente fabricadas em aço galvanizado alumínio ou ligas metálicas com tratamentos anticorrosivos, essas estruturas precisam aliar leveza, resistência mecânica e proteção contra agentes agressivos. A Figura 1 mostra um exemplo de estrutura fotovoltaica, apresentando suas respectivas matérias primas.

Figura 1 – Composição da estrutura fotovoltaica



Fonte: Acervo Alfix (2025).

Embora apresentem longa vida útil, os sistemas fotovoltaicos precisam ser projetados visando à durabilidade e longevidade do sistema e de seus componentes. A estrutura metálica, que sustenta os módulos geradores, é essencial para a segurança do sistema. Do ponto de vista mecânico, ela é responsável por suportar esforços como o peso dos módulos e as cargas de vento. Já do ponto de vista ambiental, ela deve resistir à exposição contínua a diferentes intempéries e contaminantes atmosféricos (Vinturini, 2019).

Durante o projeto, é essencial considerar que a estrutura estará exposta a ambientes diversos, como regiões litorâneas, urbanas ou industriais, bem como falhas decorrentes de erros de montagem, subdimensionamento em relação às cargas de vento ou sobrecarga, além da corrosão dos componentes (Vinturini, 2019).

Além de perdas estruturais, os sistemas fotovoltaicos quando instalados em ambientes agressivos, apresentam perdas importantes na produção de eletricidade. A corrosão afeta principalmente as resistências em série do módulo, reduzindo severamente sua eficiência, sendo essa a segunda maior causa de perda de rendimento energético, nos sistemas instalados nos últimos 10 anos (Kyranaki, 2020).

A corrosão pode se iniciar das bordas da folha traseira ou através da moldura do módulo e infiltrando-se nas lacunas da célula, isso dá início ao processo corrosivo. Esses processos resultam na criação de gás hidrogênio, cuja expansão leva à delaminação. Por sua vez, a delaminação compromete a integridade dos painéis, levando à redução da condutividade elétrica e da absorção de luz. Essa combinação acaba impactando na eficiência de conversão de energia solar em eletricidade (Shaker et al. 2024).

Diante dessas evidências, diversos estudos têm se concentrado na caracterização e mitigação da corrosão em estruturas metálicas. Martínez-Pañeda (2024) demonstra como a modelagem baseadas em métodos de campo pode auxiliar na compreensão e previsão da evolução da corrosão nos materiais. Esses modelos integram processos diversos, como o transporte de íons, reações químicas, deformações mecânicas e efeitos na microestrutura, de maneira integrada. A utilização desses modelos pode ajudar a prever transições de corrosão por pites, que evoluem para trincas, além de orientar estratégias de prevenção da mitigação da corrosão.

Tais avanços ganham relevância perante à expansão do setor fotovoltaico. Segundo o relatório da IEA-PVPS (2024), no início do ano, mais de 1,6 TW estavam operando no mundo, representando 8,3% da demanda global de energia elétrica. Além disso, é estimado que o mercado fotovoltaico atinja US\$ 590 bilhões até 2033, onde o setor residencial é o que mais compra sistemas e, conseqüentemente, mais gera energia (Straits Research, 2025).

As metodologias de mitigação da corrosão podem ser passivas ou ativas. A abordagem passiva, de caráter preventivo, geralmente envolve o uso de revestimentos, que impedem o contato entre o substrato e o ambiente agressivo. Já a abordagem ativa é corretiva, sendo aplicada após a instalação da corrosão, com objetivo de reduzir sua taxa de propagação (Figueira, 2020).

Diante deste cenário, observa-se a necessidade de adotar sistemas de proteção mais eficientes e sustentáveis, impulsionada pela crescente exigência de desempenho das estruturas metálicas. Embora exista uma ampla variedade de sistemas anticorrosivos, não há solução universal. Por isso é imprescindível selecionar o sistema que mais se adequa às necessidades do projeto, considerando fatores como o tipo de estrutura, custo, aplicação, agressividade do ambiente e as condições de exposição (Correia et al., 2011)

Além das abordagens tradicionais de proteção, revestimentos híbridos sol-gel vem ganhando destaque. Combinam vantagens de polímeros orgânicos e inorgânicos, estes revestimentos permitem o controle de sua estrutura em escala nanométrica. Isso possibilita desenvolver materiais com propriedades variadas e adaptadas a diferentes aplicações. A camada formada pelo revestimento é uniforme, impedindo a penetração de agentes corrosivos, além de ser hidrofóbica, o que aumenta a resistência à água e umidade (Figueira, 2020).

## 2.2 CORROSÃO

Gentil (2022) define corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, causado pela interação físico-química do material com o meio, por ação química ou eletroquímica, podendo estar associada a esforços mecânicos. Os danos decorrentes dessa interação apresentam perdas indesejáveis para a integridade do material, comprometendo sua durabilidade e funcionalidade. Uma vez que a corrosão é um processo espontâneo de degradação superficial em metais, é essencial empregar mecanismos protetores para evitar a destruição completa dos componentes metálicos. Todos os materiais metálicos estão sujeitos à corrosão, cuja intensidade depende da agressividade do meio, por isso é essencial que haja um estudo do conjunto para avaliar a viabilidade de uso do material, considerando o material metálico, o meio corrosivo e as condições operacionais (Gentil, 2022).

Além de garantir a integridade estrutural, o controle da corrosão proporciona benefícios expressivos em termos de custos. Segundo Koch et al. (2016) estudos apontam que os custos estimados da corrosão foram de US\$ 2,5 trilhões, aproximadamente 3,4% do PIB global em 2013. A entidade aponta que a aplicação adequada do controle da corrosão poderia

reduzir esses custos entre 15% e 35% anualmente. Tristão (2021) destaca que os sistemas fotovoltaicos estão constantemente sujeitos a degradação atmosférica, que além de gerar danos estruturais acaba reduzindo a sua vida útil. Em casos mais severos, a corrosão pode levar à falência completa dos sistemas, comprometendo a geração de energia e a segurança da instalação.

Entre os materiais metálicos disponíveis, alguns se destacam por sua resistência natural à corrosão, o que os torna a principal escolha para projetos de sistemas fotovoltaicos. O aço galvanizado, por exemplo, é comumente utilizado por possuir uma camada de zinco que aumenta sua durabilidade, podendo atingir vida útil superior a 70 anos, em ambientes classe C1 – corrosividade muito baixa, segundo a Norma ISO 9223. Além disso, esse material oferece um bom custo-benefício ao projeto (Steelpro Group, 2025).

Outras opções bastante utilizadas pelo setor são o alumínio e o aço inoxidável. O alumínio, reconhecido por sua leveza e economia, é ideal para aplicações em regiões costeiras, uma vez que possui uma camada de óxido de alumínio, que funciona como barreira natural contra ação da umidade e do sal. Apesar disso, ele ainda está suscetível à corrosão, quando em contato com metais mais nobres, como o aço inoxidável. Por sua vez, o aço inoxidável oferece uma ótima resistência à corrosão, oferecida pela camada de óxido de cromo, que protege a estrutura interna de processos corrosivos, porém apresenta custos mais elevados. Sendo assim, seu uso é justificado em projetos que exijam maior durabilidade do sistema (Steffan, 2024; Almeida, 2025).

### **2.2.1 Tipos de corrosão em estruturas para sistemas fotovoltaicos**

As estruturas metálicas utilizadas para sustentar os módulos em sistemas fotovoltaicos, estão constantemente expostas a intempéries e ambientes agressivos que podem comprometer sua integridade e favorecendo o aparecimento de diferentes manifestações corrosivas. A severidade e o tipo de ataque corrosivo variam conforme o material utilizado, os revestimentos aplicados e, principalmente, as condições ambientais do local de instalação.

Entre os principais tipos de corrosão observados em estruturas metálicas para sistemas FV, destaca-se a corrosão galvânica, que ocorre quando dois materiais metálicos, com potenciais eletroquímicos diferentes estão em contato direto, na presença de um eletrólito, como a água da chuva ou a umidade do ar (Gentil, 2022).

Outra forma de ataque localizado é a corrosão por frestas, presente em regiões de confinamento de materiais, como em fendas entre parafusos e chapas ou dobras do material.

Ocorre devido a concentração de eletrólitos na superfície, causada pela diferença de potencial eletroquímico, ocasionando uma corrosão seletiva. Em geral, a corrosão por frestas é o resultado do agravamento de pites. O que diferencia ambos tipos de corrosão é que a corrosão por frestas necessita de uma região ocluída para se desenvolver (Costa et al., 2023).

Por sua vez, a corrosão por pites, caracterizada por ataques pontuais que geram pequenos furos na superfície do metal. Esse tipo de ataque pode levar a perfuração da superfície exposta do aço. Uma vez que haja a corrosão por pites, é muito difícil que o agente passivante (ácido oxidante) consiga atingir o fundo das cavidades para restaurar a camada prejudicada. A ocorrência desse tipo de corrosão é agravada com o aumento da temperatura e aumento da concentração de íons halogênicos (ABINOX, 2023).

Já a corrosão uniforme se manifesta de forma generalizada sobre toda superfície exposta ao meio corrosivo, resultando em perda uniforme de espessura do material. É uma das manifestações da corrosão mais encontrada em estruturas no dia a dia (Gentil, 2022; Rijeza, s.d.).

A corrosão sob tensão ocorre quando o metal está sob o efeito de tensões mecânicas e a um meio corrosivo, simultaneamente. Nesses casos, o trincamento ocorre de forma transgranular, ou seja, rompe o grão, não necessariamente tendo uma propagação no seu contorno. Ambientes como a água da chuva, a maresia e a própria umidade do ar favorecem o aparecimento deste fenômeno, que torna-se ainda mais agressivo quando o ambiente está contaminado (ABINOX, 2023; UFSC, s.d.).

Por fim, a corrosão atmosférica ocorre pela presença de poluentes incorporados no ar. Assim como as demais manifestações de corrosão, pode ser definida como um processo eletroquímico, dependente da presença de eletrólitos na chuva, neve, água e umidade. A corrosão atmosférica pode ser agravada pela combinação de diversos fatores como temperatura, umidade e contaminação ambiental (Hussain et al., 2020; Bueno, 2024).

## **2.2.2 Classificação de ambientes corrosivos**

Conforme apresentado no capítulo anterior, a corrosão poderá ser agravada pela interação do material metálico com o meio. Condições específicas do meio onde a estrutura está instalada, poderão intensificar os processos corrosivos, como a presença de umidade, salinidade, poluentes e temperaturas variadas. Esses fatores irão variar de acordo com a sua localização geográfica e o tipo do ambiente - rural, urbano, industrial ou marinho - além de impactar também na escolha dos materiais, revestimentos e estratégias de manutenção da

estrutura. No que diz respeito a estruturas fotovoltaicas, é essencial que todos os componentes consigam resistir às diversas condições climáticas, uma vez que são instalados em ambientes externos com diferentes níveis de agressividade (Sheehan, 2013).

A fim de padronizar e comparar as condições ambientais em locais distintos, foi desenvolvida uma normalização. A ISO 9223 estabelece um sistema de classificação de corrosividade de ambientes atmosféricos, onde as categorias de corrosividade variam de C1 (muito baixa) a CX (extrema). Essa classificação é feita com base na perda de massa do material no primeiro ano de exposição, medição de fatores ambientais e com base nas condições locais, de acordo com o tipo de ambiente.

A classificação do ambiente segundo a ISO 9223:2012 é essencial para determinar a agressividade do meio em relação aos materiais metálicos, possibilitando uma escolha mais assertiva de materiais e revestimentos. A classificação do ambiente é dada conforme as condições que predominam no ambiente:

Rural (C1 a C2): ambiente de baixa poluição atmosférica e baixos níveis de salinidade, como áreas agrícolas e naturais;

Urbano (C2 a C3): apresenta com níveis moderados de poluição, devido a circulação de veículos e atividade residencial;

Industrial (C3 a C4): possui elevadas concentrações de poluente corrosivos, especialmente SO<sub>2</sub>, proveniente de processos industriais;

Marinho (C4 a C5): contém elevados níveis de salinidade devido à proximidade com o mar, marcado pela presença de cloretos no ar.

Misto (C5 a CX): abrange ambientes extremamente agressivos, que combinam ambientes urbanos ou industriais, agravado pela ação da maresia.

Estudos confirmam que a identificação da classe de corrosividade é essencial para prolongar a vida útil das estruturas fotovoltaicas. Heredia et al. (2025) demonstraram que a exposição do aço carbono em regiões com alto índice pluviométrico acelera significativamente os mecanismos de corrosão atmosférica, mesmo em ambientes não marinhos. Já o estudo conduzido por Kyranaki (2024) destaca que a corrosão é uma das principais causas de perda de desempenho elétrico das células fotovoltaicas. Sendo assim, compreender a classificação segundo a ISO 9223 é uma etapa fundamental para garantir a durabilidade e o desempenho dos sistemas fotovoltaicos em longo prazo.

## 2.3 REVESTIMENTO UTILIZADOS EM ESTRUTURAS DE SISTEMAS FV

A seleção adequada dos materiais utilizados em estruturas de sistemas FV é fundamental para garantir sua integridade, especialmente diante da corrosão, considerando a exposição contínua ao meio. Para enfrentar esses desafios, revestimentos como o zinco puro (galvanização a fogo) e ligas de Zn-Al-Mg, como ZAR e Magnelis®, são amplamente utilizados, por oferecerem proteção eficiente em diferentes níveis de agressividade atmosférica (COSTA et al., 2021; HAN et al. 2024). Este capítulo apresenta as principais características desses materiais e sua aplicação em estruturas FV.

### 2.3.1 Galvanização a fogo: revestimento em zinco puro

A galvanização, ou zincagem por imersão a quente, é um processo em que a peça é mergulhada em um banho de zinco fundido. Durante o processo, o aço é aquecido até atingir a temperatura do banho, promovendo a formação de uma camada aderente na superfície da peça. Esta camada é composta, em parte, por uma liga de zinco-ferro e outra externa de zinco puro. Dessa forma a peça galvanizada terá maior capacidade de resistência à corrosão, conforme descreve Gentil (2022, p. 313).

O processo de galvanização a quente é regulamentado pela norma ISO 1461:2022, que estabelece que a camada de zinco deve estar íntegra e possuir uma espessura mínima, em função da espessura do material zincado. Conforme o Quadro 1, a vida útil do revestimento está diretamente relacionada à sua espessura e à classificação de corrosividade do ambiente - definida pela ISO 9223:2012.

Quadro 1 – Desempenho de Revestimentos de Zinco por Ambientes Corrosivo

Espessura do Revestimento de Zinco ( $\mu\text{m}$ )	Categoria C2 (Ambiente rural) ~0,5 $\mu\text{m}/\text{ano}$	Categoria C3 (Ambiente urbano/industrial leve) ~2 $\mu\text{m}/\text{ano}$	Categoria C4 (Ambiente industrial/costeiro) ~4 $\mu\text{m}/\text{ano}$
55 $\mu\text{m}$ (mínimo ISO 1461 para aço $\geq 6$ mm)	~110 anos	~27 anos	~13 anos
85 $\mu\text{m}$	~170 anos	~42 anos	~21 anos
140 $\mu\text{m}$	~280 anos	~70 anos	~35 anos

Fonte: Adaptado de ISO 14713-2:2019 e ISO 9223:2012.

Conforme a Quadro 1, a espessura do revestimento de zinco tem impacto direto na resistência à corrosão do aço galvanizado. Chaouki et al. (2025) demonstrou que o aumento da espessura do revestimento eleva a resistência à corrosão, melhorando seu desempenho em ambientes com elevada agressividade.

Estudos de longo prazo também comprovam a eficácia do processo de zincagem a quente de aço. Um exemplo é a pesquisa de Sheehan (2013), que teve início em meados de 2007, na costa sudoeste australiana. A pesquisa foi desenvolvida em decorrência da crescente avaliação negativa do aço galvanizado e seu desempenho em áreas costeiras. Alguns anos depois, em 2012, foram realizadas análises mais profundas dessas estruturas. O estudo mostra que, apesar das desconfianças na garantia da galvanização, a galvanização a quente manteve a durabilidade aceitável. Além disso, compreender os processos de corrosão é essencial para atingir bons resultados (Sheehan, 2013).

Por outro lado, estudos recentes demonstram que seu desempenho irá variar conforme as condições ambientais. Um exemplo é o estudo realizado na Colômbia por Heredia et al. (2025), que avaliou as taxas de corrosão em diferentes regiões do país - semiurbana, rural e costeira - caracterizadas por elevada umidade relativa e precipitação extrema. Placas de aço carbono e aço galvanizado ficaram expostas durante 18 meses, a fim de avaliar a perda de massa e os produtos da corrosão. Coletas desse material para análises foram realizadas a cada 4 meses. Foram instalados também, coletores de cloretos e sulfatos, que quantificam a deposição de poluentes atmosféricos.

Os resultados mostram que, apesar do revestimento de zinco prevenir a corrosão do aço, em ambientes com alta agressividade e umidade, sua eficácia é comprometida. Observou-se a delaminação da camada de zinco e a formação de microfissuras, evidenciando a necessidade de aprimoramento no processo ou a aplicação de proteção adicional (Heredia, 2025).

### **2.3.2 Pré galvanização: revestimento em ligas de Zn-Al-Mg**

A adição de elementos de liga como o Alumínio (Al) e o Magnésio (Mg) em revestimentos de Zinco (Zn) tem se mostrado uma estratégia eficaz na proteção da corrosão, aumentando a durabilidade da camada protetora principalmente em ambientes agressivos (Costa et al., 2021). Esses revestimentos, designados na literatura como ZAM ou ZM (Zinco-Magnésio), são a base tecnológica para produtos comerciais com alto desempenho, oferecendo mais durabilidade quando expostos a ambientes agressivos.

Esses elementos favorecem a formação de produtos de corrosão protetores, como a *simonkolleite*, que atua como barreira física aderente, que retarda o avanço da corrosão. O alumínio contribui para a formação de hidróxidos carbonatos, que reforçam a proteção do substrato, enquanto o magnésio estabiliza a camada, impedindo sua conversão em compostos menos eficientes. Ensaios de imersão em solução salina e testes eletroquímicos demonstraram que o revestimento com adição de ligas, possui desempenho significativamente superior ao zinco puro, com maior resistência à polarização e proteção prolongada da superfície metálica (Costa et al., 2021).

#### 2.3.2.1 Mecanismos de proteção

A superioridade dos revestimentos de Zn-Al-Mg se dá pela interação entre seus elementos de liga, formando camadas protetoras densas, aderentes e autorreparadoras, aumentando a proteção a longo prazo e inibindo a corrosão em bordas danificadas ou cortadas. Essas propriedades são efeitos da sinergia do alumínio e magnésio, que foram camadas de óxido estáveis, inibindo a corrosão (Lloreda-Jurado et al. 2025).

Segundo He et al. (2024) e Guo et al. (2024), essa sinergia ocorre em etapas. Inicialmente, ocorre a dissolução preferencial das fases ricas em magnésio, que são mais ativas eletroquimicamente. Este efeito, por sua vez, libera íons de magnésio que funcionam como “tampão” de pH ao formar o hidróxido de magnésio. O controle de pH estabiliza os produtos de corrosão do zinco, como a *simonkolleite*, impedindo sua transformação em óxido de zinco, produto poroso e não protetor.

Ambos os estudos concordam que a proteção a longo prazo é garantida pelo Alumínio (Al). Em estágios posteriores da corrosão, o Al participa da formação de uma barreira final de Hidróxidos Duplos Lamelares (LDH), como a hidrotalcita. Tanto He et al. (2024) quanto Guo et al. (2024) descrevem esses LDHs como uma camada de produto de corrosão final, que é extremamente densa, estável e forma uma barreira física altamente eficaz, selando a superfície contra a penetração de eletrólitos. Além de atuarem como barreira, a estrutura dos LDHs pode capturar ativamente íons agressivos, como cloretos, fornecendo uma camada adicional de proteção química e garantindo a durabilidade estendida do revestimento.

#### 2.3.2.2 Desempenho da Liga Zn-Al-Mg

Estudos comparativos demonstram a superioridade dos investimentos tipo Zn-Al-Mg (ZM), em relação ao galvanizado convencional (GI). Análises morfológicas mostram que,

enquanto o GI apresenta microestruturas distintas enriquecidas em zinco, no ZM há formação de diversas fases, que se distribuem de forma homogênea, resultando em uma microestrutura mais estável e resistente à corrosão. Além disso, os resultados obtidos após a exposição a ensaios de névoa salina também evidenciaram as diferenças de desempenho dos revestimentos. O GI (camada de 16,1  $\mu\text{m}$ ) apresentou indícios de corrosão vermelha após cinco dias de exposição, com progressão significativa, cobrindo a amostra em 20 dias. Em contrapartida, o ZM (camada de 13,7  $\mu\text{m}$ ) apresentou apenas indícios leves de corrosão no mesmo período. Após 40 dias de exposição, a taxa de perda de massa do GI foi estimada em 9,4  $\mu\text{m}/\text{ano}$ , enquanto o ZM apresentou taxas de apenas 4,6  $\mu\text{m}/\text{ano}$  (Guo, et al., 2024).

Pesquisas de Schürz et al. (2010) destacam que a adição de alumínio e magnésio a revestimentos à base de zinco proporciona um aumento significativo na prevenção de ataques corrosivos. Durante a análise, as amostras foram submetidas a testes de névoa salina, conforme a norma DIN EN ISO 9227, e apresentaram melhorias significativas em comparação ao revestimento de zinco convencional. Enquanto o ZM manteve-se íntegro durante 100 h de exposição, o zinco convencional já apresentava sinais evidentes de corrosão no mesmo período (Schürz et al., 2010).

#### 2.3.2.3 Otimização da Liga

A eficiência anticorrosiva dos revestimentos Zn-Al-Mg está diretamente ligada à composição química da camada protetora. Estudos indicam que ligas com menor teor de alumínio (3% m/m) apresentaram resultados superiores em ambientes corrosivos, quando comparadas a compostos com teores mais elevado de alumínio (9% m/m), fenômeno associado à formação de microestruturas mais homogêneas e estáveis, favorecendo a resistência à corrosão, como demonstrado por Rai et al. (2022). Da mesma forma, revestimentos com 3% m/m de Alumínio e 3% m/m de Magnésio (Zn-3Al-3Mg) apresentaram fases eutéticas bem distribuídas na microestrutura, promovendo um aumento significativo da resistência à corrosão, em especial em ambientes marinhos (Han et al., 2024).

#### 2.3.2.4 Aplicações Comerciais

No contexto brasileiro, um exemplo de produto que utiliza essa tecnologia é o aço ZAR, uma designação comercial da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) para uma família de aços galvanizados de alta performance. Produzido conforme a norma NBR 7008, a sigla significa "Zincagem de Alta Resistência" e designa um aço estrutural cujas propriedades

mecânicas são controladas, sendo que a numeração (exemplo: ZAR 345) indica o limite de escoamento mínimo em MPa. Uma de suas aplicações convencionais, devido ao baixo custo e à facilidade de processamento, aliadas à resistência à corrosão, é observada na indústria de carrocerias de ônibus e em silos de armazenamento (Cruz, 2007; Sartori e Bressan, 2022)

O Magnelis®, por sua vez, é um produto comercial específico desenvolvido pela ArcelorMittal, também baseado na liga Zn-Al-Mg. Sua composição contém 3,5% m/m de alumínio e 3% m/m de magnésio, garantindo desempenho anticorrosivo até três vezes superior ao galvanizado tradicional. Esse material se destaca por sua capacidade de auto-reparo (*self-healing*) em bordas cortadas, onde a migração do magnésio para a área danificada forma uma película protetora (Perfil Lider, 2024). A ArcelorMittal, em sua linha Solar Solutions, reforça as vantagens do Magnelis® para aplicações em sistemas fotovoltaicos, destacando sua durabilidade e baixo custo de manutenção (ArcelorMittal, 2024).

Em síntese, a revisão bibliográfica demonstrou que a longevidade dos sistemas fotovoltaicos depende da resistência dos materiais estruturais aos mecanismos de degradação ambiental. Fundamentado nos princípios de corrosão estabelecidos por Gentil (2022) e nas diretrizes das normas técnicas apresentadas, o referencial teórico evidenciou o potencial das ligas de Zn-Al-Mg (como ZAR e Magnelis®) em oferecer proteção superior à galvanização tradicional. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo verificar experimentalmente se essas vantagens teóricas se confirmam na prática, avaliando especificamente o impacto da corrosão acelerada na manutenção das propriedades mecânicas e na integridade estrutural desses perfis.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo adotou um delineamento experimental, focando na comparação de desempenho de diferentes revestimentos anticorrosivos (galvanizado a fogo, Magnelis® e ZAR), aplicados em perfis de aço, perante a exposição a ensaios de corrosão acelerada. A partir da exposição, os corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos para avaliar a influência da corrosão nas propriedades materiais.

#### 3.1 MATERIAIS

Para os testes foram utilizados corpos de prova, conforme a Norma ASTM E290-22, em cada um dos três revestimentos (galvanização a fogo, ZAR e Magnelis). As amostras foram identificadas por lotes e códigos, de acordo com os tratamentos de superfície e, fornecidas por uma empresa de estruturas metálicas para sistemas fotovoltaicos. Para os testes, foram preparados 3 corpos de prova, de cada revestimento para cada ensaio de tração proposto.

O substrato submetido ao processo de Galvanização a Fogo, é um aço laminado a quente, qualidade CSN CIVIL 300. De acordo com os dados do certificado do fornecedor, suas propriedades mecânicas nominais são de 338 MPa, para limite de escoamento e, 468 MPa, para limite de resistência à tração.

Para o ZAR, o substrato utilizado foi um aço classificado como NBR-7008-ZAR345, indicando um aço de alta resistência com limite mínimo de escoamento de 345 MPa. Os valores apresentados no certificado foram de 403 MPa de limite de escoamento e, 499 MPa de limite de resistência à tração.

Por fim, o Magnelis® classificado como ZMR345, conforme a norma NBR 16990, assemelha-se ao ZAR. A designação 345 indica que o substrato é composto por um aço de alta resistência, com limite mínimo de escoamento de 345 MPa. O certificado deste material apresenta valores de 373 MPa para o limite de escoamento e 459 MPa para o limite de resistência à tração.

A semelhança entre os aços base é necessária uma vez que a aplicação dos materiais em campo é a mesma, logo todos os materiais são expostos aos mesmos esforços mecânicos.

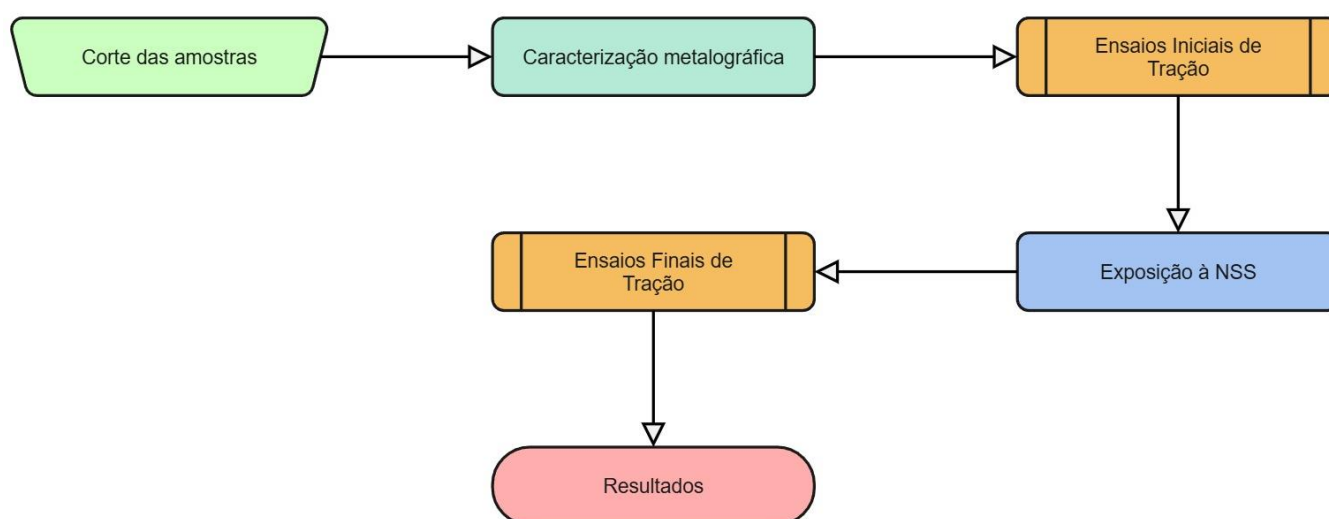
### 3.2 MÉTODOS

Os procedimentos tiveram como objetivo avaliar as propriedades de diferentes revestimentos metálicos na proteção de um substrato, quando exposto a um ambiente potencialmente corrosivo. Assim, a fim de assegurar a confiabilidade dos resultados, os ensaios foram realizados conforme normas técnicas reconhecidas.

Para isso, um grupo de controle com amostras íntegras (sem exposição à corrosão acelerada), foi submetido ao ensaio de tração, a fim de estabelecer uma base de referência das propriedades mecânicas do conjunto (substrato e revestimento). Em seguida, os demais corpos de prova foram submetidos ao ensaio de corrosão acelerada por meio do teste de névoa salina neutra e, posteriormente, tiveram suas propriedades mecânicas novamente avaliadas. A comparação da degradação mecânica entre o grupo exposto à corrosão e o grupo de controle, permitiu avaliar a degradação mecânica e o desempenho de cada revestimento na proteção do substrato.

A fim de organizar as etapas experimentais, a sequência metodológica foi estruturada em um fluxo de trabalho, representado na Figura 2. O esquema sintetiza as principais fases do processo, desde a separação das amostras até a análise dos resultados obtidos.

Figura 2 – Fluxo de trabalho



Fonte: A Autora (2025).

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO

#### 3.3.1 Caracterizações Metalográficas

Para caracterizar a microestrutura dos revestimentos e do substrato em sua condição inicial, foram realizadas análises metalográficas em amostras íntegras (sem ensaios prévios). O objetivo foi avaliar a morfologia da superfície do revestimento, assim como analisar sua seção transversal para verificar a espessura, a integridade, a interface com o substrato e a presença de possíveis defeitos, como microtrincas ou delaminação.

A preparação do material para a análise metalográfica foi conduzida de acordo com as normas ASTM E3-11 e ASTM E407-07, utilizando-se uma politriz automática Arotec, modelo Aropol 2V. As amostras foram lixadas até 1200 mesh e polidas com pastas de diamante de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente, utilizando álcool etílico hidratado como lubrificante. Posteriormente, foram polidas com uma solução composta por 96% m/v de sílica coloidal (solução a 10% m/v), 2% m/v de hidróxido de amônio (solução a 25% m/v) e 2% m/v de água oxigenada (solução a 3% m/v).

Por fim, o ataque à superfície do material foi realizado com uma solução ácida de dicromato de potássio 0,07 M, com tempo máximo de 15 s de imersão e interrompidos com água destilada. A superfície de observação foi seca por evaporação de álcool etílico absoluto, auxiliada por jato de ar quente. Ao término desse procedimento, as amostras foram observadas em um microscópio Zeiss, modelo Observer D1m.

#### 3.3.2 Ensaios de Corrosão Acelerada

Antes de expor as amostras ao meio corrosivo, as amostras foram limpas com álcool etílico e, a fim de isolar a superfície, as bordas foram protegidas com cera de abelha. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de névoa salina neutra (NSS), conduzidos no Laboratório de Corrosão (LCOR) da UCS. O objetivo do ensaio foi simular o envelhecimento e degradação dos revestimentos metálicos em ambientes atmosféricos severos, para posterior análise das perdas de propriedades mecânicas.

O procedimento seguiu as diretrizes da norma ASTM B117-19, utilizando uma câmara fechada da marca Bass, modelo USX-6000/2012. A norma utiliza uma solução de NaCl a 5%

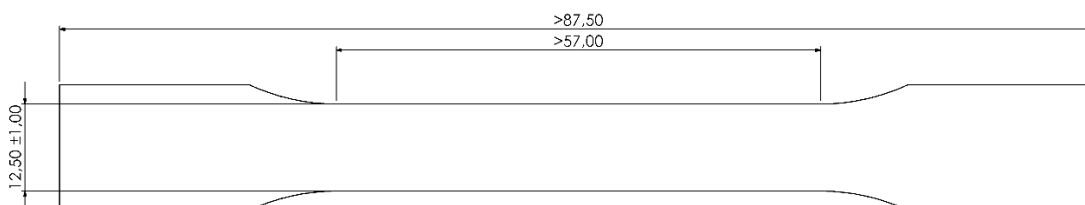
m/v  $\pm$  1, com pH entre 6,5 e 7,2, que é nebulizada continuamente, dentro de uma câmara fechada. A temperatura da câmara é mantida em  $35 \pm 2$  °C e umidade superior a 95%.

O tempo de exposição determinado foi de 1032 h, diante do tempo disponível para execução do projeto, com retiradas parciais de amostras, para análises mecânicas, em 240 h e 600 h, conforme solicitado ao laboratório. Durante o ensaio, foi realizado um acompanhamento visual periódico com registros fotográficos para documentar a evolução da degradação.

### 3.3.3 Ensaio Mecânicos

Os ensaios de resistência à tração foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LAMEC) da UCS, utilizando máquina universal de ensaios da marca EMIC, com célula de carga de 20 t e sistema de medição extensométrica. Os corpos de prova foram confeccionados por meio de corte a laser CNC a partir de perfis metálicos, atendendo às geometrias especificadas pela norma ABNT NBR 6892:2020 (equivalente à ISO 6892-1:2019), conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Corpo de prova de tração, conforme ABNT NBR 6892:2020



Fonte: A Autora (2025).

O ensaio de tração teve como objetivo determinar as propriedades mecânicas dos materiais metálicos, como limite de escoamento, resistência à tração e alongamento total. A comparação desses resultados entre as amostras expostas à corrosão e o grupo de controle (sem exposição) permitiu quantificar a degradação do comportamento mecânico proveniente dos ataques corrosivos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo dedica-se à apresentação e discussão dos dados coletados durante a fase experimental do estudo. A análise inicia-se com a caracterização dos materiais (revestimentos e substratos) em seu estado original, incluindo a análise metalográfica de cada um deles. Em seguida são demonstrados os resultados obtidos no teste de corrosão acelerada, evidenciando o comportamento de cada revestimento perante o ataque de névoa salina neutra. Por fim, são comparadas as propriedades mecânicas, avaliando os efeitos da degradação corrosiva na resistência a tração dos corpos de prova.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS MATERIAIS

A caracterização inicial teve como objetivo estabelecer uma base comparativa dos materiais estudados, com base nos certificados de qualidade dos fornecedores. Esta análise foi realizada para determinar as características dos substratos e dos revestimentos antes da exposição aos ensaios.

#### 4.1.1 Análise Metalográfica

As análises metalográficas foram realizadas nas amostras íntegras, como objetivo de caracterizar a microestrutura e a morfologia de cada tipo revestimento, sua estrutura, a interface com o substrato e a presença de fases distintas.

O revestimento Galvanizado a Fogo exibiu a microestrutura clássica esperada para o processo de zincagem por imersão a quente. A seção transversal (Figura 3 (b)) todas as fases de transição do aço até a camada superficial de zinco puro. Cunha (2021) descreve que a camada Gama é a mais próxima do substrato, composta por aproximadamente 75% de Zn, seguida pelas camadas Delta, com 90% de Zn, Zeta, com 94% de Zn e Eta, composta apenas por Zn.

Além disso, é possível observar na Figura 3 (b) que a camada Delta e Zeta apresenta uma morfologia colunar, que indica o crescimento regular das camadas. Conforme Cunha (2021), essa morfologia indica que a peça foi imersa e posteriormente resfriada em períodos de tempo adequados para um resultado satisfatório.

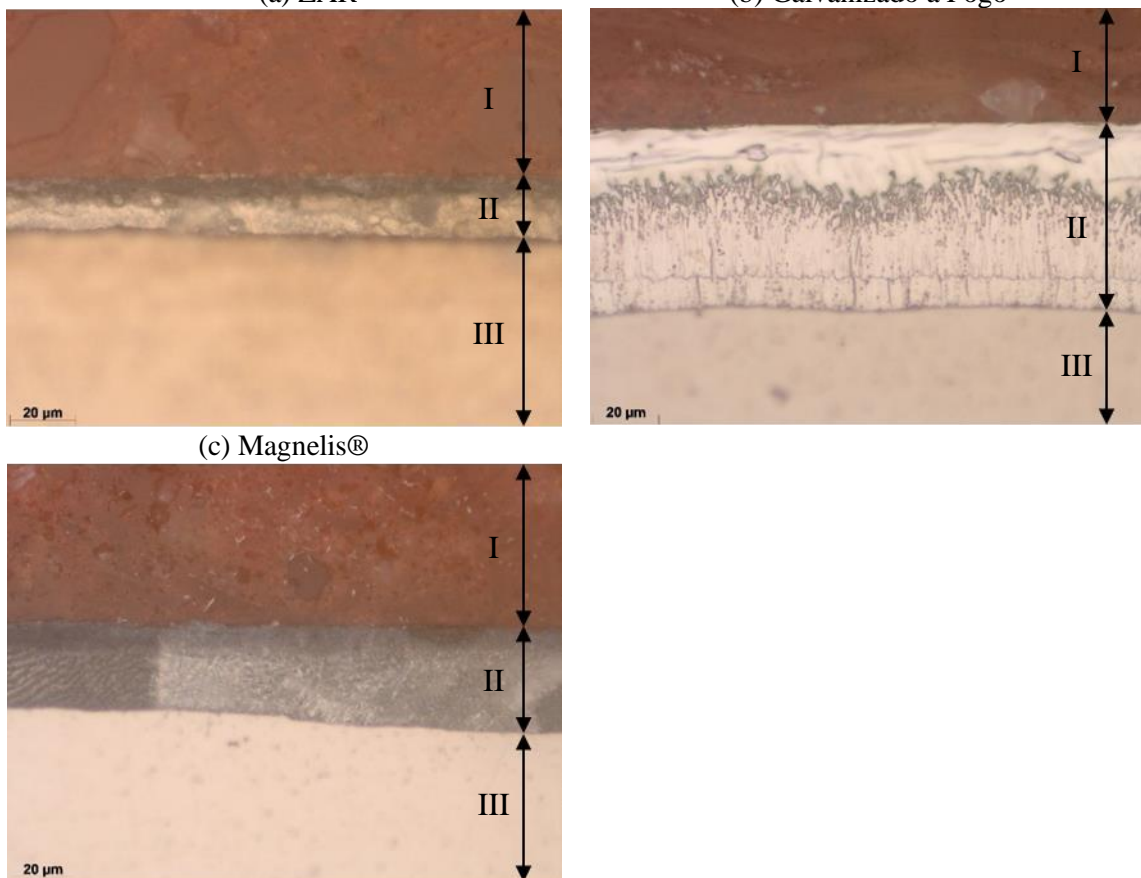
O ZAR (Figura 3 (a)), por sua vez, apresenta uma camada de revestimento visivelmente mais fina, além de uma interface plana e limpa. Em comparação com o

Galvanizado a Fogo, a microestrutura do ZAR é notavelmente mais compacta e homogênea, característica esperada para um revestimento de Zn-Al-Mg, que permite a redução da espessura do revestimento. A presença do alumínio, em poucas quantidades, resulta na formação de uma camada intermetálica, de ferro e alumínio. Tevera (2014) descreve que essa fase é a responsável por evitar a formação de camadas espessas e potencialmente frágeis de Fe-Zn, como aquelas presentes no Galvanizado a Fogo. Além disso, ainda conforme Tevera (2014) a formação da camada de Fe-Al aumenta a ductibilidade do material.

Por fim, assim como o ZAR, o Magnelis® possui a adição de magnésio e alumínio em sua composição, porém apresenta diferenças nítidas em sua microestrutura, sendo possível verificar a formação de diferentes fases distribuídas de forma homogênea.

A comparação metalográfica inicial mostra o contraste que fundamenta a discussão. O Galvanizado a Fogo depende de uma alta quantidade de massa de zinco para proteção do substrato, enquanto os revestimentos com adição de liga, ZAR e Magnelis® dependem da qualidade do revestimento, para gerar uma barreira ativa e estruturada.

Figura 4 – Metalografia amostras íntegras  
(a) ZAR (b) Galvanizado a Fogo



Fonte: A Autora (2025).

Nota: I – Resina, II – Revestimento e, III – Substrato Metálico.

#### 4.1.2 Análise dos revestimentos protetores

A principal diferença entre os materiais avaliados está na composição dos revestimentos e na sua massa de camada. A Tabela 1 apresenta as especificações de cada sistema de proteção, compiladas a partir de dados extraídos certificados de qualidade dos fornecedores.

Tabela 1 – Especificações dos revestimentos

Revestimento	Tipo de camada	Massa de camada (g/m <sup>2</sup> )
Galvanizado a Fogo	Zn puro	486
ZAR 345 Z275	Liga de Zn-Al-Mg	290
Magnelis® ZMR345 ZM310	Liga de Zn-Al-Mg	310

Fonte: A autora.

O revestimento de Galvanização a Fogo, apresentou uma massa de camada de 486 g/m<sup>2</sup>. Conforme a norma ISO 1461, para perfis de aço com espessura entre 1,5 mm e 3 mm, exige-se uma massa mínima média de 395 g/m<sup>2</sup>. Logo, o revestimento fornecido atende e supera o requisito normativo. Além disso, a norma define também que a densidade do revestimento de zinco puro é 7,2 g/cm<sup>3</sup>, o que resulta em uma espessura de camada de aproximadamente 67,5 µm.

O material ZAR, produto pré-galvanizado cuja classificação comercial Z275 (conforme norma NBR 7008) estabelece um requisito de massa mínima de 275 g/m<sup>2</sup>). A análise do lote registrou um valor médio de 290 g/m<sup>2</sup>, confirmando que o material fornecido supera a especificação nominal mínima exigida.

O material Magnelis® possui um revestimento especificado como ZM310, (conforme norma NBR 16990), o que define o requisito de massa de camada de 310 g/m<sup>2</sup>. O certificado de qualidade do material confirmou o valor de 310 g/m<sup>2</sup>, demonstrando o atendimento da especificação.

#### 4.2 ENSAIO DE CORROSÃO ACELERADA

Nesta seção, são apresentados os resultados visuais do ensaio de corrosão por Névoa Salina Neutra (NSS), realizado sob a norma B117-19, em diferentes estágios de exposição. A evolução da degradação dos revestimentos foi acompanhada por registros fotográficos para avaliar de forma qualitativa e comparativa o desempenho de cada sistema de proteção ao

longo do tempo. A análise foi focada na superfície das amostras, uma vez que as bordas cortadas foram devidamente protegidas com cera de abelha.

A fim estabelecer uma linha de base para o monitoramento da degradação, foi realizado um registro das amostras íntegras (Figura 5). Nesta etapa as amostras já se encontravam preparados conforme a metodologia, com a superfície limpa e as bordas protegidas com cera de abelha.

O grupo de controle evidenciou as distinções visuais decorrentes dos processos de fabricação: o aço Galvanizado a Fogo apresentou a característica cristalização superficial do processo de imersão a quente, enquanto os revestimentos de liga Zn-Al-Mg (ZAR e Magnelis®) exibiram superfícies visualmente mais homogêneas e compactas. Este estado inicial serve como referencial comparativo para a identificação da evolução da corrosão, descrita nas etapas subsequentes.

Figura 5 – Amostras íntegras

(a) ZAR



(b) Galvanizado a Fogo



(c) Magnelis®

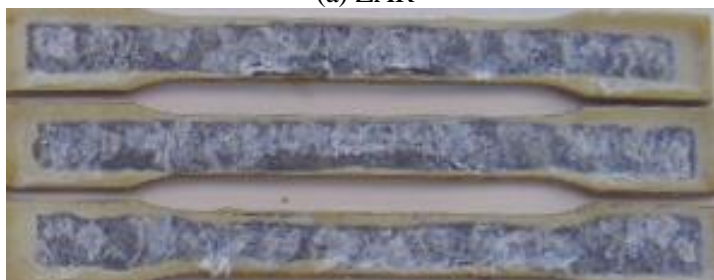


Fonte: A Autora (2025).

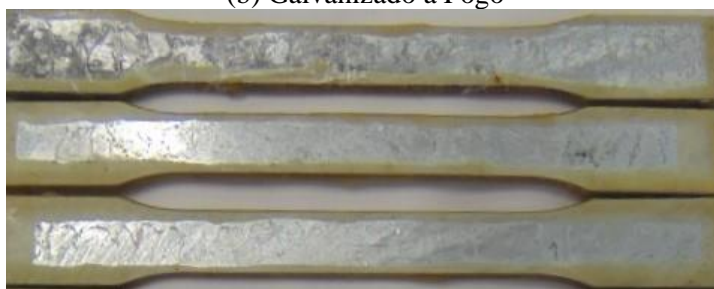
O início do ensaio revelou diferenças críticas na velocidade de degradação de cada revestimento. Com apenas 24 h de exposição, os revestimentos ZAR (Figura 6 (a)) e Galvanizado a Fogo (Figura 6 (b)) já apresentavam as primeiras alterações visuais, exibindo pontos sutis de corrosão branca.

Figura 6 – Amostras após 24h de NSS

(a) ZAR



(b) Galvanizado a Fogo



(c) Magnelis®



Fonte: A Autora (2025).

O ponto de falha do revestimento, definido pelo aparecimento de corrosão vermelha (corrosão do aço base), foi atingido de forma extremamente prematura pelo ZAR. Com apenas 72 h (3 dias) de ensaio, já foi possível perceber indícios de corrosão vermelha em algumas regiões das amostras (Figura 7 (a)).

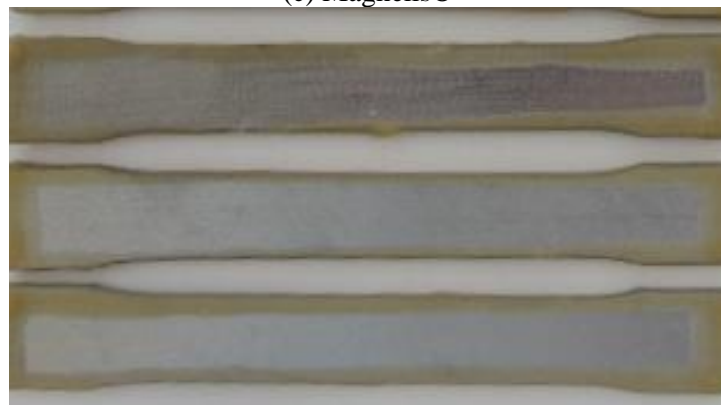
Figura 7 – Amostras após 72 h de NSS  
(a) ZAR



(b) Galvanizado a Fogo



(c) Magnelis®



Fonte: A Autora (2025).

No ZAR, a degradação avançou rapidamente e com 168 h (7 dias), já havia corrosão vermelha na superfície das quinze peças testadas (Figura 8 (a)). Em contrapartida, o Magnelis® demonstrou uma resistência inicial muito superior. Durante as primeiras 168 h (7 dias) de ensaio, não apresentou nenhuma alteração visual em relação a condição inicial.

8 – Amostras após 168 h de NSS  
(a) ZAR



(b) Galvanizado a Fogo



(c) Magnelis®



Fonte: A Autora (2025).

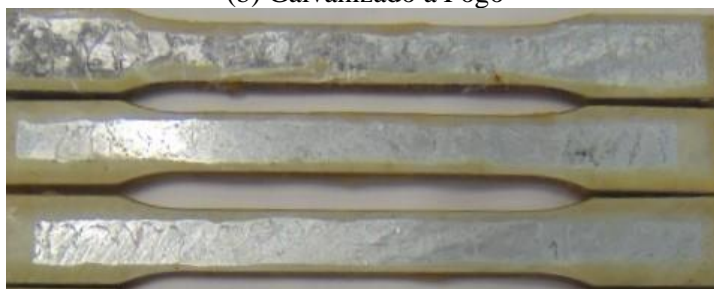
A primeira mudança no Magnelis® só foi registrada após 192 h (8 dias de exposição), onde as quinze peças apresentaram apenas corrosão branca sutil, em diversas regiões das amostras (Figura 9).

Figura 9 – Amostras após 192 h de NSS

(a) ZAR



(b) Galvanizado a Fogo



(c) Magnelis®



Fonte: A Autora (2025).

Nesta etapa, foi iniciada a retirada programada de cinco corpos de prova de cada tipo de revestimento, para a realização dos ensaios mecânicos. As retiradas ocorreram nos tempos de 240 h e 600 h.

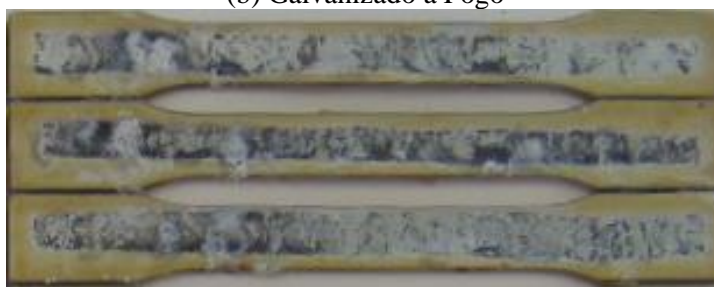
Ao atingir as 240 h (10 dias) de ensaio, os materiais estavam em diferentes estágios de degradação. O ZAR já apresentava corrosão vermelha em grande parte da superfície (Figura 10 (a)), consolidando a falha. O Galvanizado a Fogo (Figura 10 (b)) e o Magnelis® (Figura 10 (c)), por sua vez, não tiveram evoluções significativas na aparência, apresentando apenas manchas escuras e corrosão branca, sem qualquer indicio de corrosão do substrato.

Figura 10 – Amostras após 240 h de NSS

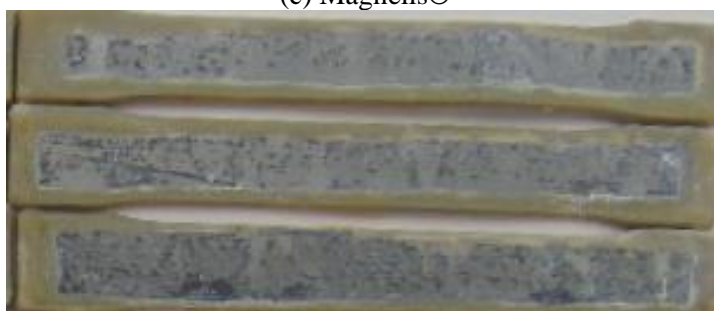
(a) ZAR



(b) Galvanizado a Fogo



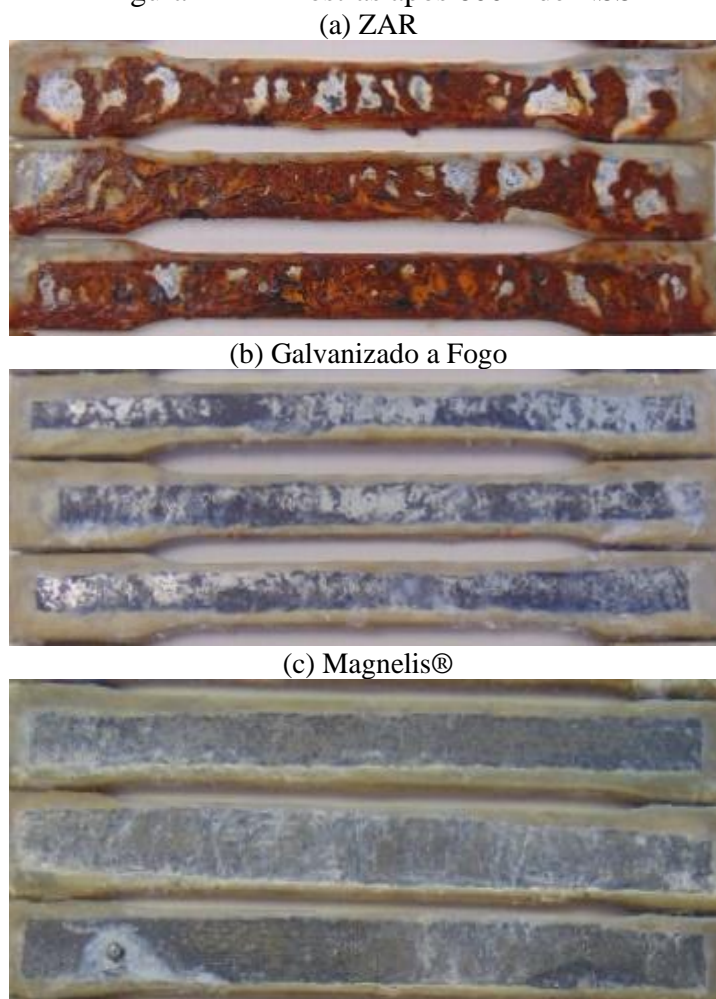
(c) Magnelis®



Fonte: A Autora (2025).

Na marca de 600 h, o ZAR (Figura 11 (a)) já demonstrava acúmulos de produto de corrosão vermelha. O Galvanizado a Fogo (Figura 11 (b)) apresentava acúmulo de produto de corrosão branca e o Magnelis® (Figura 11 (c)), escorrimento de produto de corrosão branca.

Figura 11 – Amostras após 600 h de NSS

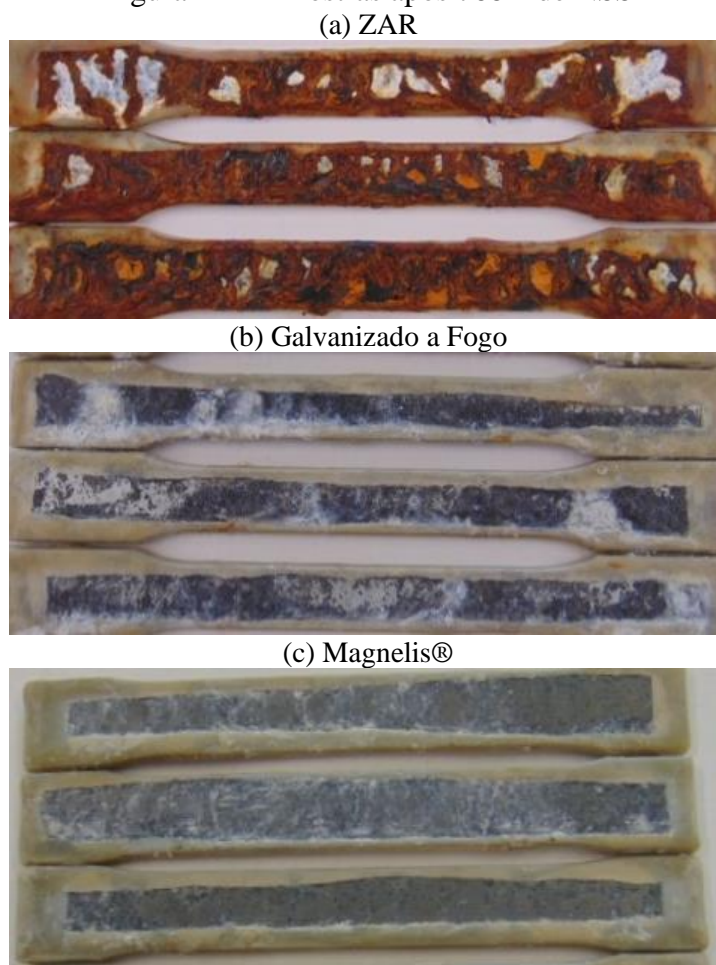


Fonte: A Autora (2025).

É importante destacar que, nesse intervalo, mais especificamente entre as inspeções de 264h e 432h, o Magnelis® apresentou um período de estabilidade, sem alterações visuais em relação a avaliação anterior, o que sugere a formação de uma camada de proteção estável.

A fase final do ensaio, de 600 h até 1032 h, confirmou as tendências de desempenho. Na marca de 768 h (32 dias), o ZAR (Figura 12 (a)) já estava tomado por uma corrosão vermelha abundante, enquanto o Galvanizado (Figura 12 (b)) e o Magnelis® (Figura 12 (c)) seguiam apresentando apenas produtos de corrosão branca.

Figura 12 – Amostras após 768 h de NSS

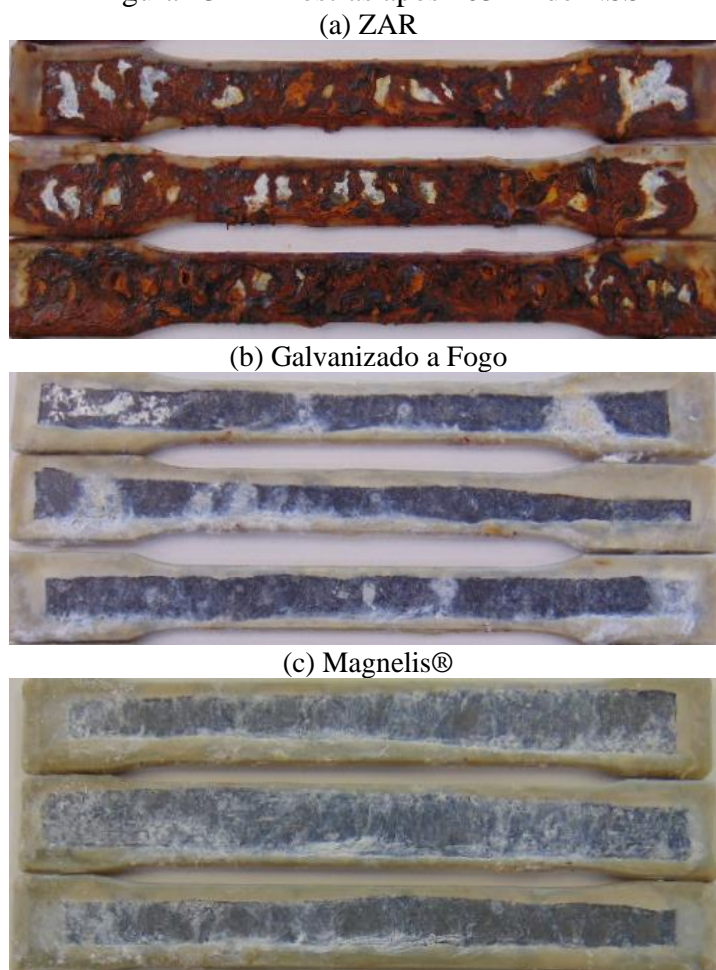


Fonte: A Autora (2025).

Ao término do ensaio com 1032 h (43 dias), foi possível constatar a falha total do sistema para o ZAR (Figura 13 (a)), que apresentou corrosão vermelha e acúmulo de produto de corrosão abundantes, em praticamente toda superfície.

Em notável contraste, os outros dois revestimentos resistiram sem falha do substrato. O Galvanizado a Fogo (Figura 13 (b)) apresentou na condição final apenas manchas escuras, corrosão branca e acúmulo de produtos de corrosão branca. O Magnelis® (Figura 13 (c)) foi o revestimento com melhor desempenho, também resistindo sem falhas no substrato, com condição final de manchas escuras e corrosão branca, com escorrimento de produto de corrosão branca. Em nenhum momento do ensaio, ambos revestimentos (Galvanizado a Fogo e Magnelis®), apresentaram indícios de corrosão vermelha.

Figura 13 – Amostras após 1032 h de NSS



Fonte: A Autora (2025).

Embora ambos os revestimentos, Galvanizado a Fogo e Magnelis®, tenham tido resultados satisfatórios, a principal diferença entre seu desempenho está na cinética inicial. O Magnelis® permaneceu íntegro, sem qualquer alteração visual, por 168 h, enquanto o Galvanizado a Fogo iniciou seu processo de corrosão branca, referente à corrosão do zinco, em 24 h.

O Galvanizado a Fogo demonstrou alta resiliência, resistindo às 1032 h sem que o meio corrosivo atingisse o substrato. Este resultado confirma a tese de Sheehan (2013) de que a massa de camada ( $486 \text{ g/m}^2$ ) é um fator determinante, compensando a menor eficiência eletroquímica do zinco puro em comparação às ligas. O fator microestrutural que resultou em um bom desempenho do revestimento, é o volume total das camadas de proteção. O grande volume atua como um reservatório extenso de material de sacrifício, garantindo uma proteção prolongada durante todo o intervalo do ensaio.

Entre os revestimentos de liga, o Magnelis® apresentou a maior resistência, permanecendo sem indícios de corrosão vermelha após 1032 h de exposição. Este

comportamento corrobora amplamente a literatura de Costa et al. (2021), He et al. (2024) e Guo et al. (2024). O sucesso é atribuído à sua microestrutura compacta e multifásica (Zn-Al-Mg). Essa composição e estrutura favorecem a formação de produtos de corrosão estáveis, como o hidróxido de cloreto de zinco monohidratado, conhecido como *simonkolleite*, e os LDHs (Hidróxidos Duplos Lamelares), que criam uma barreira densa e autorreparadora que sela os microporos, inibindo o avanço dos cloretos.

Em contraste com a superioridade esperada das ligas zinco-magnésio, o ZAR 345 apresentou falha prematura (corrosão vermelha em 72h) e falha generalizada em 1032 h. Embora pertença à família das ligas Zn-Al-Mg, seu desempenho inferior indica que a proteção oferecida pela sua composição química específica foi insuficiente diante da agressividade do ensaio. Conforme destacado por Han et al. (2024) e Guo et al. (2024), a eficiência da proteção anticorrosiva não depende apenas da presença de Alumínio e Magnésio, mas de suas concentrações ótimas, situadas geralmente na faixa de 1,5% m/m a 3,0% m/m para ambos os elementos (Al e Mg), e de uma microestrutura com fases homogeneamente distribuídas, capazes de formar produtos de corrosão estáveis e compactos.

Neste cenário, outro fator determinante para o colapso da proteção foi a pouca massa de camada (290 g/m<sup>2</sup>). A reduzida reserva de material resultou na rápida exaustão dos elementos de sacrifício na interface corrosiva. Diferentemente das ligas com formulação e espessura otimizadas, este revestimento não demonstrou capacidade de autorreparação, o que permitiu o avanço contínuo da degradação. A ineficácia da barreira observada corrobora o estudo de Sartori e Bressan (2022), que vinculam a durabilidade do aço ZAR diretamente à massa de revestimento disponível, evidenciando que espessuras reduzidas comprometem a integridade do substrato em exposições severas de longa duração.

#### 4.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A fim de quantificar o impacto da corrosão no substrato de aço, foram realizados ensaios de tração tanto nas amostras em seu estado íntegro (grupo de controle) quanto nas amostras expostas à névoa salina neutra, em diferentes períodos. Nesta seção são apresentados e comparados os resultados de Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência à Tração (LRT) e Alongamento Total (Ductilidade).

As tabelas a seguir apresentam os dados detalhados do comportamento das propriedades mecânicas para cada material, conforme discutido anteriormente.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas ZAR 345

<b>Tempo de Exposição</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Alongamento total (%)</b>
0 h (íntegro)	295,7 ( $\pm$ 6,4)	390,3 ( $\pm$ 3,8)	34,5 ( $\pm$ 0,6)
240 h	289,3 ( $\pm$ 0,6)	390,7 ( $\pm$ 1,2)	41,0 ( $\pm$ 2,7)
600 h	292,3 ( $\pm$ 0,6)	383,7 ( $\pm$ 3,2)	30,9 ( $\pm$ 1,1)
1032 h	290,0 ( $\pm$ 5,0)	384,7 ( $\pm$ 2,5)	23,5 ( $\pm$ 1,1)

Tabela 3 – Propriedades mecânicas Galvanizado a Fogo

<b>Tempo de Exposição</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Alongamento total (%)</b>
0 h (íntegro)	360,3 ( $\pm$ 18,4)	450,0 ( $\pm$ 4,6)	25,2 ( $\pm$ 0,6)
240 h	356,0 ( $\pm$ 1,4)	435,0 ( $\pm$ 2,0)	28,9 ( $\pm$ 1,3)
600 h	358,0 ( $\pm$ 6,8)	456,3 ( $\pm$ 1,5)	25,3 ( $\pm$ 1,8)
1032 h	360,7 ( $\pm$ 5,0)	471,3 ( $\pm$ 3,5)	22,3 ( $\pm$ 0,6)

Tabela 4 – Propriedades mecânicas Magnelis®

<b>Tempo de Exposição</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Alongamento total (%)</b>
0 h (íntegro)	370,7 ( $\pm$ 3,2)	458,3 ( $\pm$ 4,0)	22,9 ( $\pm$ 0,9)
240 h	361,3 ( $\pm$ 4,2)	453,0 ( $\pm$ 2,6)	36,4 ( $\pm$ 0,7)
600 h	362,3 ( $\pm$ 8,1)	452,3 ( $\pm$ 5,0)	34,2 ( $\pm$ 2,7)
1032 h	363,7 ( $\pm$ 3,0)	457,7 ( $\pm$ 3,8)	27,4 ( $\pm$ 0,6)

O aço ZAR 345 apresentou as variações de comportamento mais expressivas entre os materiais avaliados. A análise inicia-se pela caracterização do material íntegro, onde foi constatada uma divergência importante nas propriedades iniciais. Embora o material seja classificado comercialmente como ZAR 345, o que implica, normativamente, um Limite de Escoamento mínimo de 345 MPa, os ensaios revelaram um valor médio de apenas 295,7 MPa. Essa menor resistência mecânica inicial veio acompanhada de uma ductilidade elevada (34,5%), superior aos demais materiais estudados.

Em relação à exposição na câmara salina, a degradação foi evidenciada na etapa final. Ao atingir 1032 h, o material registrou uma queda abrupta em sua ductilidade, apresentando um alongamento total de apenas 23,5%. Quando comparado ao pico de ductilidade observado em 240 h (41,0%), a redução foi de aproximadamente 42%. A perda severa da ductilidade, aliada à manutenção do baixo limite de escoamento (~290 MPa), corrobora a análise visual de

falha total do revestimento e confirma que o ataque corrosivo comprometeu a integridade estrutural do substrato.

Os valores numéricos que fundamentam esta análise estão compilados na Tabela 2, enquanto o comportamento gráfico detalhado do material em cada etapa do ensaio pode ser consultado nas curvas tensão-deformação apresentadas no Apêndice A.

Em contraste com o material anterior, o aço revestido por Galvanização a Fogo demonstrou notável estabilidade de suas propriedades mecânicas ao longo de todo o ensaio. O Limite de Escoamento manteve-se praticamente inalterado, oscilando minimamente entre 360,3 MPa (estado íntegro) e 360,7 MPa ao final das 1032 h.

O comportamento da ductilidade apresentou flutuações pouco relevantes, encerrando o ensaio com um alongamento de 22,3%, valor próximo ao encontrado nas amostras íntegras (25,2%). Observou-se ainda um leve aumento no Limite de Resistência à Tração final (471,3 MPa). Esses resultados indicam que, apesar da corrosão branca presente ao final do ensaio, a robusta massa de revestimento protegeu o substrato de maneira eficaz, impedindo qualquer maior degradação mecânica. As curvas tensão-deformação correspondentes, que ilustram essa estabilidade elástica e plástica, encontram-se no Apêndice B.

O revestimento Magnelis® apresentou alta eficácia na manutenção das propriedades mecânicas do substrato. O material manteve sua integridade estrutural com variações pouco expressivas na resistência, encerrando o ensaio de 1032 h com um Limite de Escoamento de 363,7 MPa.

O destaque deste material está no comportamento de sua ductilidade. Mesmo após a longa exposição em ambiente agressivo, o Magnelis® sustentou um alongamento final de 27,4%, valor superior ao seu estado inicial de entrega (22,9%). Diferentemente do ZAR, que apresentou fragilização, o substrato do Magnelis® não sofreu perda de tenacidade. Este resultado comprova que a barreira formada pela liga Zn-Al-Mg foi eficaz, isolando o aço base e impedindo os mecanismos de fragilização por corrosão.

A análise comparativa ao final de 1032 h evidencia a correlação direta entre a eficácia do revestimento e a propriedade mecânica do substrato. O Magnelis® e o Galvanizado a Fogo mantiveram a estabilidade da resistência e ductilidade, indicando que a integridade da barreira protetora impediu a degradação do aço.

Por outro lado, o ZAR 345 foi marcado pela fragilização do material após a exposição prolongada. A queda da ductilidade para 23,5% no final do ensaio está diretamente ligada à falha da barreira protetora observada visualmente. Conforme demonstrado por Heredia et al. (2025) e Martinez-Pañeda (2024), a corrosão no substrato, seja por pites ou perda de seção,

compromete a capacidade de deformação plástica do metal, justificando a perda de tenacidade observada exclusivamente no ZAR.

#### 4.4 ANÁLISE COMPARATIVA

A análise conjunta dos dados visuais e mecânicos estabelece que o desempenho dos revestimentos em atmosferas agressivas é regido pela interação entre a composição química da liga e a massa de camada disponível. Não se trata apenas da tecnologia do material, mas da quantidade de proteção disponível para sustentar o mecanismo de defesa ao longo do tempo.

O Galvanizado a Fogo validou sua posição como uma solução de alta confiabilidade baseada em barreira física. Sua estabilidade mecânica e visual é um reflexo direto da camada espessa (486 g/m<sup>2</sup>). Este volume atua como um reservatório extenso de material de sacrifício, compensando a menor eficiência eletroquímica do zinco puro em comparação às ligas modernas. A manutenção da integridade do substrato, mesmo após 1032 h, confirma a tese de Sheehan (2013) sobre a importância do volume de zinco para a durabilidade em longo prazo.

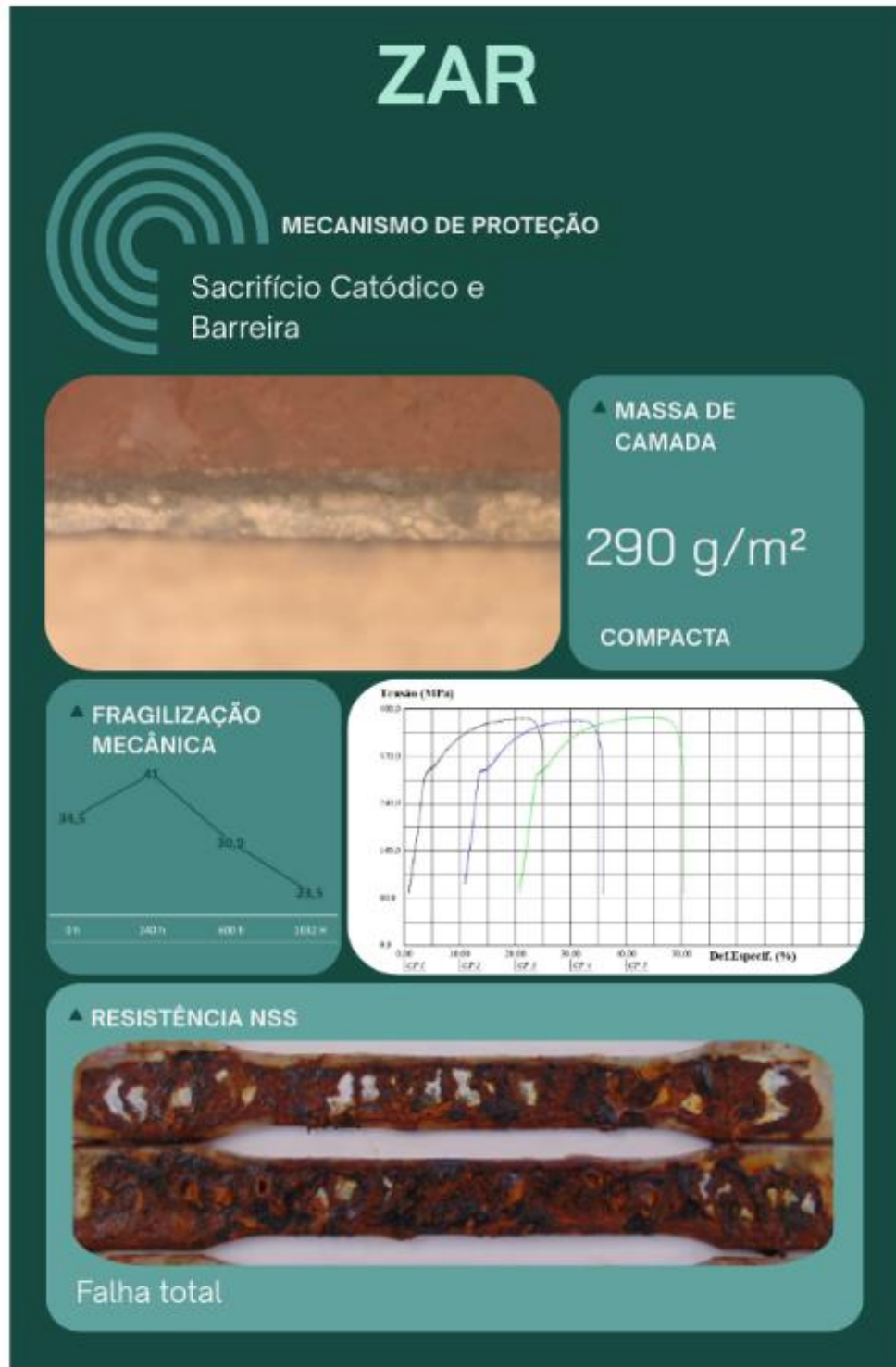
Em contraste, o Magnelis® comprovou a superioridade tecnológica da liga Zn-Al-Mg com formulação otimizada. Mesmo com uma massa de camada 36% inferior à do galvanizado (310 g/m<sup>2</sup> vs. 486 g/m<sup>2</sup>), o material mostrou-se resistente à corrosão vermelha e não apresentou mudanças significativas em suas propriedades mecânicas, mantendo-se estável durante todo ensaio. Isso demonstra que a barreira química formada pelos produtos de corrosão estáveis foi eficaz em selar a superfície, impedindo que o hidrogênio ou os cloretos atingissem o aço base, evitando a fragilização.

O aço ZAR 345 representou o contraponto crítico do estudo. A falha do sistema, evidenciada visualmente pela corrosão vermelha em 72 h e mecanicamente pela queda da ductilidade para 23,5% ao final do teste, demonstra os limites da proteção quando há insuficiência de massa. Embora pertença à família das ligas, a camada de 290 g/m<sup>2</sup> foi rapidamente consumida, exaurindo a proteção galvânica antes que qualquer mecanismo de passivação pudesse atuar.

Em suma, a divergência de desempenho revela que a durabilidade do sistema fotovoltaico em ambientes de alta corrosividade exige a integração de dois pilares: qualidade da liga e espessura da camada. A ausência de massa suficiente, como observado no ZAR 345, anula os benefícios teóricos da liga, resultando em degradação estrutural acelerada.

A Figura 14 sintetiza os resultados finais, associando a massa de revestimento com a manutenção da ductilidade após os ensaios de Névoa Salina Neutra (NSS).

Figura 14 – Síntese de resultados para as amostras ZAR, Galvanizado a Fogo e Magnelis®



# Galvanizado a Fogo



## MECANISMO DE PROTEÇÃO

Sacrifício Catódico -  
Grande volume de Zn

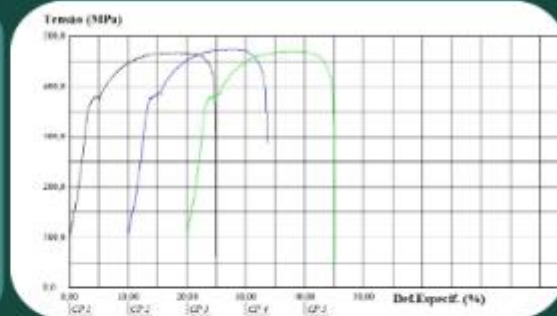
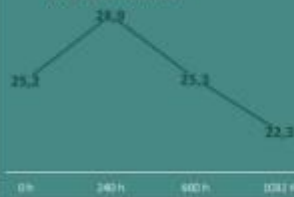


▲ MASSA DE  
CAMADA

486 g/m<sup>2</sup>

CAMADAS  
INTERMETÁLICAS

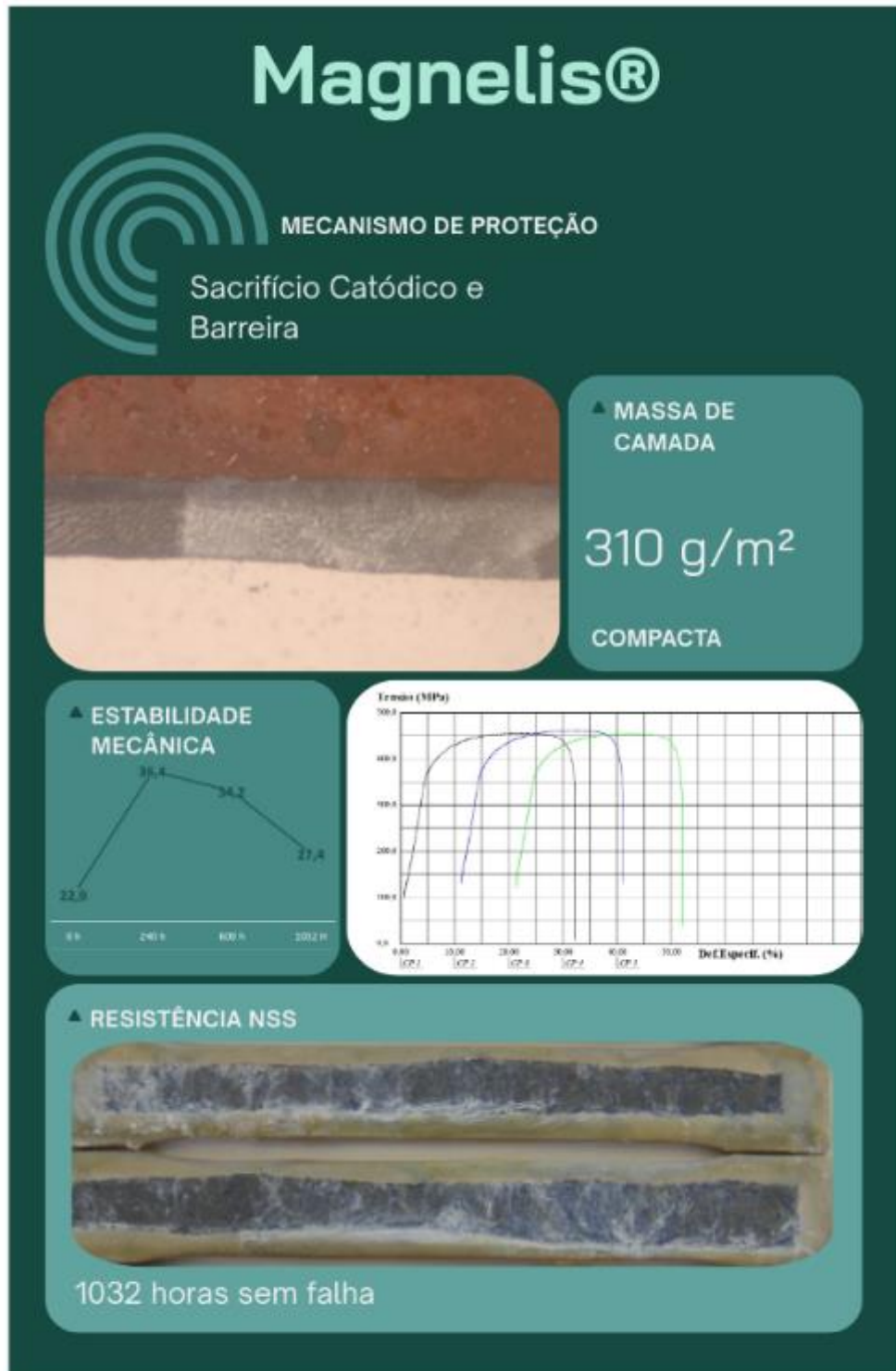
▲ ESTABILIDADE  
MECÂNICA



▲ RESISTÊNCIA NSS



1032 horas sem falha



Fonte: A Autora (2025).

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho cumpriu o objetivo geral de avaliar comparativamente o desempenho de três revestimentos metálicos (Galvanizado a Fogo, Magnelis® e ZAR 345) sob condições de corrosão acelerada (Névoa Salina Neutra) e os efeitos da corrosão nas propriedades mecânicas do substrato, fornecendo dados para a seleção de materiais em estruturas de sistemas fotovoltaicos expostas a ambientes severos.

Os resultados demonstraram que o desempenho protetivo está ligado à combinação entre a massa de revestimento e o mecanismo de proteção específico de cada material. Tanto o Galvanizado a Fogo quanto o Magnelis® apresentaram notável eficácia, resistindo às 1032 h de exposição sem manifestar corrosão vermelha no substrato, comprovando sua adequação para ambientes de alta agressividade.

O desempenho do Galvanizado a Fogo foi garantido pela sua robusta massa de camada (486 g/m<sup>2</sup>) que, em função da espessura da camada Eta (zinco puro), ofereceu um reservatório superior para o mecanismo de proteção catódica por sacrifício. Por sua vez, o Magnelis® alcançou o mesmo resultado de resistência com uma massa de camada inferior (310 g/m<sup>2</sup>), reforçando o papel crucial dos elementos de liga (Zn-Al-Mg) adicionados ao processo. O sucesso do Magnelis® se dá em função da formação de produtos de corrosão estáveis (*simonkolleite* e LDHs) que promovem um mecanismo de proteção ativa e autorreparadora, selando a superfície e inibindo o avanço dos cloretos.

Em contraste, o revestimento ZAR 345 apresentou a falha mais crítica, com corrosão vermelha em 72 h e falha generalizada em 1032 h. Este resultado evidenciou que, apesar da tecnologia Zn-Al-Mg, a composição específica da liga não foi capaz de compensar a baixa reserva de material (290 g/m<sup>2</sup>) sob condições severas. A espessura reduzida limitou a disponibilidade dos elementos de liga necessários para a formação de produtos de corrosão estáveis, tornando a proteção insuficiente para sustentar a regeneração do filme protetor e levando ao rápido rompimento da barreira.

A análise das propriedades mecânicas confirmou a importância da proteção superficial, demonstrando que a falha do ZAR 345 resultou em fragilização severa do substrato, evidenciada pela queda da ductilidade para 23,5% ao final do ensaio. Em contrapartida, o Magnelis® e o Galvanizado a Fogo demonstraram estabilidade mecânicas, mesmo após a exposição à Névoa Salina.

Conclui-se que o Magnelis® e o Galvanizado a Fogo são materiais tecnicamente adequados para o uso em estruturas fotovoltaicas em ambientes potencialmente corrosivos.

Este trabalho reforça a importância de considerar a massa de camada como um parâmetro de especificação inegociável para ligas (Zn-Al-Mg) em aplicações de alto risco, dado o desempenho insatisfatório da baixa massa de camada do ZAR 345. Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a caracterização metalográfica dos produtos de corrosão por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), e investigar o desempenho do revestimento ZAR 345 em massas de camada superiores, visando determinar o ponto de saturação em que seu mecanismo de proteção ativa se torna eficaz.

## REFERÊNCIAS

**ABINOX – Associação Brasileira do Mercado de Aços Inoxidáveis. Módulo 5: Corrosão por pites.** Curitiba: ABINOX, set. 2023. Disponível em: <<https://abinox.org.br/wp-content/uploads/2023/09/Corrosao-Modulo-5.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2025.

**ABINOX – Associação Brasileira do Mercado de Aços Inoxidáveis. Módulo 9: Corrosão sob tensão.** Curitiba: ABINOX, set. 2023. Disponível em: <<https://abinox.org.br/wp-content/uploads/2023/09/Corrosao-Modulo-9.pdf>>. Acesso em: 10 abril. 2025.

**ALMEIDA, L. Como Evitar a Corrosão de Estruturas de Suporte de Painéis Solares: Dicas Essenciais para Maior Durabilidade. Início Virtual,** 3 fev. 2025. Disponível em: <[https://iniciovirtual.com/2025/02/03/como-evitar-a-corrosao-de-estruturas-de-suporte-de-paineis-solares-dicas-essenciais-para-maior-durabilidade/?utm\\_source](https://iniciovirtual.com/2025/02/03/como-evitar-a-corrosao-de-estruturas-de-suporte-de-paineis-solares-dicas-essenciais-para-maior-durabilidade/?utm_source)>. Acesso em: 24 abr. 2025

**ARCELORMITTAL.** Solar Solutions: produtos Magnelis® para estruturas fotovoltaicas. 2024. Disponível em: <<https://constructalia.arcelormittal.com>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 16990:2021: Bobinas e chapas de aço revestidas com liga zinco-alumínio-magnésio pelo processo contínuo de imersão a quente — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 6892-1:2020: Materiais metálicos — Ensaio de tração — Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 7008:2012: Chapas e bobinas de aço de baixa liga e alta resistência, laminadas a quente, para uso estrutural — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR ISO 10289:2015: Revestimentos metálicos e outros revestimentos inorgânicos — Ensaio de corrosão em atmosferas artificiais — Classificação dos corpos de prova e dos produtos manufaturados submetidos aos ensaios de corrosão. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

**ASTM INTERNATIONAL.** ASTM D2247-20: Standard Practice for Testing Water Resistance of Coatings in 100 % Relative Humidity. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

**ASTM INTERNATIONAL.** ASTM E290-22: Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

**ASTM INTERNATIONAL.** ASTM E3-11(2017): Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

**ASTM INTERNATIONAL.** ASTM E407-07(2021): Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

**BUENO, Rodrigo.** Corrosão atmosférica em projetos fotovoltaicos: uma análise detalhada segundo normas regulatórias. *Photoenergy*. Disponível em: <<https://photoenergy.com.br/artigo/corrosao-atmosferica-em-projetos-fotovoltaicos-uma-analise-detalhada-segundo-normas-regulatorias>>. Acesso em: 24 maio. 2025.

CHAOUKI, W. et al. Correlation between the morphology of the Fe-Al intermetallic layer and the corrosion resistance of hot-dip galvanized and Zn-5%Al-Mg coated steel in a marine environment. *Corrosion Science*, v. 90, p. 195-207, 2015.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL (CSN). **Aços Planos: Galvanizados**. [s.l.]: CSN, 2024. Disponível em: <https://www.csn.com.br/homepage/acos-planos/galvanizados/>. Acesso em: 4 nov. 2025.

CORREIA, M. J. PERNETA, H. RODRIGUES, M. P. PEREIRA, E. V. SALTA, M. M. Sistemas de proteção contra corrosão das estruturas metálicas. **Repositorio Inec**, 24 nov. 2011.

COSTA, A. N. C. et al. Comparative analysis of corrosion resistance of Zinc and Zn-Al-Mg coatings on carbon steel. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 1, p. e49810111973, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i1.11973.

COSTA, E. M. et al. Crevice corrosion on stainless steels in oil and gas industry: A review of techniques for evaluation, critical environmental factors and dissolved oxygen. **Engineering failure analysis**, v. 144, n. 106955, p. 106955, 2023.

CRUZ, Magnus Geder Henz. Estudo das propriedades mecânicas do aço estrutural ZAR 345 galvanizado a fogo aplicado na fabricação de carrocerias de ônibus. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007. Disponível em: <https://repositorio.uces.br/xmlui/bitstream/handle/11338/136/Dissertacao%20Magnus%20Geder%20Henz%20Cruz.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2025.

CUNHA, W. P. et al. Corrosion resistance of zinc, zinc-aluminium and zinc-aluminium-magnesium coated steel in neutral salt spray test. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 28, n. 4, p. 1-12, 2023.

**FIGUEIRA, R. B.** Hybrid sol-gel coatings for corrosion mitigation: a critical review. *Polymers*, Basel, v. 12, n. 3, p. 689, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12030689>. Acesso em: 21 jun. 2025.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. *E-book*. pág.1-2,56,71,104,313. ISBN 9788521637998. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637998/>. Acesso em: 24 abril. 2025.

GUO, Taixiong et al. Roles of Al and Mg on the Microstructure and Corrosion Resistance of Zn-Al-Mg Hot-Dipped Coated Steel. **Materials**, Basel, v. 17, n. 7, p. 1512, 2024. DOI: 10.3390/ma17071512. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/7/1512>. Acesso em: 28 jun. 2025.

**HAN, S. et al.** Influence of Al and Mg on the corrosion resistance of Zn-based coatings. *Materials and Corrosion*, 2024.

HE, Xiumei, et al. Insight into the corrosion mechanism of hot-dip Zn-Al-Mg-coated steel: A comparison between cut-edge and flat surface. **Sustainable Materials and Structures**, [S.L.], 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667266924000057>. Acesso em: 24 nov. 2025.

**HEREDIA, A. A.** et al. Atmospheric corrosion of carbon and galvanized steel under high rainfall conditions. **Heliyon**, v. 11, n. 1, p. e41281, jan. 2025.

HUSSAIN, M. I. et al. Corrosion resistance of nanostructured metals and alloys. **Corrosion Protection at the Nanoscale**, p. 63–87, 2020.

ICZ INSTITUTO CADEIA DO ZINCO. Galvanização. [s.l.]: ICZ, s.d. Disponível em: <https://icz.org.br/galvanizacao/>. Acesso em: 23 out. 2025.

IEA-PVPS (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme). **Trends in PV Applications 2024**. 2024. Disponível em: [[https://iea-pvps.org/trends\\_reports/trends-in-pv-applications-2024/](https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-in-pv-applications-2024/)]([https://iea-pvps.org/trends\\_reports/trends-in-pv-applications-2024/](https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-in-pv-applications-2024/)). Acesso em: 10 mai. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1461:2022: Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles — Specifications and test methods. Geneva: ISO, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14713-2:2019: Zinc coatings — Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures — Part 2: Hot dip galvanizing. Geneva: ISO, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6892-1:2019: Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature. Geneva: ISO, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9223:2012: Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation. Geneva: ISO, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9227:2017: Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests. Geneva: ISO, 2017.

**KOCH, Gerhardus H.; VARNEY, Jeff; THOMPSON, Neil; MOGHISSI, Oliver; GOULD, Melissa; PAYER, Joe.** *International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technology*. Houston: NACE International, 2016. Anais... Apresentado em 8 mar. 2016.

KYRANAKI, N. **Corrosion in crystalline silicon photovoltaic modules and the influence on performance**. Loughborough: Loughborough University, 21 maio 2021.

Lloreda-Jurado, P.J.; Chicardi, E. Evaluation of Corrosion Behavior of Zn–Al–Mg-Coated Steel in Corrosive Heterogeneous Soil. *Crystals* 2025, 15, 738. <https://doi.org/10.3390/cryst15080738>

MARTÍNEZ-PAÑEDA, E. Phase-field simulations opening new horizons in corrosion research. **MRS Bulletin**, p. 603–612, 21 maio 2024.

PERFIL LIDER. Magnelis®: o que é e como funciona o revestimento anticorrosivo da ArcelorMittal. 2024. Disponível em: <https://www.perfillider.com.br/magnelis>. Acesso em: 16 jun. 2025.

RAI, P. K. et al. Corrosion behaviour of hot-dip Zn-Al-Mg coatings with different Al content. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, v. 69, n. 1, p. 29–37, 2022. DOI: 10.1108/ACMM-05-2021-2487.

**RIJEZA Metalurgia Ltda.** *Corrosão uniforme: o que é e como evitar?* São Leopoldo: Rijeza, [20--?] (s.d.). Disponível em: <https://rijeza.com.br/blog/corrosao-uniforme-o-que-e-e-como-evitar/>. Acesso em: 24 abr. 2025.

SARTORI, Fernanda; BRESSAN, Marcos. Estudo comparativo entre aços estruturais galvanizados ZAR 345 e ZAR 450 aplicados em silos metálicos de armazenamento de grãos. In: **Anais da Semana Acadêmica Integrada FAG**, Cascavel: Fundação Assis Gurgacz, 2022. Disponível em: <https://www4.fag.edu.br/anais-2022/Anais-2022-44.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2025.

SCHÜRZ, J. et al. Corrosion resistance of zinc and zinc alloy coatings. *Materials and Corrosion*, v. 61, n. 6, p. 519–527, 2010.

SHAKER, Lina M. et al. Corrosion in solar cells: challenges and solutions for enhanced performance and durability. **Journal of Optics**, 2023. DOI: 10.1007/s12596-023-01277-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12596-023-01277-9>. Acesso em: 28 abr. 2025.

SHEEHAN, A. **PERFORMANCE OF HOT DIP GALVANIZING IN COASTAL ENVIRONMENTS: A REVIEW.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: [https://www.steel.org.au/getattachment/a9eddba2-bcb7-41a3-b31b-73a83021375f/Sheehan\\_Perf\\_of\\_HDG\\_in\\_coastal\\_envs.pdf](https://www.steel.org.au/getattachment/a9eddba2-bcb7-41a3-b31b-73a83021375f/Sheehan_Perf_of_HDG_in_coastal_envs.pdf).

**STEELPRO GROUP.** Quanto tempo dura o aço galvanizado? 8 mar. 2025. Disponível em: Disponível em: [https://steelprogroup.com/pt/galvanized-steel/properties/lifespan/?utm\\_source=chatgpt.com](https://steelprogroup.com/pt/galvanized-steel/properties/lifespan/?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 24 abr. 2025

STEFFAN. **Prevenção eficaz da corrosão galvânica em sistemas solares com aço inoxidável 304 e liga de alumínio.** Disponível em: <https://pv-mounts.com/pt/prevencao-eficaz-da-corrosao-galvanica-em-sistemas-solares-com-aco-inoxidavel-304-e-liga-de-aluminio/>. Acesso em: 24 abr. 2025.

STRAITS RESEARCH PRIVATE LIMITED-GARNER INSIGHTS. **Solar energy systems market size to worth USD 590.8 billion by 2033.** Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/02/03/3019353/0/en/Solar-Energy-Systems-Market-Size-to-Worth-USD-590-8-Billion-by-2033-Straits-Research.html>. Acesso em: 10 maio. 2025.

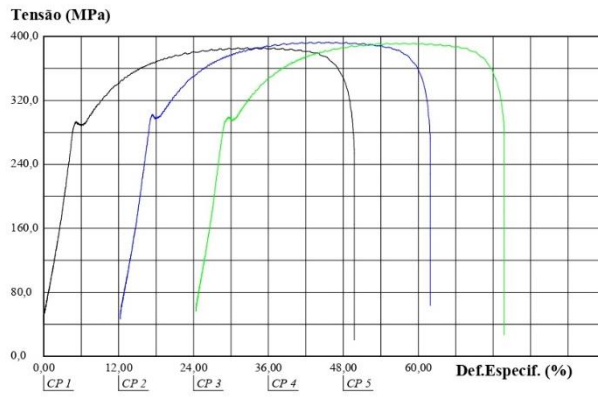
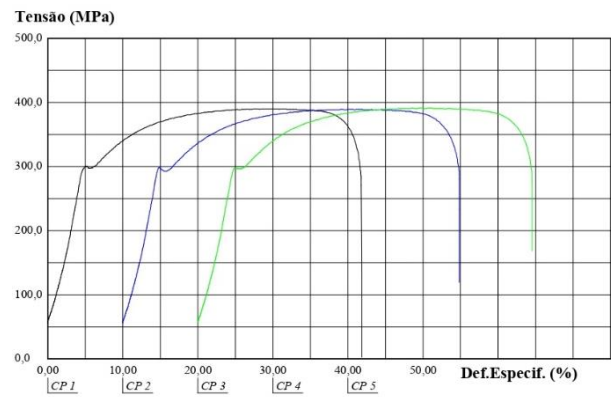
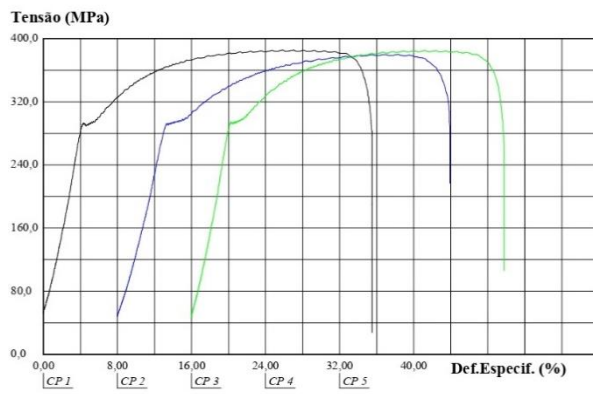
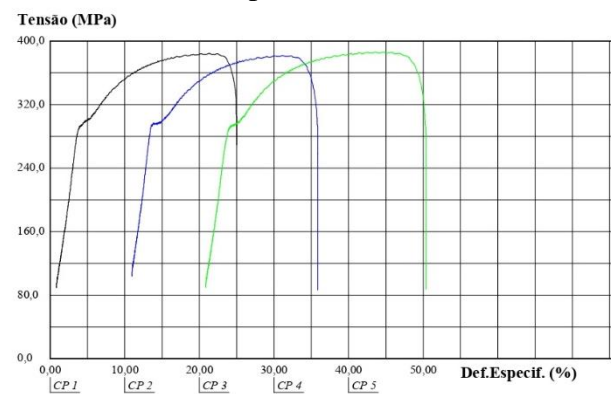
TEVERA, Tapiwa. Evaluation of corrosion behaviour of hot dip Zn and Zn-Al alloy coatings on steel wire using laboratory and field tests. 2014. [Trabalho de Conclusão de Curso/Dissertação]. University of Cape Town, Cape Town, 2014. Disponível em:

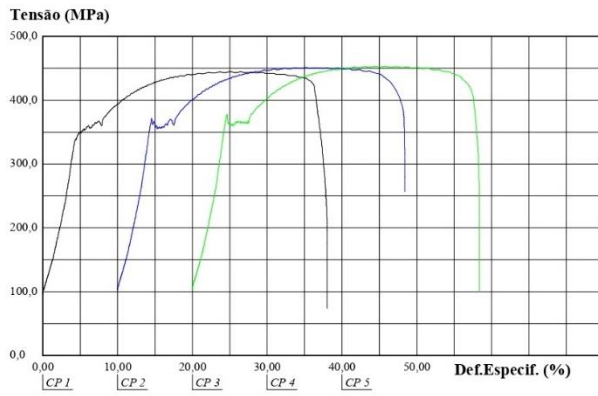
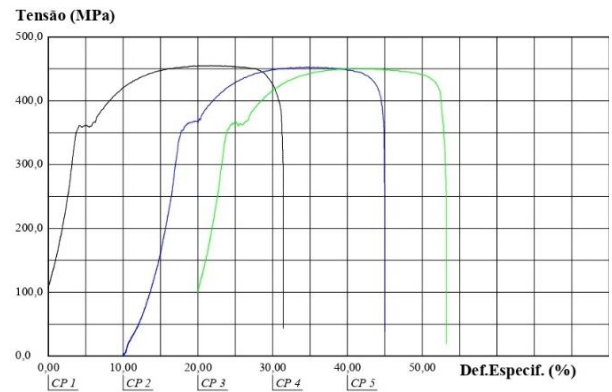
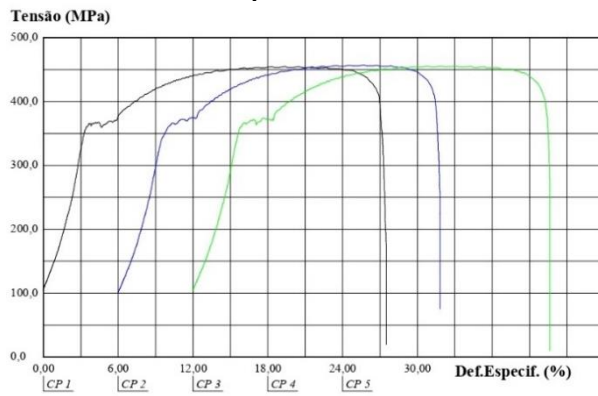
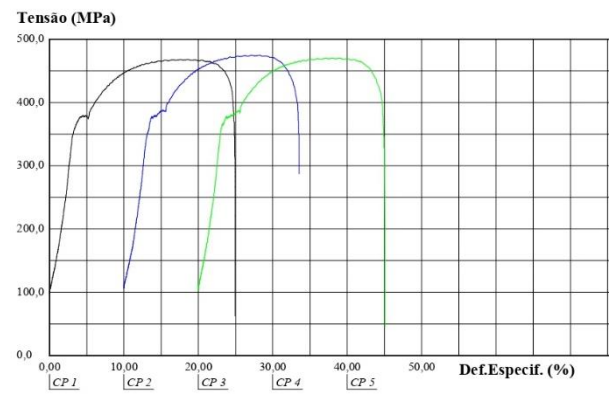
<https://open.uct.ac.za/server/api/core/bitstreams/a1eeef80-6b3d-44c8-bde6-9cc18bf4e6a1/content>. Acesso em: 24 nov. 2025.

**TRISTÃO, J. L. INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO DAS ESTRUTURAS DE FIXAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.** [s.l.] CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS, 2021.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC, Centro de Engenharia.** Corrosão sob tensão | Materiais. Disponível em: <[https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6349-corrosao-sob-tensao#google\\_vignette](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6349-corrosao-sob-tensao#google_vignette)>. Acesso em: 24 maio. 2025.

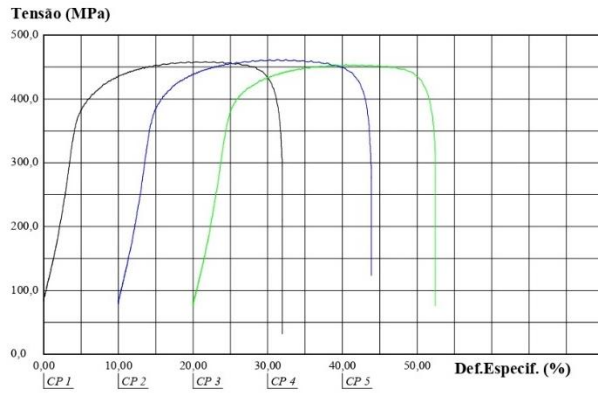
**VINTURINI, M. Corrosão galvânica em estruturas metálicas de sistemas fotovoltaicos.** Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/corrosao-galvanica-em-estruturas-metalias/>>. Acesso em: 7 abr. 2025.

**ANEXO A – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO AÇO ZAR 345****Amostras íntegras****Amostras após 240 h de NSS****Amostras após 600 h de NSS****Amostras após 1032 h de NSS**

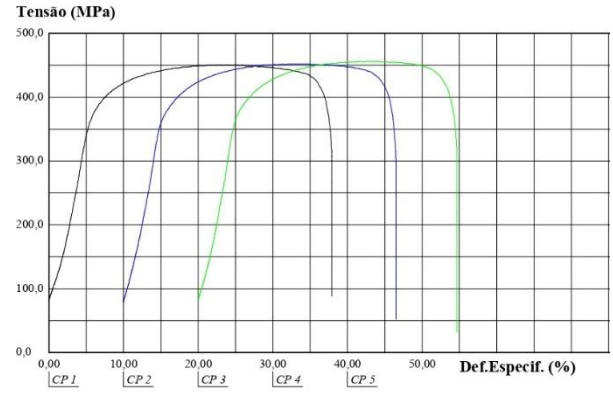
**ANEXO B – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO AÇO GALVANIZADO A FOGO****Amostras íntegras****Amostras após 240 h de NSS****Amostras após 600 h de NSS****Amostras após 1032 h de NSS**

## ANEXO C – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO MAGNELIS®

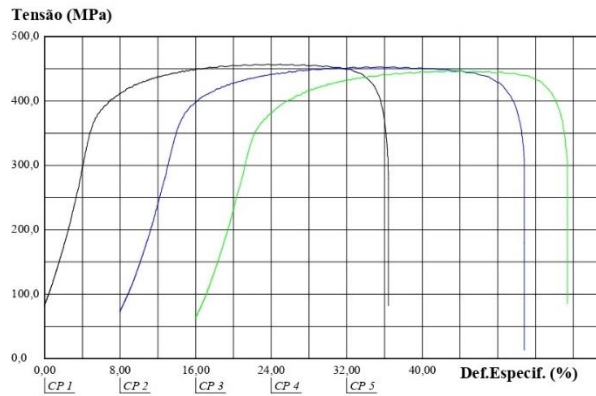
### Amostras íntegras



### Amostras após 240 h de NSS



### Amostras após 600 h de NSS



### Amostras após 1032 h de NSS

