



Gabriela Cornelius Pandolfo

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE CHAPAS DE AÇO-CARBONO
SAE 1020 COM PINTURA ELETROSTÁTICA SOB EXPOSIÇÃO A INSUMOS
QUÍMICOS AGRÍCOLAS**

Horizontina-RS

2024

Gabriela Cornelius Pandolfo

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE CHAPAS DE AÇO-CARBONO
SAE 1020 COM PINTURA ELETROSTÁTICA SOB EXPOSIÇÃO A INSUMOS
QUÍMICOS AGRÍCOLAS**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Química na Faculdade Horizontina, sob a orientação da professora. Me. Darciane Eliete Kerkhoff.

Horizontina - RS

2024

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“Análise da resistência à corrosão de chapas de aço-carbono SAE 1020 com
pintura eletrostática sob exposição a insumos químicos agrícolas”**

**Elaborada por:
Gabriela Cornelius Pandolfo**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Química

Aprovado em: dd/mm/20aa
Pela Comissão Examinadora

Me. Darciane Eliete Kerkhoff
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Dr. Rafael Luciano Dalcin
FAHOR – Faculdade Horizontina

Dra. Janice Zulma Francesquett
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS
2024**

AGRADECIMENTO

Ao meu companheiro Gustavo que sempre esteve ao meu lado durante a minha formação.

“A estrada é sua, e somente sua. Outros podem andar ao seu lado, mas ninguém pode andar por você.”

(Cora Coralina)

RESUMO

Na agricultura, o maquinário enfrenta constantes desgastes e impactos que favorecem a corrosão, causando altos prejuízos econômicos. Apesar de o revestimento com pintura ser amplamente utilizado para proteger os equipamentos, ele muitas vezes não é suficiente contra a corrosão química causada por insumos agrícolas. Este estudo analisou a resistência à corrosão de chapas de aço SAE 1020, revestidas com esquemas específicos de pintura, quando expostas a insumos químicos agrícolas. Foram realizados ensaios de *salt spray* por 240 horas, intemperismo por 4 meses, espessura de película, aderência e resistência química, com o objetivo de avaliar o potencial corrosivo de diferentes insumos químicos sobre o aço revestido. Para isso, foram utilizados 32 corpos de prova de aço SAE 1020 com espessuras de 4,75 mm e 2,00 mm, submetidos a dois esquemas de pintura: o primeiro com jateamento de granalha Sa 2½, primer e pintura eletrostática a pó, e o segundo com jateamento Sa 2½ seguido apenas de pintura eletrostática. Testaram-se os insumos ácido fosfórico, ureia e sulfato de amônio, todos a 3,5% de concentração. Os ensaios seguiram normativas específicas, como a ASTM B-117 para névoa salina, ASTM D-1654 para intemperismo, ISO 2409 para aderência, ISO 19840 para espessura de película e ISO 2812-1 para resistência química em imersão em NaOH (10%) e H₂SO₄ (10%). Os resultados mostraram que, no teste de *salt spray*, o ácido fosfórico e o sulfato de amônio foram os mais corrosivos em apenas 50 horas de ensaio. No teste de intemperismo, os corpos revestidos permaneceram intactos após 4 meses, enquanto os não revestidos apresentaram corrosão significativa. No teste de aderência, houve deslocamento de grau 1 nos corpos expostos ao ácido fosfórico. Na resistência química ao NaOH, os revestimentos começaram a se alterar aos 33 dias, com remoção de tinta ao final; já os corpos sem revestimento não apresentaram corrosão. No ensaio com H₂SO₄, os corpos com revestimento de pintura eletrostática apresentaram corrosão direta no aço aos 19 dias, mas a tinta permaneceu intacta; os não revestidos foram totalmente corroídos. Concluiu-se que o ácido fosfórico e o sulfato de amônio possuem alto poder corrosivo, mesmo em baixas concentrações, destacando a necessidade de revestimentos mais eficientes para prolongar a vida útil dos equipamentos agrícolas expostos a esses insumos.

Palavras-chave: Corrosão. Ensaio. Revestimento. Insumos agrícolas. Aço-carbono.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das formas de corrosão.....	12
Figura 2 - Modelo simplificado descrevendo natureza eletroquímica do processo de corrosão metálica.....	13
Figura 3 - Equipamento de jateamento mecânico.....	19
Figura 4 - Esquema de aplicação de tinta pó.....	21
Figura 5 - Representação de um equipamento de pintura eletrostática a pó.....	22
Figura 6 - Corpo-teste pintado com corte em "X".....	30
Figura 7 – Corpos-teste com ácido fosfórico pós ensaio de <i>Salt Spray</i>	36
Figura 8 – Corrosão no corpo-teste "P" com sulfato de amônio pós ensaio de <i>Salt Spray</i>	37
Figura 9 - Corrosão nos corpos-teste com ureia pós ensaio de <i>Salt Spray</i>	37
Figura 10 – Corpos-teste após 2 dias em intemperismo.....	39
Figura 11 - Corpos-teste - avaliação de setembro.....	40
Figura 12 - Corpos-teste - avaliação de outubro.....	41
Figura 13 - Corpos-teste - avaliação de novembro.....	42
Figura 14 - Corpos-testes no sistema de imersão em NaOH e H ₂ SO ₄	44
Figura 15 - Liberação de gás hidrogênio durante a reação de oxidação.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Corrosividade de fertilizantes em aço galvanizado e inoxidável.....	17
Quadro 2 - Taxas de corrosão por fertilizantes em aço carbono e aço galvanizado.	17
Quadro 3 - Camada de espessura recomendada para diversos ambientes.....	23
Quadro 4 - Identificação dos corpos-teste em intemperismo.....	29
Quadro 5 – Avaliação corpos-teste submetidos a teste de névoa salina.....	31
Quadro 6 – Classificação dos resultados teste de aderência.....	32
Quadro 7 – Plano de amostragem para medições de espessura da película.....	33
Quadro 8 – Transformações dos corpos-teste em imersão em H ₂ SO ₄ (10%).....	45
Quadro 9 - Transformações dos corpos-teste em imersão em NaOH (10%).....	46

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	4
1.1 TEMA	5
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	5
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA.....	6
1.4 JUSTIFICATIVA	6
1.5 OBJETIVOS	8
1.5.1 Objetivo geral	8
1.5.2 Objetivos específicos.....	8
2.REVISÃO DA LITERATURA.....	9
2.1 INSUMOS AGRÍCOLAS.....	9
2.1.1 Sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄)	9
2.1.2 Ácido fosfórico (H₃PO₄)	10
2.1.3 Ureia (NH₂CONH₂).....	10
2.2 TIPOS DE AÇOS	11
2.3 CORROSÃO	11
2.3.1 Corrosão atmosférica	14
2.3.2 A corrosão e os aspectos climático do noroeste do Rio Grande do Sul ..	15
2.3.3 Corrosão causada por fertilizante	16
2.4 PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO	18
2.4.1 Pintura industrial.....	18
2.4.1.1 Pré-tratamento mecânico de jateamento.....	18
2.4.1.2 Revestimento por tinta primer	20
2.4.1.3 Revestimento por tinta acabamento.....	20
2.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO	23

2.5.1 Ensaio acelerado de névoa salina	24
2.5.2 Teste de aderência	25
2.5.3 Ensaio de resistência a intempéries.....	26
2.5.4 Ensaio de resistência química	26
3.METODOLOGIA.....	28
3.1 CORPOS-TESTE	28
3.1.1 Identificação dos corpos-teste.....	29
3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À NÉVOA SALINA	30
3.3 TESTE DE RESISTÊNCIA A INTEMPÉRIES	31
3.3.1 - Solução de ácido fosfórico (H₃PO₄) (3,5%)	31
3.3.2 - Solução de ureia (NH₂CONH₂) (3,5%)	31
3.3.3 - Solução de sulfato de amônio ((NH₄)SO₄) (3,5%)	32
3.4 TESTES DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO	32
3.4.1 Teste de aderência	32
3.4.2 Teste de espessuras de película.....	32
3.4.3 Teste de resistência química a imersão em NaOH e H₂SO₄.....	33
3.4.3.1 Solução de NaOH (10%)	33
3.4.3.2 Solução de H ₂ SO ₄ (10%).....	33
3.5 ANÁLISE DOS RESULTADO.....	34
3.6 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E REAGENTES.....	34
4.APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
4.1 TESTE DE RESISTÊNCIA À NÉVOA SALINA	35
4.2 TESTE DE RESISTÊNCIA A INTEMPÉRIES	38
4.3 RESISTÊNCIA QUÍMICA.....	43
CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS.....	50
APÊNDICE A	55

1. INTRODUÇÃO

A corrosão é um problema presente em diversos setores industriais, sendo facilmente observada em pontes, reservatórios, edificações civis e industriais, tubulações, automóveis, estruturas metálicas, entre outros. Esse processo corrosivo gera prejuízos significativos em diferentes áreas de atividade, resultando em uma série de consequências, como a redução da vida útil dos equipamentos, aumento nos custos de manutenção, perda de estruturas metálicas e o risco de acidentes (Roberge, 1999).

A corrosão é definida por Gentil (2022), como a deterioração de um material metálico, resultante da ação química ou eletroquímica do ambiente, podendo ou não estar associada a esforços mecânicos. Quando essa deterioração é provocada pela interação físico-química entre o material e seu ambiente operacional, as mudanças resultantes são prejudiciais e indesejáveis, tornando os materiais inadequados para seu propósito original. No entanto, a extensão da corrosão é determinada pela sensibilidade de um metal ou liga específica ao ambiente em questão (Ahmad, 2006).

A Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) calcula que a corrosão acarretou custos anuais equivalentes a cerca de 3% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil em 2018, o que totaliza aproximadamente R\$ 280 bilhões. Segundo a mesma entidade, se as medidas de proteção contra corrosão fossem adequadamente aplicadas, a economia brasileira poderia economizar pelo menos R\$ 112 bilhões, após descontar os custos de implementação dessas medidas (Vasco, 2020).

Quando citado a corrosão em máquinas agrícolas, nota-se que é um desafio significativo que afeta a durabilidade e a eficiência desses equipamentos, especialmente devido à exposição constante a ambientes adversos (Labiapari *et al.* 2013). Para mitigar esse problema, são essenciais medidas preventivas, como o uso de revestimentos protetores, tratamento adequado de superfícies e manutenção regular (Durmoo *et al.* 2008). A pintura industrial consiste em um conjunto de operações destinadas a aplicar uma camada de revestimento sobre uma superfície, criando uma película com viscosidade adequada que endurece com o tempo. Sua principal função é preservar equipamentos e materiais, prolongando sua vida útil ao protegê-los de ataques corrosivos e outros tipos de danos. Além disso, a pintura industrial também atende a outras finalidades, como garantir a segurança industrial, impermeabilizar recipientes, reduzir a rugosidade de tubulações (Leite, 2004).

Muitos produtos químicos comerciais são usados na agricultura, incluindo fertilizantes, conservantes de grãos e silagem, produtos químicos para controle de pragas, doenças e ervas daninhas, e soluções ácidas próprias para limpeza de equipamentos lácteos (Yuksel e Eker, 2005). Devido à corrosividade de muitos desses, deve haver cautela na seleção dos produtos a serem utilizados, assim como no tipo de material utilizado no sistema (Sunny e Hakkim, 2016).

Segundo Uneri (1998) as duas principais razões para a substituição de máquinas ou equipamentos incluem a atualização de equipamentos antigos e a substituição por causa do desgaste e corrosão. Discussões com pessoas desse setor industrial resultaram em uma estimativa de custos de corrosão na faixa de 5% a 10% do valor de todos os novos equipamentos.

Identificar a causa da corrosão possibilita sua contenção e a redução significativa dos custos com manutenção e substituição de equipamentos. Isso pode ser alcançado por meio da implementação de mecanismos preventivos e tratamentos realizados regularmente, tais como limpeza, pintura e manutenções periódicas dos equipamentos e acessórios metálicos (Rodrigues, 2019).

Considerando que os problemas causados pela corrosão em máquinas agrícolas, que fazem o uso de fertilizantes químicos, geram custos extras aos produtores e para a fábrica. O objetivo deste trabalho é realizar ensaios de resistência à corrosão em aço-carbono SAE 1020, os quais foram revestidos com esquema de pintura específico, utilizando pintura eletrostática, para definir se os parâmetros utilizados entram em conformidade com a ASTM B-117 (*Salt spray Test*) e ASTM D-1654 (Método de teste padrão para Avaliação de Corpos de Prova Pintados ou Revestidos Submetidos a Ambientes corrosivos).

1.1 TEMA

Avaliação da resistência à corrosão de peças metálicas revestidas com tinta, quando expostas a uma variedade de produtos químicos agrícolas.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Ensaio de verificação de resistência química à corrosão utilizando a ureia, sulfato de amônio e ácido fosfórico como reagentes em contato com chapas de aço-

carbono SAE 1020 revestidas com pintura eletrostática, utilizando acompanhamento em intemperismo natural por 4 meses e *salt spray* em 240 horas.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Na agricultura há diversos processos que envolvem desgaste e impacto ao maquinário: exposição ao sol e outras intempéries, altas temperaturas, terrenos acidentados, produtos químicos e outras situações (Sachelli, 2024). Assim, há muita incidência de corrosão nos equipamentos agrícolas, e o processo corrosivo tem acarretado uma série de problemas (Gentil, 2022). Os prejuízos causados pelos danos de corrosão, do ponto de vista econômico, atingem custos extremamente altos, tanto diretos como indiretos, resultando em consideráveis desperdícios de investimentos, e acidentes com perdas, provocadas por contaminação, poluição e falta de segurança dos equipamentos (Orisanmi *et al.* 2017).

A exposição constante do maquinário agrícola a insumos químicos, especialmente fertilizantes, destaca a relevância de compreender a corrosividade desses produtos. A capacidade de corrosão dos fertilizantes varia conforme o tipo de nutriente, podendo impactar qualquer peça metálica em contato com eles. Entre eles, o sulfato de amônio e o ácido fosfórico se destacam como os mais corrosivos, enquanto a ureia, considerada menos agressiva entre os nitrogenados, apresentando baixa ou nenhuma corrosão ao entrar em contato com o aço (Borges e Silva, 2009).

Além disso, estudos específicos sobre a interação desses insumos com componentes metálicos ainda são escassos, prejudicando a elaboração de esquemas de pintura eficientes para a proteção contra a corrosão química.

Considerando a importância desse estudo, surge a necessidade da seguinte investigação: Qual é o impacto corrosivo de insumos químicos usados na agricultura em contato com peças metálicas de máquinas agrícolas?

1.4 JUSTIFICATIVA

Os problemas com corrosão ocorrem frequentemente em muitos lugares e as perdas econômicas são um fator de grande importância a ser considerado já na fase de projeto, para evitar ou minimizar futuros processos corrosivos. Estudos realizados mostraram que em 2022 o custo direto anual da corrosão nos Estados Unidos, chegando ao montante de 5,427 bilhões de dólares americanos (equivalente a 2,1% do produto interno bruto, PIB, na época). Esse cálculo englobou os custos associados

a materiais resistentes à corrosão, manutenção, substituição de peças e equipamentos afetados pela corrosão (Gentil, 2022).

No Brasil, ao longo da década de 2000, o custo total da corrosão foi estimado entre 3,5% e 4,0% do PIB, com a possibilidade de economia de até 20% mediante a adoção de materiais mais resistentes e a implementação de técnicas apropriadas desde a fase de projeto até a manutenção de estruturas e equipamentos (Gentil, 2022).

Diante disto, nota-se a necessidade de criar uma solução para minimizar os efeitos da corrosão. Quando se fala de qualquer equipamento agrícola, deve-se avaliar suas características particulares, já que fertilizantes, silagem, herbicidas e pesticidas, lamas e adubos, contêm conteúdo corrosivo, além de as atividades agrícolas serem ao ar livre, expostas a vários elementos e condições ambientais, situação que maximiza a corrosão (Borges e Silva, 2009).

Em empresas do setor metalomecânico que produzem equipamentos e implementos agrícolas isto se torna um problema também: a quantidade de retrabalhos e suporte técnico de pós-vendas necessários geram custos que poderiam ser evitados com um bom esquema de pintura. Além da grande deficiência de informações sobre os efeitos de insumos químicos agrícolas em contato com aço pintado, considera-se que a pintura é o principal processo utilizado para prevenção da corrosão, porém muitas vezes o processo não é estruturado de forma correta para o uso final da peça, o que possibilita que haja grande índice de corrosão quando o equipamento agrícola começa seu uso no campo.

Tendo em vista o impacto da corrosão química, principalmente em maquinários agrícolas, se torna necessário haver estudos nacionais sobre as condições que causam esses efeitos, para que as indústrias possam e tenham em mãos o conhecimento técnico para melhor estruturar seus processos contra corrosão.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo geral realizar ensaios de resistência contra corrosão causada pelo contato de insumos agrícolas químicos em chapas de aço-carbono SAE 1020 que foram revestidas com pintura eletroestática.

1.5.2 Objetivos específicos

- Realizar testes em atmosfera controlada (*Salt Spray*) por 240 horas;
- Verificar a resistência contra intemperismos pelo período de 4 meses;
- Realizar testes de espessura de película, aderência e resistência química;
- Classificar a corrosão causada pelas diferentes exposições;
- Avaliar o potencial corrosivo de diferentes insumos químicos sobre o aço revestido;

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentado a revisão de literatura, que abordará os fundamentos teóricos essenciais para a compreensão do estudo sobre a resistência à corrosão em chapas de aço-carbono SAE 1020 com pintura eletrostática. Serão apresentados os tópicos: tipos de aço e suas propriedades específicas, os diferentes tipos de corrosão e seus mecanismos de ação, bem como as condições ambientais que influenciam este processo, especialmente no contexto agroindustrial. Também será explorada a composição química e a corrosividade de insumos agrícolas, como sulfato de amônio, ácido fosfórico e ureia, além das técnicas de proteção contra corrosão, com ênfase nos revestimentos industriais e métodos de aplicação, como pintura eletrostática e revestimento primer. Finalmente, serão discutidos os principais métodos de ensaio para avaliar a resistência à corrosão, destacando as normativas utilizadas no estudo, como ASTM B-117 e ASTM D-1654.

2.1 INSUMOS AGRÍCOLAS

A eficiência agrícola é melhorada através da introdução de implementos agrícolas no campo. Na agricultura de precisão, a utilização de insumos agrícolas é necessária para combater pragas, recuperar o solo e reduzir gastos com água (TOTV, 2022).

Os fertilizantes são produtos químicos administrados às plantas com a intenção de promover o crescimento. Geralmente são aplicados via solo ou por pulverização foliar. Os fertilizantes normalmente fornecem em proporções variáveis os três principais nutrientes da planta (nitrogênio, fósforo e potássio) e os nutrientes secundários da planta (cálcio, enxofre, magnésio, ferro, etc) (Eker e Yuksel, 2005).

2.1.1 Sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄)

O sulfato de amônio é um sólido, com forma de grânulos ou cristais. Tem cor branca, é inodoro e é um composto inorgânico usado como fertilizante. Contém 21% ponderal de azoto sob a forma de íons de amônio e 24% de enxofre sob a forma de íons de sulfato. O sulfato de amônio ocorre naturalmente como um mineral raro. Contém 20% de nitrogênio e 22% de enxofre em sua composição. É um produto higroscópico e solúvel em água, álcool e benzina (Avanzi Química, 2024).

Este sal é utilizado na agricultura como fertilizante para reposição de nitrogênio e enxofre aos solos cultivados. Na indústria de curtimento de couro, ele é usado para remover limo do couro no processo de curtimento do couro; na indústria têxtil em tingimentos de tecidos tinturas, o sulfato de amônio regula a difusão do corante para a fibra têxtil; na indústria alimentícia, como regulador de acidez e conservante em pães e massas e como ativante no processo fermentativo, agindo como nutriente para leveduras; alimentação de animais, como suplemento de nitrogênio; tratamento de efluentes, atua como floculante e desinfectante; farmacêutica, usado como purificador de proteínas; Inibidor de corrosão nas refinarias de petróleo; manufatura de explosivos (Avanzi Química, 2024).

2.1.2 Ácido fosfórico (H_3PO_4)

O ácido fosfórico é um importante produto químico industrial utilizado como intermediário na indústria de fertilizantes, no tratamento de superfícies metálicas na indústria metalúrgica e como aditivo na indústria alimentícia. Muitas formas de corrosão, principalmente localizada, são encontradas nas plantas e instalações de produção de PA, como corrosão-erosão, corrosão seletiva, pite, fissuração por corrosão sob tensão, corrosão intergranular e corrosão em alta temperatura (Schorr e Valdez, 2016).

O ácido fosfórico é obtido a partir de um fosfato tri cálcico de origem mineral, que pode, por exemplo, estar presente na apatia. A rocha sedimentar ou magmática é submetida a um processo denominado de “via úmida”, em que se aplica o ácido sulfúrico sobre ela e forma-se o ácido fosfórico e outros subprodutos como o $CaSO_4$ e o H_2SiF_6 . Posteriormente, passa-se por um processo de purificação para retirar as impurezas e materiais sólidos (Schorr e Valdez, 2016).

2.1.3 Ureia (NH_2CONH_2)

A ureia é um tipo de fertilizante que desempenha um papel crucial no fornecimento de nitrogênio às plantas. Este composto é altamente volátil. Quando as plantas carecem de nitrogênio, sua vitalidade pode diminuir perceptivelmente. Geralmente, a deficiência desse elemento pode ser identificada pela aparência das plantas. É classificada como um fertilizante nitrogenado, o que significa que fornece um tipo de nitrogênio facilmente assimilável pelas plantas. Embora o nitrogênio seja

abundante na atmosfera, para que as plantas possam utilizá-lo, ele precisa ser transformado em uma forma "sólida" (Agroabudo, 2024).

De modo geral, as fontes nitrogenadas mais empregadas apresentam alta solubilidade, elevado índice salino, alto índice de acidez e, muitas vezes, ausência de macronutrientes secundários. A ureia, que é a fonte mais empregada em razão do menor preço, apresenta menor índice salino/unidade do nutriente entre as fontes mais empregadas (EMBRAPA, 2011).

2.2 TIPOS DE AÇOS

Os aços carbono são basicamente ligas de ferro e carbono, com apenas pequenas quantidades de outros elementos presentes. Para a maioria dos aços, o teor de carbono varia até 1%. No entanto, existem alguns aços especiais em que o teor de carbono pode variar até 2%. Os aços carbono sempre contêm um pouco de manganês, silício, fósforo e enxofre, pequenas quantidades de outros elementos também podem estar presentes. O American Iron and Steel Institute (AISI) especifica que o aço carbono pode conter até 1,65 % de manganês, 0,6 % de silício e 0,6 % de cobre (Soares, 2012).

A classificação do aço se dá por diversos critérios e pelas interações entre eles. A composição química, o processamento, a microestrutura, as propriedades e as principais aplicações são usadas como critérios, entretanto, a composição química e o processamento levam a alterações na microestrutura, modificando uma possível classificação inicial (Dolbella, 2016).

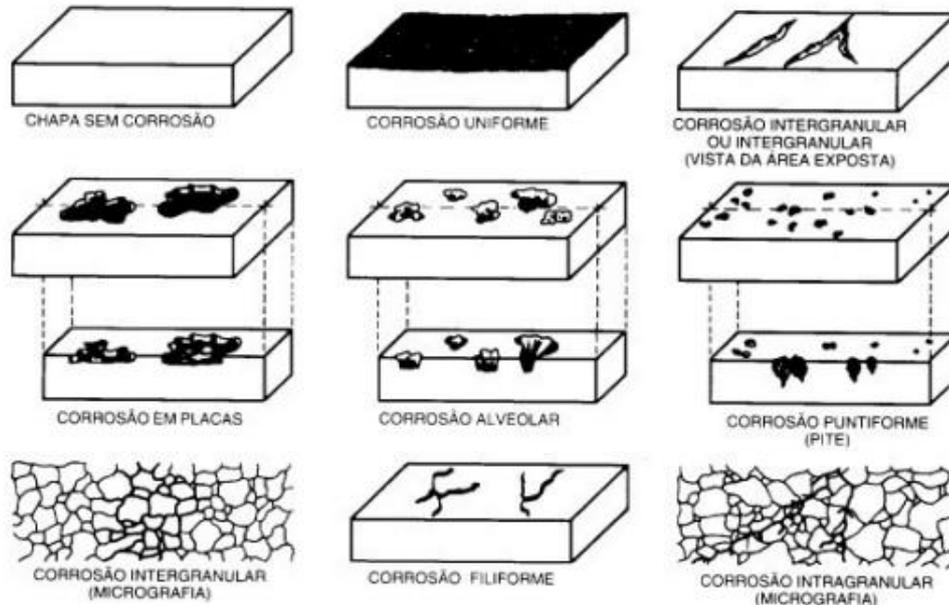
O aço-carbono SAE 1020 é um aço de baixa resistência mecânica e temperabilidade, mas com ótima forjabilidade e soldabilidade. Possui 0,2% de carbono (baixo carbono), entre 0,3% e 0,6% de mangânes, máximo de 0,03% de fósforo, máximo de 0,05% de enxofre, e entre 0,15% e 0,35% de silício; densidade de 7,85 g/cm e o equivalente grama do aço de 28,15 g/eq (equivalente ao mol/2) (Callister Jr, 2000). Sua principal aplicação é em chapas automobilísticas, perfis estruturais, placas para produção de tubos, construção civil e pontes (Rodrigues *et al.* 2014).

2.3 CORROSÃO

A corrosão pode ocorrer de diferentes formas, que podem ser classificadas considerando-se a aparência ou tipo de ataque, as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos. Pode então ser classificada pela sua morfologia, mecanismos,

fatores mecanismos, meio corrosivo, e localização do ataque (Gentil, 2022). As diferentes formas de corrosão segundo sua morfologia são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Classificação das formas de corrosão

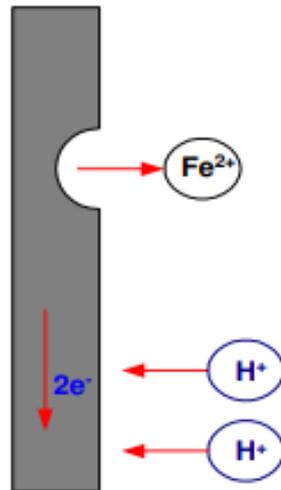


Fonte: Gentil, 2022

A corrosão do tipo uniforme acontece de modo aproximadamente uniforme em toda a superfície atacada, já a corrosão por placas forma-se em placas que se desprendem progressivamente e é comum em metais que formam película inicialmente protetora, mas que, ao se tornarem espessas, fratura e perde aderência, expondo o metal a novo ataque. Na corrosão alveolar o desgaste provocado se dá de forma localizada, com o aspecto de crateras. Na corrosão por pite o desgaste se dá de forma muito localizada e de alta intensidade, geralmente com profundidade maior que o diâmetro e bordos angulosos. A corrosão intergranular se dá quando o ataque se manifesta no contorno dos grãos, como no caso dos aços inoxidáveis austeníticos sensibilizados, expostos a meios corrosivos. E por último a corrosão transgranular se dá quando o fenômeno se manifesta sob a forma de trincas que se propagam pelo interior dos grãos do material (ABRACO, 2020).

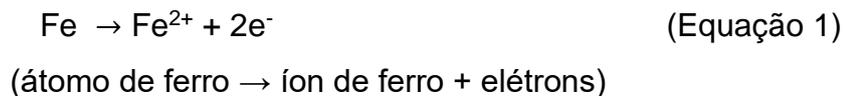
Segundo Roberge (1999) “nas reações do ferro (Fe) com água (H₂O), íons metálicos entram em solução nas áreas anódicas em uma quantidade quimicamente equivalente às reações nas áreas catódicas”. A Figura 2 represente um modelo do processo de corrosão

Figura 2 - Modelo simplificado descrevendo natureza eletroquímica do processo de corrosão metálica

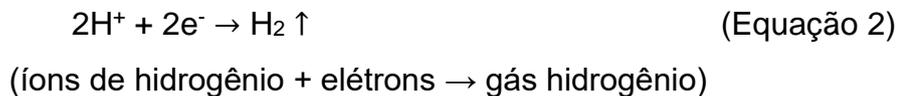


Fonte: Roberge, 1999

Assim, nos casos de ligas contendo ferro, a Equação 1 ocorre geralmente em áreas anódicas:



Em uma solução desaerada, a Equação 02 representa uma reação catódica:



Esta reação ocorre rapidamente nos ácidos, mas apenas lentamente no meio aquoso, neutro ou alcalino. A reação catódica pode ser acelerada pela redução do oxigênio dissolvido, de acordo com a Equação 03, um processo chamado de despolarização:



Já a Equação 4 mostra que oxigênio dissolvido reage com átomos de hidrogênio adsorvidos aleatoriamente na superfície do ferro, independente da presença ou ausência de impurezas no metal. Segundo Callister Jr (2000), outras reações de redução são possíveis, dependendo da natureza da solução à qual o metal está exposto. Para uma solução aquosa neutra ou básica na qual o oxigênio estiver também dissolvido:

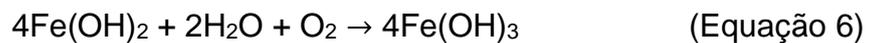


Ainda segundo Roberge (1999), a reação de oxidação procede tão rapidamente quanto o oxigênio atinge a superfície metálica. Adicionando a Equação 1 e a Equação

3, fazendo uso da reação $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$, leva à Equação 5, que pode ser visto a baixo:



Óxido de ferro hidratado $\text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$ ou o hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ compõe a camada que se opõe à difusão próxima à superfície do ferro através do qual O_2 deve difundir. O pH de uma solução saturada de $2\text{Fe}(\text{OH})_2$ é aproximadamente igual a 9,5; de modo que a superfície do ferro corroída em água pura aerada é sempre alcalina. Já a cor do $2\text{Fe}(\text{OH})_2$, embora branca quando a substância é pura, é normalmente verde ou preto-esverdeada por causa da incipiente oxidação pelo ar. Na superfície externa do filme de óxido, o acesso ao oxigênio dissolvido converte óxido ferroso em óxido férrico hidratado ou hidróxido férrico, de acordo com a Equação 6 (Roberge, 1999):



Óxido férrico hidratado apresenta cor laranja a vermelho-marrom como a maior parte das ferrugens usuais. Ela existe como $\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$ não magnético (hematita) ou como Fe_2O_3 magnético, a forma α tendo a maior energia livre negativa da formação (maior estabilidade termodinâmica). O Fe_2O_3 saturado tem pH aproximadamente neutro. A ferrita ferrosa hidratada magnética, $(\text{Fe}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O})$ frequentemente forma uma camada intermediária preta entre Fe_2O_3 hidratado e o FeO . Por esse motivo, filmes de ferrugem normalmente consistem por três camadas de óxidos de ferro em diferentes estados de oxidação (Roberge, 1999).

2.3.1 Corrosão atmosférica

A corrosão atmosférica refere-se à deterioração de um material quando exposto ao ar e seus poluentes, em vez de estar imerso em um líquido. Esse tipo de corrosão é considerado o mais prejudicial, tanto em termos de custos quanto na quantidade de material danificado, comparado a outros ambientes corrosivos (Seechurn; Wharton; Surnam, 2022).

A corrosão não pode ser definida sem uma referência ao meio ambiente. Todos os ambientes são corrosivos em algum grau, ar e umidade, água doce, salgada, atmosferas naturais, urbanas e industriais, vapor e gases, amônia, sulfeto de hidrogênio, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, ácidos e solos (Ahmad, 2006). Assim, há cinco tipos de atmosferas corrosivas, que apresentam agressividade diferentes para os materiais metálicos:

- Rural: caracterizada pela ausência de contaminantes químicos fortes, podendo apresentar poeira orgânica e inorgânica. Os principais constituintes desta atmosfera são elementos gasosos, como o O₂ e CO₂ e a umidade (Diógenes, 2023).
- Urbana: esta atmosfera é caracterizada pela presença de fumos e sulfatos provenientes da combustão. Quando na presença de alta umidade relativa e condensação, pode estabelecer elevada taxa de corrosão, pois promove uma interação mais intensa dos contaminantes nas estruturas metálicas (Diógenes, 2023).
- Marinha: carregada com partículas de NaCl trazidas pelos ventos e que, na presença de umidade, se dissociam em íons Na⁺ e Cl⁻, afetando a condutividade do filme de eletrólito sobre o metal, aumentando a solubilidade dos produtos de corrosão e causando a destruição de filmes passivos (Lazorenko; Kasprzhitskii; Nazdracheva, 2021).
- Industrial: caracterizado pela elevada deposição de SO₂ resultante da queima de combustível fóssil. Na presença de umidade, o SO₂ reage com a água formando ácido sulfúrico. Este ácido em contato com a superfície metálica, intensifica o processo corrosivo do mesmo (Gentil; Carvalho, 2022).
- Marinho-industrial: a presença de íons cloretos e compostos de enxofre (SO₂, SO₃, H₂S e outros) na atmosfera é intensa. Este ambiente é caracterizado pela presença de indústrias em regiões litorâneas (Diógenes, 2023).

Resumidamente, os principais fatores ambientais que regem a taxa de corrosão do aço na atmosfera são temperatura, tempo de molhamento, tipo e quantidade de contaminação química. O tempo de molhamento inclui não apenas o tempo em que o aço está molhado por precipitação ou orvalho, mas também o tempo acima de uma certa "umidade crítica", que pode variar de cerca de 50-70% de umidade relativa, dependendo dos contaminantes presentes no ar (Baboian, 2005).

2.3.2 A corrosão e os aspectos climático do noroeste do Rio Grande do Sul

A região noroeste do Rio Grande do Sul possui um clima subtropical úmido, caracterizado por verões quentes e invernos amenos, além de chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Essa região se destaca por suas temperaturas mais moderadas em comparação ao clima semiárido do Nordeste brasileiro, onde as chuvas são escassas e concentradas em apenas alguns meses do ano. Diferente do

clima equatorial da Amazônia, que é quente e úmido durante todo o ano, a região noroeste do Rio Grande do Sul experimenta uma variação sazonal mais pronunciada, com verões quentes e invernos que podem até registrar geadas. Comparando com o Centro-Oeste, que tem um clima tropical com uma estação seca bem definida, o noroeste gaúcho apresenta uma umidade mais constante. Dessa forma, a diversidade climática do Brasil é expressa na variação entre as regiões, com o noroeste do Rio Grande do Sul refletindo características climáticas únicas que contrastam com outras partes do país (Rossato, 2011).

A região com menor densidade populacional e extensas áreas rurais, geralmente apresenta melhor qualidade do ar em comparação com grandes centros urbanos do Sudeste, onde a poluição é mais intensa. No entanto, práticas agrícolas como a queima de restos de colheita e o uso de agroquímicos podem contribuir para a poluição do ar localmente. Esses fatores exigem manejo sustentável para minimizar impactos. Apesar disso, a poluição na região é menos significativa e mais pontual em relação a áreas industrializadas do Brasil (Rossato, 2011).

Segundo o Climate Data (2024), ano base 2021, a precipitação média entre os meses de agosto a novembro na região de Santa Maria é de 166 mm, a umidade relativa do ar 72%, e a radiação solar de $17 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$ ao dia, com 7 horas diárias de sol.

2.3.3 Corrosão causada por fertilizante

Alguns fertilizantes podem ser mais propensos à corrosão do que outros, especialmente quando reagem com a água, produzindo substâncias agressivas como amônia ou gás sulfídrico. Os fertilizantes em si não são corrosivos, a menos que estejam em contato com água ou umidade. Por exemplo, o nitrato de amônia absorve umidade apenas quando a umidade relativa do ar está acima de 60%, enquanto alguns fosfatos o fazem quando a umidade relativa está acima de 90%. No Quadro 1 é possível ver o diferente grau de corrosividade de alguns fertilizantes (Sunny e Hakkim, 2016).

Quadro 1 - Corrosividade de fertilizantes em aço galvanizado e inoxidável

Tipo de metal	Sulfato de Amônio (NH ₄) ₂ SO ₄	UREIA	Ácido Fosfórico H ₃ PO ₄
Aço galvanizado	4	1	4
Aço inoxidável	-	-	1

Legenda: Grau de corrosividade de 1 a 5.

Fonte: Adaptado de Sunny e Hakim, 2016

Fertilizantes à base de nitrogênio têm tendência à corrosão lenta quando interagem com aços carbono. Por outro lado, fertilizantes à base de fosfatos têm a propensão de formar um filme sobre a superfície metálica, protegendo-a da corrosão quando em contato com produtos à base de nitrogênio. Em ambos os casos, os fertilizantes geralmente causam pouca ou nenhuma corrosão quando estão em estado sólido. No entanto, quando são hidratados, como em ambientes de alta umidade relativa do ar, podem absorver a umidade e desencadear corrosão mais severa (Roffey, 2015). Testes de resistência à corrosão foram conduzidos por Eker e Yuksel (2005), nos quais amostras de aço com baixo teor de carbono e aço galvanizado foram imersas em soluções de fertilizantes por 500 horas à temperatura ambiente.

Conforme o Quadro 2, o aço galvanizado teve menor perda de espessura quando comparado com o aço carbono de baixa liga, provando que é mais resistente à corrosão. Observa-se também que, nas soluções saturadas, houve uma perda de espessura menor que nas soluções com menores concentrações (Eker e Yuksel, 2005).

Quadro 2 - Taxas de corrosão por fertilizantes em aço carbono e aço galvanizado

Fertilizante	Perda de espessura equivalente após um ano (µm)	
	Aço Carbono Baixa Liga	Aço Galvanizado
Nitrato de amônio Solução saturada e 63% de concentração	1,250 e 380	250 e 280
Nitrato de amônio e Cal - Solução saturada e 67% de concentração	815 e 1070	330 e 340
Fertilizante Composto (0, 24, 24) - Solução Saturada	200	60

Fonte: Adaptado de Sunny e Hakim, 2016

2.4 PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO

As diversas características encontradas em indústrias de fertilizantes, como o contato com compostos ácidos e contaminantes sólidos, além da presença de alta umidade, temperaturas elevadas, sais, sulfetos e outros agentes corrosivos, geram a demanda por materiais e revestimentos de alta performance (WEG, 2020).

O entendimento da corrosão eletroquímica se dá por três elementos principais: o metal, o oxigênio e o eletrólito. As reações eletroquímicas ocorrem na superfície do material metálico quando este está em contato com um meio contendo oxigênio. Com base nesse princípio, diversos métodos são empregados para evitar a corrosão, tais como a redução ou eliminação da umidade do ambiente, a remoção do oxigênio do eletrólito, a aplicação de revestimentos inorgânicos ou orgânicos no metal, e a utilização de inibidores de corrosão no eletrólito ou nos revestimentos (Lu *et al.* 1998).

2.4.1 Pintura industrial

Na indústria metalmeccânica, a pintura de peças metálicas é largamente empregada para conferir proteção anticorrosiva às áreas que se encontram expostas ao ambiente. O desempenho de um esquema de pintura é influenciado por fatores como o tipo de preparação da superfície aplicado ao substrato, o método de aplicação das tintas, a qualidade dos produtos e a especificação de pintura selecionada (Santos, 2018).

Os revestimentos de pintura devem ser capazes de criar uma barreira que interrompa a conexão entre o metal e o eletrólito, a fim de retardar a reação de corrosão do substrato metálico. Embora nenhum revestimento seja indestrutível, todos os revestimentos orgânicos acabarão sofrendo deterioração com o tempo. No entanto, é possível reduzir significativamente essa taxa escolhendo um revestimento de alta qualidade e/ou utilizando técnicas apropriadas de preparação e aplicação de superfície (Santágata *et al.* 1998).

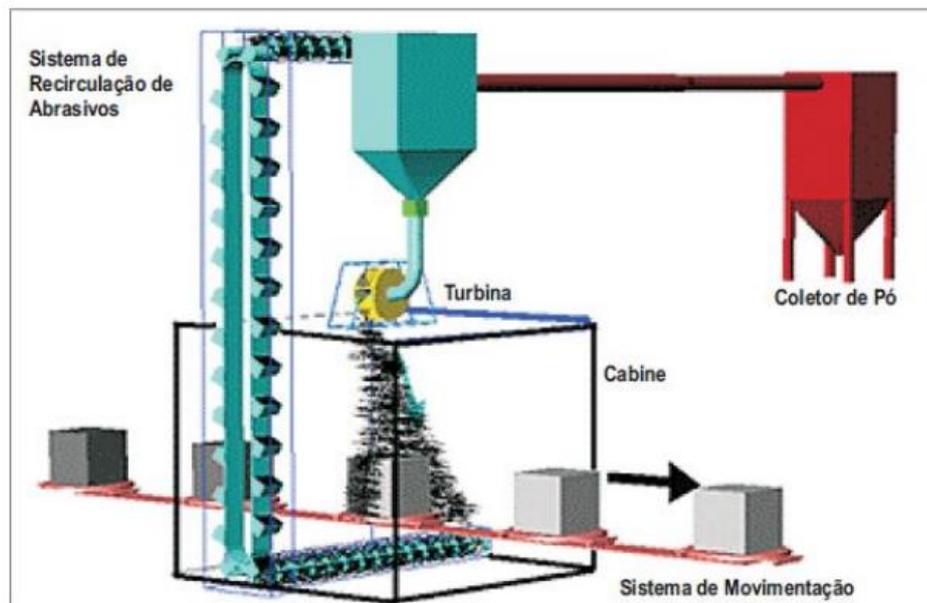
2.4.1.1 Pré-tratamento mecânico de jateamento

O jateamento com abrasivo é um método de processamento a frio no qual partículas de alta velocidade impactam a superfície de uma peça. As tensões compressivas resultantes oferecem vantagens, aumentando a resistência a diversas formas de falhas, como fadiga, fadiga por corrosão, trincas por tensão de corrosão, trincas assistidas por hidrogênio, desgaste e erosão por cavitação. Entre os benefícios

do processamento a frio estão o aumento da dureza, a resistência à corrosão, a texturização da superfície, a redução da porosidade e a verificação da aderência de revestimentos (Niosh, 1976).

Em comparação com métodos rivais, como decapagem, limpeza eletroquímica ou acabamento manual, o jateamento mecânico é mais rápido, o que reduz as horas de trabalho necessárias, além de em muitos casos, pode ser reciclado para uso futuro. Além disso, o investimento em equipamentos não é significativamente afetado por mudanças de modelo, procedimentos operacionais ou rotatividade de pessoal (Niosh, 1976). Na Figura 3 pode-se ver uma representação de um equipamento de jateamento mecânico.

Figura 3 - Equipamento de jateamento mecânico



Fonte: Sinto, 2020

O método de jateamento com granalhas, também chamado de *shot peening*, é extremamente eficaz na remoção de escamas e ferrugem das peças. Ele proporciona bons resultados em relação ao desempenho, velocidade e, especialmente, qualidade da limpeza. Durante o processo de jateamento, a superfície é deixada diretamente no metal, resultando em uma rugosidade ideal para uma melhor aderência do primer ou primeira camada de tinta (Gentil, 2011; Serizawa, 2005). A limpeza ao metal quase branco (As 2_{1/2}) é utilizada para a retirada total dos óxidos, deixando a superfície do metal completamente limpa, entrando em conformidade com a Norma SIS 055900 e ISO 8501- 1 (WEG, 2022).

Um dos materiais mais cruciais para jateamento amplamente disponíveis no mercado são as granalhas de aço. Essas partículas variam em tamanho, morfologia e dureza. Em geral, existem duas estruturas principais de granalha de aço-carbono: a angular (*grit*) e a esférica (*shot*) (Meneghel, 2017).

2.4.1.2 Revestimento por tinta primer

Um esquema de pintura anticorrosivo se constitui de três aplicações de tintas: tinta primer, tinta intermediária e tinta de acabamento. Por vezes não se faz necessária o uso da tinta intermediária, sendo substituída por mais demãos da tinta primer ou da tinta de acabamento. Primer, também conhecida como tinta de fundo ou tinta primária é a tinta que entra em contato direto com o substrato. Seu objetivo é deixar a superfície o mais regular possível, homogeneizando a textura e a cor. O processo de primer pode ser de secagem ao ar ou em estufa. Outra característica importante é o seu alto potencial de aderência. Essa característica permite que a camada final de pintura se prenda com maior facilidade, aprimorando o resultado do processo (Gentil, 2007).

Existem diversos tipos de primers utilizados na pintura industrial, cada um com características específicas: o primer epóxi oferece alta resistência química e física, ideal para ambientes industriais; o primer sintético anticorrosivo proporciona uma camada protetora contra corrosão e é aplicável em diversas superfícies; e o primer à base de zinco é utilizado para proteção catódica, especialmente em estruturas metálicas expostas a ambientes corrosivos (Gentil, 2007).

A tinta primer Politherm 25 Cinza, da marca WEG é utilizada para recobrimento de peças metálicas para uso interno; é uma tinta em pó, muito usada também como primer em processos de pintura industrial. Segundo informações do fabricante WEG (2024) sua resina é epóxi com camada da película entre 50 - 70 um com aplicação realizada com pistola eletrostática; a aderência da mesma se classifica com GR0, com nenhum deslocamento, a resistência química em câmara de *salt spray* suporta no mínimo 500 h seguindo a normativa ASTM B117.

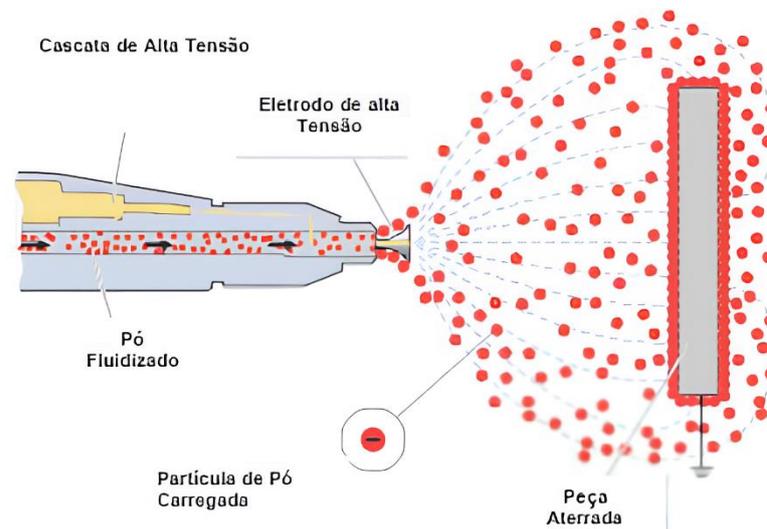
2.4.1.3 Revestimento por tinta acabamento

Segundo Nunes (2014) “As tintas industriais são composições químicas líquidas ou em pó capaz de formar uma película durante a aplicação e após a secagem e/ou cura”. A técnica de pintura em pó implica na aplicação de pequenas partículas de resina e pigmento (pó) sobre a superfície de um substrato. Essas partículas são

então submetidas ao calor para derreter e fundir-se na superfície da peça, formando uma camada de pintura contínua e uniforme. A pintura em pó proporciona excelente resistência à corrosão, impacto e abrasão, além de manter o brilho por um longo período (Soares, 2013).

Conforme ilustrado na Figura 4, os processos de pintura em pó são comumente realizados através da aplicação eletrostática. Nesse método, o pó é carregado eletricamente com cargas positivas e negativas por meio de um sistema específico. Quando a peça a ser pintada é aterrada, ocorre a atração das partículas carregadas para a superfície da peça (Soares, 2013).

Figura 4 - Esquema de aplicação de tinta pó



Fonte: WEG, 2018

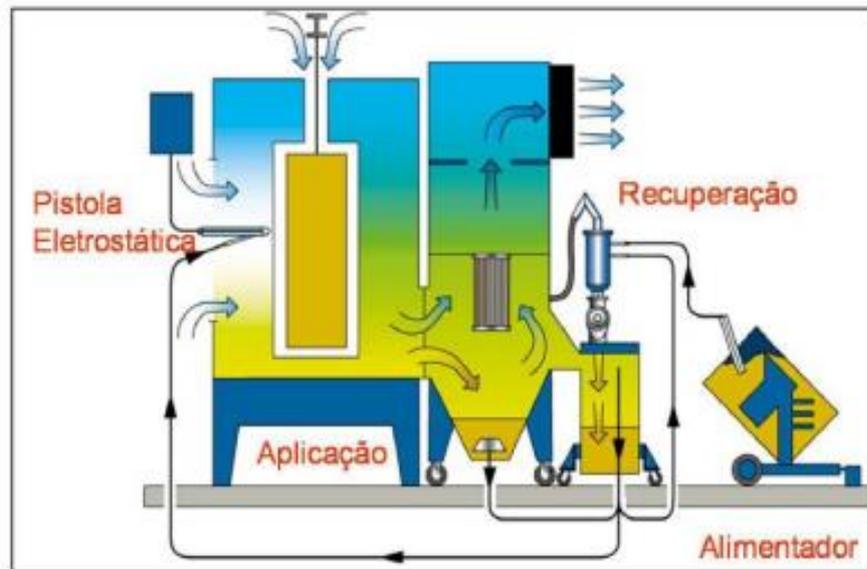
As películas das tintas em pó, quando devidamente curadas, exibem excelentes propriedades mecânicas, como alta dureza, resistência ao impacto e à abrasão, além de qualidades estéticas notáveis. Em relação à proteção anticorrosiva, podem oferecer um nível de impermeabilidade muito superior ao das tintas líquidas convencionais, mesmo com espessuras menores (Gentil, 2011; WEG, 2018).

Como a maioria dos revestimentos, a tinta em pó consiste em três componentes básicos: resina, pigmento e aditivo. Os pigmentos conferem cor ao produto, podendo ser orgânicos ou inorgânicos, enquanto os aditivos desempenham funções diversas, como controle de brilho, textura, processo de cura, entre outros (Gentil, 2011; WEG, 2018).

A Figura 5 ilustra o esquema de funcionamento de um equipamento de aplicação de pintura em pó. É possível observar o processo de aplicação do pó através

da pistola eletrostática, bem como o fluxo de recuperação do pó que não adere à peça pintada. Esse pó é direcionado de volta à pistola eletrostática e complementado por uma alimentação externa paralela (Soares, 2013).

Figura 5 - Representação de um equipamento de pintura eletrostática a pó



Fonte: Soares, 2013

Após a aplicação do *top-coat* em pó, a reação de fusão é iniciada em fornos de cura conhecidos como estufas. Essas estufas são responsáveis por gerar e manter o calor necessário para a reação química da pintura em pó. As peças devem ser expostas ao calor para que a camada de pó reaja na superfície, alcançando as propriedades especificadas. O controle preciso da temperatura e do tempo de permanência das peças na estufa é essencial para obter as propriedades químicas e mecânicas desejadas (Soares, 2013).

Para que a película de tinta cumpra a sua finalidade de proteção anticorrosiva, deve apresentar uma espessura mínima. Esta espessura é função da natureza das tintas usadas e da agressividade do meio corrosivo, e pressupõe a seleção adequada do esquema de pintura para o meio considerado (ABRACO, 2020).

As espessuras mínimas usuais recomendáveis para os diversos ambientes corrosivos, sem corrosão prévia, são mostradas no Quadro 3.

Quadro 3 - Camada de espessura recomendada para diversos ambientes

Atmosfera altamente agressiva	250 μ m
Imersão permanente (em água salgada)	300 μ m
Superfície quente	75 a 120 μ m
Atmosfera medianamente agressiva	160 μ m
Atmosfera pouco agressiva	120 μ m

Fonte: Adaptado de ABRACO, 2020

A análise visual é a melhor ferramenta de avaliação de cor e aparência, inclusive no processo produtivo da indústria. Porém, por muitas vezes ela se torna subjetiva devido à percepção humana variar de acordo com diversos fatores (fisiológicos, como sensibilidade à cor, que depende do número de células oculares funcionais ou até mesmo comportamentais, como humor, temperamento, entre outros) (Gardner, 2016).

A casca de laranja refere-se a uma textura irregular na superfície da pintura que se assemelha à pele de uma laranja. É geralmente caracterizada por pequenas elevações e depressões que criam uma aparência densa e não uniforme. Esse defeito pode ser causado por várias razões, incluindo: parâmetros inadequados de aplicação, viscosidade da tinta, temperatura e umidade. Embora não afete diretamente a resistência à corrosão, a casca de laranja pode comprometer a estética do revestimento e a percepção de qualidade do produto final (Gardner, 2016).

Segundo a fabricante WEG (2022) a tinta em pó poliéster Politherm 26 tem como função de primer e acabamento as peças; tem boa resistência ao intemperismo e ao amarelamento. Tem resistência UVA de 500 horas e resistência em *salt spray* de 500 horas (sobre aço com fosfato de zinco). E sua espessura seca deve ficar entre 60 - 80 μ m.

2.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO

A corrosão pode ser estudada de diferentes maneiras, tanto no campo (ao ar livre) quanto em laboratório. O monitoramento mais eficaz ocorre em ensaios de

campo, pois reflete as condições reais do ambiente em que vivemos, considerando fatores como períodos de chuva, seca, ventos que carregam partículas de poluição, deposição de excrementos de animais, orvalho, entre outros. No entanto, uma desvantagem desse tipo de ensaio é o tempo prolongado para obter uma avaliação precisa do desgaste causado pela corrosão. Quanto mais longo o período, que pode durar meses ou anos, mais exato será o estudo (Lopes, 2019).

Devido à demora dos ensaios de campo, opta-se frequentemente por ensaios mais curtos realizados em laboratório. Esses ensaios acelerados seguem normas técnicas, tanto nacionais quanto internacionais, que estabelecem como devem ser conduzidos. As diretrizes incluem desde a construção dos equipamentos até os parâmetros a serem seguidos durante o teste, o estado do material a ser analisado, o tempo de exposição na câmara, e as análises a serem feitas ao longo e ao final do ensaio. Esses testes ocorrem em ambientes controlados que simulam diferentes condições de corrosão em um período mais curto, como ambientes marinhos (ensaio de névoa salina acelerada), industriais (ensaio com SO₂), exposição à radiação solar (ensaio com luz UV), ou locais com alta umidade (ensaio de umidade relativa) (Lopes, 2019).

O objetivo dos ensaios acelerados não é determinar por quanto tempo um material duraria em condições controladas e converter esse tempo para o ambiente natural, mas sim avaliar a resistência dos materiais ao ataque corrosivo (Lopes, 2019).

2.5.1 Ensaio acelerado de névoa salina

O ensaio de névoa salina se baseia na norma ASTM B 117. Esta norma aborda sobre os equipamentos, procedimentos, condições necessárias para criar e manter um ambiente de teste de pulverização (nebulização) salina. O ensaio é composto por um equipamento formado por uma câmara de névoa, um reservatório de solução salina, um suprimento de ar comprimido devidamente condicionado, um ou mais bicos pulverizadores, suportes para corpos-de-prova, dispositivo para aquecimento da câmara, e os meios de controle necessários (ASTM B 117, 2003).

Para determinar o desenvolvimento de corrosão em uma área, uma arranhadura ou linha riscada é feita através do revestimento com um instrumento pontudo (definido conforme o método de Teste D 1654), de forma a expor o metal subjacente antes do ensaio. Os corpos-de-prova são suspensos entre 15° e 30° da vertical, e preferivelmente paralelos à direção principal do fluxo da névoa através da câmara,

baseado na superfície dominante sendo testada. Os corpos-de-prova são preferivelmente apoiados pela base ou pela lateral (ASTM B 117, 2003).

A solução salina é preparada dissolvendo-se 5 ± 1 partes por massa de cloreto de sódio em 95 partes de água (do tipo IV da especificação D 1193). O pH da solução salina é tal que, quando pulverizada a 35°C (95°F), a solução coletada obedece a uma faixa de pH de 6,5 a 7,2. Para o controle do fluxo de solução colocam-se pelo menos dois coletores de névoa limpos por torre de aspersão dentro da zona de exposição, de forma a que nenhuma gota da solução seja coletada pelos corpos-de-prova ou qualquer outra fonte. Para cada 80 cm^2 de área de coleta horizontal, são coletados de 1,0 a 2,0 mL da solução por hora baseado em um funcionamento médio de pelo menos 16 h. Os dispositivos coletores apropriados são funis de vidro ou plástico com os bicos inseridos através de tampas dentro de cilindros graduados, ou pratos de cristalização. O bico ou bicos são direcionados ou defletidos de tal forma que a solução espargida não caia diretamente sobre os corpos-de-prova (ASTM B 117, 2003).

Para o bom desempenho do ensaio recomenda-se que a câmara seja fechada e a pulverização esteja funcionando ininterruptamente exceto pelos curtos intervalos diários necessários para inspecionar, rearranjar ou remover amostras, para checar e preencher a solução no reservatório, e para fazer os registros necessários. Depois de decorrido o tempo estabelecido, os corpos-de-prova são removidos cuidadosamente e ligeiramente lavados em água corrente limpa com temperatura não superior a 38°C a fim de remover depósitos salinos da superfície, e então imediatamente secos. Finalizando por realizar um exame cuidadoso e imediato conforme prescrito nas especificações relativas ao material ou produto sob testes, ou de acordo com mútuo entendimento entre o comprador e o fornecedor (ASTM B 117, 2003).

2.5.2 Teste de aderência

A avaliação da aderência dos revestimentos por pintura, ao longo dos anos, tem sido realizada por diversos métodos. Os mais tradicionais são aqueles que envolvem o corte do revestimento na forma de quadrículas ou de "X", seguido da resistência do mesmo a um esforço de tração, proporcionado por uma fita adesiva apropriada. Em função da área destacada, avalia-se, através de padrões fotográficos, o grau de aderência do revestimento. Há ainda um método de corte em X cuja avaliação é feita levando-se em consideração o grau de dificuldade para o destacamento do

revestimento na interseção, e para isso utiliza-se a ponta de uma lâmina, bem como as dimensões dos fragmentos oriundos do processo (Fragrata, *et al.* 2006).

Um dos métodos mais utilizados na avaliação da aderência dos revestimentos por pintura, tanto em campo quanto em laboratório, é aquele que envolve a medição da resistência do revestimento a um esforço de tração, o qual pode ser realizado segundo as normas ISO 4624 ou ASTM D 4541, utilizando-se equipamentos especiais para tal finalidade (Fragrata, *et al.* 2006).

2.5.3 Ensaio de resistência a intempéries

O teste de corrosão atmosférica consiste em expor o material estudado à atmosfera terrestre, sendo essencial para análise do desempenho de revestimentos anticorrosivos na proteção contra corrosão de materiais metálicos em diferentes atmosferas. O teste requer longo tempo de exposição e investimento considerável, pois é necessária uma estrutura específica para a expor os materiais (Mills e Jamali, 2017).

Em seu estudo sobre o desempenho de revestimentos anticorrosivos epóxi fosfato de zinco com adição de argilas para proteção de aço-carbono. Girão (2019) observou pelos resultados de espectroscopia de impedância eletroquímica que os ensaios acelerados de corrosão ocasionaram maior degradação aos revestimentos desenvolvidos que o ensaio de corrosão atmosférica. Este fato acontece devido os materiais estarem em exposição contínua ao agente agressivo nas câmaras de ensaio acelerado, diferente do ensaio de corrosão atmosférica.

2.5.4 Ensaio de resistência química

A ISO 2812-1 é uma norma internacional que estabelece métodos para determinar a resistência de tintas e vernizes à exposição a líquidos, incluindo substâncias químicas agressivas como o hidróxido de sódio (NaOH) e o ácido sulfúrico (H₂SO₄). Este teste é amplamente utilizado para avaliar a durabilidade de revestimentos aplicados em superfícies metálicas e verificar sua capacidade de proteger o substrato contra corrosão química (ISO 2812-1, 2017).

O procedimento descrito na norma envolve a imersão de amostras revestidas em soluções químicas específicas. As concentrações dessas soluções, como 10% de NaOH ou H₂SO₄, são definidas de acordo com o objetivo do ensaio. As amostras são expostas a condições controladas de temperatura, tempo e pH, que simulam

situações reais de contato com substâncias químicas. Após o período de imersão, as amostras são avaliadas quanto a alterações visuais, como descoloração, bolhas, descascamento ou fissuras na película de tinta (ISO 2812-1, 2017).

Além da inspeção visual, o teste também pode incluir a avaliação de aderência do revestimento, verificando se a exposição aos produtos químicos afetou a integridade da película e sua ligação ao substrato. Revestimentos que apresentam degradação mínima, como ausência de bolhas, delaminação ou perda de aderência, são considerados mais resistentes (ISO 2812-1, 2017).

3. METODOLOGIA

As ciências são definidas pela aplicação de métodos científicos, porém nem todas as áreas de estudo que utilizam esses métodos são consideradas ciências. Embora o uso de métodos científicos não seja exclusivo da ciência, é essencial para o exercício da mesma (Lakatos, 2021).

Em seu sentido mais geral, o método é a ordem que se deve impor aos diferentes processos necessários para atingir um certo fim dado ou um resultado desejado. Nas ciências, entende-se por método o conjunto de processos empregado na investigação e na demonstração da verdade (Cervo; Bervian; Silva, 2014, p. 27).

Utilizando do método de abordagem mista, do tipo qualitativa e quantitativa, o presente trabalho utilizou-se do método de pesquisa descritiva-exploratória, tendo como referência as normas ASTM B-117 (*Salt Spray Test*) e ISO 2812-1 (Determinação de resistência a líquidos – Imersão em líquidos que não sejam água). Com base nisto, os procedimentos que foram utilizados são de pesquisa bibliográfica e experimental, utilizando-se de ensaios em corpos de prova de aço-carbono SAE 1020 com limpeza por jateamento abrasivo com granalha de aço e revestidos com primer + pintura eletrostática a pó. O experimento foi realizado no Laboratório de Química Geral da Faculdade Horizontina – FAHOR.

3.1 CORPOS-TESTE

Para a realização dos ensaios de *salt spray* e intemperismo natural foram utilizadas chapas de 150 mm X 75 mm com espessura de 4,75 mm em aço-carbono SAE 1020, seguindo a normativa ISO 12944-6. As peças foram cedidas por uma empresa metalmeccânica do noroeste do Rio Grande do Sul. Foram utilizados 27 corpos de prova no total, 5 de aço cru, 10 preparadas com jateamento de granalha, aplicação de primer e pintura eletrostática a pó e 10 preparadas com jateamento de granalha e pintura eletrostática a pó.

Para os testes de resistência química, foram utilizados corpos-teste de 150 mm X 100 mm e espessura de 2 mm em aço-carbono SAE 1020, seguindo a normativa ISO 2812-1. Foram utilizados 10 corpos de prova no total, 2 de aço cru, 4 preparadas com jateamento de granalha, aplicação de primer e pintura eletrostática a pó e 4 preparadas com jateamento de granalha e pintura eletrostática a pó.

Os corpos-teste foram preparados com tratamento de superfície por jateamento de granalha Sa 2_{1/2}, angular G40, como definido na ISO 8501-1 e revestimento por

primer Politherm 25 cinza e pintura eletrostática com o pó poliéster Politherm 26, e curados em estufas, conforme norma interna e procedimentos da empresa que cedeu os corpos-teste.

3.1.1 Identificação dos corpos-teste

A identificação dos corpos-teste utilizados no ensaio de intemperismo foi feita por meio de um sistema alfabético, como mostrado no Quadro 4: na nomenclatura de cada amostra a uma sequência de letras. Nele é descrito o tipo de acabamento do corpo-teste e qual substância química foi utilizada durante os testes.

Quadro 4 - Identificação dos corpos-teste em intemperismo

PN	corpo teste com granalha + primer + pó sem substância aplicada
PSA	corpo teste com granalha + primer + pó + sulfato de amônio
PAF	corpo teste com granalha + primer + pó + ácido fosfórico
PU	corpo teste com granalha + primer + pó + ureia
NA	corpo teste com granalha + pó sem substância aplicada
ASA	corpo teste com granalha + pó + sulfato de amônio
AAF	corpo teste com granalha + pó + ácido fosfórico
AU	corpo teste com granalha + pó + ureia
CN	corpo teste sem tratamento ou pintura
CSA	corpo teste sem tratamento ou pintura + sulfato de amônio
CAF	corpo teste sem tratamento ou pintura + ácido fosfórico
CU	corpo teste sem tratamento ou pintura + ureia

Já a identificação dos corpos-teste utilizados nos ensaios de *salt spray* e resistência química seguiu um padrão alfabético mais simples: letra “A” para aqueles que receberem tratamento com jateamento de granalha seguido de pintura eletrostática a pó; letra “P” para aqueles que receberam tratamento com jateamento de granalha seguido de aplicação de primer e pintura eletrostática a pó; e letra “C” para aqueles que não tiveram nenhum tipo de tratamento ou pintura.

3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À NÉVOA SALINA

Os corpos-teste utilizados nos testes de *salt spray* foram submetidos a imersão em soluções de ácido fosfórico (3,5%), ureia (3,5%) e sulfato de amônio (3,5%) por 1 hora antes do procedimento. Seguindo a ASTM B-117, foi realizado o teste de resistência à névoa salina (*salt spray*) utilizando a cabine que se encontra na Faculdade Horizontina (FAHOR). O painel pintado foi cortado com material pontiagudo (estilete) em forma de “X”, de forma que seu substrato foi exposto, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Corpo-teste pintado com corte em “X”



A névoa salina da câmara *salt spray* foi preparada com uma solução a 5% de NaCl. A temperatura foi regulada para 40 °C. Para este ensaio, foram utilizadas 6 corpos-teste preparadas com jateamento de granalha, aplicação de primer e pintura eletrostática a pó, 6 preparadas com jateamento de granalha e pintura eletrostática a pó e 6 sem nenhum tratamento ou pintura, que serviram como padrão de avaliação.

Todos os corpos-teste foram colocados ao mesmo tempo na cabine, seguindo as recomendações de espaçamento entre os mesmos. Destes, a avaliação ocorreu após 50 horas de exposição; após 100 horas, após 200 horas e após 240 horas. As avaliações que foram realizadas seguem como base a ISO 4628 e suas partes, conforme mostrado no Quadro 5.

Quadro 5 – Avaliação corpos-teste submetidos a teste de névoa salina

Avaliação	Método
Avaliação do grau de formação de bolhas (ISO 4628-2)	Visual
Avaliação do grau de ferrugem (ISO 4628 - 3)	Visual - comparação com padrões
Avaliação do grau de fissuração (ISO 4628 - 4)	Visual
Avaliação do grau de descamação (ISO 4628 - 5)	Visual

3.3 TESTE DE RESISTÊNCIA A INTEMPÉRIES

Seguindo a normativa ISO 2812-1, que fornece um meio de avaliar e analisar o desempenho básico de corrosão do substrato, pré-tratamento ou sistema de revestimento, ou combinação destes, após exposição a ambientes corrosivos e ASTM G50. Foram separados 4 corpos-teste preparados com jateamento de granalha, aplicação de primer e pintura eletrostática a pó, 4 preparadas com jateamento de granalha e pintura eletrostática a pó e 4 sem nenhum tratamento ou pintura.

Eles foram dispostos em 60° em relação a horizontal, em um suporte construído em madeira, e alocado por 4 meses no pátio da Faculdade Horizontina - FAHOR. Foi realizada a exposição por meio de pulverização dos agentes estudados (sulfato de amônio 3,5%, ácido fosfórico 3,5% e ureia 3,5%) semanalmente e as avaliações foram feitas mensalmente para anotar os resultados.

3.3.1 - Solução de ácido fosfórico (H₃PO₄) (3,5%)

A solução de ácido fosfórico foi preparada dissolvendo 35 gramas de produto PA em 1,0 L de água desmineralizada. Foi acondicionado em local em temperatura ambiente e ao abrigo da luz.

3.3.2 - Solução de ureia (NH₂CONH₂) (3,5%)

A solução de ureia foi preparada dissolvendo 35 gramas em 1,0 L de água desmineralizada. Foi acondicionado em local em temperatura ambiente e ao abrigo da luz.

3.3.3 - Solução de sulfato de amônio ((NH₄)SO₄) (3,5%)

A solução de sulfato de amônio foi preparada dissolvendo 35 gramas em 1,0 L de água desmineralizada. Foi acondicionado em local em temperatura ambiente e ao abrigo da luz.

3.4 TESTES DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO

3.4.1 Teste de aderência

Os testes de aderência foram realizados após a realização de ensaios de corrosão e seguiram a norma ISO 2409, onde foi verificado o grau de aderência em função do destacamento do revestimento ao longo dos cortes feitos em grade com espaçamento de 3 mm. O grau de deslocamento pode ser visto no Quadro 6.

Quadro 6 - Classificação dos resultados do teste de aderência

Classification	Description	Appearance of surface of cross-cut area from which flaking has occurred ^a (Example for six parallel cuts)
0	The edges of the cuts are completely smooth; none of the squares of the lattice is detached.	
1	Detachment of small flakes of the coating at the intersections of the cuts. A cross-cut area not greater than 5 % is affected.	
2	The coating has flaked along the edges and/or at the intersections of the cuts. A cross-cut area greater than 5 %, but not greater than 15 %, is affected.	
3	The coating has flaked along the edges of the cuts partly or wholly in large ribbons, and/or it has flaked partly or wholly on different parts of the squares. A cross-cut area greater than 15 %, but not greater than 35 %, is affected.	
4	The coating has flaked along the edges of the cuts in large ribbons and/or some squares have detached partly or wholly. A cross-cut area greater than 35 %, but not greater than 65 %, is affected.	
5	Any degree of flaking that cannot even be classified by classification 4.	—

^a The figures are examples for a cross-cut within each step of the classification. The percentages stated are based on the visual impression given by the pictures and the same percentages will not necessarily be reproduced with digital imaging.

Fonte: ISO 2409, 2020.

3.4.2 Teste de espessuras de película

Em conformidade com a ISO 19840 foi realizado medidas de verificação da espessura da película de tinta antes dos ensaios, com o equipamento de medição AK157, disponibilizado por uma empresa da região. O Quadro 7 mostra o plano de amostragem para medições de espessura, assim, como os corpos-teste tem menos de 1 m² foi feito 5 medições.

Quadro 7 - Plano de amostragem para medições de espessura da película

Área de inspeção (m ²)	Número mínimo de medições	Número máximo de repetições
acima de 1	5	1
entre 1 e 3	10	2
entre 3 e 10	15	3
entre 10 e 30	20	4
entre 30 e 100	30	6

Fonte: ISO 19840, 2012.

Os painéis de ensaio revestidos foram acondicionados durante duas semanas na variante climática normalizada de acordo com a norma ISO 3270 em 23 ± 2 °C e 50 ± 5 % de umidade antes dos ensaios.

3.4.3 Teste de resistência química a imersão em NaOH e H₂SO₄

O teste de resistência química à imersão em uma solução de NaOH (10%) e H₂SO₄ (10%) seguiu a normativa a ISO 2812 - 1. O ensaio foi realizado em duplicata. Antes dos ensaios, os painéis foram acondicionados por cerca de 16 horas em condições de 23 ± 2 °C e 50 ± 5 % de umidade relativa.

Uma quantidade de solução suficiente foi colocada em um recipiente apropriado. Os painéis foram suspensos de forma a não encostar no fundo do recipiente e com espaçamento mínimo de 5 mm entre si. A solução foi reposta a medida que houve evaporação da mesma. As avaliações foram feitas em 12, 19, 33 e 54 dias. Os critérios de avaliação seguiram as premissas do Quadro 5.

3.4.3.1 Solução de NaOH (10%)

A solução de hidróxido de sódio foi preparada pesando 500 gramas de NaOH e misturando com 5 litros de água destilada, de modo que a concentração final da solução fosse 10%. Ao final, foi agitado de forma que não ficassem sólidos em suspensão. Foi acondicionado em local em temperatura ambiente e ao abrigo da luz.

3.4.3.2 Solução de H₂SO₄ (10%)

Para preparar a solução de ácido sulfúrico, foi medido 230 mL de ácido sulfúrico 98% e misturado com 4,780 litros de água destilada, de forma que a solução final ficou com concentração de 10%. Ao final, foi agitado bem e acondicionado em local em temperatura ambiente e ao abrigo da luz.

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADO

Os resultados obtidos nos ensaios serão comparados e discutidos com as normativas ASTM B-117 para névoa salina, ASTM D-1654 para intemperismo, ISO 2409 para aderência, ISO 19840 para espessura de película e ISO 2812-1 para resistência química em imersão.

3.6 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E REAGENTES

- Hidróxido de sódio (NaOH);
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄);
- Ureia (NH₂CONH₂);
- Ácido Fosfórico (H₃PO₄);
- Sulfato de Amônio ((NH₄)SO₄);
- Vidrarias de laboratório;
- Cabine de *Salt Spray*;
- 32 corpos-teste de aço-carbono 1020;
- Suporte de madeira para corpos-teste;
- Estilete e fita adesiva;
- Balança analítica.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à corrosão realizados em chapas de aço-carbono SAE 1020 submetidas à pintura eletrostática e expostas a diferentes insumos químicos. A análise dos dados será conduzida de forma detalhada, com o objetivo de avaliar o desempenho do revestimento aplicado em condições adversas, conforme os parâmetros estabelecidos. A discussão dos resultados será fundamentada na literatura existente, discutindo a eficácia do esquema de pintura empregado como proteção anticorrosiva e apontando possíveis correlações, limitações observadas e implicações para o uso industrial do aço-carbono SAE 1020.

4.1 TESTE DE RESISTÊNCIA À NÉVOA SALINA

Durante o teste de resistência à névoa salina ocorreram diversos empecilhos. Antes de iniciar, o equipamento de *salt spray* foi testado de forma a garantir seu bom funcionamento; durante esse teste inicial, constatou-se que a resistência elétrica utilizada para aquecimento da câmara estava queimada, o que atrasou o início dos ensaios em alguns dias. Quando essa questão foi resolvida, com a troca da resistência elétrica por uma nova, notou-se que havia um vazamento de água no reservatório de água mesma, e se o equipamento fosse ligado, a resistência queimaria novamente.

O vazamento de água foi concertado em seguida, e os testes iniciaram de fato. Durante o acompanhamento do funcionamento do *salt spray*, em alguns momentos ele foi desligado devido a problemas de energia elétrica do local, e mal funcionamento dos bicos pulverizadores, que ficavam mal posicionados e muitas vezes não funcionavam. Por fim, após 3 dias de funcionamento, notou-se que o vazamento de água havia retornado, desta vez no reservatório de solução salina.

Devido a estas questões, além do ensaio ser atrasado em muitos dias, não foi possível chegar as 240 horas programadas, sendo possível realizar somente 50 horas de ensaio, pois o equipamento de *salt spray* necessitava de uma parada de emergência para conserto.

Os corpos-teste “P” que foram imergidos em solução de ácido fosfórico, foram os que mais apresentaram indícios de corrosão, porém que não excedem 1 mm para ambos lados a partir da incisão. Além disso, não houve perda de aderência do revestimento ao substrato nem infiltração à película.

Notou-se que a corrosão ocorreu de forma mais acentuada nos corpos-teste “P” do que nos corpos-teste “A”, como pode ser visto na Figura 7; algo inusitado, visto que na literatura de WEG, fabricante dos revestimentos utilizados neste trabalho, diz que ambos suportam pelo menos 500 horas em *salt spray*, sendo assim, o corpo-teste “P” que tem um revestimento que pode ser considerado “extra” (primer) deveria ser mais resistente.

Figura 7 – Corpos-teste com ácido fosfórico pós ensaio de *Salt Spray*



Nos corpos-teste que foi feita imersão em sulfato de amônio, também apresentam corrosão, que pode ser visto na Figura 8, porém que não excedem 1 mm para ambos lados a partir da incisão. Não houve perda de aderência do revestimento ao substrato nem infiltração à película. Os corpos-teste “A” deste ensaio não apresentaram nenhum indício de corrosão.

Figura 8 – Corrosão no corpo-teste “P” com sulfato de amônio pós ensaio de *Salt Spray*



No ensaio utilizando ureia, os corpos-teste “P” também apresentaram corrosão, com indício de deslocamento próximo a incisão. Neste caso, os corpos-teste “A” também apresentam um grau de corrosão. Ambos os casos podem ser observados na Figura 9.

Figura 9 – Corrosão no corpos-teste com ureia pós ensaio de *Salt Spray*



A literatura de Sunny e Hakkim (2016) é uma das únicas que abordam o assunto de corrosão por insumos químicos agrícolas. Nela, é trazido a corrosividade do sulfato de amônio, ureia e ácido fosfórico, porém em aço galvanizado e aço inoxidável. Mesmo não sendo os mesmos materiais do estudado neste trabalho (aço-carbono SAE 1020), percebe-se a relação do grau de corrosividade, onde os mais corrosivos são o sulfato de amônio e o ácido fosfórico, fato que também pode ser confirmado nesse ensaio.

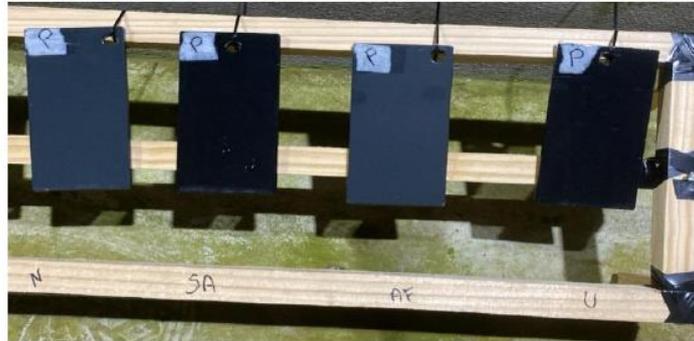
4.2 TESTE DE RESISTÊNCIA A INTEMPÉRIES

Apesar da presença de inúmeros fatores agressivos que dificultam o isolamento e a identificação de um efeito específico que venha provocar a falha de um revestimento, segundo a literatura de Lopes (2019), o ensaio de corrosão atmosférica é a maneira mais confiável de avaliar um revestimento orgânico pois o revestimento é exposto simultaneamente a todos os fatores agressivos: radiação solar, chuva, variação de temperatura e umidade e presença de poluentes atmosféricos. Por ser um ensaio em atmosfera real, o desempenho dos revestimentos costuma ser menor no ensaio de corrosão atmosférica do que nos ensaios acelerados de corrosão, visto que nestes últimos os materiais são expostos ao agente agressivo ininterruptamente.

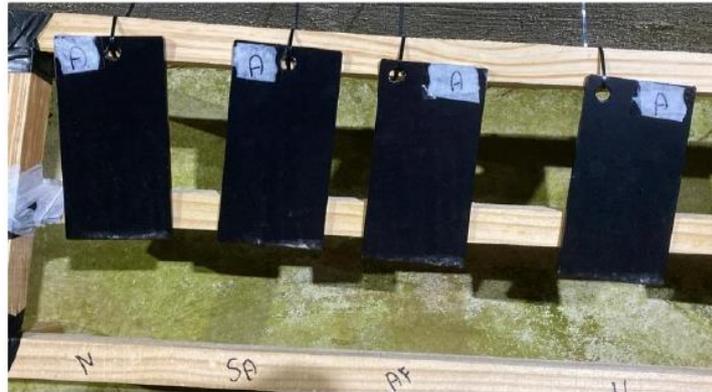
As avaliações dos corpos-testes expostos ao intemperismo foram feitas mensalmente para ter comparações sobre a evolução do processo de corrosão. Porém, foi feita uma avaliação dois dias após a exposição, que pode ser vista na Figura 10, devido a uma mudança brusca no corpo-teste CSA, onde notou-se a formação de corrosão do tipo uniforme (Gentil, 2022) com a típica coloração alaranjada, mostrando a presença de óxido férrico (Roberge, 1999). No corpo-teste CAF também houve mudanças aparentes, com a formação do aspecto esbranquiçado.

Figura 10 – Corpos-teste após 2 dias em intemperismo

Corpos-teste 'P'



Corpos-teste 'A'



Corpos-teste 'C'

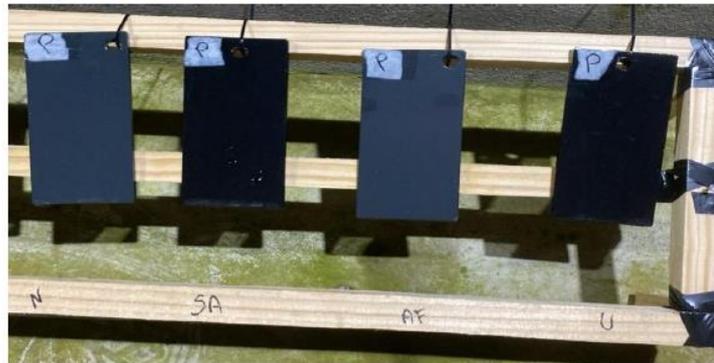


O impacto quase que imediato dos insumos químicos agrícolas sulfato de amônio e ácido fosfórico já conseguiu ser bem representado nesta avaliação, visto que os corpos-testes revestidos com algum tipo de pintura não tiveram nenhuma mudança, já os corpos-teste CN e CU tiveram pequenos indícios de corrosão por pite.

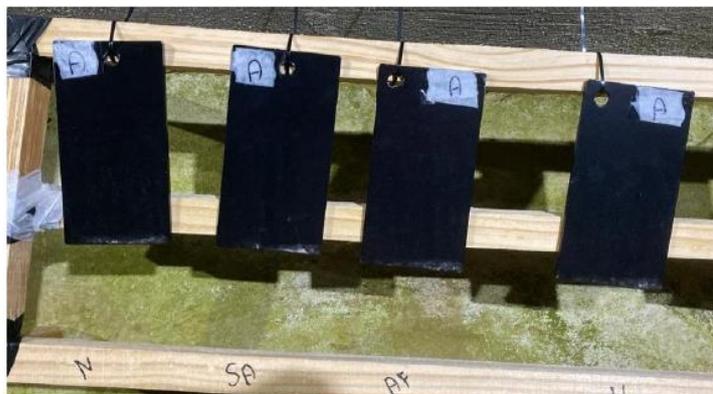
A avaliação do mês de setembro pode ser vista na Figura 11, onde o corpo-teste CSA novamente apresentou uma corrosão em processo avançado, onde o óxido de ferro formado foi transferido para o piso onde o conjunto estava alocado. O corpo-teste CAF permaneceu no mesmo estágio da primeira avaliação. Os indícios de corrosão dos corpos-teste CN e CU não tiveram mudanças significativas. Já os demais, revestidos com algum tipo de pintura, não apresentaram nenhuma mudança.

Figura 11 - Corpos-teste - avaliação de setembro

Corpos-teste 'P'



Corpos-teste 'A'



Corpos-teste 'C'



Na avaliação visual realizada no mês de outubro, que pode ser vista na Figura 12, novamente não se percebeu mudanças significativas nos corpos-testes com algum revestimento por pintura, mostrando a eficiência do revestimento contra a corrosão causada pelo intemperismo. Desta vez, notou - se um maior índice de corrosão nos corpos teste CN e CU, que antes não havia sido notado; nos corpos-testes CAF e CSA a corrosão seguiu aumentando.

Figura 12 - Corpos-teste - avaliação de outubro

Corpos-teste 'P'



Corpos-teste 'A'



Corpos-teste 'C'



Antes do início da avaliação visual do mês de novembro, percebeu-se que os corpos-teste com revestimento não estavam apresentando mudanças, então foi feito cortes em forma de “X”, de modo que imitasse a erosão mecânica que é causada pelo atrito de grãos, que podem a vir a ser usados em maquinários agrícolas multiuso (fertilização e armazenamento de grãos). O corte foi superficial, de modo que só riscasse a película de tinta. Essa avaliação pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 - Corpos-teste - avaliação de novembro

Corpos-teste 'P'



Corpos-teste 'A'



Corpos-teste 'C'



Nesta avaliação, novamente não foi percebido mudanças no aspecto visual dos corpos-teste revestidos com revestimento primer e revestimento por pintura eletrostática associados; os corpos-teste somente com revestimento por pintura eletrostática também não apresentaram mudanças no seu aspecto visual. Após a retirada dos mesmos do suporte, foi realizado os testes de fricção de algodão e o teste aderência; o qual o primeiro não apresentou nenhum vestígio de remoção de tinta, já o segundo revelou um deslocamento de classificação 1 (ISO 2409, 2020) nos corpos-teste PAF e AAF, ambos que estavam sendo expostos ao agente químico ácido fosfórico 3,5%.

Esse resultado demonstrou que o poder corrosivo do ácido fosfórico, apesar de estar em baixa concentração, é superior aos outros agentes químicos trabalhados nesse ensaio. Até mesmo o corpo-teste com revestimento primer sofreu com a agressividade do ácido.

No geral, o clima da região onde os corpos foram expostos, pode ser considerado como rural (Diógenes, 2023), já que não há incidência de grandes centros urbanos; sendo este um ambiente menos agressivo para a corrosão; em conjunto com a quantidade de precipitação, umidade e radiação solar (Climate Data, 2024) pode ser um fator que explique a baixa corrosão e degradação geral das chapas expostas ao intemperismo.

Conforme Lopes (2019), o monitoramento mais eficaz é feito por meio de ensaios de campo, pois esses refletem as condições reais do ambiente, considerando fatores como períodos de chuva e seca, ventos carregados de partículas poluentes, deposição de excrementos de animais, formação de orvalho, entre outros. No entanto, uma limitação desse tipo de ensaio é o tempo necessário para obter uma avaliação precisa do desgaste causado pela corrosão. Quanto maior a duração do estudo, que pode se estender por meses ou até anos, mais confiáveis serão os resultados obtidos. Assim, este pode ser um dos motivos dos poucos resultados obtidos, já que o tempo de estudo foi de 4 meses.

4.3 RESISTÊNCIA QUÍMICA

Para testes de resistência química a NaOH e H₂SO₄ todos os corpos-teste foram inicialmente identificados e avaliados quanto a casa de laranja, espessura da película e demais defeitos que poderiam existir, conforme Apêndice A deste trabalho.

Segundo ABRACO (2020), a espessura mínima necessária para que haja proteção anticorrosiva em um meio de atmosfera pouco agressiva é de 120 μm , assim, as medidas de espessura de película medidas nos corpos-teste antes dos ensaios, não estão totalmente de acordo, pois apresentaram medidas média de 95 μm . Referente a casca de laranja, não houve grande identificação da mesma nos corpos-teste avaliados visualmente, segundo a literatura de Garder (2017), dependendo do grau da casca de laranja da pintura, pode haver influência na corrosão da peça.

Não se notou defeitos nos corpos-teste revestidos com pintura, porém os corpos-teste em que não havia pintura, notou-se pequenos pontos pré-existent de corrosão; isso se deve em parte a qualidade do aço-carbono proveniente do fornecedor, e também a questão de armazenamento na indústria. Não se tem demais informações sobre a origem do defeito.

No início dos ensaios, os corpos-testes imersos em solução de H_2SO_4 tiveram que ser separados em dois recipientes, pois o corpo-teste sem revestimento apresentou grande deterioração do aço-carbono, causando acúmulos de óxidos e outras sujidades na solução de ácido sulfúrico. Na Figura 14 é possível observar o sistema montado para realizar o teste de resistência química.

Figura 14 - Corpos-testes no sistema de imersão em NaOH e H_2SO_4



No Quadro 8 a seguir, são descritas as transformações ocorridas nos corpos-testes que passaram pelo ensaio de resistência química a H_2SO_4 , e as respectivas imagens do processo estão no Apêndice B.

Quadro 8 - Transformação dos corpos-testes em imersão em H₂SO₄ (10%)

Dias	Revestimento primer + pintura eletrostática	Revestimento com pintura eletrostática	Sem revestimento
12	Sem mudanças no aspecto visual.	Acumulo de cristais em partes logo acima a área em contato com a solução.	Grande deterioração da chapa, com formação de óxidos azuis e cristais. Corrosão com perda de material em toda a parte em contato com a solução
19	Sem mudanças no aspecto visual.	Fuga de borda e acumulo de cristais.	Aumento da deterioração da chapa, com aumento dos óxidos azuis. Corrosão agravada com perda de material em toda a parte em contato com a solução
33	Perda de brilho e início do acumulo de cristais.	Fuga total de borda, com corrosão diretamente no aço. Placas de cristais de coloração azul/verde na parte logo acima ao contato com a solução.	Deterioração total da chapa que estava em contato com a solução.
54	Grande acumulo de cristais, perda de brilho (quando seca). Pouca remoção de tinta no teste de fricção de algodão.	Fuga total de borda, com corrosão diretamente no aço e formação de granulos de óxido de ferro por debaixo da película de tinta. Perda de brilho (quando seca) e pouca remoção de tinta no teste de fricção de algodão.	Deterioração total da chapa que estava em contato com a solução. Grandes formações de cristais de coloração amarelo/verde.

Durante os ensaios de imersão em H₂SO₄ (10%), notou-se que os corpos-testes com revestimento primer e pintura eletrostática associados, levaram mais tempo para apresentar transformações no seu aspecto, iniciando somente com 33 dias de ensaio. Até o final do ensaio, esse esquema de pintura se mostrou mais eficaz; na última avaliação, após 54 dias, os corpos-teste apresentaram perda de brilho e uma leve remoção de tinta pelo algodão, sem formação de bolhas ou trincas na película.

Já os corpos-teste em que havia somente revestimento com pintura eletrostática, desde a primeira avaliação apresentaram alterações de aspecto visual, e com apenas 19 dias de imersão, houve a fuga das bordas. Ao final do ensaio, esses corpos-teste, apresentaram corrosão do tipo alveolar (Gentil, 2022), total deslocamento da película de tinta, porém sem trincas ou bolhas na mesma, e com pouca remoção de tinta pelo algodão, indicando que a revestimento de pintura eletrostática é resistente, porém sua adesão ao corpo-teste é fraca, considerando que o único pré-tratamento aplicado é o jateamento de granalha de aço.

De acordo com o reportado na literatura a corrosão do aço carbono em soluções diluídas de H₂SO₄ apresenta reação anódica, essa reação libera íons de ferro (Fe²⁺) e libera elétrons. Ao mesmo tempo, ocorre uma reação de redução dos íons hidrogênio (H⁺) na superfície metálica, onde esses íons se combinam com os elétrons liberados pela oxidação do ferro para formar gás hidrogênio (H₂). Esse gás é liberado na forma de bolhas, situação que ocorreu nas primeiras horas de imersão do corpo-teste sem revestimento e pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Liberação de gás hidrogênio durante a reação de oxidação



Por último, durante todo o processo, é possível que ocorram reações secundárias que formam espécies complexas de ferro. Esses complexos de ferro podem atuar como catalisadores na formação de um filme protetor ou "filme passivante" na superfície metálica. Esse mecanismo começa com a adsorção do ânion sulfato (SO_4^{2-}) à superfície metálica, promovendo a formação de complexos de ferro. Esses íons Fe^{2+} formados reagem com ânions (como o próprio sulfato) ou com espécies oxigenadas presentes na solução, resultando em sais, óxidos ou hidróxidos que aderem à superfície, dificultando ou desacelerando a corrosão ao criar uma camada de barreira.

No teste de resistência química em imersão em NaOH os resultados são apresentados no Quadro 9 e as respectivas imagens estão no Apêndice B.

Quadro 9 - Transformação dos corpos-testes em imersão em NaOH (10%)

Dias	Revestimento primer + pintura eletrostática	Revestimento com pintura eletrostática	Sem revestimento
12	Sem mudanças no aspecto visual. Pequeno acúmulo de sais na parte superior ao contato com a solução.	Sem mudanças no aspecto visual.	Sem mudanças no aspecto visual.
19	Sem mudanças no aspecto visual.	Sem mudanças no aspecto visual.	Sem mudanças no aspecto visual.
33	Perda de brilho e início do acúmulo de cristais.	Perda de brilho e início do acúmulo de cristais.	Acúmulo de cristais. Sem indícios de corrosão.
54	Grande acúmulo de cristais, perda de brilho (quando seca). Grande remoção de tinta no teste de fricção de algodão.	Grande acúmulo de cristais, perda de brilho (quando seca). Grande remoção de tinta no teste de fricção de algodão.	Grande acúmulo de cristais. Sem indícios de corrosão.

Nos ensaios de imersão em NaOH (10%), os corpos-teste revestidos com primer em conjunto com a pintura eletrostática, começaram a apresentar mudanças

significativas aos 33 dias de imersão, onde apesar de não haver grandes mudanças visuais, já se percebia uma remoção de tinta no manuseio das mesmas. O que se confirmou aos 54 dias de imersão, quando as chapas foram retiradas e então feito o teste de fricção de algodão, havendo remoção de tinta parcialmente da superfície.

Os corpos-teste revestidos somente com pintura eletrostática também iniciaram suas transformações visuais aos 33 dias, porém já antes disso já havia sinais de transferência de tinta. Ao final do ensaio, o corpo-teste apresentou remoção total de tinta pelo algodão, deixando o aço totalmente exposto.

Já naqueles em que não havia nenhum revestimento, por inspeção visual não é possível observar empolamentos, corrosão, rachaduras ou descamação, somente acúmulo de cristais.

Assim, notou-se que o ensaio de imersão em meio ácido teve efeito sobre a chapa de aço, não danificando muito a película de tinta; já a imersão em meio alcalino, danificou muito a película de tinta, mas não causou nenhum defeito ou corrosão no aço.

CONCLUSÃO

Os ensaios realizados demonstraram a relevância do estudo sobre resistência à corrosão em chapas de aço-carbono SAE 1020 com pintura eletrostática, especialmente sob a exposição a insumos químicos agrícolas. O ensaio acelerado de névoa salina (*salt spray*), apesar de ser feito por apenas 50 horas permitiu classificar a agressividade dos insumos químicos testados (ácido fosfórico, ureia e sulfato de amônio). O ácido fosfórico e o sulfato de amônio apresentaram maior potencial corrosivo, enquanto a ureia mostrou-se menos agressiva, confirmando as diferenças de impacto entre os insumos. No teste de resistência a intempéries realizado ao longo de quatro meses, os resultados demonstraram que os corpos de prova revestidos com esquemas de pintura resistiram bem ao ambiente externo, enquanto os não revestidos sofreram corrosão significativa. O ensaio de resistência química por imersão, realizado com soluções de NaOH (10%) e H₂SO₄ (10%), evidenciou que em meios alcalinos, a película de tinta sofreu degradação, enquanto em meio ácido a película resistiu porém causou danos extremos no aço.

Os testes de resistência a corrosão, incluindo névoa salina, intempéries e imersão em soluções químicas, validaram a eficácia parcial do esquema de pintura que inclui o revestimento com primer e pintura eletrostática, já que o mesmo não se mostrou eficaz em todos os ensaios, como por exemplo o ensaio de resistência à névoa salina. Apesar disso, este esquema apresentou melhor desempenho em comparação aos corpos-teste em que havia somente pintura eletrostática, indicando que a combinação de jateamento de granalha e camadas protetoras é essencial para ambientes agressivos.

Também observou-se que os insumos ácido fosfórico e o sulfato de amônio causam degradação mais acentuada na pintura ao longo do tempo. Isso ressalta a importância de estudos contínuos para aprimorar os processos de revestimento, buscando alternativas mais resistentes para cenários de exposição severa. Portanto, o trabalho contribui para a melhoria dos processos industriais no setor metalmeccânico, destacando a necessidade de investimentos em tecnologias de proteção anticorrosiva para atender às demandas específicas do setor agrícola e reduzir impactos econômicos e ambientais.

Com base nos dados obtidos, conclui-se que os revestimentos testados apresentam desempenho eficaz na proteção contra a corrosão em aço SAE 1020, especialmente em condições de intemperismo e exposição a insumos químicos

menos agressivos, como a ureia. Contudo, a proteção é limitada frente a agentes químicos mais corrosivos, como o ácido fosfórico e sulfato de amônio, indicando a necessidade de aprimorar os esquemas de pintura para aplicações mais severas.

REFERÊNCIAS

ABRACO. **Influência da preparação de superfície no desempenho de tintas de fundo aplicadas a estruturas marítimas sob proteção catódica.** ITERCORR, São Paulo, 2018. Disponível em: https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2018/INTERCORR2018_051.pdf. Acesso em: 10 abr. 2024.

ABRACO. **Qualificação para inspetor de pintura industrial - módulo Corrosão.** Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://abraco.org.br/src/uploads/2020/07/Insp_pint_N1_Mod6.pdf. Acesso em: 15 Abr. 2024.

AGROABUDO. **Fertilizante Ureia.** Disponível em: <https://www.agroadubo.com.br/fertilizante-ureia-pura-46-20kg-granulada-melhor-preco-ml#:~:text=A%20Ureia%20%C3%A9%20um%20tipo,queima%E2%80%9D%20nas%20folhas%20das%20plantas>. Acesso em: 12 Abr. 2024.

AHMAD, Z. **Principles of corrosion engineering and corrosion control.** 1. ed. Oxford: Elsevier, 2006.

ASTM B 117. **Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.** 2019.

ASTM D-1654. **Standard test method for evaluation of painted or coated specimens subjected to corrosive environments.** 2016.

ASTM G50-20. **Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals.** 2020.

AVANZI QUÍMICA. **Sulfato de Amônio.** Disponível em: <https://avanziquimica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/SULFATO-AM%C3%94NIO.pdf>. Acesso em: 28 Abr. 2024.

BABOIAN, R. **Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation.** 2. ed. Baltimore: ASTM International, 2005.

BORGES, A.L.; SILVA, D.J. **Fertilizantes para fertirrigação.** 2 ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2009. cap. 2, p.20-37. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/658447/1/Fertirriacao2009.pdf>. Acesso em: 12 Abr. 2024.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução.** 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CERVO, A; BERVIAN, P. A.; DA SILVA, R. **Metodologia Científica.** 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2014.

CLIMATE DATA: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/santa-maria-4498/>

DIÓGENES, O. B. **Utilização de lignina acetilada no desenvolvimento de revestimento epóxi anticorrosivo.** Tese. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2023.

DOLABELLA, L. M. P. **Estudo eletroquímico sobre a corrosão de aço carbono e aço inoxidável em meio contendo cloreto na presença de extrato etanólico de própolis.** 2016. 140 p. Engenharia Química - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.

DURMOO, S. *et al.* **Biocorrosion of stainless steel grade 304L (SS304L) in sugar cane juice.** *Electrochimica Acta*, 2008.

EMBRAPA. **Irrigação e Fertirrigação em Fruteiras e Hortaliças.** Brasília, DF. 2011.

FRAGATA, F.; *et al.* **Ensaio de aderência de esquemas de pintura pelo método de resistência à tração.** Artigo técnico. *Revista ABRACO: corrosão e proteção*. Ano 3. Nº 12. p.23 - 30.

GARDNER, B. **QC Solutions for coatings and plastics.** 2016. Disponível em: . Acesso em: 26 out. 2024.

GENTIL, V; CARVALHO, L. J. **Corrosão.** 7^o ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GENTIL, V. **Corrosão.** 5^a ed. Rio de Janeiro. LTC, 2007.

GENTIL, V. **Corrosão.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2011.

GIRÃO, D. C. **Estudo De Revestimentos Anticorrosivos Epóxi-Fosfato De Zinco** Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

ISO 4628/Part 1-6. **Evaluation of Degradation of Paint Coatings:** Designation of Intensity, Quantity and Size of Common Types of Defect. International Organization for Standardization, 2003.

ISO 2409. **Paints and Varnishes:** Cross-Cut Test. International Organization for Standardization, 2020.

ISO 12944/ Part 6. **Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems:** Laboratory performance test methods. International Organization for Standardization, 2018.

ISO 19840. **Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems:** Measurement of, and acceptance criteria for, the thickness of dry films on rough surfaces. International Organization for Standardization, 2012.

ISO 2812/ Part 1. **Paints and varnishes - Determination of resistance to liquids:** Immersion in liquids other than water. International Organization for Standardization, 2017.

ISO 8501-01. **Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness:** Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings. 2007.

ISO 3270. **Paints and varnishes and their raw materials:** Temperatures and humidities for conditioning and testing. 1984.

JONES, D.; HACKERMAN, N. **The corrosion of fe in the nh, noa-nhg-h₂O system.** Department of Chemistry, The University of Texas. USA. Corrosion Science, vol. 8, p. 565-572. 1968.

LABIAPARI, W.S. *et al.* **Stainless steel as an antiwear material for the bio-fuel industry.** Wear. V. 302. p. 1536-1545. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164812004516>. Acesso em: 15 Mai. 2024.

LAKATOS, E. M. **Fundamentos da Metodologia Científica.** São Paulo: Atlas, 2021. Disponível em: [https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788597026580/epubcfi/6/28\[%3Bvnd.vst.idref%3Dhtml12\]!/4](https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788597026580/epubcfi/6/28[%3Bvnd.vst.idref%3Dhtml12]!/4). Acesso em: 17 Abr. 2024.

LAZORENKO, G.; KASPRZHITSKII, A.; NAZDRACHEVA, T. **Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments:** A review. Construction and Building Materials, v. 288, p. 123115, 2021.

LEITE, A. O. S. **Desenvolvimento e estudos de tintas epóxis anticorrosivas ecologicamente corretas.** Tese de Doutorado em Química Inorgânica. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

LOPES, P. H. **Desempenho de tintas anticorrosivas em revestimento de aço-carbono SAE 1020.** Universidade Federal do Ceará. Monografia bacharelado Química Industrial. Fortaleza. 2019.

LU, W. K. *et al.* **Corrosion inhibition of metals by conductive polymers.** New York: T.A. Skotheim, 1998.

MENEGHEL, L. **Aproveitamento De Resíduos De Granalha De Aço-Carbono Por Metalurgia Do Pó.** Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.

MILLS, D. J.; JAMALI, S. S. **The best tests for anti-corrosive paints and why : A personal viewpoint.** Progress in Organic Coatings, v. 102, p. 8–17, 2017.

NIOSH. **Abrasive blasting operations: engineering control and work practices manual**. Public Health Service: Washington. 1976.

NUNES, L. D. P.; LOBO, A. C. O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2014.

ORISANMI, B. O. *et al.* Cost of Corrosion of Metallic Products in Federal University of Agriculture, Abeokuta. **International Journal of Applied Engineering Research**, India, V. 12, nº 24, p. 14141 - 14147, 2017.

SANTÁGATA, D.M; SERÉ, P.R; ELSNER, C.I; SARLI, A.R. **Evaluation of the surface treatment effect on the corrosion performance of paint coated carbon steel**. Progress in Organic Coatings, v. 33, n. 1, Jan. 1998.

ROBERGE, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering**. New York: McGrawHill, 1999.

RODRIGUES, Karina Vilela. **Efeitos da fertirrigação sobre corrosão em aço galvanizado utilizado em pivô central**. Tese Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Lavras-MG. 2019.

RODRIGUES, L. *et. al.* **Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060**. Cadernos UniFOA Especial, Volta Redonda, v. 1, n. 2. 2014.

ROFFEY, P. **Corrosion-initiated rotating bending fatigue failure of a fertilizer conveyor belt head roller**. J. Fail Anal. and Preven., v. 15, jan. 2015.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011.

SUNNY, C. S. A. C.; HAKKIM, V. M. A. **Fertirrigation automation system for poly houses**. **International Journal of Engineering Science and Computing**, v. 6, n. 11, Nov. 2016.

SCHORR, M. e VALDEZ, B. **A indústria do ácido fosfórico: equipamentos, materiais e corrosão**. Avaliações de corrosão, vol. 34, p. 85-102. 2016.

SACCHELLI. **Aço Carbono**. Disponível em: <https://sacchelli.com.br/aco-carbono/>. Acesso em: 13 Abr. 2024.

SANTOS, I. S. S. **Influência da preparação de superfície no desempenho de tintas de fundo aplicadas a estruturas marítimas sob proteção catódica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SEECHURN, Y; WHARTON, J. A.; SURNAM, B. Y. R. **Mechanistic modelling of atmospheric corrosion of carbon steel in Port-Louis by electrochemical characterisation of rust layers**. Materials Chemistry and Physics, v. 291, p. 126694, 2022.

SERIZAWA, G. H. R.; GALLEGOS, J. **Análise estrutural da aplicação do processo de jateamento com granalhas de aço (shoot peening) em rotores hidroelétricos.** Ilha Solteira: Unesp e ABCM, 2005.

SINTO. **Jateamento:** Introdução. Disponível em: <http://www.sinto.com.br/pdfprodutos/pro-jateamento.pdf>. Acesso em: 26 Abr. 2024.

SOARES, P. R. da S. **Estudo da corrosão em diferentes tipos de aço.** Mestrado em Engenharia Química: Instituto Superior de Engenharia do Porto. Disponível em: https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/4419/1/DM_PedroSoares_2012_MEQ.pdf. Acesso em: 04 Jul. 2024.

SOARES, B. B. **A utilização do modelo de simulação computacional para análise e modificação de um sistema de produção de pinturas automotivas Caxias do Sul.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2013.

TOTVS. **Insumos agrícolas: o que são, tipos e importância.** 29 Set. 2022. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-agricola/insumos-agricolas/#:~:text=Os%20insumos%20agr%C3%ADcolas%20biol%C3%B3gicos%20se,se%20misturam%20ao%20sol%2C%20etc>. Acesso em: 10 Abr. 2024.

UNERI, S. **Corrosion and prevention:** Corrosion Foundation Publication, Ankara, Turkey, 1998.

VREELAND D.C; KALIN, S. H. **Corrosion of metals by liquid fertilizer solutions.** The Journal of Science and Engineering. New York. p. 53-59. 1956.

VASCO, R. **Os Efeitos e Impactos Econômicos da Corrosão na Indústria.** Al'kim Químicos Brasil. 2020. Disponível em: <https://www.alkim.com.br/post/os-efeitos-e-impactos-econ%C3%B4micos-da-corros%C3%A3o-na-industria>. Acesso em: 15 Abr. 2024.

YUKSEL, E.; EKER, B. **Solutions to corrosion caused by agricultural chemicals.** Trakia Journal of Sciences, Vol. 3, No. 7. 2005.

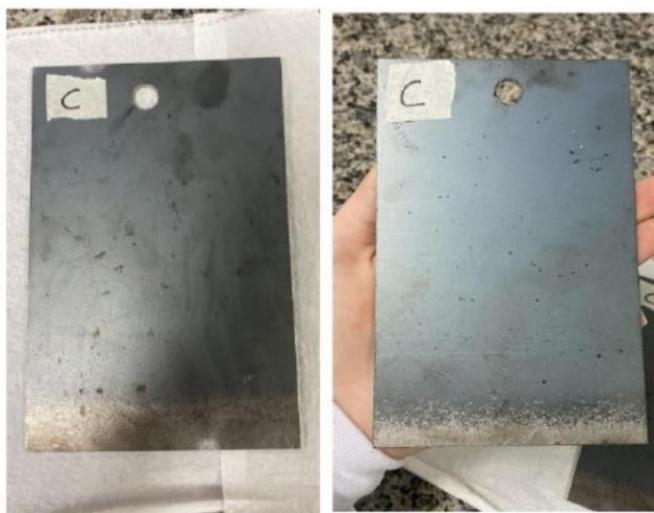
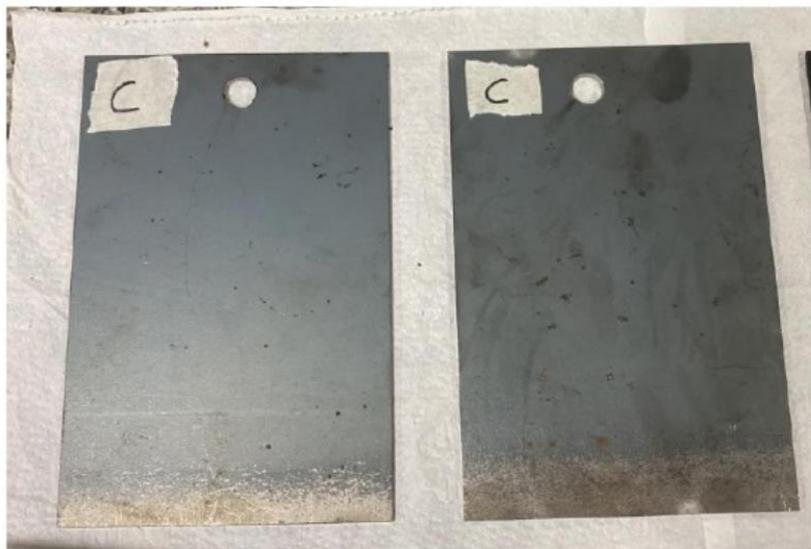
WEG TINTAS: **DT - 13: Treinamento Pintura Industrial com Tintas em Pó.** Rev. 06. Mar. 2022.

WEG TINTAS. **Pintura industrial com tintas em pó.** Disponível em: https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6e/h8b/Apostila-DT-13-Tinta-p-_2018.pdf. Acesso em: 26 Abr. 2024.

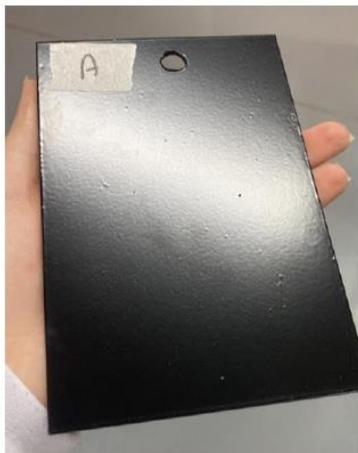
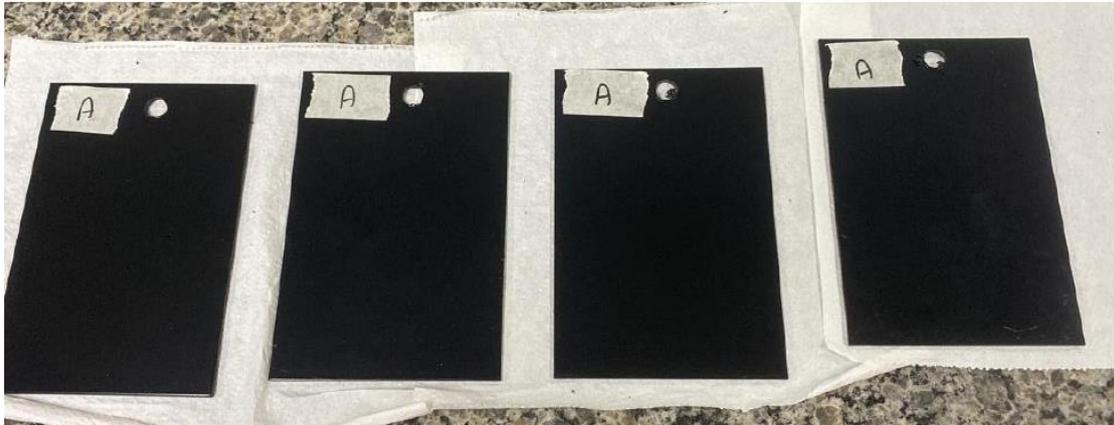
WEG TINTAS. **Boletim técnico - tinta em pó: POLITHERM 25 R LI CINZA PRIMER ACE 10629 SB.** Disponível em: https://static.weg.net/medias/documents/hd7/h58/ZBT_10007031102_pt.pdf. Acesso em: 05 Nov. 2024.

APÊNDICE A

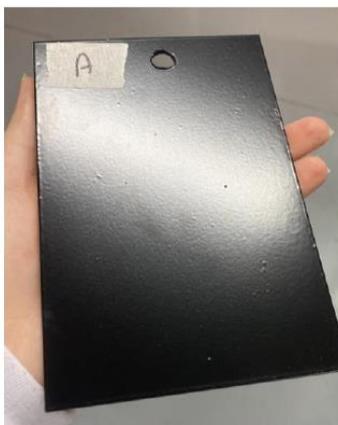
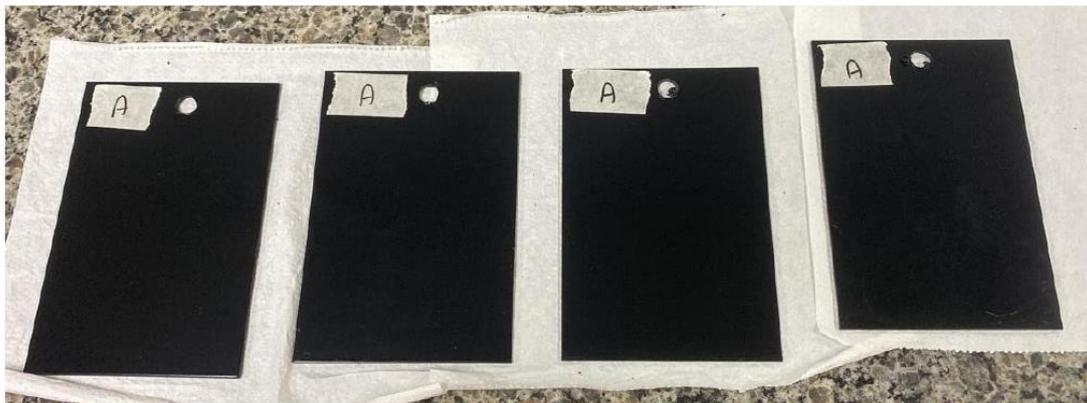
Corpos-testes sem tratamento ou pintura



Corpos-teste com tratamento por jateamento de granalha e pintura eletrostática a pó.

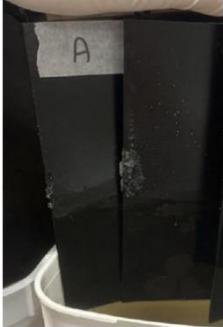
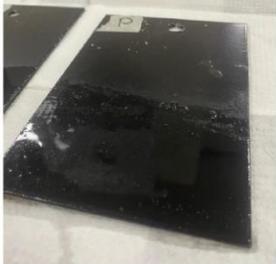
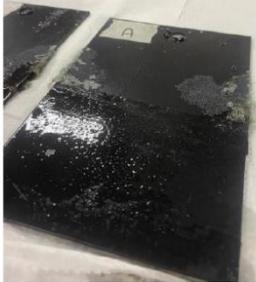


Corpos-teste com tratamento por jateamento de granalha e pintura eletrostática a pó.



APÊNDICE B

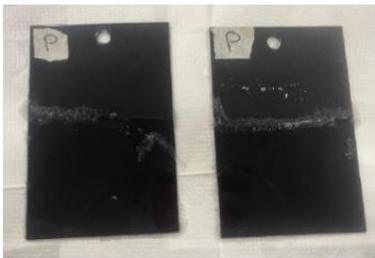
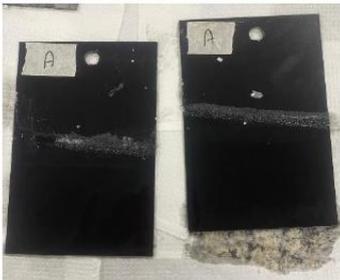
Teste de resistência química a imersão em H_2SO_4 (10%) – ISO 2812-1

Dias	Revestimento primer + pintura eletrostática	Revestimento pintura eletrostática	Sem revestimento
12			
19			
33	 	  	

54



Teste de resistência química a imersão em $NaOH$ (10%) – ISO 2812-1

Dias	Revestimento primer + pintura eletrostática	Revestimento pintura eletrostática	Sem revestimento
12	 Two black panels, each labeled with a white 'P' on a small piece of paper, are suspended by metal hooks from a wooden frame. They are partially submerged in a white bucket containing a dark liquid. The bucket has some faint markings, including the number '507'.		 A single black panel is suspended by metal hooks from a wooden frame. It is partially submerged in a white bucket containing a dark liquid.
33	 Two black panels, each labeled with a white 'P' on a small piece of paper, are shown side-by-side. The bottom portion of each panel is covered in a white, crystalline or powdery substance, indicating corrosion.	 Two black panels, each labeled with a white 'A' on a small piece of paper, are shown side-by-side. The bottom portion of each panel is covered in a white, crystalline or powdery substance, indicating corrosion.	 A single black panel is shown. The top portion of the panel is covered in a white, crystalline or powdery substance, indicating corrosion.

54

