



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



**RICARDO MARRA ANTUNES**

**PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A  
CORROSÃO DE AÇOS PATINÁVEIS EM AMBIENTES  
PERMANENTEMENTE ÚMIDOS PARA UTILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO  
DE ESTACAS METÁLICAS EM FUNDAÇÕES**

**VOLTA REDONDA**

**2025**



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



RICARDO MARRA ANTUNES

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DE AÇOS PATINÁVEIS EM  
AMBIENTES PERMANENTEMENTE ÚMIDOS PARA UTILIZAÇÃO NA  
PRODUÇÃO DE ESTACAS METÁLICAS EM FUNDAÇÕES

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE  
“MESTRE EM MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO  
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

*Roberto de Oliveira Magnago*

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

*Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira  
Presidente / UniFOA

*Shimeni Baptista Ribeiro Daer*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Shimeni Baptista Ribeiro Daer  
Examinador interno / UniFOA

*Leonardo Martins da Silva*

Prof. Dr. Leonardo Martins da Silva  
Examinador externo / UFF

Junho de 2025

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A  
CORROSÃO DE AÇOS PATINÁVEIS EM AMBIENTES  
PERMANENTEMENTE ÚMIDOS PARA UTILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO  
DE ESTACAS METÁLICAS EM FUNDAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais metálicos e linha de pesquisa em materiais siderúrgicos.

Mestrando:

Ricardo Marra Antunes

Orientadora:

Professora Dra. Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira

**VOLTA REDONDA**

**2025**

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

A627p Antunes, Ricardo Marra

Procedimento para avaliação da resistência a corrosão de aços patináveis em ambientes permanentemente úmidos para utilização na produção de estacas metálicas em fundações. / Ricardo Marra Antunes. - Volta Redonda: UniFOA, 2025. 86 p. II

Orientador (a): Profa. Dra. Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em  
Materiais, 2025

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram e possibilitaram a realização deste projeto. À minha família, que, com amor e compreensão, abdicou de momentos ao meu lado e sempre me incentivou a seguir em frente, com determinação, em busca deste objetivo. A todos os colaboradores da Gerdau, que disponibilizaram os recursos necessários para a realização deste trabalho, e ao UniFOA, instituição que me acolheu e me proporcionou uma formação sólida. Aos professores do MeMat, por toda a orientação ao longo dos anos. Em especial, ao Prof. Dr. Roberto Magnago, cuja paixão pela educação e soluções criativas para os desafios enfrentados foram essenciais para o progresso do projeto. Agradeço, finalmente, à Prof<sup>a</sup>. Dra. Janaina Oliveira, minha orientadora, cuja capacidade de manter o foco e sua determinação incansável foram fundamentais para que eu alcançasse a conclusão deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço profundamente à minha família, pelo apoio incondicional ao longo de toda a jornada. Suas palavras de incentivo, paciência e amor me acompanharam em cada etapa deste processo. Aos meus colegas e amigos do Grupo Gerdau, que, com a disponibilidade de recursos e apoio contínuo, permitiram que este trabalho se tornasse realidade. Agradeço também ao UniFOA e, especialmente, aos professores do programa de Mestrado em Engenharia de Materiais (MeMat), que foram fundamentais para a minha formação e desenvolvimento durante todo o curso. De maneira especial, quero expressar minha gratidão ao Prof. Dr. Roberto Magnago, cuja dedicação e visão inovadora, sempre focadas em soluções práticas para os obstáculos que surgiram, foram essenciais para a realização desta pesquisa. Por fim, agradeço imensamente à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Janaina Oliveira, que, com sua liderança firme e orientação precisa, não só manteve o foco do trabalho, como também me proporcionou ensinamentos valiosos para o meu crescimento acadêmico e profissional.

ANTUNES, R. M. **Procedimento para avaliação da resistência a corrosão de aços patináveis em ambientes permanentemente úmidos para utilização na produção de estacas metálicas em fundações. 2025.** Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2025.

## RESUMO

A presente pesquisa investiga o desempenho anticorrosivo de aços patináveis em comparação com aços carbono convencionais, visando sua aplicação em fundações profundas submetidas à exposição contínua à umidade. A motivação decorre da necessidade de reduzir a espessura de sacrifício exigida pelas normas técnicas, que impacta diretamente nos custos e na sustentabilidade dos empreendimentos. O objetivo principal foi avaliar se os aços patináveis, em especial o ASTM A588, apresentam resistência à corrosão suficiente para permitir a redução da espessura adicional comumente adotada em estacas metálicas de aço carbono. Para isso, quatro tipos de aço foram analisados: A588 (gusa), A36 (gusa), A572 G50 (sucata) e A36 (sucata). As amostras, em formato de cantoneiras laminadas a quente, foram submetidas a ensaio acelerado em câmara úmida por até 226 dias, conforme a norma ABNT NBR 8095, e caracterizadas por análises de perda de massa, inspeção visual, difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados demonstraram que o aço A588 apresentou o melhor desempenho, com formação de camada protetora aderente, mesmo em ambiente de umidade constante. Já os aços provenientes de sucata apresentaram maior degradação superficial, atribuída à presença de elementos residuais como enxofre e fósforo. Verificou-se ainda que a carepa de laminação contribui para a proteção temporária contra a corrosão, sendo sua remoção responsável por acelerar o processo corrosivo. Conclui-se que a substituição de aços carbono convencionais por aços patináveis é tecnicamente viável em fundações metálicas, com potencial para redução de custos, consumo de material e impacto ambiental, sem comprometer a integridade estrutural.

**Palavras-chave:** Estaca metálica; Cobre; Fundações.

ANTUNES, R. M. **Evaluation of the corrosion resistance of weathering steels in permanently humid environments for use in the production of steel piles for foundations.** 2025. Dissertation (Professional Master of Material) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2025.

## **ABSTRACT**

This research investigates the corrosion resistance performance of weathering steels compared to conventional carbon steels, aiming at their application in deep foundations exposed to continuous moisture. The motivation stems from the need to reduce the sacrificial thickness required by technical standards, which directly impacts construction costs and project sustainability. The main objective was to assess whether weathering steels, particularly ASTM A588, exhibit sufficient corrosion resistance to allow for a reduction in the additional thickness typically adopted in carbon steel piles. To this end, four steel types were analyzed: A588 (pig iron), A36 (pig iron), A572 G50 (scrap-based), and A36 (scrap-based). The samples, in the form of hot-rolled equal-angle profiles, were subjected to an accelerated corrosion test in a humidity chamber for up to 226 days, according to ABNT NBR 8095. They were characterized through mass loss measurements, visual inspection, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that A588 steel exhibited the best performance, forming a dense and adherent protective oxide layer, even under constant humidity. Conversely, scrap-based steels showed greater surface degradation, attributed to the presence of residual elements such as sulfur and phosphorus. It was also observed that the original mill scale acts as a temporary protective barrier, and its removal significantly accelerates the corrosion process. It is concluded that replacing conventional carbon steels with weathering steels is technically feasible for deep steel foundations, offering potential cost, material, and environmental impact reductions without compromising structural integrity.

**Keywords:** Metal pile; Copper; Foundations.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Tabela de compensação de espessura da ABNT NBR 6122 .....	31
<b>Tabela 2.</b> Características padronizadas das estacas Gerdau – Perfil H.....	33
<b>Tabela 3.</b> Características padronizadas das Estacas Gerdau – Perfil I.....	33
<b>Tabela 4.</b> Requisitos especificados dos aços conforme ASTM A588 (valores mínimos e máximos) .....	37
<b>Tabela 5.</b> Requisitos especificados dos aços conforme normas ASTM A242, A36 e A572 G50 (valores mínimos e máximos).....	37
<b>Tabela 6.</b> Requisitos especificados dos aços conforme norma ABNT NBR 7007 (valores mínimos e máximos) .....	38
<b>Tabela 7.</b> Equivalência entre normas ABNT e ASTM.....	39
<b>Tabela 8.</b> Composição química dos aços avaliados .....	40
<b>Tabela 9.</b> Resultado da pesagem das amostras utilizadas no presente estudo antes da distribuição na câmara úmida (valores em gramas) .....	45
<b>Tabela 10.</b> Resultado da composição química dos aços utilizados no estudo .....	52
<b>Tabela 11.</b> Peso em gramas antes do ensaio .....	76
<b>Tabela 12.</b> Peso em gramas após 226 dias.....	77
<b>Tabela 13.</b> Perda de massa das amostras.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CSN</b>	Companhia Siderúrgica Nacional
<b>MeMat</b>	Mestrado Profissional em Materiais
<b>NBR</b>	Norma Técnica Brasileira
<b>BOF</b>	Basic Oxygen Furnace
<b>EAF</b>	Electric Arc Furnace
<b>DRI</b>	Direct Reduced Iron

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Seção transversal de um Alto Forno.....	23
<b>Figura 2.</b> Processo de produção de aço no BOF.....	25
<b>Figura 3.</b> Desenho esquemático do forno elétrico com balanço de massa .....	26
<b>Figura 4.</b> Representação esquemática de camadas de óxido formadas em aços carbono e aços patináveis.....	29
<b>Figura 5.</b> Detalhe de uma camada de pátina em uma superfície .....	29
<b>Figura 6.</b> Metodologia aplicada ao estudo .....	40
<b>Figura 7.</b> Amostras coletadas.....	42
<b>Figura 8.</b> Corte dos corpos de prova .....	43
<b>Figura 9.</b> Lixamento dos corpos de prova.....	43
<b>Figura 10.</b> Marcação dos corpos de prova .....	44
<b>Figura 11.</b> Pesagem dos corpos de prova .....	44
<b>Figura 12.</b> Aspecto inicial dos corpos de prova .....	45
<b>Figura 13.</b> Equipamento de ensaio de câmara úmida.....	47
<b>Figura 14.</b> Detalhe do interior do equipamento de ensaio de câmara úmida .....	47
<b>Figura 15.</b> Detalhe do controle de temperatura do equipamento de câmara úmida ..	48
<b>Figura 16.</b> Corpos de prova distribuídos dentro do equipamento de ensaio de câmara úmida .....	48
<b>Figura 17.</b> Folha de registro do monitoramento da câmara úmida com a sinalização da data de início do ensaio (25/09/2024 às 10:47 h).....	49
<b>Figura 18.</b> Ajuste da temperatura inicial de 38°C.....	50
<b>Figura 19.</b> Ajuste da temperatura de ensaio no quinto dia para 42°C .....	50
<b>Figura 20.</b> Arranjo inicial dos corpos de prova no equipamento de ensaio .....	51

<b>Figura 21.</b> Visão geral dos corpos de prova, não decapadas, após 1 dia de ensaio (26/09/24) .....	55
<b>Figura 22.</b> Visão geral dos corpos de prova após 15 dias de ensaio (11/10/24) .....	57
<b>Figura 23.</b> Detalhe do aspecto visual no 15º dia de ensaio .....	57
<b>Figura 24.</b> Visão geral dos corpos de prova após 28 dias de ensaio (24/10/24) .....	58
<b>Figura 25.</b> Detalhe do aspecto visual no 30º dia de ensaio .....	58
<b>Figura 26.</b> Visão geral dos corpos de prova após 45 dias de ensaio (11/11/24) .....	59
<b>Figura 27.</b> Detalhe do aspecto visual no 45º dia de ensaio .....	59
<b>Figura 28.</b> Visão geral dos corpos de prova após 61 dias de ensaio (25/11/24) .....	60
<b>Figura 29.</b> Detalhe do aspecto visual em vários dias de ensaio .....	60
<b>Figura 30.</b> Novas amostras após decapagem química com ácido clorídrico.....	61
<b>Figura 31.</b> Amostras decapadas e incorporadas ao experimento na câmara úmida no dia 28 de novembro de 2024 .....	62
<b>Figura 32.</b> Visão geral dos corpos de prova decapados após 4 dias de ensaio (02/12/24) .....	62
<b>Figura 33.</b> Visão geral dos corpos de prova após 150 dias de ensaio (27/02/25) ....	63
<b>Figura 34.</b> Visão geral dos corpos de prova após 180 dias de ensaio (27/03/25) ....	63
<b>Figura 35.</b> Visão geral dos corpos de prova após 210 dias de ensaio (27/04/25) ....	64
<b>Figura 36.</b> Visão geral dos corpos de prova após 226 dias de ensaio (13/05/25) ....	64
<b>Figura 37.</b> Amostra 1.1 com carepa .....	65
<b>Figura 38.</b> Amostra 2.1 com carepa .....	65
<b>Figura 39.</b> Amostra 3.1 com carepa .....	66
<b>Figura 40.</b> Amostra 4.1 com carepa .....	66
<b>Figura 41.</b> Amostra 1.1 D (decapada) .....	67
<b>Figura 42.</b> Amostra 2.1D (decapada) .....	68

<b>Figura 43.</b> Amostra 3.1D (Decapada).....	68
<b>Figura 44.</b> Amostra 4.1D (Decapada).....	69
<b>Figura 45.</b> DRX 1.1D .....	69
<b>Figura 46.</b> DRX 1.1D .....	70
<b>Figura 47.</b> DRX 1.3.....	71
<b>Figura 48.</b> DRX 2.3.....	72
<b>Figura 49.</b> Micrografias (200, 500, 1000 e 2000 X) de uma amostra de aço patinável não decapado após o ensaio na câmara úmida .....	73
<b>Figura 50.</b> Micrografias (25, 200, 500 e 1000 X) de uma amostra de aço patinável decapado após o ensaio na câmara úmida .....	74
<b>Figura 51.</b> Micrografias (25, 200, 500 e 1000 X) de uma amostra de aço oriundo de gusa (sem residuais) não decapado após o ensaio na câmara úmida .....	75
<b>Figura 52.</b> Micrografias (25, 200, 500 e 1000 X) de uma amostra de aço oriundo de gusa (sem residuais) decapado após o ensaio na câmara úmida .....	76

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	16
1.1 CONSIDERAÇÃO SOBRE O AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	16
1.2 Objetivos .....	17
1.2.1 Objetivo Geral .....	17
1.2.2 Objetivos Específicos .....	17
1.3 Justificativa .....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Composição e classificação dos aços .....	19
2.1.1 Processo de mineração.....	20
2.1.2 Processo de redução .....	22
2.1.3 Processo de refino .....	24
2.1.3.1 Aciaria a oxigênio .....	24
2.1.3.2 Aciaria Elétrica.....	25
2.2 Aços patináveis .....	27
2.3 Corrosão em estacas metálicas enterradas .....	30
2.4 Estacas metálicas Gerdau .....	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	34
3.1 Normas técnicas de perfis metálicos utilizadas no Brasil .....	34
3.2 Materiais.....	39
3.3 Métodos.....	40
3.3.1 Coleta, caracterização e preparação dos aços.....	40
3.3.1.1 Coleta dos aços .....	41
3.3.1.2 Preparação dos corpos de prova .....	42

3.3.2 Ensaio dos aços em câmara úmida.....	45
3.3.2.1 Caracterização da composição química .....	46
3.3.2.2 Descritivo do ensaio de câmara úmida .....	46
3.3.2.3 Distribuição das amostras.....	48
3.3.2.4 Configuração (parâmetros) do ensaio.....	49
3.3.3 Acompanhamento do ensaio.....	50
3.3.3.1 Verificação parcial dos resultados .....	50
3.3.3.2 Registro fotográfico.....	50
3.4. Caracterização em MEV e DRX.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1 Composição química dos materiais .....	52
4.2 Análise visual das amostras .....	54
4.3 Detalhes dos corpos de prova após 226 dias de ensaio .....	65
4.4 Resultados do DRX .....	69
4.5 Resumo dos Resultados de DRX – Amostra 3 .....	71
4.6 Resumo da Análise da Quarta Amostra de DRX .....	72
4.7 Resumo dos Resultados de MEV .....	73
5 CONCLUSÕES .....	80
6 TRABALHOS FUTUROS .....	82
REFERÊNCIAS .....	83

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÃO SOBRE O AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A redução de custos nos processos construtivos e na seleção de matérias-primas representa um dos principais desafios enfrentados pelo setor da construção civil, tanto em escala global quanto no contexto brasileiro. Tal preocupação é recorrente em diferentes tipologias de obras, incluindo infraestrutura urbana, edificações comerciais, empreendimentos residenciais e instalações industriais. A seleção criteriosa dos materiais estruturais, fundamentada em parâmetros técnicos e econômicos, pode definir o êxito financeiro de um empreendimento, além de impactar diretamente nos aspectos relacionados à durabilidade e segurança da obra.

As normativas brasileiras que regulam o setor da construção civil, especialmente aquelas editadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelecem requisitos mínimos de desempenho e vida útil para edificações (ABNT, 2022a). Assim, o desenvolvimento de novos materiais ou a reavaliação de aplicações para materiais já consolidados se apresenta como um eixo estratégico para inovação e competitividade no setor.

Dentre os materiais mais empregados, o aço destaca-se por sua ampla aplicabilidade e versatilidade. Seu uso estende-se desde elementos de reforço em estruturas de concreto armado, como vergalhões, até perfis metálicos estruturais, chapas planas e componentes de fundações profundas, como as estacas metálicas. No entanto, independentemente da aplicação, uma preocupação recorrente refere-se à suscetibilidade do aço à corrosão, especialmente em ambientes agressivos.

Para mitigar os efeitos deletérios da corrosão, práticas como aplicação de revestimentos protetivos, tratamentos de superfície e o superdimensionamento das estruturas são usualmente adotadas. Neste último caso, incrementa-se a espessura dos elementos estruturais, conhecido como espessura de sacrifício, como medida compensatória às perdas de material ao longo do tempo. No entanto, tais estratégias implicam em aumento do consumo de aço e, conseqüentemente, elevação dos custos operacionais e ambientais da obra.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral propor uma alternativa técnica e economicamente viável para a redução de custos associados às estruturas metálicas utilizadas em fundações profundas. Para tanto, investiga-se a possibilidade de empregar aços patináveis na fabricação de estacas metálicas com espessuras de sacrifício reduzidas, em relação aos parâmetros atualmente adotados para aços carbono convencionais.

A hipótese central deste trabalho é que os aços patináveis, mesmo quando expostos a ambientes de umidade constante (condição geralmente desfavorável ao desenvolvimento de sua camada protetiva), apresentam desempenho superior à corrosão quando comparados aos aços carbono comuns, conforme preconizado na literatura técnica (ASTM, 2024).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho contempla os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar comparativamente a resistência à corrosão atmosférica de aços patináveis, conforme a norma ASTM A588 (ASTM, 2024), e aços carbono convencionais, sob condição de exposição permanente à umidade;
- Demonstrar a viabilidade técnica do uso de aços patináveis em ambientes tradicionalmente considerados não apropriados para esse tipo de material, expandindo assim suas possibilidades de aplicação no setor da construção civil;
- Evidenciar o potencial de redução de custos decorrente da diminuição da espessura de sacrifício das estacas metálicas, contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental dos empreendimentos.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A motivação para a realização deste estudo está ancorada na necessidade de comprovar, de forma empírica, a superioridade do desempenho anticorrosivo dos aços patináveis em relação aos aços carbono convencionais, em condições específicas de umidade constante. Tal comprovação pode viabilizar a utilização desses materiais em fundações profundas, como estacas metálicas, promovendo a otimização da espessura de sacrifício adotada para esses elementos estruturais.

A norma brasileira ABNT NBR 6122:2022 – Projeto e Execução de Fundações estabelecem critérios técnicos para o dimensionamento e execução de estacas metálicas, incluindo diretrizes para o cálculo de espessuras adicionais que devem ser incorporadas como forma de compensar as perdas por corrosão ao longo da vida útil do elemento (ABNT, 2022b).

Essas espessuras adicionais impactam significativamente no peso linear das estacas e, por consequência, no custo total da fundação. Ao propor a substituição do aço carbono convencional por aços patináveis de maior resistência à corrosão, busca-se racionalizar o uso do material metálico, sem comprometer os requisitos estruturais e normativos, reduzindo os impactos econômicos e ambientais associados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

O aço é uma liga metálica cuja base é o ferro (Fe), um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, presente principalmente sob a forma de óxidos, como hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). O ferro representa cerca de 4,5% da massa da crosta, sendo o quarto elemento em abundância, atrás apenas do oxigênio, silício e alumínio. Na natureza, raramente é encontrado em estado metálico puro, estando normalmente associado a minerais ferruginosos que necessitam de processos específicos de extração e purificação (Petryshyn *et al.*, 2022).

A conversão do minério de ferro em aço envolve uma cadeia complexa de processos metalúrgicos, que incluem as etapas de beneficiamento mineral, redução, refino, desgaseificação e solidificação controlada. O principal objetivo desses processos é remover impurezas e ajustar a composição química da liga metálica, de modo a obter um material com propriedades mecânicas otimizadas e adequado às mais diversas aplicações estruturais e funcionais (Wang *et al.*, 2021).

Do ponto de vista microestrutural e funcional, o aço pode ser definido como uma liga metálica composta majoritariamente por ferro e carbono, sendo este último o principal elemento de liga, responsável por modificar significativamente propriedades como dureza, resistência, ductilidade e soldabilidade. A definição clássica de liga metálica, amplamente aceita, compreende a combinação de dois ou mais elementos, sendo ao menos um deles metálico, com manutenção das propriedades metálicas nas fases resultantes (Zhang *et al.*, 2023).

A classificação dos aços pode ser feita com base em diversos critérios. Quanto à forma física de comercialização, os aços são comumente divididos em aços planos, como chapas, bobinas e tiras, e aços longos, como vergalhões, barras e perfis laminados. Já segundo a aplicação final, os aços podem ser classificados como estruturais, para ferramentas, para molas, inoxidáveis, entre outros, conforme padronizações estabelecidas por normas técnicas internacionais (Chen *et al.*, 2021).

Com relação à composição química, os aços carbono são tradicionalmente subdivididos conforme o teor de carbono presente:

- Aços de baixo carbono ( $C < 0,30\%$  em massa): apresentam elevada ductilidade, boa soldabilidade e são amplamente utilizados em aplicações estruturais leves e componentes soldados;
- Aços de médio carbono ( $0,30\% < C < 0,70\%$ ): combinam moderada resistência mecânica com razoável ductilidade, sendo comuns em eixos, engrenagens e trilhos;
- Aços de alto carbono ( $C > 0,70\%$ ): oferecem elevada dureza e resistência ao desgaste, porém com menor tenacidade, sendo indicados para ferramentas de corte, molas e aplicações sujeitas à abrasão (Singh *et al.*, 2020).

Além dos aços carbono, existem os chamados aços-liga, nos quais são adicionados elementos como cromo, níquel, molibdênio, vanádio, entre outros, com a finalidade de melhorar características específicas como resistência à corrosão, resistência térmica e estabilidade estrutural. Esses aços podem ser classificados como:

- Aços de baixa liga, com teor total de elementos de liga inferior a 8% em massa;
- Aços de alta liga, quando essa proporção ultrapassa os 8%, sendo o exemplo mais clássico os aços inoxidáveis, ricos em cromo (Wang *et al.*, 2021).

A correta classificação e seleção dos tipos de aço é um fator determinante para o sucesso de projetos na engenharia, sobretudo na construção civil, onde é necessário equilibrar aspectos de desempenho estrutural, resistência à corrosão, processabilidade e viabilidade econômica (Chen *et al.*, 2021; Petryshyn *et al.*, 2022).

### 2.1.1 Processo de mineração

O minério de ferro constitui a principal matéria-prima utilizada na produção siderúrgica global, sendo obtido diretamente da natureza na forma de rochas ferruginosas que contêm, majoritariamente, os óxidos hematita ( $Fe_2O_3$ ) e magnetita ( $Fe_3O_4$ ). Esses minerais geralmente ocorrem em associação com impurezas gangue, como sílica e alumina, exigindo o emprego de operações específicas para seu

beneficiamento (Lala *et al.*, 2020). A extração desse recurso ocorre por meio da atividade mineradora, que compreende as fases de lavra, seguida pelo beneficiamento mineral, cujo objetivo é concentrar os óxidos metálicos e remover as fases indesejáveis.

Durante o beneficiamento, são aplicadas operações unitárias como britagem, moagem, classificação granulométrica, separação magnética e flotação, com vistas a melhorar a pureza do concentrado e garantir o desempenho metalúrgico do minério nos altos-fornos ou fornos de redução direta (Tang *et al.*, 2022). A eficiência dessa etapa é crítica para a produtividade das usinas siderúrgicas, influenciando diretamente no consumo energético e na qualidade do ferro-gusa produzido.

No contexto internacional, o Brasil destaca-se como um dos maiores detentores de reservas de minério de ferro do planeta, contribuindo de forma significativa para o abastecimento global. Segundo dados recentes, o país ocupa posição de liderança em termos de volume explorável, apresentando expressiva disponibilidade geológica e qualidade do minério, especialmente nas formações ferríferas dos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul (Gonçalves *et al.*, 2023). Essas regiões concentram os principais polos extrativos e logísticos voltados à exportação do minério, com destaque para os sistemas integrados operados por empresas multinacionais.

Após a etapa de beneficiamento, o minério de ferro é transportado para os complexos siderúrgicos, onde será submetido a processos de conversão termoquímica e transformação mecânica. As principais configurações industriais para essa finalidade são as usinas integradas e as usinas semi-integradas, cujas diferenças estruturais influenciam diretamente no desempenho técnico, econômico e ambiental da produção siderúrgica.

As usinas integradas realizam internamente todas as etapas do processo siderúrgico, iniciando com a redução do minério de ferro no alto-forno, seguida pelo refino do ferro-gusa na aciaria e, posteriormente, pela laminação do aço em produtos acabados. Este tipo de planta industrial caracteriza-se por elevada capacidade de produção, uso intensivo de matérias-primas virgens (minério e carvão coqueificável) e alto consumo energético. Apesar de sua eficiência em larga escala, esse modelo é

associado a elevados níveis de emissão de dióxido de carbono e requer robusta infraestrutura logística (Hasanbeigi; Arens; Price, 2020).

As usinas semi-integradas, por outro lado, representam uma alternativa mais flexível e ambientalmente mais eficiente. Essas unidades utilizam predominantemente sucata metálica como matéria-prima, fundida por meio de fornos elétricos a arco (EAF). Essa rota elimina a necessidade da etapa de redução do minério, o que resulta em significativa economia de energia e menores emissões de gases do efeito estufa. Além disso, permite maior adaptabilidade à disponibilidade local de materiais recicláveis e à flutuação dos preços de mercado do minério de ferro (Birat, 2021; Khanna; Chaturvedi; Mahapatra, 2022).

Essas duas rotas tecnológicas são complementares no contexto industrial global, e a escolha entre uma ou outra depende de variáveis como demanda de produção, acesso a matérias-primas, políticas ambientais e disponibilidade energética.

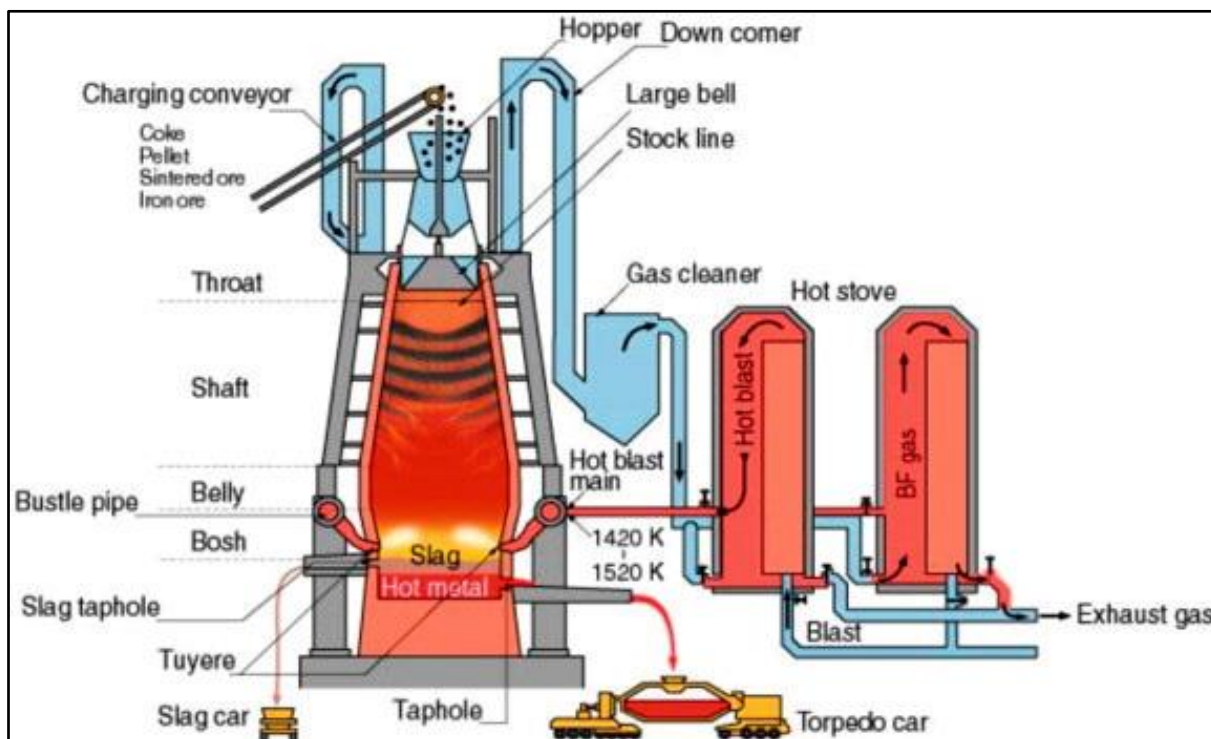
### **2.1.2 Processo de redução**

A etapa de redução do minério de ferro visa separar o ferro do oxigênio presente nos óxidos, além de remover impurezas como a sílica. Essa reação ocorre no alto-forno, onde são adicionados minério de ferro, coque ou carvão vegetal, calcário e oxigênio insuflado. O coque atua como combustível e agente redutor, promovendo reações com os óxidos de ferro que geram ferro metálico e  $\text{CO}_2$  (Tian *et al.*, 2022). O calcário reage com a ganga mineral, formando escória líquida separável. O ferro líquido é coletado na base do forno para posterior refino. Apesar da eficiência, o processo é intensivo em emissões, o que tem motivado estudos sobre rotas alternativas com hidrogênio verde como redutor (Li *et al.*, 2023; Xie *et al.*, 2021).

O alto-forno é um reator térmico vertical que opera em contracorrente, essencial na produção de ferro-gusa líquido. A carga composta por óxidos de ferro, coque e fundente é alimentada pelo topo, enquanto gases redutores ( $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ ) sobem pela base, promovendo aquecimento e reações de redução (Zhou *et al.*, 2020). À medida que os sólidos descem, os óxidos são convertidos em ferro metálico, que se acumula

no fundo do forno (Tian *et al.*, 2022). A eficiência do processo depende da distribuição da carga e da dinâmica térmica do reator (Matsuda *et al.*, 2021). A Figura 1 mostra a seção transversal de um alto-forno típico, juntamente com as entradas e saídas.

**Figura 1.** Seção transversal de um Alto Forno



Fonte: Yang *et al.* (2014)

O principal produto do alto-forno é o ferro-gusa líquido, conhecido internacionalmente como *pig iron*, uma designação associada à aparência do metal solidificado em moldes ramificados, lembrando uma ninhada de porcos. Quimicamente, o ferro-gusa é constituído predominantemente por ferro (Fe), com teores significativos de carbono (C), além de elementos residuais como silício (Si), enxofre (S) e fósforo (P). Trata-se de um material intermediário e impuro, que requer posterior refino para a produção de aço de alta qualidade (Zhang *et al.*, 2022).

A transformação do ferro-gusa em aço ocorre em duas principais rotas industriais. Na primeira, o gusa é transferido em estado líquido para aciarias dotadas de conversores a oxigênio, onde o excesso de carbono e impurezas é oxidado. Na segunda rota, o gusa solidificado é reaproveitado em forno elétrico a arco (EAF), usualmente misturado com sucata metálica, sendo fundido e refinado para obtenção do aço (Lee *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2023).

### 2.1.3 Processo de refino

O processo de refino do aço possui duas rotas distintas que são a aciaria a oxigênio e a aciaria elétrica. Os produtos produzidos por elas possuem algumas diferenças, notadamente a existência de residuais ou não.

#### 2.1.3.1 Aciaria a oxigênio

A próxima etapa do processo produtivo do aço é na área de produção denominada aciaria, onde se faz o refino do aço (etapa de refino). A matéria prima principal é o gusa, que é transportado no estado líquido via carros torpedo do alto forno para a aciaria.

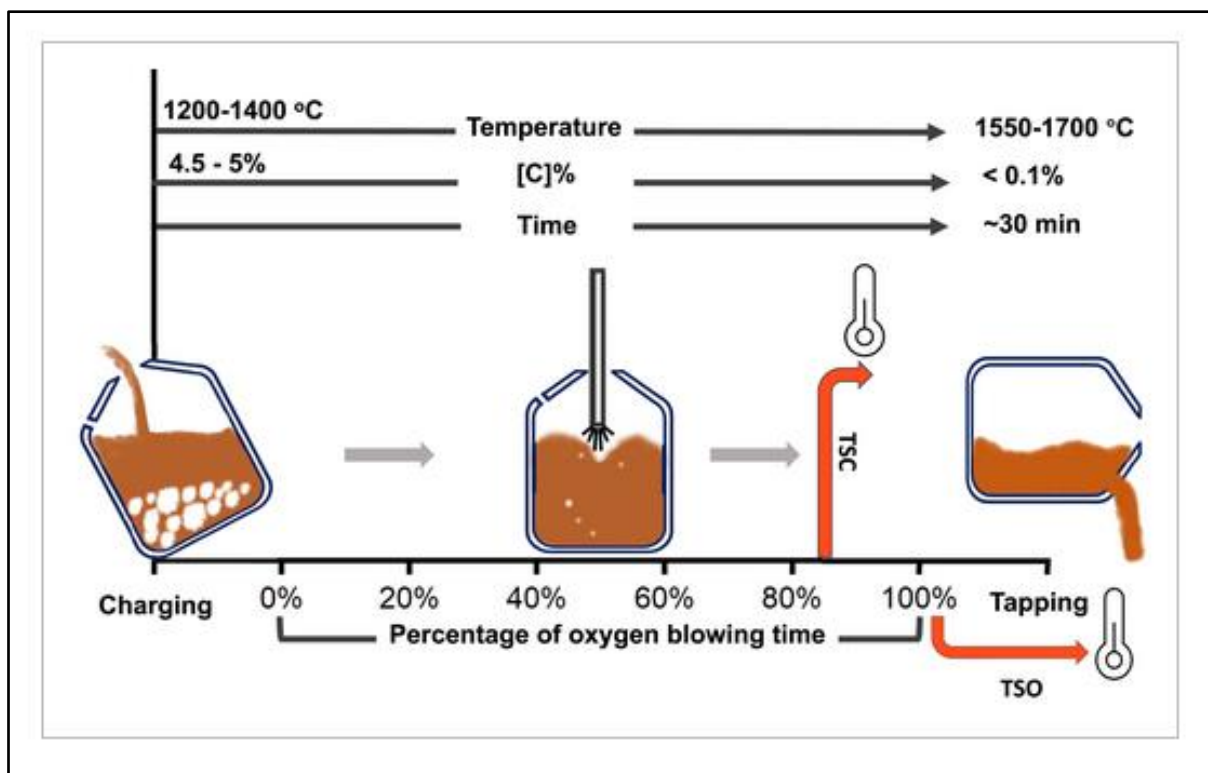
Nessa etapa realiza-se o “ajuste fino” da composição química do produto através da adição de ligas contendo elementos para purificação do material e também aqueles que irão se incorporar ao aço a fim de conferir propriedades mecânicas e químicas desejadas.

O equipamento utilizado é o BOF – *Basic Oxygen Furnace*, sendo o processo mais utilizado na siderurgia mundial atualmente, com aproximadamente 70% da produção mundial de aço. O BOF é cilíndrico, tendo a sua base arredonda. As capacidades desse equipamento variam de 60 a 400 toneladas. São providos de uma lança que sopra o oxigênio a velocidades supersônicas. A combinação então do oxigênio com o carbono gera uma reação exotérmica que mantém/eleva a temperatura da massa líquida. Silício, manganês e fósforo também são oxidados nessa etapa (Ghalati *et al.*, 2023).

O processo de produção de aço no forno básico a oxigênio leva menos de 30 minutos, iniciando com o metal já a uma temperatura de 1200 a 1400 graus (gusa líquido) elevando então para 1550 a 1700 graus. Essa temperatura é fundamental para converter o ferro gusa com carbono entre 4,5 e 5% em aço carbono (Ghalati *et al.*, 2023).

A Figura 2 ilustra o processo de produção do aço no BOF.

**Figura 2.** Processo de produção de aço no BOF



Fonte: Ghalati (2023)

Ao final do processo, o aço está pronto para ser “vazado”, ou seja, será lingotado em um processo de lingotamento contínuo gerando placas, blocos e ou tarugos para serem encaminhados para a etapa de transformação mecânica. Os aços produzidos via BOF (processo integrado) não possuem residuais tais como Cobre, Níquel, Cromo, Estanho e outros.

### 2.1.3.2 Aciaria Elétrica

O processo de produção do aço via aciaria elétrica pode ser visto como um processo de reciclagem. Ele utiliza energia elétrica como fonte de energia em seu principal equipamento (Forno a arco elétrico) e sua principal matéria prima é a sucata, ou seja, material que a sociedade descartou e que pode ser infinitamente reciclado.

Segundo Abadi (2024), aproximadamente 29% da produção mundial de aço é produzida com fornos a arco elétrico (EAF – *Electric Arc Furnace*). Os fornos elétricos podem utilizar como matéria prima sucata ou ferro esponja (ferro de redução direta ou

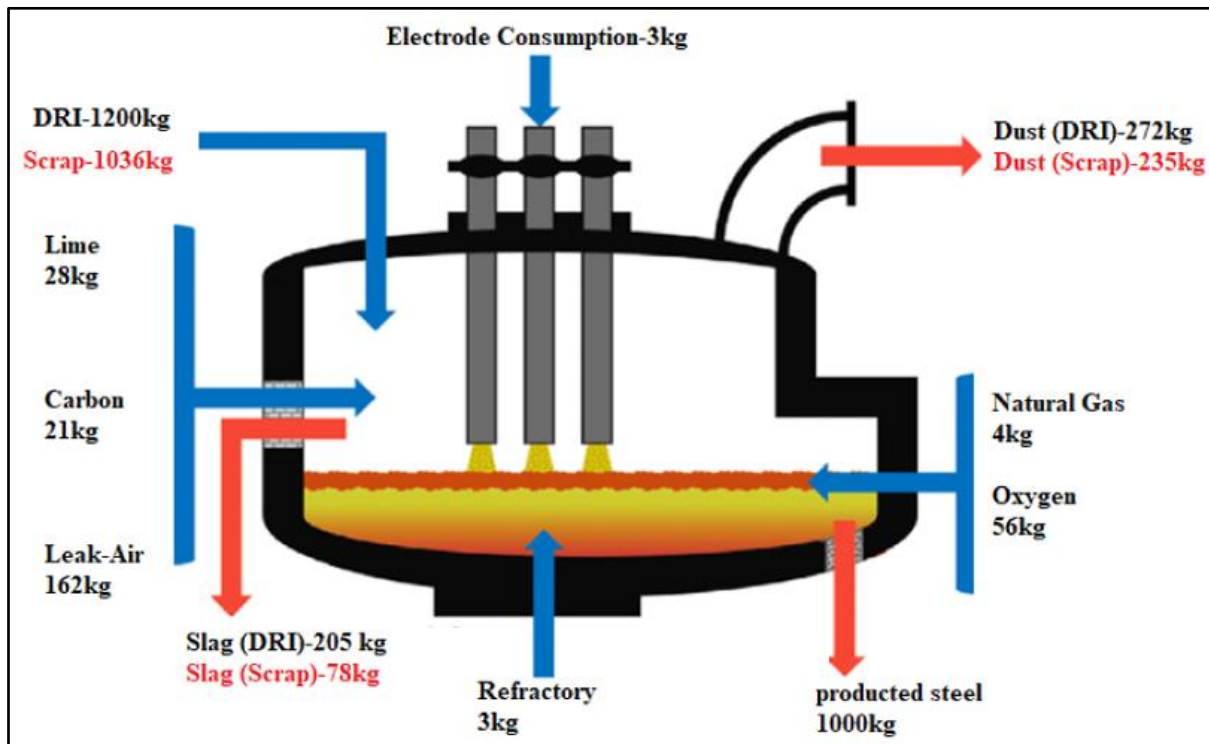
DRI – *Direct Reduced Iron*).

Os fornos a arco elétrico diretos são os mais indicados para a fusão de sucatas ferrosas ou ferro esponja por atingirem temperaturas maiores. São dotados de dois ou três eletrodos e o arco voltaico formado entra em contato com a carga, gerando temperaturas de até 3000 graus celsius (Abadi, 2024).

Os aços produzidos com sucata como matéria-prima fundida em fornos elétricos apresentam elementos residuais tais como cobre, cromo, níquel e estanho, que estavam presentes na carga fria.

A Figura 3 apresenta um desenho esquemático de um forno elétrico a arco trifásico com um balanço de massa utilizando a base de 1000 quilos de aço produzido. É possível verificar a produção de escória prevista bem como a quantidade de pó gerado. Verifica-se ainda a quantidade de sucata necessária (ou DRI) assim como a cal, além do consumo estimado de eletrodo e refratários (Abadi, 2024).

**Figura 3.** Desenho esquemático do forno elétrico com balanço de massa



Fonte: Abadi (2024)

Após o término do processo de fusão e tratamento químico do aço, o mesmo é vazado no lingotamento contínuo na forma de placas, blocos ou tarugos e inicia-se os

processos de transformações mecânicas (laminações).

## 2.2 AÇOS PATINÁVEIS

Os aços patináveis são uma tecnologia conhecida e já dominada em todo o mundo. Diversas normas de diversos países especificam as características que o aço deve apresentar (composição química e propriedades mecânicas) para poder ser classificado como aço patinável. Nos Estados Unidos, por exemplo, temos as normas ASTM A-242 (ASTM, 2024) e a ASTM A588 (ASTM, 2024). No Brasil, tem-se a norma ABNT NBR 7007 (ABNT, 2022).

Segundo Pannoni (2015), o estímulo dado a esses tipos de aços foi dado pela United States Steel Corporation (USS). Na década de 1930, essa empresa desenvolveu o aço comercialmente conhecido como Cor-Ten.

A denominação Cor-Ten foi concedida ao novo aço para remeter aos aspectos que diferenciavam o mesmo do aço carbono comum, ou seja, Cor para a resistência a corrosão e Ten para a questão das propriedades mecânicas, que eram até 30% superiores aos aços tradicionais (Morcillo, 2019)

De fato, observando a norma ABNT NBR 7007 - Aços-carbono e aços microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural – Requisitos, observa-se que o grau MR 250 possui um limite de escoamento de 250 MPa enquanto que o AR 350 COR apresenta 345 MPa para essa característica, ou seja, uma diferença de 38% (ABNT, 2022b).

Os aços patináveis possuem este nome em função do mecanismo de proteção que ocorre. Quando submetido a certas condições, onde um ciclo alternado de secagem e molhagem é fundamental, forma-se uma camada protetora de óxido denso, não craqueado, que protege o metal base (Pannoni, 2015). Este óxido é conhecido por pátina, daí o nome patinável.

Outras condições devem ser observadas, tais como concentrações máximas de SO<sub>2</sub> em ambientes industriais e taxa de deposição de cloretos máxima em ambientes marinhos.

Aços intemperizados (AIT), frequentemente chamados de aços de baixa liga, são aços com baixo teor de carbono e adições baixas a médias de um ou mais outros elementos de liga (Cu, Cr, Ni, P, etc.), com um teor total de liga de pelo menos 1,00% em peso e não mais que 5,00% em peso, uma proporção maior do que a normalmente encontrada em baixo carbono. Os AIT são cada vez mais utilizados em aplicações como pontes e outras estruturas de suporte de carga, torres de transmissão, fachadas e telhados de edifícios, elementos artísticos e decorativos, etc.

Os elementos químicos que mais colaboram para o bom desempenho do aço patinável são o cobre e o fósforo, sendo este último deletério para outras características do material, sendo então utilizado de forma contida. Outros elementos, tais como o cromo e o níquel também contribuem para o desempenho, porém em menor intensidade (Pannoni, 2015).

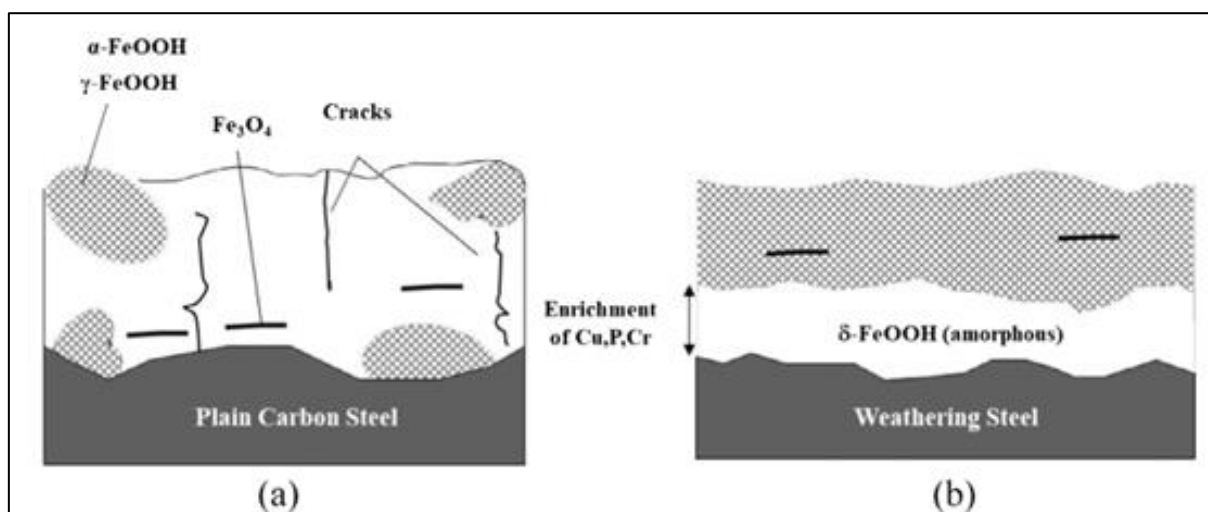
Os aços patináveis podem e são utilizados em diversas aplicações, estruturas metálicas (prédios, pontes, viadutos, torres de transmissão, etc...), fachadas, elementos artísticos e containers são exemplos típicos na utilização desse aço (Morcillo, 2019).

O mecanismo de proteção dos aços patináveis que conferem uma maior resistência a corrosão quando comparados com os aços carbono comuns vem sendo objeto de estudos contínuos e já há muito conhecimento sobre o tema. Morcillo (2019), cita a seguinte observação:

(a) A estrutura de camada dupla da ferrugem: uma porção externa solta e uma porção interna aderente". (b) "As camadas de ferrugem crescem por vários mecanismos: (i) por íons de ferro que se difundem para fora através da ferrugem para formar ferrugem fresca na interface ar-ferrugem; (ii) na superfície aço-ferrugem; e (iii) dentro da camada de ferrugem para preencher poros e rachaduras (Morcillo, 2019).

A Figura 4 ilustra as camadas de óxido dos aços carbono e aços patináveis.

**Figura 4.** Representação esquemática de camadas de óxido formadas em aços carbono e aços patináveis



Fonte: Morcillo (2019)

Wierzbicki *et al* (2024) mencionou que só após o 1º ano de exposição é que a camada protetora começa a se formar, vindo a proteger o metal. Essa camada é aderente a superfície, contendo cobre, cromo, fósforo, níquel e outros. Possui baixa permeabilidade, protegendo a superfície então de processos de corrosão. A Figura 5 apresenta o aspecto da pátina.

**Figura 5.** Detalhe de uma camada de pátina em uma superfície



Fonte: Wierzbicki (2024)

## 2.3 CORROSÃO EM ESTACAS METÁLICAS ENTERRADAS

A corrosão metálica é um processo eletroquímico que envolve o fluxo de elétrons entre diferentes metais ou entre áreas distintas na superfície de um único metal. A formação de uma célula de corrosão é essencial para a iniciação do processo corrosivo, sendo esta composta por um ânodo, onde ocorre a oxidação, e um cátodo, onde ocorre a redução. Quando as condições para a formação de uma célula de corrosão são satisfeitas, estabelece-se uma corrente elétrica que promove a corrosão no ânodo. A diferença de potencial eletroquímico entre o ânodo e o cátodo impulsiona a migração de elétrons e íons. A corrente flui do cátodo para o ânodo, enquanto os elétrons e/ou íons migram do ânodo para o cátodo. No ânodo, a perda de elétrons resulta na formação de íons metálicos que se combinam com íons negativos presentes no eletrólito.

O estudo sobre a corrosividade do solo é importante devido ao uso global de infraestruturas metálicas subterrâneas, como gasodutos, minerodutos e fundações de estacas metálicas (Bispo; Tsuha, 2018).

Segundo Rodriguez (2018), mundialmente existem milhares de estruturas metálicas total ou parcialmente enterradas no solo sendo a corrosão a principal preocupação em seu projeto.

Estruturas de aço subterrâneas, como estacas metálicas, estão sujeitas a corrosão devido à exposição a solos com propriedades corrosivas. Este fenômeno é uma preocupação significativa devido aos elevados custos de manutenção e ao potencial de falhas estruturais catastróficas.

A corrosão afeta a integridade das estacas de aço, reduzindo a área da seção transversal e comprometendo a capacidade de carga axial e lateral da estrutura. Essa degradação material pode levar a uma diminuição na segurança e na vida útil das estruturas suportadas.

O monitoramento da corrosão em estacas metálicas é em parte complexo, uma vez que os elementos são instalados no subsolo. Entretanto, a perda de espessura ao longo da vida útil de projeto tem sido razoavelmente estimada, sendo considerada uma espessura de parede adicional no aço para sacrifício em medida compensatória

à perda por corrosão (Decker *et al.*, 2008).

Na análise de durabilidade de estruturas metálicas deve ser incluído o risco de corrosão, exigindo um entendimento dos fatores que influenciam esse processo, incluindo características do eletrólito (solo) e fatores externos como contaminantes, correntes parasitas e métodos de instalação (Decker *et al.*, 2008).

Como exemplo de compensação de perda de espessura por corrosão do perfil ao longo do tempo, a ABNT NBR 6122 – Projeto e execução de fundações estabelecem espessuras mínimas de compensação em função do tipo de solo da obra. A Tabela 1, extraída da NBR 6122 (ABNT, 2022), apresenta as especificações citadas anteriormente.

**Tabela 1.** Tabela de compensação de espessura da ABNT NBR 6122

<b>Classe</b>	<b>Espessura mínima de sacrifício (mm)</b>
Solos em estado natural e aterros controlados	1,0
Argila orgânica; solos porosos não saturados	1,5
Turfa	3,0
Aterros não controlados	2,0
Solos contaminados <sup>a</sup>	3,2

<sup>a</sup> Casos de solos agressivos devem ser estudados especificamente.

Fonte: ABNT (2022)

A maioria dos processos destrutivos que afetam os metais enterrados são de natureza eletroquímica, principalmente associados às características dos solos em que estão localizados (Rodríguez, 2018).

Os fatores que influenciam a corrosão nessa situação (enterrados), são:

- Textura do solo
- Presença de água
- Aeração
- Potencial Redox

- pH
- Resistividade
- Conteúdo de íons
- Bactérias

Segundo Rodriguez (2018), a corrosão é consequência então da interação de diferentes fatores, conforme citado anteriormente, característicos de cada tipo de solo.

Torna-se necessário, para fins de projeto das estruturas, utilizar um dos métodos possíveis para prever o desgaste das mesmas nos solos em que serão construídas/instaladas. Os métodos geram dados que podem ser divididos em duas grandes categorias: eletroquímica e não eletroquímica. Os métodos mais utilizados são os que geram dados não eletroquímicos, notadamente a perda de massa (Rodriguez, 2018).

#### 2.4 ESTACAS METÁLICAS GERDAU

As estacas metálicas Gerdau são produzidas na unidade da Gerdau Ouro Branco desde 2002 quando houve o start-up do laminador de perfis estruturais nessa unidade. Até então, os perfis disponíveis para essa aplicação eram soldados, e não laminados como os da Gerdau. O advento da produção desse tipo de perfil no país trouxe benefícios para o mercado da construção civil, entre os quais maior disponibilidade de bitolas e também do próprio produto e ainda redução de custos quando comparado com os perfis soldados.

A questão do custo de produção dessa solução para fundações na construção civil é de extrema importância pois, além de competir com perfis semelhantes de origem importada, compete também com outras soluções como estacas de concreto pré-moldadas e estacas tubulares, por exemplo.

As estacas Gerdau são produzidas em aço ASTM A-572 grau 50 (ABNT NBR 7007 AR-350 equivalente). Trata-se então de um aço de alta resistência gerando elevada capacidade de carga.

Suas seções geométricas de mesas (abas) paralelas facilitam as ligações entre as estacas que serão soldadas e cravadas no campo. Possui ainda uma diversidade de famílias e bitolas que facilita a escolha adequada para o projeto da obra. A rota de produção do aço utilizado nas estacas metálicas é oriunda de gusa, gerando um aço sem residuais. Nas Tabela 2 e 3 estão apresentadas a relação de dimensões de estacas de perfil H e perfil I (Gerdau, 2024):

**Tabela 2.** Características padronizadas das estacas Gerdau – Perfil H

		Tipo de perfil e largura, em milímetros							
		W 150	W 200	HP 200	W 250	HP 250	W 310	HP 310	W 360
Peso em kg/m		22,5	35,9	53	73,0	62,0	97,0	79,0	91,0
		29,8	41,7		80,0	85,0	107,0	93,0	101,0
		37,1	46,1		89,0		117,0	110,0	110,0
			52,0		101,0		129,0	125,0	122,0
			59,0		115,0		143,0	132,0	
			71,0		131,0		158,0		
			86,0		149,0		179,0		
			100,0		167,0		202,0		

Fonte: Gerdau (2024)

**Tabela 3.** Características padronizadas das Estacas Gerdau – Perfil I

		Tipo de perfil e largura, em milímetros								
		W 150	W 200	W 250	W 310	W 360	W 410	W 460	W 530	W 610
Peso em kg/m		13,0	15,0	17,9	21,0	32,9	38,8	52,0	66,0	82,0
		18,0	19,3	22,3	23,8	39,0	46,1	60,0	72,0	92,0
		24,0	22,5	25,3	28,3	44,6	53,0	68,0	74,0	101,0
			26,6	28,4	32,7	51,0	60,0	74,0	82,0	113,0
			31,3	32,7	38,7	58,0	67,0	82,0	85,0	125,0
				38,5	44,5	64,0	75,0	89,0	92,0	140,0
				44,8	52,0	72,0	85,0	97,0	101,0	153,0
					60,0	79,0		106,0	109,0	155,0
					67,0				123,0	174,0
					74,0				138,0	195,0
									217,0	

Fonte: Gerdau (2024)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para fundamentar a seleção dos materiais empregados na presente investigação experimental, tornou-se imprescindível a consulta a normas técnicas reconhecidas nacional e internacionalmente, que regulam a produção e a aplicação de perfis metálicos estruturais. A subseção 3.1 apresenta uma revisão sistematizada das principais normas utilizadas no Brasil, destacando suas especificações químicas e mecânicas, bem como sua relevância para o estudo da resistência à corrosão atmosférica.

#### 3.1 NORMAS TÉCNICAS DE PERFIS METÁLICOS UTILIZADAS NO BRASIL

As normas técnicas representam instrumentos normativos essenciais para a padronização, rastreabilidade e garantia da segurança na aplicação de materiais em sistemas estruturais. No contexto da siderurgia nacional, destaca-se a utilização das diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), evidenciando a consolidação do modelo normativo norte-americano como referência amplamente aceita no mercado brasileiro.

A formulação dessas normativas decorre de processos colaborativos que envolvem representantes da indústria siderúrgica, instituições de ensino e pesquisa, bem como laboratórios especializados em ensaios mecânicos e metalúrgicos. Tal articulação viabiliza a incorporação de diretrizes internacionais ao arcabouço normativo nacional, promovendo alinhamento técnico entre práticas globais e demandas locais. Um exemplo representativo dessa integração normativa é a ABNT NBR 7007:2022, a qual unifica requisitos técnicos anteriormente distribuídos entre as normas ASTM A36/A36M-19, ASTM A572/A572M-18 e ASTM A588/A588M-24, consolidando parâmetros de desempenho mecânico e requisitos químicos aplicáveis a aços estruturais.

No âmbito deste trabalho, cujo propósito consiste em analisar a correlação entre a composição química dos aços e sua suscetibilidade à corrosão atmosférica, a seleção dos materiais foi fundamentada em um conjunto de normas técnicas

previamente estabelecidas. Essas normativas forneceram os critérios necessários para a escolha criteriosa dos tipos de aços e dos produtos siderúrgicos submetidos à investigação, assegurando a relevância técnica e a validade científica dos resultados obtidos.

No contexto da caracterização normativa dos materiais empregados em estruturas metálicas submetidas à exposição atmosférica, destaca-se um conjunto de especificações técnicas que fundamentam a seleção de aços estruturais de alta resistência e baixa liga. Entre essas normativas, ressalta-se a ASTM A588/A-588M-24, que estabelece os requisitos para perfis, placas e barras de aço estrutural com resistência mínima ao escoamento de 345 MPa (50 ksi), caracterizado por elevada resistência à corrosão atmosférica. Tal especificação é especialmente direcionada ao emprego em construções soldadas, rebitadas ou aparafusadas, com ênfase em aplicações onde a redução de peso e a durabilidade são aspectos prioritários, como em pontes e edificações de longa vida útil. A norma admite o uso do aço em sua condição exposta, sem necessidade de pintura, desde que adequadamente instalado e mantido (ASTM, 2024a).

Complementarmente, a norma ASTM A242 apresenta requisitos semelhantes, sendo aplicável a perfis estruturais com até 100 mm (4 polegadas) de espessura. Também especifica a utilização de aços de baixa liga e alta resistência em componentes estruturais, com desempenho superior à corrosão em comparação aos aços-carbono convencionais, com ou sem adição de cobre. De forma análoga à ASTM A588, permite seu uso sem pintura em ambientes atmosféricos moderadamente agressivos, ampliando sua aplicabilidade em estruturas de arquitetura exposta (ASTM, 2024b).

A especificação ASTM A36/A36M-19, por sua vez, continua sendo amplamente utilizada como referência para aços-carbono estruturais com propriedades mecânicas compatíveis com construções rebitadas, soldadas ou aparafusadas, especialmente em projetos convencionais que não demandam características superiores de resistência mecânica ou de durabilidade ambiental (ASTM, 2019).

No escopo de aços estruturais de alta resistência microligados, destaca-se a ASTM A572/A572M-18, que normatiza cinco graus de aços contendo elementos como

nióbio e vanádio, com limites de escoamento variando de 290 MPa (Grau 42) a 450 MPa (Grau 65). Essa norma contempla diferentes formatos como perfis, placas, estacas-pranchas e barras, com aplicações voltadas tanto para construção civil quanto para pontes estruturais, apresentando versatilidade de uso em sistemas com distintas solicitações mecânicas (ASTM, 2018).

Em alinhamento com as diretrizes internacionais, a ABNT NBR 7007:2022 incorpora e adapta ao contexto brasileiro os parâmetros estabelecidos pelas normas ASTM supracitadas. Essa norma nacional estabelece os critérios técnicos para barras e perfis laminados a quente de aços-carbono e microligados destinados a aplicações estruturais em construções rebitadas, soldadas ou parafusadas. Os aços classificados segundo essa norma compreendem os grupos BR190, MR250, AR350, AR415 e AR350 COR, conforme seus limites de resistência mecânica e comportamento frente à corrosão. O aço AR350 COR, em particular, apresenta desempenho superior à corrosão atmosférica, sendo indicado para estruturas não pintadas em ambientes agressivos, conferindo significativa vantagem em projetos que demandam maior vida útil e menor custo de manutenção, especialmente em pontes e edificações expostas (ABNT, 2022).

No contexto do mercado siderúrgico nacional, observa-se a predominância da adoção das especificações normativas ASTM A588 (ASTM, 2024), ASTM A242 (ASTM, 2024) e ABNT NBR 7007, na classificação AR350 COR, para aplicações em que a resistência à corrosão atmosférica constitui um requisito técnico essencial à durabilidade do material empregado. Essas normas fornecem os critérios técnicos e composicionais necessários à seleção de aços de baixa liga e alta resistência destinados a estruturas expostas a ambientes agressivos, como pontes, fachadas e componentes de infraestrutura urbana.

A norma ASTM A588 (ASTM, 2024), em particular, apresenta subdivisões em três categorias distintas de aços de alta resistência à corrosão atmosférica: Grade A, Grade B e Grade K. Cada uma dessas classes é caracterizada por faixas específicas de composição química, estabelecendo limites mínimos e máximos para elementos como carbono (C), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S), cobre (Cu), níquel (Ni), cromo (Cr) e outros elementos de liga. A definição desses intervalos tem como finalidade garantir propriedades mecânicas e desempenho à corrosão adequados às

diferentes condições de exposição. A Tabela 4 apresenta de forma consolidada os teores exigidos para cada elemento químico conforme estipulado pela norma.

**Tabela 4.** Requisitos especificados dos aços conforme ASTM A588 (valores mínimos e máximos)

Requisitos químicos e mecânicos	Grade A	Grade B	Grade K
% Carbono	0,19 máx.	0,20 máx.	0,17 máx.
% Manganês	0,80 – 1,25	0,75 – 1,35	0,50 – 1,20
% Fósforo	0,030 máx.	0,030 máx.	0,030 máx.
% Enxofre	0,030 máx.	0,030 máx.	0,030 máx.
% Silício	0,30 – 0,65	0,15 – 0,50	0,25 – 0,50
% Nickel	0,40 máx.	0,50 máx.	0,40 máx.
% Cromo	0,40 – 0,65	0,40 – 0,70	0,40 – 0,70
% Molibdênio	-	-	0,10 máx.
% Cobre	0,25 – 0,40	0,20 – 0,40	0,30 – 0,50
% Vanádio	0,02 – 0,10	0,01 – 0,10	-
% Nióbio	-	-	0,005 – 0,5
Limite de Escoamento (MPa)	345 mín.		
Limite de Resistência (MPa)	485 mín.		
Alongamento %	18,0 mín.		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A escolha dos aços a ser fornecido é função da aplicação final do produto e é definida pelo cliente ao fazer o pedido junto ao fornecedor.

As demais normas técnicas ASTM citadas são mais simples em termos de especificação química conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5.** Requisitos especificados dos aços conforme normas ASTM A242, A36 e A572 G50 (valores mínimos e máximos)

Requisitos químicos e mecânicos	ASTM A242	ASTM A36	ASTM A572 G50(**)	ASTM A572 G60(**)
% Carbono	0,15 máx.	0,26 máx.	0,23 máx.	0,26 máx.
% Manganês	1,00 máx.	-	1,35 máx.	1,35 máx.
% Fósforo	0,15 máx.	0,04 máx.	0,03 máx.	0,03 máx.

% Enxofre	0,05 máx.	0,05 máx.	0,03 máx.	0,03 máx.
% Silício	-	0,40 máx.	0,40 máx.	0,40 máx.
% Cobre	0,20 mín.	0,20 mín. (*)	0,20 mín. (*)	0,20 mín. (*)
Limite de Escoamento MPa	345 mín.	250 mín.	345 mín.	415 mín.
Limite de Resistência MPa	480 mín.	400 a 550	450 mín.	520 mín.
Alongamento %	18,0 mín.	20,0 mín.	18,0 mín.	16,0 mín.

(\*) só aplicável quando Cobre for solicitado pelo cliente;

(\*\*) G50 é a categoria mais comercializada no mercado nacional, pois trata-se de um aço destinado a fabricação de Torres de transmissão de energia elétrica.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A norma técnica ABNT NBR 7007 (ABNT, 2022), conforme mencionado anteriormente, é uma compilação das normas ASTM, com algumas adequações às exigências do mercado nacional. A Tabela 6 apresenta a faixa química dos aços classificados segundo essa norma.

**Tabela 6.** Requisitos especificados dos aços conforme norma ABNT NBR 7007 (valores mínimos e máximos)

<b>Requisitos químicos e mecânicos</b>	<b>BR 190</b>	<b>MR 250</b>	<b>AR 350</b>	<b>AR 350 COR</b>	<b>AR 415</b>
% Carbono	0,30 máx.	0,23 máx.	0,23 máx.	0,20 máx.	0,26 máx.
% Manganês	-	-	0,50 a 1,35	0,50 a 1,35	0,50 a 1,35
% Silício	0,40 máx.	0,40 máx.	0,10 a 0,40	0,15 a 0,55	0,10 a 0,40
% Fósforo	0,040 máx.	0,04 máx.	0,040 máx.	0,040 máx.	0,040 máx.
% Enxofre	0,050 máx.	0,05 máx.	0,050 máx.	0,050 máx.	0,050 máx.
% Cobre	0,40 máx.	0,40 máx.	0,40 máx.	0,25 a 0,50	0,40 máx.
% Vanádio	-	-	0,15 máx.	0,15 máx.	0,15 máx.
% Nióbio	-	-	0,050 máx.	0,050 máx.	0,050 máx.
% Cromo	-	0,35 máx.	0,35 máx.	0,40 a 0,70	0,35 máx.
% Níquel	-	0,35 máx.	0,35 máx.	0,50 máx.	0,35 máx.
% Molibdênio	-	0,05 máx.	0,05 máx.	0,10 máx.	0,05 máx.
% Titânio	-	-	0,04 máx.	0,04 máx.	0,04 máx.
Limite de Escoamento MPa	190 mín.	250 mín.	345 mín.	345 mín.	415 mín.
Limite de	330 mín.	400 a 550	450 mín.	485 mín.	520 mín.

Resistência MPa					
Alongamento %	22,0 mín.	20,0 mín.	18,0 mín.	18,0 mín.	16,0 mín.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Nesta norma a designação “BR” significa baixa resistência, “MR” significa média resistência e “AR” significa alta resistência. Essa classificação tem relação com o limite de escoamento dos aços, onde os números que aparecem representam o valor mínimo em Mega Pascal (MPa).

Ao ser realizada uma comparação entre as normas ABNT NBR 7007 (ABNT, 2022) e as normas ASTM citadas anteriormente, pode-se fazer a seguinte associação, conforme Tabela 7.

**Tabela 7.** Equivalência entre normas ABNT e ASTM

<b>ABNT NBR 7007</b>	<b>Norma ASTM equivalente</b>
BR 190	Não apresenta similaridade
MR 250	ASTM A36
AR 350	ASTM A572 G50
AR 350 COR	ASTM A588
AR 415	ASTM A572 G60

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

### 3.2 MATERIAIS

Para a realização do trabalho, de cunho comparativo de performance quanto a resistência a corrosão de diferentes aços, foram selecionados quatro diferentes composições químicas. Os aços a serem testados são:

- Aço A-36 Gusa: Aço que atende a qualidade A-36, sem elementos residuais por ter sido produzido em aciaria de conversor LD.
- Aço A-588: Aço patinável, com adição intencional de cobre e cromo.
- Aço A-572 Sucata: Aço que atende a qualidade A-572 com elementos residuais por ter sido produzido em aciaria elétrica a partir de sucata.
- Aço A-36 Sucata: Aço que atende a qualidade A-36, com elementos residuais por ter sido produzido em aciaria elétrica a partir de sucata.

As amostras obtidas possuem formato em L (cantoneiras laminadas a quente), com pequenas diferenças em suas dimensões de forma a evitar mistura ao longo dos ensaios. As composições químicas de cada uma delas estão registradas na Tabela 8.

**Tabela 8.** Composição química dos aços avaliados

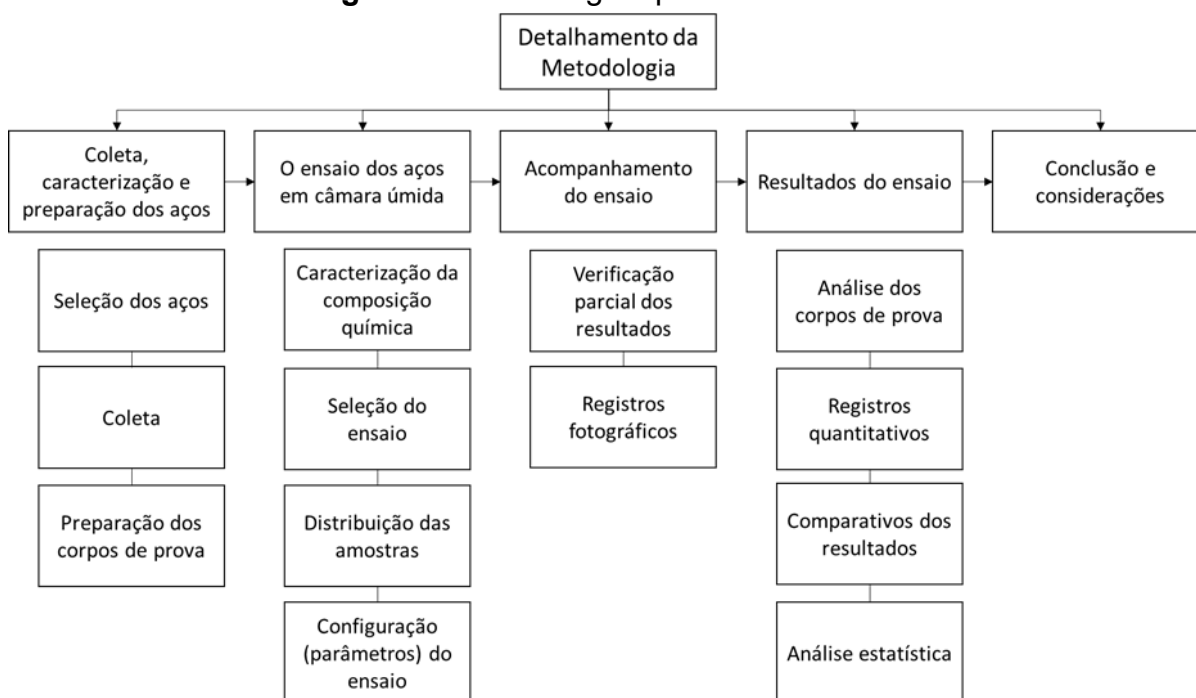
Aço	Bitola	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr
A-36 Gusa	2 x 1/4	0,14	0,16	0,69	0,013	0,025	0	0,037	0,04
A-588	1 ¼ x 1/8	0,14	0,26	0,95	0,007	0,033	0,321	0,01	0,467
A-572 Sucata	2 x 5/16	0,18	0,21	1,2	0,027	0,023	0,12	0,063	0,076
A-36 Sucata	2 x 1/8	0,11	0,21	0,73	0,026	0,014	0,117	0,04	0,07

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

### 3.3 MÉTODOS

A Figura 6 apresenta a metodologia aplicada no desenvolvimento do estudo.

**Figura 6.** Metodologia aplicada ao estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

#### 3.3.1 Coleta, caracterização e preparação dos aços

Os aços utilizados neste estudo foram selecionados com base no conhecimento metalúrgico sobre a influência dos elementos químicos na resistência

à corrosão do material.

Assim, além das amostras de aço patinável (alto teores de cobre e cromo, conforme a Tabela 8) e o aço sem qualquer elemento residual (oriundo de aciaria conversor LD), foram coletados e testados também aços oriundos de sucata, que apresentam residual típico de cobre em sua composição química (abaixo do mínimo exigido pela norma de aço para corrosão atmosférica conforme ASTM A588 (ASTM, 2024)).

### 3.3.1.1 Coleta dos aços

A coleta dos aços contou com o apoio do Grupo Gerdau, que disponibilizou seu estoque de produtos para a retirada das amostras. Visando maior disponibilidade de diferentes aços e composições químicas, foi selecionado o produto perfil cantoneira de abas iguais para a coleta.

Na usina siderúrgica da Gerdau, situada na cidade de Barão de Cocais em Minas Gerais, foram localizadas cantoneiras produzidas com aço isento de Cobre e também cantoneiras produzidas com aço ASTM A588 (ASTM, 2024), com percentual de Cobre que atende então a especificação do aço patinável. Esta usina possui o processo de produção integrado, ou seja, possui as três etapas do processo siderúrgico (Redução, Refino e Transformação Mecânica), produzindo então aço utilizando como matéria prima básica o minério de ferro e o carvão vegetal. Estes materiais são processados no Alto Forno onde é obtido o Ferro Gusa que é então processado em Aciaria a Oxigênio. Então, nesta usina, foram coletados os seguintes produtos:

- Aço isento de Cobre: Cantoneira de abas iguais com dimensões de 2" x 1/4";
- Aço com percentual de Cobre atendendo a norma ASTM A588 (ASTM, 2024): Cantoneira de 'abas iguais com dimensões de 1.1/4" x 1/8".

Em uma outra usina siderúrgica da Gerdau, situada na cidade do Rio de Janeiro e conhecida como Gerdau COSIGUA, localiza-se os aços com percentual de Cobre intermediário. Esta usina é conhecida por ser uma unidade siderúrgica semi integrada, ou seja, produz aço utilizando como matéria prima básica a sucata metálica. A sucata é processada diretamente em Aciaria Elétrica. Então, nesta usina, foram coletados os

seguintes produtos:

- Aço com Cobre intermediário atendendo a norma ASTM A572 grau 50 (ASTM, 2019): Cantoneira de abas iguais com dimensões de 2" x 5/16";
- Aço com Cobre intermediário atendendo a norma ASTM A36 (ASTM, 2019): Cantoneira de abas iguais com dimensões de 2" x 1/8".

A Figura 7 apresenta as amostras coletadas.

**Figura 7.** Amostras coletadas



Fonte: Autor (2024)

### 3.3.1.2 Preparação dos corpos de prova

De posse das amostras, foram preparados corpos de prova de mesmo comprimento para distribuição no dispositivo de ensaio. Foram cortados 5 (cinco) corpos de prova de cada amostra, cada um com comprimento de 5 cm. Os corpos de prova foram lixados e identificados. As Figuras 8, 9 e 10 ilustram o processo de preparação dos corpos de prova, desde o corte, passando pelo lixamento e marcação, respectivamente.

**Figura 8.** Corte dos corpos de prova



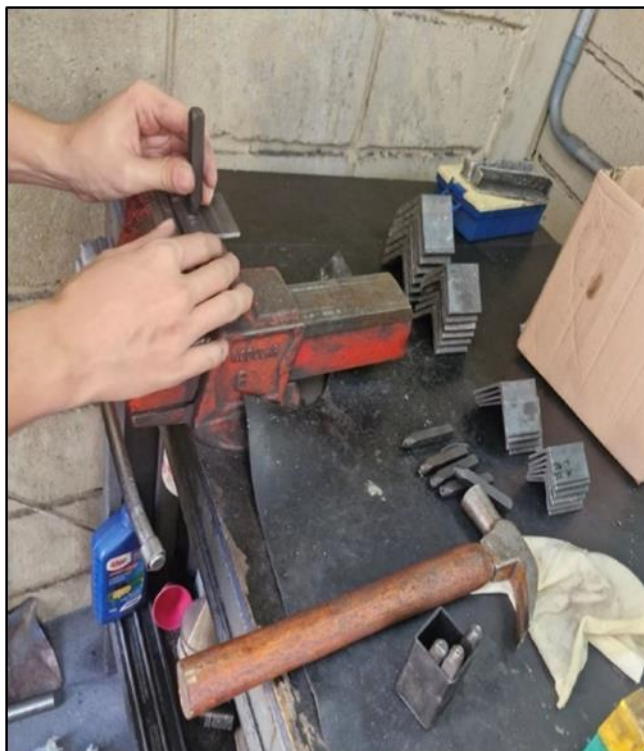
Fonte: Autor (2024)

**Figura 9.** Lixamento dos corpos de prova



Fonte: Autor (2024)

**Figura 10.** Marcação dos corpos de prova



Fonte: Autor (2024)

A verificação da performance dos diferentes tipos de aço quanto a resistência a corrosão será através da verificação da perda de peso das amostras ensaiadas. Com isso, foram realizadas pesagens iniciais, conforme Figura 11, antes de submeter as amostras ao ensaio de câmara úmida.

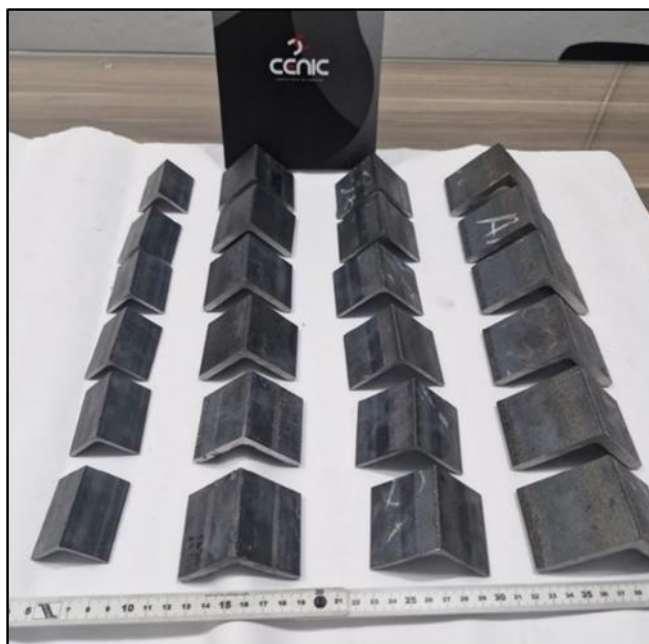
**Figura 11.** Pesagem dos corpos de prova



Fonte: Autor (2024)

A Figura 12 apresenta os corpos de prova submetidos ao ensaio.

**Figura 12.** Aspecto inicial dos corpos de prova



Fonte: Autor (2024)

Os resultados da pesagem podem ser verificados na Tabela 9.

**Tabela 9.** Resultado da pesagem das amostras utilizadas no presente estudo antes da distribuição na câmara úmida (valores em gramas)

	<b>Dimensões, qualidade do aço e matéria prima</b>			
	1.1/4 x 1/8" A588 (ferro gusa)	2 x 1/8" A36 (sucata)	2 x 1/4" A36 (fero gusa)	2 x 5/16" A572 G50 (sucata)
Amostra 1	79,62	131,98	238,02	369,75
Amostra 2	79,23	133,42	237,53	372,55
Amostra 3	79,60	132,10	238,16	374,53
Amostra 4	79,63	131,82	234,81	372,73
Amostra 5	79,69	131,86	237,02	374,91

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

### 3.3.2 Ensaio dos aços em câmara úmida

### 3.3.2.1 Caracterização da composição química

Para fins de confirmação do resultado químico, foi realizado uma nova análise de composição química nas amostras coletadas (Tabela 10). Esta análise foi realizada em Espectômetro de Emissão Ótica, devidamente calibrado, localizado na usina da Gerdau COSIGUA.

### 3.3.2.2 Descritivo do ensaio de câmara úmida

O ensaio de “câmara úmida” que consiste em submeter os corpos de prova a uma atmosfera úmida durante um período de tempo e temperatura controlados.

O ensaio de câmara úmida está prescrito na norma ABNT NBR 8095 – Material metálico revestido e não revestido – Corrosão por exposição à atmosfera úmida saturada – Método de ensaio (ABNT, 2015).

A norma estabelece os requisitos mínimos para a aparelhagem, citando que as câmaras devem ser fabricadas de materiais que não afetem as condições de ensaio e citando também que a parte superior da mesma deve ter formato adequado para não permitir que gotas de água condensadas caiam sobre os corpos de prova.

Com relação aos corpos de prova, a norma cita cuidados com a limpeza dos mesmos e estabelece um mínimo de tres exemplares para cada avaliação.

Sobre as condições de ensaio, a norma específica a temperatura do ar saturado ( $40 \pm 3$ ) graus e cita a necessidade de medição frequente da mesma. A norma determina também que a atmosfera tem que ser mantida saturada, isto é, contínua condensação de água sobre os corpos de prova, e que deve ser utilizada água desmineralizada ou destilada para a execução do ensaio.

Busca-se simular no ensaio a condição do aço quando submetido a condições constantes de umidade, como por exemplo, quando utilizado soterrado em solo constantemente úmido que é típico de Estacas aplicadas em lençol freático.

O equipamento utilizado nesse estudo está localizado no laboratório CENIC, situado na cidade de São Carlos, estado de São Paulo. O fabricante do equipamento é a empresa Equilam, lider mundial na fabricação de equipamentos para ensaios de

intemperismo acelerado. O laboratório é certificado junto ao INMETRO na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 para ensaios com o registro CRL 0454. As Figuras 13, 14 e 15 apresentam o equipamento citado.

**Figura 13.** Equipamento de ensaio de câmara úmida



Fonte: Autor (2024)

**Figura 14.** Detalhe do interior do equipamento de ensaio de câmara úmida



Fonte: Autor (2024)

**Figura 15.** Detalhe do controle de temperatura do equipamento de câmara úmida

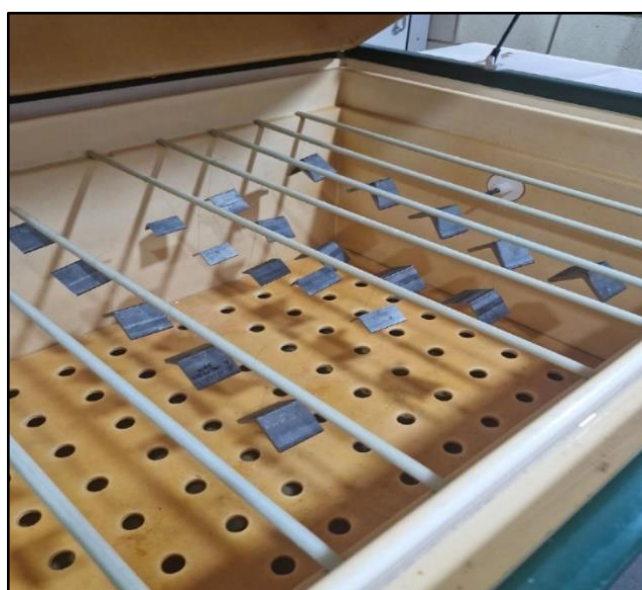


Fonte: Autor (2024)

### 3.3.2.3 Distribuição das amostras

Os corpos de prova foram distribuídos no equipamento de ensaio conforme apresentado na Figura 16.

**Figura 16.** Corpos de prova distribuídos dentro do equipamento de ensaio de câmara úmida



Fonte: Autor (2024)

Os corpos de prova ficam suspensos no equipamento amarrados com fio de nylon. Cada “linha” contém o mesmo tipo de aço. Na Figura 17 está apresentado o

registro da entrada dos corpos de prova no equipamento de ensaio.

**Figura 17.** Folha de registro do monitoramento da câmara úmida com a sinalização da data de início do ensaio (25/09/2024 às 10:47 h)

CENIC		MONITORAMENTO DA CÂMARA ÚMIDA.			
Data - Hora	Temp. da câmara (°C)	Nível da Solução	Observações	Rubrica	
10/06/24 - 15:30	38,1	OK	Entrada amortecedor 12154-6	Ferrado	
20/06/24 - 16:00	38,0	OK	monitoramento	Ferrado	
30/06/24 - 12:30	38,0	OK	monitoramento	Ferrado	
11/08/24 - 08:20	37,9	OK	monitoramento	Ferrado	
14/08/24 - 10:10	38,0	OK	monitoramento	Ferrado	
17/08/24 - 11:20	37,9	OK	monitoramento	Ferrado	
18/08/24 - 14:40	38,0	OK	monitoramento	Ferrado	
12/08/24 - 08:35	37,8	OK	monitoramento	Ferrado	
12/08/24 - 10:35	38,1	OK	monitoramento	Ferrado	
12/08/24 - 14:10	37,9	OK	monitoramento	Ferrado	
12/08/24 - 15:30	37,9	OK	Retirada amortecedor	Ferrado	
02/09/24 - 14:30	37,8	OK	Entrada OS 15610/24 ref	Ferrado	
02/09/24 - 16:10	37,9	OK	monitoramento	Ferrado	
02/09/24 - 17:30	38,0	OK	monitoramento	Ferrado	
03/09/24 - 08:35	37,8	OK	monitoramento	Ferrado	
03/09/24 - 11:10	37,9	OK	monitoramento	Ferrado	
03/09/24 - 14:30	37,9	OK	Retirada OS 15670 ref 1	Ferrado	
16/09/24 - 17:30	37,8	OK	Entrada amortecedor/ferrado	Ferrado	
17/09/24 - 8:15	37,7	OK	monitoramento	Gustavo	
17/09/24 - 12:12	38,1	OK	monitoramento	Gustavo	
18/09/24 - 12:30	37,9	OK	Arde amortecedor	Ferrado	
25/09/24 - 10:47	38,0	OK	Entrada de contêineres	Ferrado	
25/09/24 - 11:13	31,3	OK	Entrada amostra na lava	Ferrado	
1/1					
1/1					
1/1					
1/1					

Fonte: Autor (2024)

### 3.3.2.4 Configuração (parâmetros) do ensaio

Para que as condições reais de aplicação dos aços seja simulada e acelerada, um controle da temperatura interna e da umidade é fundamental.

Então, no início do ensaio, o equipamento foi ajustado para 38°C, porém já no quinto dia de ensaio foi realizado um ajuste da temperatura para 42°C, pois verificou-se essa necessidade para que seja possível observar diferenças após o tempo de conclusão previsto (60 dias). As Figuras 18 e 19 registram esse ajuste de temperatura.

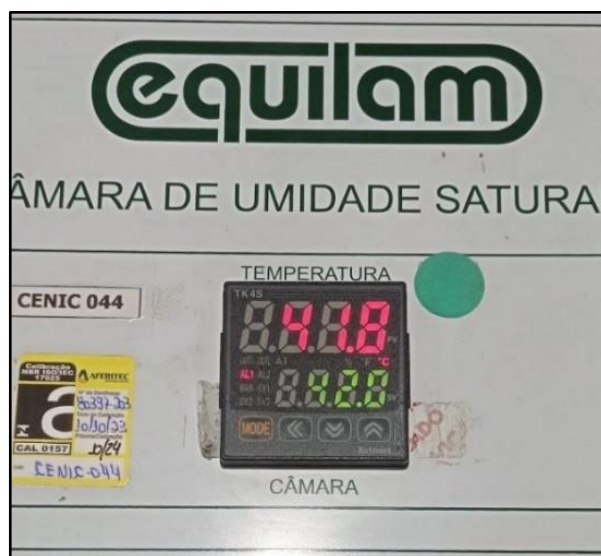
Os parâmetros de umidade e a temperatura objetivada são constantes ao longo de todo o tempo de ensaio.

**Figura 18.** Ajuste da temperatura inicial de 38°C



Fonte: Autor (2024)

**Figura 19.** Ajuste da temperatura de ensaio no quinto dia para 42°C



Fonte: Autor (2024)

### 3.3.3 Acompanhamento do ensaio

#### 3.3.3.1 Verificação parcial dos resultados

A avaliação da resistência a corrosão dos aços será feita através de análise visual, perda de massa das amostras, avaliação da microestrutura e DRX.


#### 3.3.3.2 Registro fotográfico

Conforme mencionado anteriormente, foi realizado o registro fotográfico diário

da evolução do ensaio para fins de acompanhamento da evolução da corrosão dos aços.

Os corpos de prova foram distribuídos conforme o seguinte arranjo apresentado na Figura 20.

**Figura 20.** Arranjo inicial dos corpos de prova no equipamento de ensaio

<p>Configuração inicial</p> 	<p>2 x ¼ % Cu = zero C1</p>	<p>1.1/4 X 1/8 % Cu = 0,321 B1</p>	<p>2 x 1/8 % Cu = 0,117 A1</p>	<p>2 x 5/16 % Cu = 0,120 D1</p>
	<p>2 x ¼ % Cu = zero C2</p>	<p>1.1/4 X 1/8 % Cu = 0,321 B2</p>	<p>2 x 1/8 % Cu = 0,117 A2</p>	<p>2 x 5/16 % Cu = 0,120 D2</p>
	<p>2 x ¼ % Cu = zero C3</p>	<p>1.1/4 X 1/8 % Cu = 0,321 B3</p>	<p>2 x 1/8 % Cu = 0,117 A3</p>	<p>2 x 5/16 % Cu = 0,120 D3</p>
	<p>2 x ¼ % Cu = zero C4</p>	<p>1.1/4 X 1/8 % Cu = 0,321 B4</p>	<p>2 x 1/8 % Cu = 0,117 A4</p>	<p>2 x 5/16 % Cu = 0,120 D4</p>
	<p>2 x ¼ % Cu = zero C5</p>	<p>1.1/4 X 1/8 % Cu = 0,321 B5</p>	<p>2 x 1/8 % Cu = 0,117 A5</p>	<p>2 x 5/16 % Cu = 0,120 D5</p>

Fonte: Autor (2024)

### 3.4. CARACTERIZAÇÃO EM MEV E DRX

As amostras do aço patinável (A-588) e do aço oriundo de gusa, sem elementos residuais (A-36 Gusa) foram caracterizadas em MEV e DRX para verificação da cristalinidade e estrutura metalográfica.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

Foram realizadas análises via espectrometria óptica nos copos de prova afim de verificar a composição química do material submetidos aos ensaios. Os resultados encontram-se na Tabela 10.

**Tabela 10.** Resultado da composição química dos aços utilizados no estudo

Qualidade do aço e matéria prima	Dimensões	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Ni	%Cr
A36 (ferro gusa)	2 x 1/4"	0,14	0,16	0,69	0,013	0,025	0,000	0,037	0,040
A588 (ferro gusa)	1.1/4 x 1/8"	0,14	0,26	0,95	0,007	0,033	0,321	0,010	0,467
A572 G50 (sucata)	2 x 5/16"	0,18	0,21	1,20	0,027	0,023	0,120	0,063	0,076
A36 (sucata)	2 x 1/8"	0,11	0,21	0,73	0,026	0,014	0,117	0,040	0,070

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise da composição química dos aços estruturais estudados revela uma correlação direta entre a presença de certos elementos e sua resistência à corrosão. O teor de carbono varia entre 0,11% e 0,18%. Embora o carbono não seja um agente corrosivo por si só, sua elevação induz a formação de perlita, resultando em microestruturas heterogêneas que favorecem o surgimento de microcélulas galvânicas internas, especialmente no aço A572 G50 (sucata), que possui o maior teor registrado (0,18%). Nesse contexto, “a presença elevada de carbono pode aumentar a heterogeneidade microestrutural, elevando o risco de corrosão localizada por microcélulas galvânicas internas” (Li *et al.*, 2021, p. 1457).

O silício, por sua vez, é reconhecidamente benéfico para a resistência à corrosão atmosférica, atuando como agente formador de camadas passivas que estabilizam os óxidos superficiais. No aço A588 (ferro gusa), o teor de Si atinge 0,26%, o que justifica sua utilização em estruturas expostas, como pontes e fachadas. Como destaca Zhou *et al.* (2020, p. 211), “o silício promove a formação de filmes de óxido compactos e aderentes em aços intemperizados, melhorando significativamente a

resistência à corrosão em ambientes atmosféricos”.

O manganês, apesar de essencial para propriedades mecânicas como tenacidade e resistência ao impacto, pode, em concentrações elevadas (acima de 1%), atuar como agente indutor de corrosão intergranular, principalmente quando se observa segregação na solidificação. Esse é o caso do aço A572 G50 (sucata), cujo teor de Mn atinge 1,2%. Segundo Kim *et al.* (2022, p. 804), “o excesso de manganês em aços estruturais pode aumentar a suscetibilidade à corrosão intergranular quando se segrega ao longo dos contornos dos grão”.

Os elementos enxofre e fósforo são classificados como impurezas e têm papel prejudicial na resistência à corrosão, especialmente em aços produzidos a partir de sucata. Nos aços A572 G50 e A36 (sucata), os teores de S (~0,027%) e P (~0,033%) se aproximam dos limites superiores das normas, o que compromete a integridade estrutural em ambientes úmidos, por favorecerem a corrosão intergranular. Nesse sentido, Alam *et al.* (2021, p. 128) esclarecem que “sabe-se que o enxofre e o fósforo promovem a corrosão intergranular ao enfraquecer os contornos dos grãos e facilitar a formação de microtrincas”.

O cobre é um dos elementos residuais mais desejáveis em aços resistentes à corrosão atmosférica. Sua presença, como verificada no A588 (0,321%), contribui significativamente para a formação de camadas protetoras de óxido. Em contraste, o A36 (ferro gusa) apresenta teor não mensurável de cobre, o que compromete sua resistência natural à corrosão. De acordo com Liu *et al.* (2023, p. 34), “o cobre contribui para a estabilização das camadas de corrosão e retarda o início da propagação da oxidação em aços intemperizados”.

Já os elementos níquel e cromo, quando presentes em quantidades moderadas, atuam sinergicamente na formação de óxidos nobres e estáveis que protegem a superfície metálica de reações de oxirredução. O A588, por conter 0,467% de Cr e 0,01% de Ni, apresenta o melhor perfil para passivação. O A572 G50, com Cr = 0,076% e Ni = 0,063%, também se beneficia parcialmente desses elementos, mesmo sendo proveniente de sucata. Segundo Rao e Mukherjee (2020, p. 611), “níquel e cromo atuam sinergicamente para formar películas de óxido protetoras que aumentam a resistência à corrosão em aços de baixa liga, particularmente sob

exposição cíclica úmida/seca”.

Logo, entre os aços analisados, o A588 (ferro gusa) apresenta a melhor resistência à corrosão atmosférica, devido à combinação sinérgica de Cu, Cr e Si, elementos que promovem a formação de camadas passivas densas e aderentes. Por outro lado, os aços produzidos por sucata, embora contenham níveis úteis de Cu e Cr, são penalizados pela presença de impurezas como S e P, que reduzem a resistência à corrosão intergranular e localizada, tornando esses materiais menos adequados para aplicações em ambientes agressivos ou externos.

Os aços com elementos residuais como Cu, Ni e Cr (casos do A588, A572 G50 e A36 sucata) apresentam vantagens na resistência à corrosão atmosférica, especialmente se os teores forem controlados dentro de faixas ótimas. O cobre (Cu), em particular, é amplamente reconhecido por formar uma camada de óxido aderente que protege contra o avanço da corrosão em aços patináveis (Liu *et al.*, 2023).

No entanto, quando esses elementos estão presentes de forma não intencional, como ocorre em sucatas, podem causar segregações microestruturais e até problemas de soldabilidade e corrosão localizada, caso estejam associados a impurezas como S e P (Alam *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2022).

Por outro lado, os aços sem elementos residuais relevantes (como o A36 via ferro gusa) são mais “puros” e apresentam melhor comportamento eletroquímico uniforme, porém não possuem resistência aprimorada à corrosão atmosférica, sendo recomendados apenas para ambientes internos ou controlados.

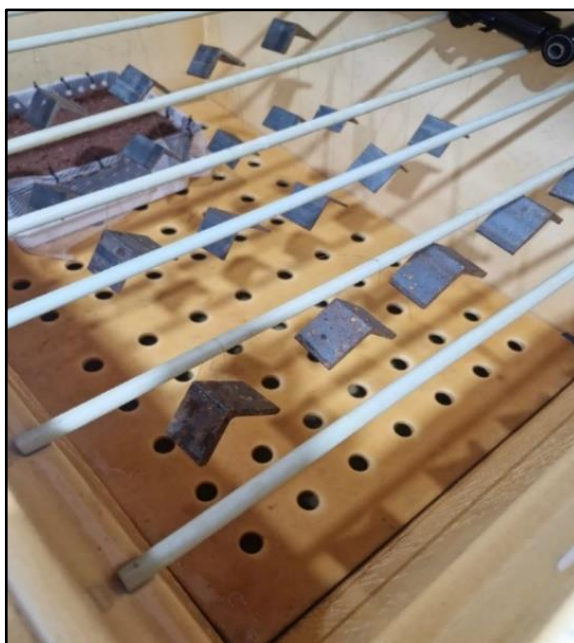
## 4.2 ANÁLISE VISUAL DAS AMOSTRAS

Foram realizadas análises visuais, com registros fotográficos, dos corpos de prova afim de verificar a evolução da corrosão na superfície dos mesmos ao longo dos meses de ensaio. O acompanhamento registrou a inexpressiva corrosão dos corpos de prova no período em que estiveram submetidas ao ensaio. As amostras decapadas apresentaram uma oxidação mais acentuada, mas sem degenerar significativamente as amostras.

Percebeu-se uma grande resistência a corrosão de dois grupos de amostras que apresentavam uma carepa muito compacta, não permitindo a oxidação do metal base.

A Figura 21 apresenta os corpos de prova, das amostras não decapadas, após 1 dia de ensaio.

**Figura 21.** Visão geral dos corpos de prova, não decapadas, após 1 dia de ensaio (26/09/24)



Fonte: Autor (2024)

As imagens apresentadas representam diferentes estágios do ensaio de corrosão conduzido conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 8095:2015, a qual especifica métodos para avaliação da resistência de materiais metálicos, com ou sem revestimento, por meio de exposição à atmosfera úmida saturada. Esse método simula condições de elevada umidade relativa (~100%) com temperatura constante, com o objetivo de promover o ataque corrosivo de forma acelerada.

Na Figura 16, observa-se o estado inicial das amostras, onde a superfície metálica dos corpos de prova permanece praticamente inalterada, sem a formação visível de produtos de corrosão. Esse resultado indica que, nas condições iniciais do ensaio, os materiais ainda não apresentavam sinais de degradação superficial significativos, sugerindo a presença de barreiras físicas eficazes, como carepas de laminação compactas ou propriedades intrínsecas que retardam o início da corrosão.

Esse comportamento está em conformidade com o que se espera de materiais com boa estabilidade frente à condensação contínua em atmosferas saturadas.

Já na Figura 21, referente a uma fase mais avançada da exposição, evidencia-se a formação de produtos de corrosão em diversas amostras, caracterizados visualmente por manchas avermelhadas de óxidos de ferro.

De acordo com a NBR 8095:2015, a análise visual ao final do ensaio deve considerar critérios como:

- Continuidade e adesão de produtos de corrosão;
- Presença de bolhas, manchas ou descascamento;
- Comparação entre materiais sob as mesmas condições ambientais.

Nesse sentido, os resultados demonstram que os corpos de prova que conservaram camadas superficiais compactas e aderentes apresentaram melhor desempenho anticorrosivo, ao passo que as superfícies tratadas ou desprotegidas foram mais suscetíveis ao ataque úmido contínuo. Esse comportamento é tecnicamente sustentado por estudos recentes, como o de Alam *et al.* (2021), que confirmam que barreiras físicas naturais, como carepas de oxidação compacta, dificultam a penetração de umidade e a formação de pilhas galvânicas locais.

De acordo com Alam *et al.* (2021, p.128) “superfícies metálicas que mantêm camadas de óxidos estáveis e aderentes demonstram maior resistência à corrosão em ambientes úmidos saturados, especialmente quando não há falhas na passivação”.

A comparação entre as Figuras 16 e 21 demonstra de forma clara a evolução do processo corrosivo ao longo do ensaio normativo. A resistência superior apresentada por determinados grupos de amostras pode ser atribuída à preservação da carepa de laminação, a qual atua como uma barreira física eficaz contra a penetração de umidade, retardando a ação corrosiva da atmosfera saturada. Os resultados validam a importância da condição superficial inicial e da natureza do material como fatores determinantes no desempenho anticorrosivo em ambientes úmidos, conforme os critérios da ABNT NBR 8095:2015.

Para garantir homogeneização da exposição das amostras ao longo do tempo (dias), as mesmas tinham suas posições alteradas dentro da câmara úmida. As Figuras 22 e 23 apresentam os corpos de prova após 15 dias de ensaio.

**Figura 22.** Visão geral dos corpos de prova após 15 dias de ensaio (11/10/24)



Fonte: Autor (2024)

**Figura 23.** Detalhe do aspecto visual no 15º dia de ensaio



Fonte: Autor (2024)

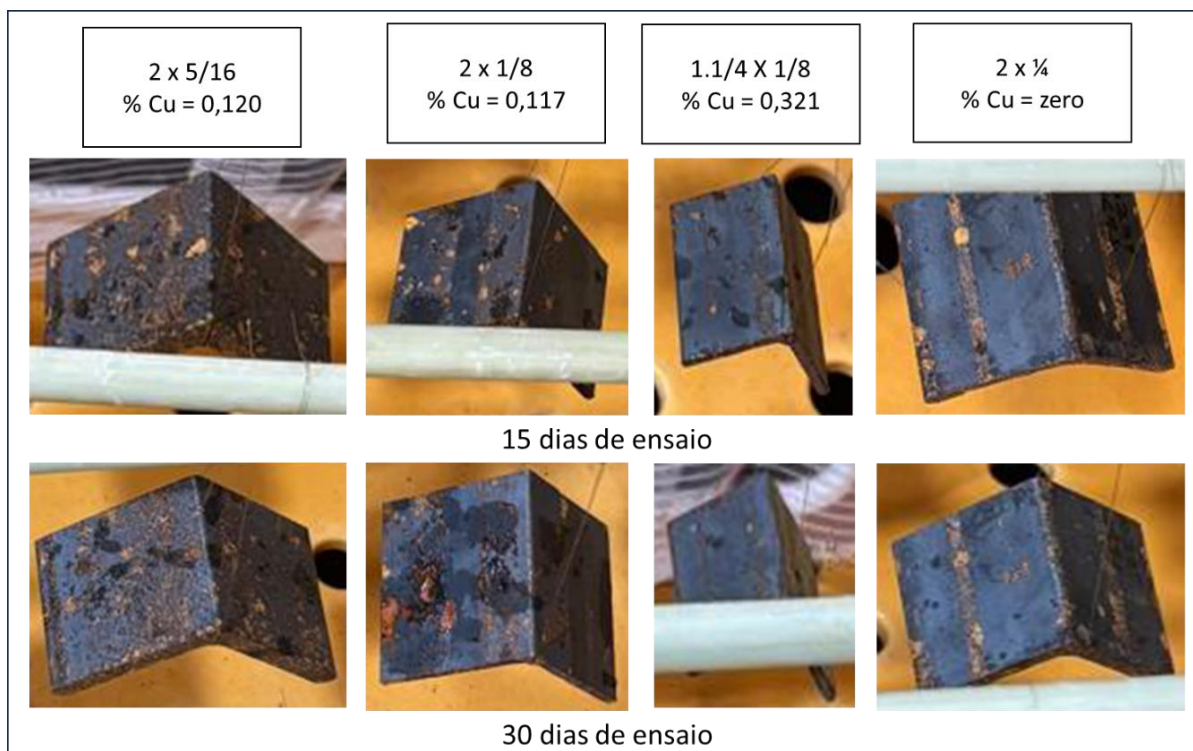
A Figura 24 apresenta uma visão geral dos corpos de prova após 28 dias de ensaio e a Figura 25 apresenta o aspecto visual no 30º dia dos corpos de prova.

**Figura 24.** Visão geral dos corpos de prova após 28 dias de ensaio (24/10/24)



Fonte: Autor (2024)

**Figura 25.** Detalhe do aspecto visual no 30º dia de ensaio



Fonte: Autor (2024)

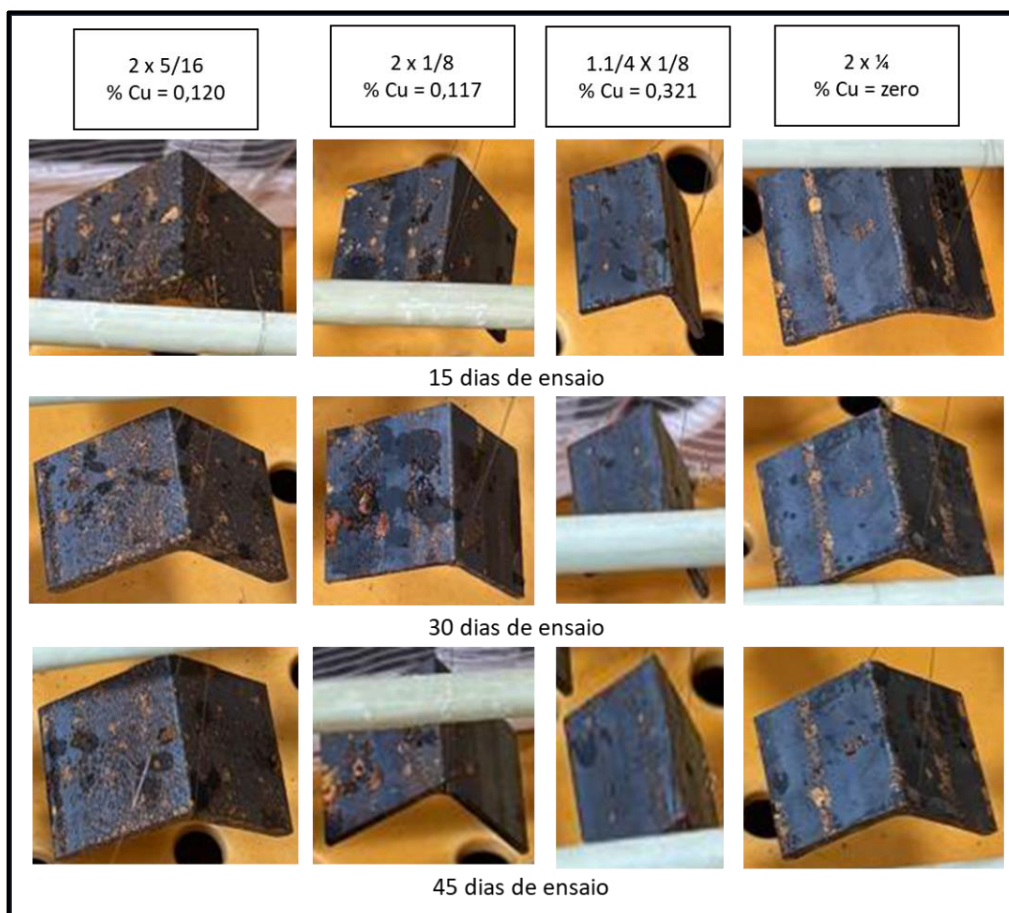
A Figura 26 apresenta uma visão geral dos corpos de prova após 45 dias de ensaio, a Figura 27 detalhes do aspecto visual no 45º dia dos corpos de prova, Figura 28 apresenta uma visão geral dos corpos de prova após 61 dias e a Figura 29 mostra os detalhes do aspecto visual no 61º dia.

**Figura 26.** Visão geral dos corpos de prova após 45 dias de ensaio (11/11/24)



Fonte: Autor (2024)

**Figura 27.** Detalhe do aspecto visual no 45º dia de ensaio



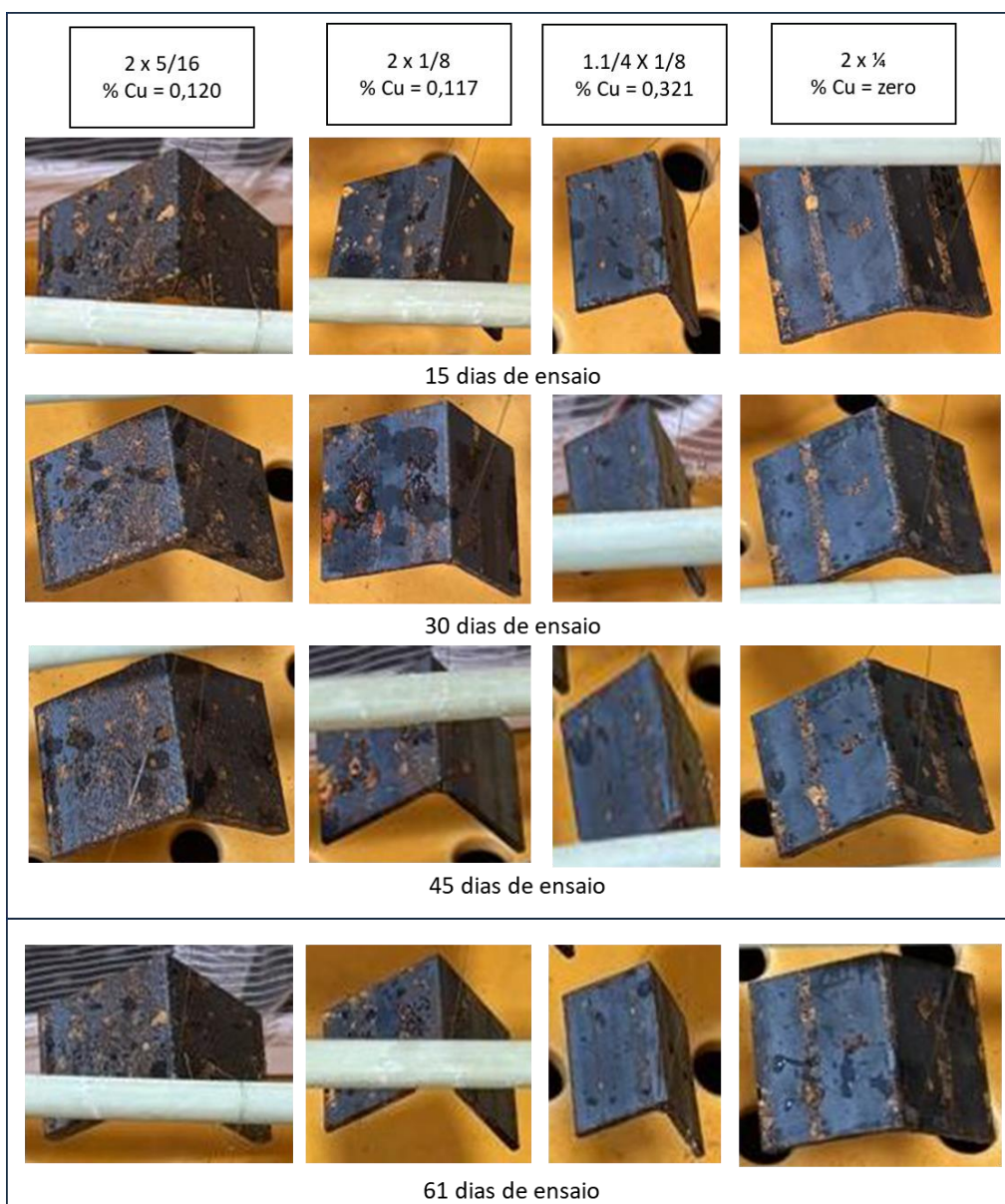
Fonte: Autor (2024)

**Figura 28.** Visão geral dos corpos de prova após 61 dias de ensaio (25/11/24)



Fonte: Autor (2024)

**Figura 29.** Detalhe do aspecto visual em vários dias de ensaio



Fonte: Autor (2024)

Conforme apresentado na Figura 29, o aspecto visual das amostras após 61 dias de exposição na câmara úmida apresenta pouca evolução da oxidação. Por esta razão, foi decidido preparar novas amostras dos mesmos aços e submetê-las a ataque químico com ácido clorídrico (Figura 30), para a remoção de sua carepa superficial e, então, incorporá-las ao experimento. O objetivo desta ação é promover uma aceleração no processo de oxidação das amostras, pois percebe-se que a carepa superficial típica do processo de laminação à quente das cantoneiras, está atuando como um proteção natural contra a oxidação.

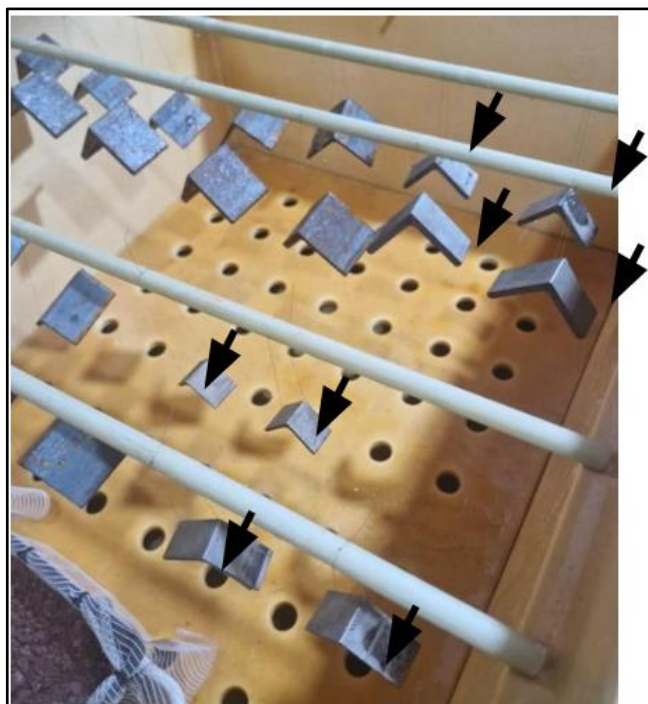
**Figura 30.** Novas amostras após decapagem química com ácido clorídrico



Fonte: Autor (2024)

As Figura 31 e 32 apresentam, respectivamente, as amostras decapadas e incorporadas ao experimento na câmara úmida no dia 28 de novembro de 2024 e a visão geral dos corpos de prova decapados após 4 dias de ensaio (02/12/24).

**Figura 31.** Amostras decapadas e incorporadas ao experimento na câmara úmida no dia 28 de novembro de 2024



Fonte: Autor (2024)

**Figura 32.** Visão geral dos corpos de prova decapados após 4 dias de ensaio (02/12/24)

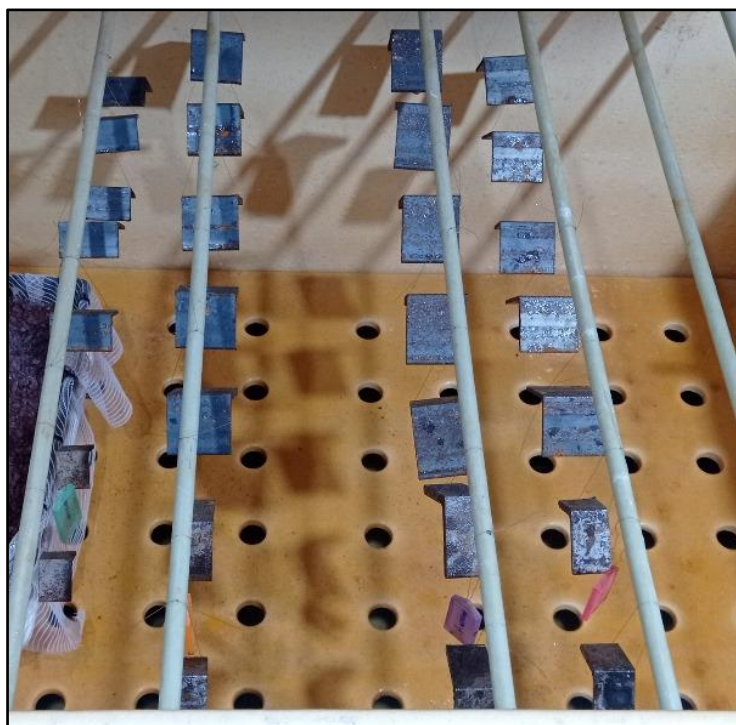


Fonte: Autor (2024)

As Figuras 33, 34, 35 e 36 apresentam uma visão geral dos corpos de prova

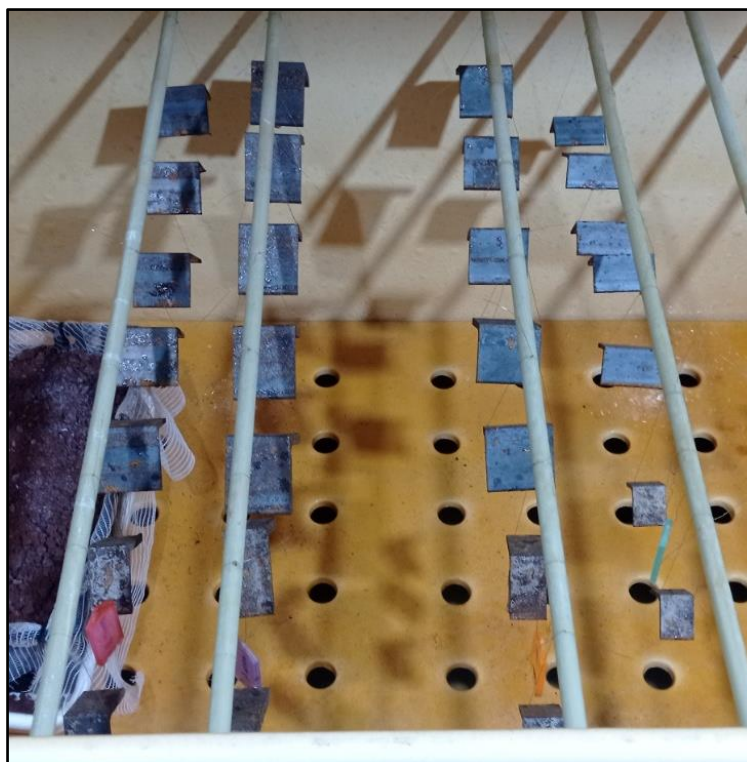
após 150, 180, 210 e 226 dias.

**Figura 33.** Visão geral dos corpos de prova após 150 dias de ensaio (27/02/25)



Fonte: Autor (2025)

**Figura 34.** Visão geral dos corpos de prova após 180 dias de ensaio (27/03/25)



Fonte: Autor (2025)

**Figura 35.** Visão geral dos corpos de prova após 210 dias de ensaio (27/04/25)



Fonte: Autor (2025)

**Figura 36.** Visão geral dos corpos de prova após 226 dias de ensaio (13/05/25)



Fonte: Autor (2025)

### 4.3 DETALHES DOS CORPOS DE PROVA APÓS 226 DIAS DE ENSAIO

A seguir são apresentadas as imagens (Figuras 37 a 44) dos corpos de prova após 226 dias.

**Figura 37.** Amostra 1.1 com carepa



Fonte: Autor (2024)

**Figura 38.** Amostra 2.1 com carepa



Fonte: Autor (2024)

**Figura 39.** Amostra 3.1 com carepa



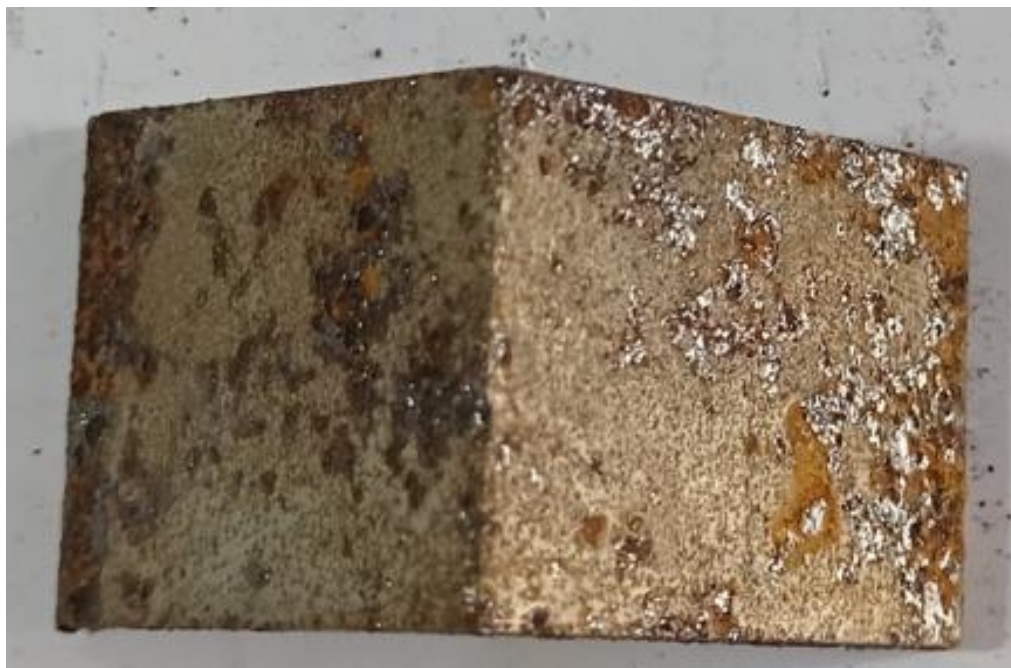
Fonte: Autor (2024)

**Figura 40.** Amostra 4.1 com carepa



Fonte: Autor (2024)

**Figura 41.** Amostra 1.1 D (decapada)



Fonte: Autor (2024)

A Figura 37 mostra um corpo de prova que preserva a carepa de laminação, uma camada superficial composta por óxidos de ferro formada durante o processo de laminação a quente. Essa camada é heterogênea e apresenta certa porosidade, porém atua como uma barreira parcial contra a penetração de agentes corrosivos, reduzindo a exposição direta do substrato metálico. Estudos recentes demonstram que a presença da carepa pode retardar a nucleação de pites e reduzir a taxa de corrosão em ambientes de exposição inicial (Lyu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020).

Em contraste, a Figura 41 apresenta um corpo de prova que foi decapado quimicamente antes do ensaio, expondo diretamente a superfície metálica do aço ao ambiente agressivo. Essa condição promove maior reatividade superficial, favorecendo a formação rápida e disseminada de produtos de corrosão, como óxidos e hidróxidos de ferro. A ausência da carepa elimina a barreira protetiva inicial, tornando o material mais suscetível à corrosão atmosférica acelerada, especialmente sob condições de umidade saturada (Deng *et al.*, 2022).

A comparação entre as imagens evidencia que a carepa de laminação, embora não seja um revestimento protetivo intencional, pode exercer um papel mitigador frente à corrosão em curto prazo. Já a superfície decapada, com maior energia livre e sem passivação natural, sofre corrosão mais agressiva e uniforme. Essa observação

está em consonância com ensaios descritos na literatura recente, que demonstram o impacto direto da condição superficial na taxa de degradação de aços carbono sob atmosferas controladas (Park *et al.*, 2023).

**Figura 42.** Amostra 2.1D (decapada)



Fonte: Autor (2024)

**Figura 43.** Amostra 3.1D (Decapada)



Fonte: Autor (2024)

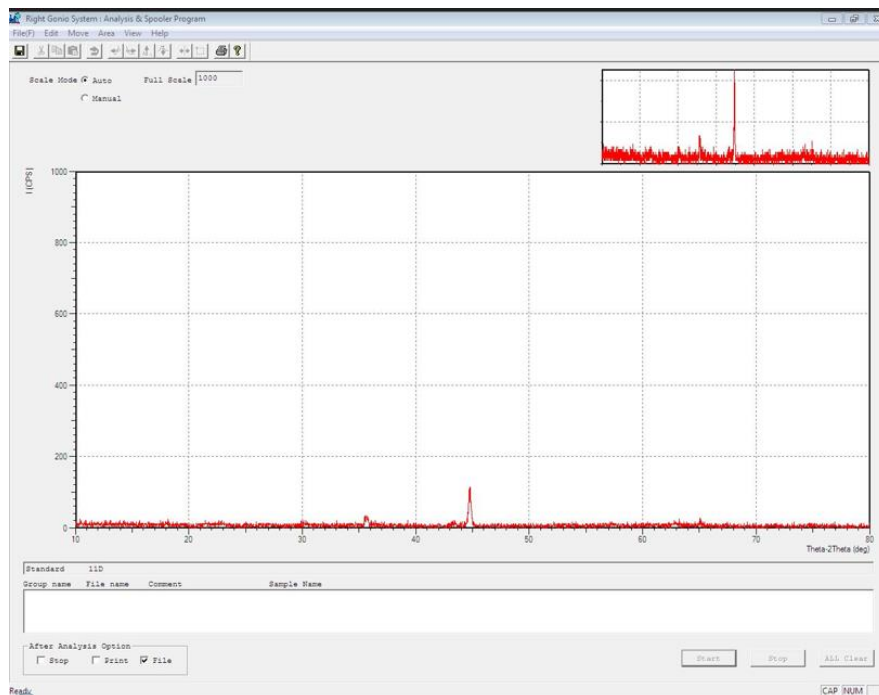
**Figura 44.** Amostra 4.1D (Decapada)



Fonte: Autor (2024)

#### 4.4 RESULTADOS DO DRX

**Figura 45.** DRX 1.1D



Fonte: Autor (2024)

1. **\*Fase metálica predominante:\*** Na Figura 45 observou-se um pico intenso em torno de  $44,7^\circ$  ( $2\theta$ ), característico do plano (110) do ferro  $\alpha$  (estrutura cúbica de corpo centrado - CCC), indicando forte presença de ferro metálico.

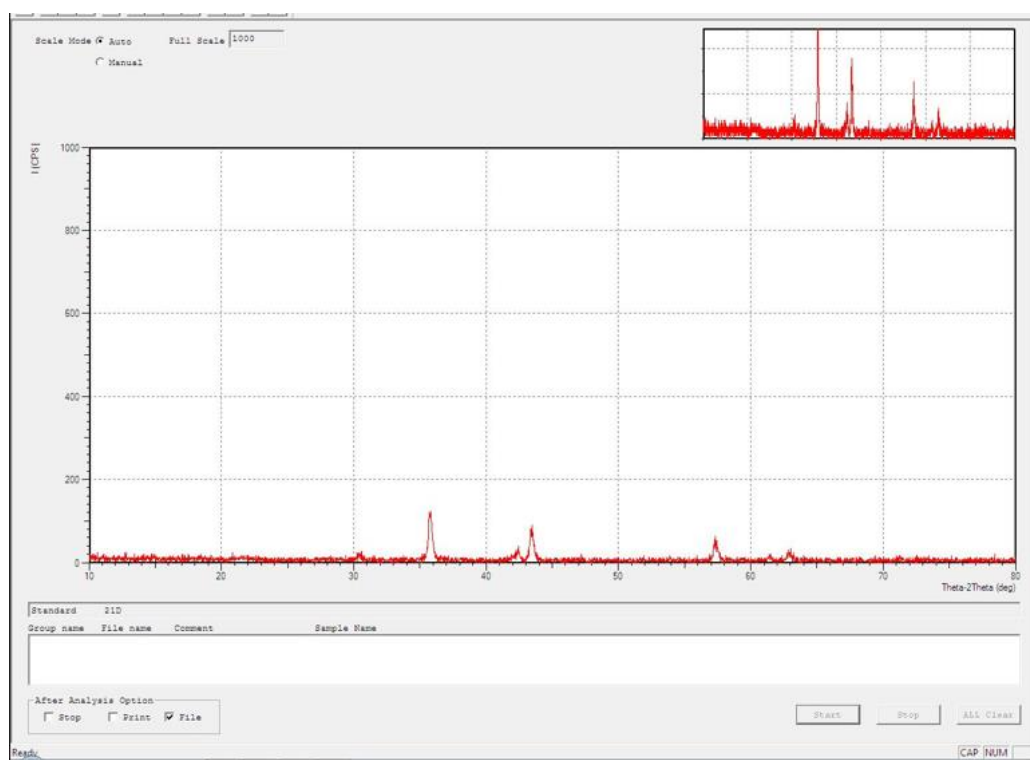
2. **\*Presença de óxidos de ferro:\*** Na faixa de  $34,8^\circ$  a  $37,0^\circ$  ( $2\theta$ ), foram identificados picos típicos de fases como magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ou hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),

sugerindo regiões oxidadas na amostra.

3. \*Planos cristalográficos destacados:\* (110) para ferro metálico e possíveis planos (104), (110) para óxidos de ferro.

A amostra apresenta principalmente ferro metálico, evidenciado pelo pico intenso em  $44,7^\circ$ , além de sinais de oxidação superficial devido aos picos de óxidos em ângulos menores. Isso indica que a amostra tem regiões bem preservadas e outras parcialmente oxidadas.

**Figura 46. DRX 1.1D**



Fonte: Autor (2024)

1. Fases cristalinas identificadas na Figura 46:

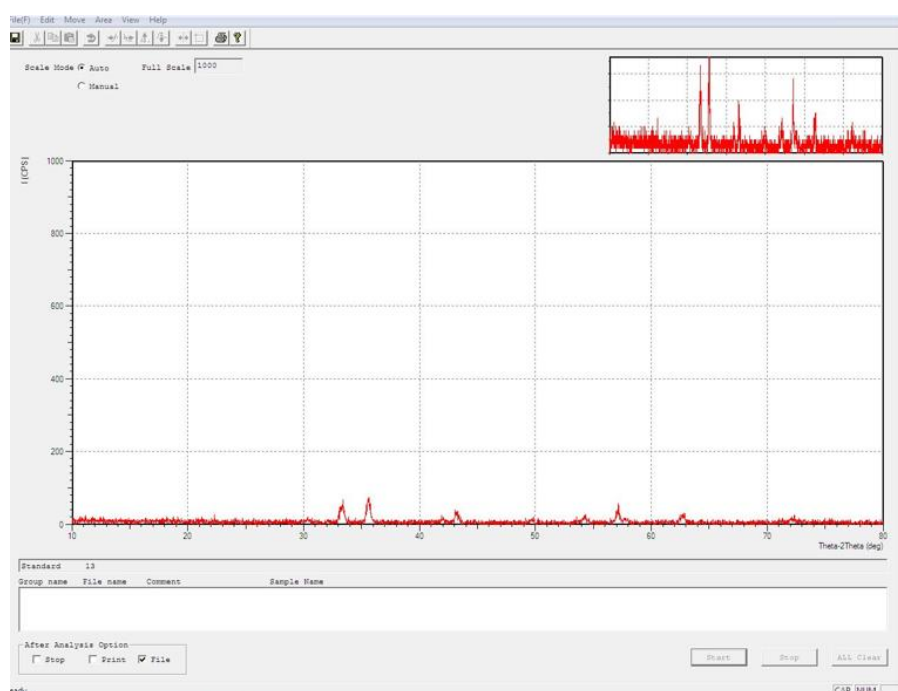
- \*Ferro metálico (Fe)\*: Presença confirmada pelos picos intensos nos ângulos próximos de  $44,7^\circ$  (plano 110) e  $65^\circ$  (plano 200), típicos do aço.
- \*Óxidos de ferro (magnetita  $Fe_3O_4$  e/ou hematita  $Fe_2O_3$ )\*: Picos menores identificados entre  $33^\circ$  e  $36^\circ$ , comuns em produtos de corrosão do aço.

2. Planos cristalográficos observados:

- Fe (110):  $\sim 44,7^\circ$
- Fe (200):  $\sim 65^\circ$
- Magnetita/Hematita:  $\sim 33^\circ$  a  $36^\circ$

O material analisado apresenta majoritariamente ferro metálico, mas já com formação de óxidos de ferro devido à corrosão. Isso indica que o aço ainda mantém boa parte de sua estrutura original, mas já está em processo de oxidação superficial.

**Figura 47. DRX 1.3**



Fonte: Autor (2024)

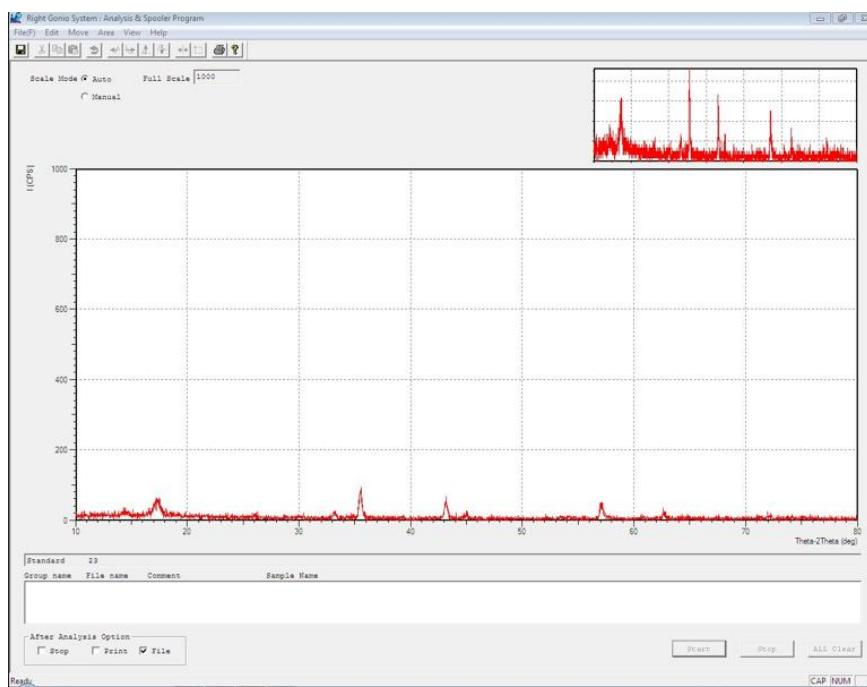
#### 4.5 RESUMO DOS RESULTADOS DE DRX – AMOSTRA 3

1. Foram analisados, Figura 48, os intervalos de  $42,7^\circ$ – $43,9^\circ$  e  $56,6^\circ$ – $58,7^\circ$   $2\theta$ .
2. Os principais picos intensos foram encontrados em  $43,0^\circ$ ,  $43,3^\circ$ ,  $43,4^\circ$ ,  $57,2^\circ$  e  $57,3^\circ$   $2\theta$ .
3. O padrão de picos é compatível com hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), principalmente os planos (202) e (024).

4. Não há indícios de FeO ou magnetita, pois seus picos característicos não aparecem nessas faixas analisadas.

A amostra analisada apresenta padrão cristalográfico típico da hematita, confirmando a predominância desse óxido de ferro.

**Figura 48. DRX 2.3**



Fonte: Autor (2024)

#### 4.6 RESUMO DA ANÁLISE DA QUARTA AMOSTRA DE DRX

1. Foram identificados picos intensos nas regiões de  $43^\circ$  e  $57^\circ 2\theta$ , com máximos em  $43,16^\circ$  (40) e  $57,0^\circ/57,14^\circ$  (30).

2. O padrão de difração sugere presença dominante de fases cristalinas como magnetita ou hematita, típicas de minérios de ferro.

3. A distribuição dos picos mostra que a amostra é bem cristalina, com reflexões fortes e bem definidas.

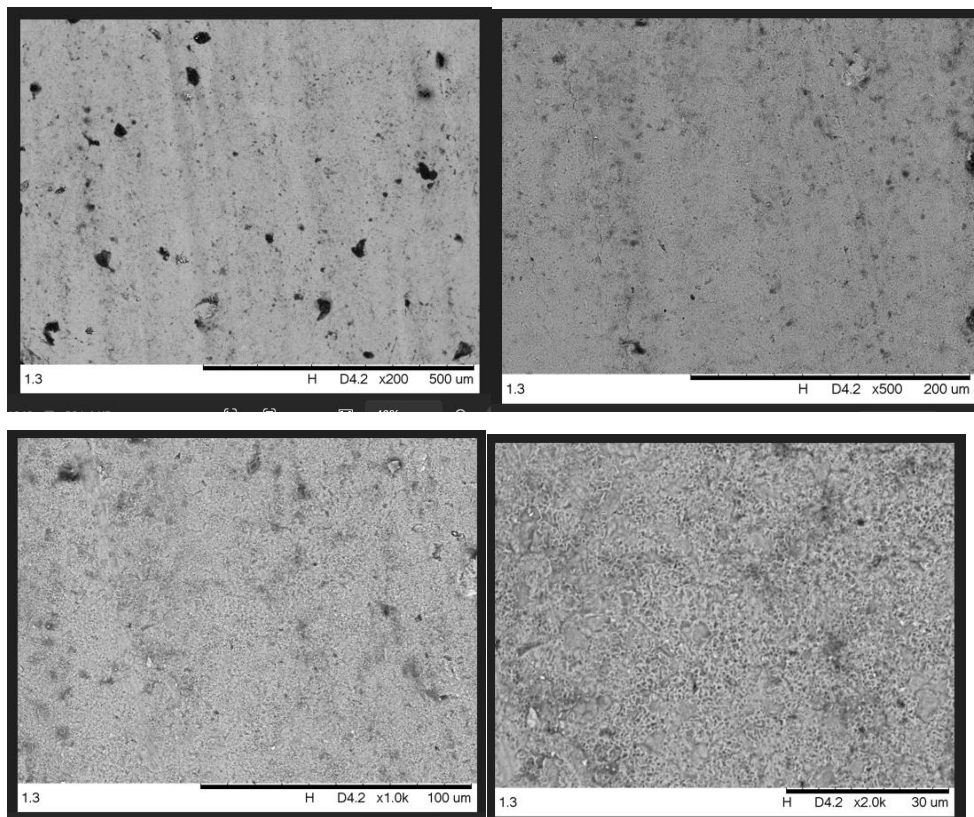
4. Não foram observados picos incomuns que indiquem contaminação ou fases estranhas.

A amostra apresenta características típicas de magnetita/hematita, com alta cristalinidade e sem indícios de impurezas relevantes.

#### 4.7 RESUMO DOS RESULTADOS DE MEV

A Figura 49 apresenta as micrografias (200, 500, 1000 e 2000 X) de uma amostra de aço patinável não decapado após o ensaio na câmara úmida. Percebe-se que a superfície integra de óxido de ferro (FeO) oriunda do processo de laminação, sem craqueamento da mesma ou presença significativa de pontos de oxidação do metal base.

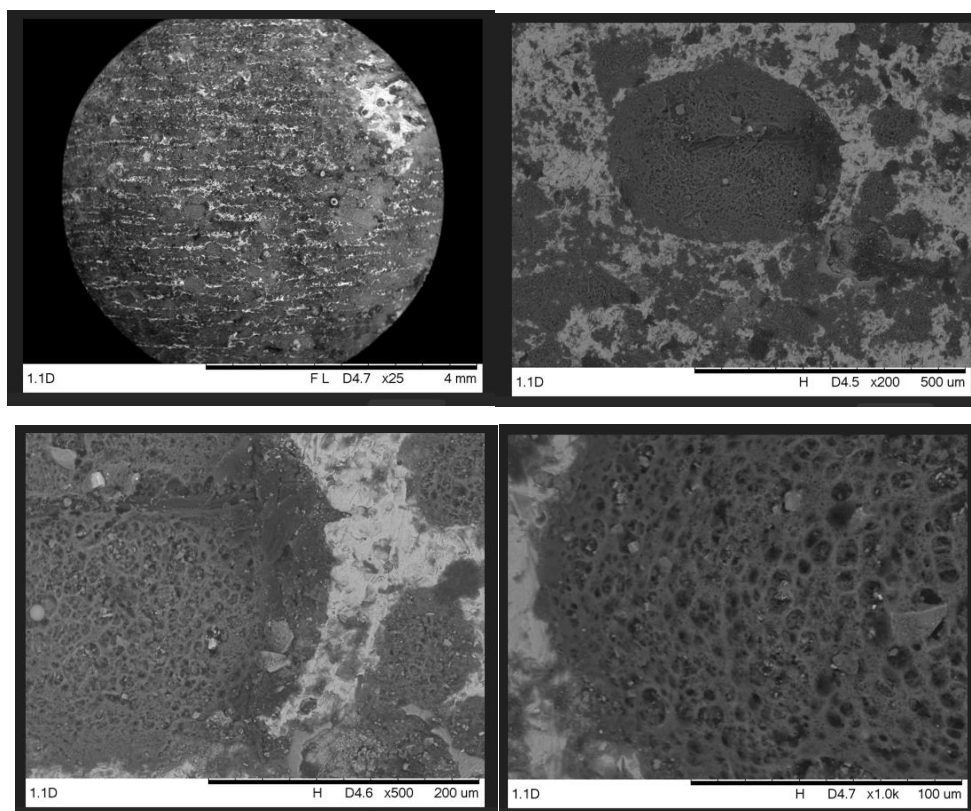
**Figura 49.** Micrografias (200, 500, 1000 e 2000 X) de uma amostra de aço patinável não decapado após o ensaio na câmara úmida



Fonte: Autor (2025)

A Figura 50 apresenta as micrografias (25, 200, 500 e 1000 X) de uma amostra de aço patinável decapado após o ensaio na câmara úmida. Percebe-se que a formação de núcleos de óxidos, sendo esse um estágio inicial do processo de oxidação da superfície da amostra.

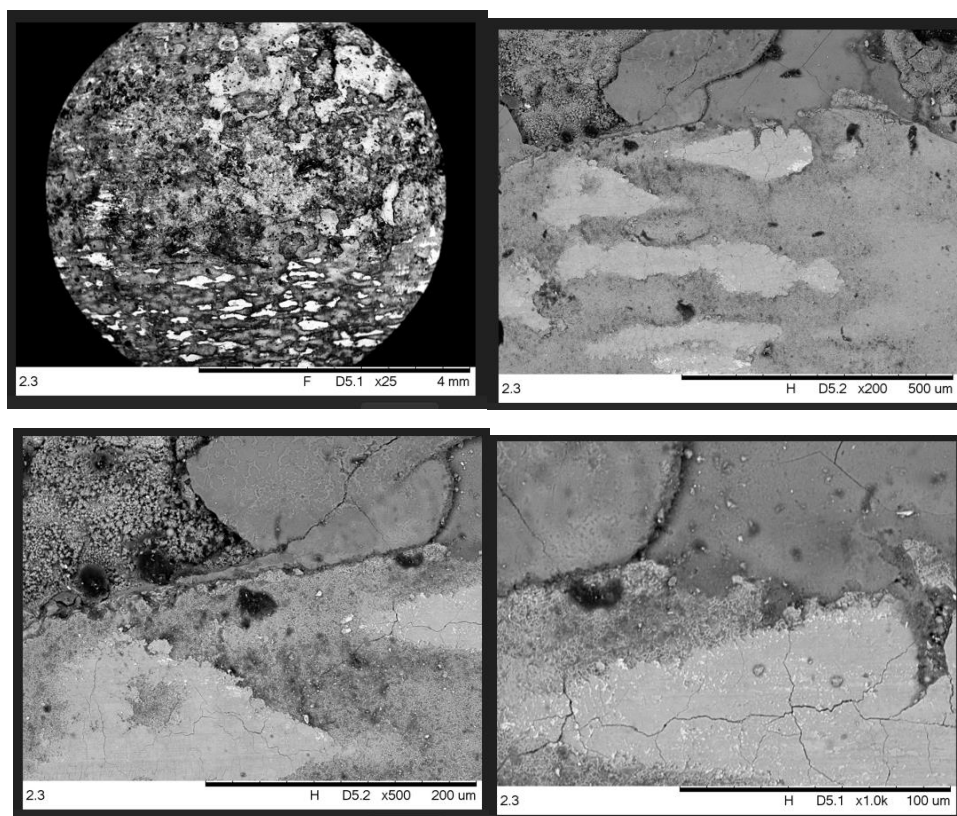
**Figura 50.** Micrografias (25, 200, 500 e 1000 X) de uma amostra de aço patinável decapado após o ensaio na câmara úmida



Fonte: Autor (2025)

A Figura 51 apresenta as micrografias (25, 200, 500 e 1000 X) de uma amostra de aço oriundo de gusa (sem residuais) não decapado após o ensaio na câmara úmida. Percebe-se a forte presença de óxidos oriundos de laminação (carepa – Feo) mais craqueados, mas com pouca presença de óxidos oriundos do processo de ensaio em câmara úmida.

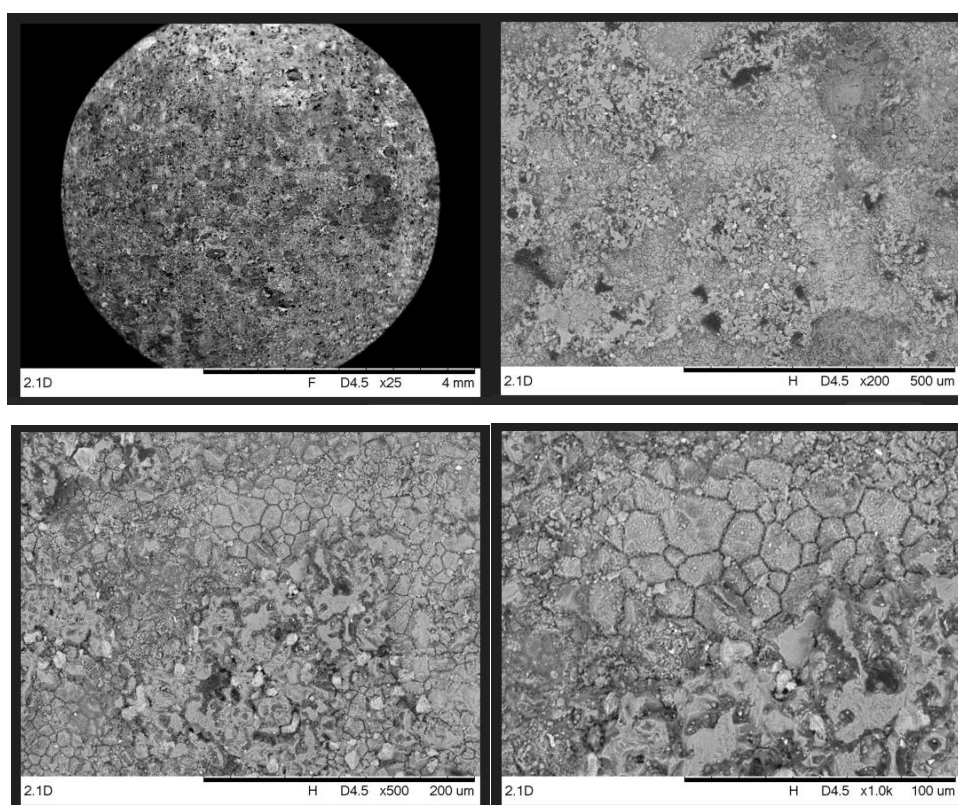
**Figura 51.** Micrografias (25, 200, 500 e 1000 X) de uma amostra de aço oriundo de gusa (sem residuais) não decapado após o ensaio na câmara úmida



Fonte: Autor (2025)

A Figura 52 apresenta as micrografias (25, 200, 500 e 1000 X) de uma amostra de aço oriundo de gusa (sem residuais) decapado após o ensaio na camara úmida. Percebe-se o início da oxidação pelo processo de exposição em camara úmida, ainda em um estágio inicial.

**Figura 52.** Micrografias (25, 200, 500 e 1000 X) de uma amostra de aço oriundo de gusa (sem residuais) decapado após o ensaio na câmara úmida



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 11 apresenta os valores de massa inicial das amostras antes do início do ensaio de exposição atmosférica, enquanto a Tabela 12 reúne os dados de massa obtidos após 226 dias de exposição contínua. Ressalta-se que nem todas as amostras foram removidas do equipamento de ensaio ao final do período estabelecido. Tal decisão visa preservar parte do material exposto com o propósito de possibilitar a continuidade da investigação em estudos futuros, ampliando a compreensão dos efeitos da corrosão ao longo de tempos mais prolongados.

**Tabela 11.** Peso em gramas antes do ensaio

Peso das amostras antes do ensaio (g)				
Amostras	A588	A36 (gusa)	A36 (sucata)	A 572 (sucata)
Decapadas	35,99	127,16	70,16	211,10
Decapadas	38,27	127,40	66,58	220,34
C/carepa	79,62	238,02	131,98	369,75
C/carepa	79,23	237,53	133,42	372,55
C/carepa	79,60	238,16	132,10	374,53

C/carepa	79,63	234,81	131,82	373,73
C/carepa	79,69	237,02	131,86	374,91

Fonte: Autor (2025)

**Tabela 12.** Peso em gramas após 226 dias

<b>Peso das amostras após 226 dias (g)</b>				
<b>Amostras</b>	<b>A588</b>	<b>A36 (gusa)</b>	<b>A36 (sucata)</b>	<b>A 572 (sucata)</b>
Decapadas	35,99	127,32	70,93	211,44
Decapadas	38,26	127,34	66,64	220,64
C/carepa	79,61	238,02	132,12	370,09
C/carepa	79,21	237,54	133,47	372,91
C/carepa	79,59	238,20	132,13	379,81

Fonte: Autor (2025)

**Tabela 13.** Perda de massa das amostras

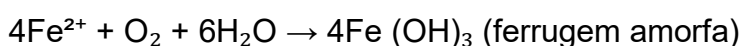
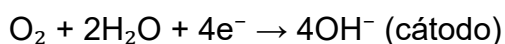
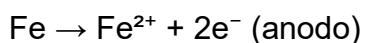
<b>Perda de massa das amostras após 226 dias</b>								
<b>Amostras</b>	<b>A588</b>		<b>A36 (gusa)</b>		<b>A36 (sucata)</b>		<b>A572 (sucata)</b>	
	<b>Massa (g)</b>	<b>%</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>%</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>%</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>%</b>
Decapadas	0	0,00%	-0,16	-0,13%	-0,77	-1,10%	-0,34	-0,16%
Decapadas	0,01	0,03%	0,06	0,05%	-0,06	-0,09%	-0,3	-0,14%
C/carepa	0,01	0,01%	0	0,00%	-0,14	-0,11%	-0,34	-0,09%
C/carepa	0,02	0,03%	-0,01	0,00%	-0,05	-0,04%	-0,36	-0,10%
C/carepa	0,01	0,01%	-0,04	-0,02%	-0,03	-0,02%	-5,28	-1,41%

Fonte: Autor (2025)

Os resultados obtidos a partir da Tabela 13 referem-se ao comportamento de amostras metálicas expostas por 226 dias em ambiente de umidade saturada, segundo os critérios da NBR 8095 (ABNT, 2015). Esse ambiente simula uma condição altamente corrosiva, caracterizada por condensação constante, onde ocorrem reações eletroquímicas favorecidas pela presença contínua de eletrólito e oxigênio dissolvido. O ensaio visa avaliar a massa perdida ou adquirida pelos corpos de prova ao longo do tempo, o que pode indicar processos de oxidação, formação de óxidos hidratados ou adsorção de espécies da atmosfera corrosiva.

Do ponto de vista teórico, a corrosão úmida é um processo anódico em que o

ferro metálico ( $\text{Fe}^0$ ) é oxidado a íons  $\text{Fe}^{2+}$ , liberando elétrons que participam de reações catódicas com o oxigênio e a água, formando hidróxidos férricos e, posteriormente, ferrugem:



Nas amostras analisadas, observou-se que valores negativos de massa indicam ganho de massa, possivelmente devido à formação e fixação de produtos de corrosão aderentes na superfície metálica. Esse ganho está associado ao acúmulo de óxidos hidratados ou à formação de camadas de óxido sem descamação significativa, o que pode mascarar a verdadeira taxa de degradação.

Dentre os materiais avaliados, destaca-se o aço A36 (sucata) decapado, com ganho de massa de até 0,77 g e variação relativa de -0,010975%, seguido pelo A572 G50, também com ganho. Este comportamento indica que os produtos de corrosão formados não foram removidos durante o ensaio, permanecendo aderidos às superfícies. Essa condição é compatível com o fenômeno descrito por Li *et al.* (2021), no qual a formação de óxidos compactos em ambientes saturados pode resultar em aumento de massa aparente, ainda que esteja ocorrendo corrosão subjacente.

Segundi Li *et al.* (2021, p. 1457) “A formação de filmes de corrosão hidratados em superfícies metálicas sob condensação constante pode levar a ganho de massa, sobretudo quando os produtos não são solúveis ou não se desprendem facilmente”.

Já os materiais com carepa de laminação apresentaram ganhos de massa mais moderados, como no caso do A588, cuja variação foi inferior a 0,0003%, evidenciando uma reação superficial controlada. A carepa, formada por óxidos de ferro compactos durante a laminação a quente, age como uma barreira física e química, dificultando a penetração de oxigênio e umidade até o metal base. Esse comportamento está de acordo com a literatura, que reconhece a carepa como camada passivadora temporária, especialmente eficaz em ambientes onde a umidade permanece constante (Zhou *et al.*, 2020).

De acordo com Zhou *et al.* (2020) “Camadas de carepa aderente limitam o

transporte de espécies corrosivas e retardam o avanço das reações redox na interface metal-meio”.

A influência dos elementos residuais também deve ser considerada. Aços provenientes de sucata, como A36 (sucata) e A572 G50, geralmente apresentam teores mais elevados de fósforo, enxofre, cobre e níquel, que podem contribuir para formação de óxidos instáveis, microfissuras e corrosão localizada, mesmo na presença de camada superficial aparente. Quando presentes em teores mal controlados, esses elementos favorecem o fenômeno conhecido como corrosão intergranular ou corrosão sob tensão (Yuan *et al.*, 2021).

Conforme Yuan *et al.* “Elementos residuais como fósforo e enxofre promovem segregação intergranular e aumento da suscetibilidade à corrosão localizada, especialmente em atmosferas úmidas estáveis”.

A análise dos resultados obtidos indica que os ganhos de massa registrados nas amostras não representam inatividade corrosiva, mas sim a retenção de produtos de corrosão na superfície, em conformidade com os princípios da corrosão úmida. Os aços com carepa demonstraram melhor desempenho, com reatividade superficial reduzida e menor variação de massa, em especial o A588, sugerindo maior capacidade de autoproteção passiva. Já os aços decapados e produzidos a partir de sucata apresentaram maior ganho de massa e, por consequência, maior acúmulo de óxidos hidratados, associados a processos corrosivos ativos, embora não necessariamente com perda de integridade imediata.

## 5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo principal investigar os efeitos da composição química e da condição superficial na resistência à corrosão atmosférica de diferentes aços estruturais, com especial atenção aos impactos de elementos residuais provenientes do uso de sucata na produção siderúrgica. Para isso, foram conduzidos ensaios de corrosão em atmosfera úmida saturada conforme a norma ABNT NBR 8095:2020, avaliando-se a perda (ou ganho) de massa ao longo de 226 dias, bem como a evolução da superfície metálica por meio de análises visuais e registro fotográfico.

Os resultados obtidos evidenciam que a condição superficial exerce influência significativa sobre o comportamento corrosivo. Os corpos de prova que mantiveram a carepa de laminação apresentaram desempenho superior, com menores variações de massa e menor evidência de ataque corrosivo, enquanto que, conforme evidenciado pelas análises de MEV, as amostras decapadas mostraram maior suscetibilidade à formação de óxidos hidratados e acúmulo de produtos de corrosão. Tais achados corroboram a literatura contemporânea, segundo a qual a carepa atua como barreira protetora, retardando os mecanismos eletroquímicos de oxidação superficial.

Adicionalmente, a composição química dos aços analisados revelou diferenças cruciais quanto à presença de elementos residuais, como enxofre, fósforo, cobre e níquel. Observou-se que os aços obtidos a partir de sucata, embora contenham elementos potencialmente benéficos à passivação, também concentram impurezas que promovem a corrosão intergranular e a formação de microcélulas galvânicas. Essa dualidade foi particularmente evidente nas amostras A36 e A572 produzidas via rota de sucata, as quais apresentaram ganho de massa associado à formação de produtos de corrosão pouco aderentes, indicando atividade corrosiva ativa, mesmo na ausência de perda de massa aparente.

Por fim, o aço A588, produzido com ferro-gusa e contendo teores otimizados de elementos como silício, cobre e cromo, demonstrou a maior resistência à corrosão no ensaio de exposição prolongada, configurando-se como o material mais adequado para aplicações em ambientes agressivos, como estruturas expostas a atmosferas industriais, bem como na construção civil com estacas metálicas.

Dessa forma, conclui-se que a seleção criteriosa da matéria-prima, aliada à preservação da condição superficial original, são fatores determinantes para o desempenho anticorrosivo de aços estruturais em atmosferas saturadas. Os resultados obtidos reforçam a importância de políticas de controle de qualidade na reciclagem de sucata e na definição de tratamentos superficiais para uso em aplicações críticas de engenharia civil e industrial.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Deve-se dar continuidade aos estudos, com maior tratamento estatístico, do comportamento de aços patináveis submetidos a umidade constante afim de constatar/ratificar a performance dos mesmos quanto à corrosão nestas condições.

Deve-se iniciar estudos do comportamento de aços patináveis quando enterrados no solo afim de reproduzir ao máximo a situação real em que as estacas metálicas são utilizadas.

Sugere-se o desenvolvimento de uma metodologia de análise/cálculo para redução de espessura de sacrifício de estacas metálicas conforme a composição química do aço utilizada na fabricação da mesma.

## REFERÊNCIAS

ABADI, M. M. *et al.* A Review of Simulation and Numerical Modeling of Electric Arc Furnace (EAF) and its Processes, June 2024.

ALAM, M. *et al.* Effects of sulfur and phosphorus on corrosion behavior of structural steels. **Materials Today Communications**, v. 28, p. 127-132, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A36/A36M-19**: Standard Specification for Carbon Structural Steel. West Conshohocken: ASTM, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A242**: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A572/A572M-18**: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel, West Conshohocken: ASTM, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A588/A-588M-24**: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 50 ksi Minimum Yield Point, with Atmospheric Corrosion Resistance. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7007**: Aços-carbono e aços microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8095**: Material metálico revestido e não revestido – Corrosão por exposição à atmosfera úmida saturada – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BIRAT, J. P. Steel and raw materials: global trends and technological shifts. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 7, p. 1407–1416, 2021.

BISPO, M. B.; TSUHA, C. H. C. **Comparação entre métodos analíticos e as recomendações das normas sobre corrosão de estacas metálicas**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, 2018.

CHEN, H.; ZHOU, Y.; LIU, X. Steel classification and application: a structural perspective. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 180, p. 106593, 2021.

DECKER, J. B.; ROLLINS, K. **Corrosion Rate Evaluation and Prediction for Piles Based on Long-Term Field Performance**. ResearchGate, 2008.

DENG, J.; ZHANG, Q.; LU, X. Influence of surface treatment on atmospheric corrosion

behavior of low carbon steel. **Corrosion Science**, v. 199, p. 110193, 2022.

GERDAU. **Perfis estruturais Gerdau**: Estacas metálicas. 9<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Gerdau, 2024.

GHALATI, M.K. *et al.* Toward learning steelmaking – A review on machine learning for basic oxygen furnace process, Wiley Online Library, 2023

GONÇALVES, A. M.; FERNANDES, R. C.; LIMA, P. A. Brazilian iron ore: reserves, beneficiation and logistics challenges in the global market. **Resources Policy**, v. 84, p. 103604, 2023.

HASANBEIGI, A.; ARENS, M.; PRICE, L. Emerging energy-efficiency and CO<sub>2</sub> emission-reduction technologies for cement and steel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 102–122, 2020.

KHANNA, R.; CHATURVEDI, V.; MAHAPATRA, R. Sustainable steel production in emerging economies: drivers and implications. **Energy Policy**, v. 164, p. 112885, 2022.

KIM, H. J. *et al.* Manganese segregation and corrosion sensitivity in high-strength low-alloy steels. **Corrosion Science**, v. 188, p. 802-809, 2022.

KUMAR, R.; SHARMA, A.; VERMA, A. K. Thermo-chemical behavior of pig iron during secondary steelmaking: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 25, p. 5471–5483, 2023.

LALA, A.; DAS, S. K.; MAHATO, B. Iron ore beneficiation: current practices and emerging trends. **Minerals Engineering**, v. 159, p. 106636, 2020.

LEE, J.; KIM, Y.; PARK, J. Energy and exergy analysis of pig iron utilization in integrated and electric steelmaking routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123919, 2021.

LI, H.; WANG, J.; ZHAO, Y. Hydrogen-based direct reduction of iron ores: process modeling and environmental potential. **Journal of Cleaner Production**, v. 395, p. 136261, 2023.

LI, X. *et al.* Carbon content and microgalvanic corrosion in steel microstructures. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 1453–1461, 2021.

LIU, Y. *et al.* Influence of copper addition on corrosion behavior of weathering steel in marine environment. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v. 58, p. 30–39, 2023.

LYU, Y.; HU, Y.; LI, M. Effect of oxide scale on the initial atmospheric corrosion behavior of hot-rolled steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 405, p. 126647, 2021.

MATSUDA, Y.; ITO, K.; NISHIMURA, H. Operational optimization of burden

distribution in large-scale blast furnaces. **ISIJ International**, v. 61, n. 11, p. 2761–2770, 2021.

MORCILLO, M. *et al.* Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts, April 2019

PANNONI, F. D. Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio. 6ª ed., São Paulo, 2015.

PARK, J. H.; LEE, J. S.; CHOI, W. J. Influence of initial surface condition on corrosion kinetics of structural steels exposed to humid environments. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 25, p. 5841–5852, 2023.

PETRYSHYN, A.; RADCHENKO, M.; BEREZHNYI, M. Iron-bearing minerals and their impact on steelmaking processes: recent developments. **Minerals**, v. 12, n. 8, p. 1055, 2022.

RAO, P. S.; MUKHERJEE, A. Effect of Ni and Cr additions on the corrosion performance of low-carbon steels. **Surface and Coatings Technology**, v. 398, p. 610–616, 2020.

RODRIGUEZ, L. *et al.* **Methods to evaluate corrosion in buried steel structures: A review**, May 2018

SINGH, R.; PANDEY, R. K.; KUMAR, P. Effect of carbon content on mechanical properties and microstructure of plain carbon steels. **Materials Today: Proceedings**, v. 28, p. 1746–1751, 2020.

TANG, Y.; LI, X.; YANG, L. Advancements in iron ore beneficiation processes and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 373, p. 133986, 2022.

TIAN, S.; HUANG, Y.; SUN, Y. Thermodynamic and kinetic analysis of iron ore reduction in blast furnaces: a comprehensive review. **Metals**, v. 12, n. 11, p. 1902, 2022.

WANG, Y.; WANG, Z.; ZHAO, L. Advances in alloy design of steels: from microstructure to performance. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 81, p. 13–26, 2021.

WANG, Y.; ZHAO, L.; LI, H. Role of oxide scale morphology on corrosion initiation of carbon steels. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 27, n. 9, p. 1003–1011, 2020.

WIERZBICKI, T. *et al.* **Behavior of Weathering Steel in Artificial Harsh Environment**. Institute of Civil Engineering, Warsaw University of Life Sciences, Dezembro 2024

XIE, Z.; CHEN, M.; LUO, Y. Optimization of burden distribution and gas flow in blast furnaces to enhance energy efficiency and reduce emissions. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 48, n. 8, p. 1011–1020, 2021.

YANG, Yongxiang; RAIPALA, Kalevi; HOLAPPA, Lauri. **Chapter 1.1 - Ironmaking**, Treatise on Process Metallurgy, p. 2-88. Elsevier, 2014.

YUAN, S. *et al.* Influence of residual elements and surface condition on corrosion behavior of recycled steels. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 1070–1078, 2021.

ZHANG, L.; LI, C.; WU, H. Definition and development of metal alloys in advanced manufacturing. **Metals**, v. 13, n. 2, p. 273, 2023.

ZHANG, J.; ZHU, W.; YANG, F. Pig iron characteristics and its influence on converter steel refining processes. **Metals**, v. 12, n. 3, p. 511, 2022.

ZHOU, C.; WANG, Z.; LIU, X. Multiphysics modeling in blast furnaces. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 47, n. 9, p. 1007–1015, 2020.

ZHOU, Y. *et al.* Atmospheric corrosion resistance of low-alloy steels with silicon addition. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 210–218, 2020.