

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DE CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À ENSAIO
DE NÉVOA SALINA UTILIZANDO O SOFTWARE IMAGEJ PARA O
PROCESSAMENTO DE IMAGENS**

VITOR BEZERRA CORRADI*

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE PROFISSIONAL EM QUÍMICA, área de concentração: QUÍMICA TECNOLÓGICA.

Orientador(a): Prof. Dr. ERNESTO CHAVES PEREIRA

*** Vínculo Empregatício: Jacto Máquinas Agrícolas S/A**

São Carlos - SP
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Química

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Vitor Bezerra Corradi, realizada em 19/09/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Ernesto Chaves Pereira de Souza (UFSCar)

Prof. Dr. Mauro Chierici Lopes (UNICENTRO)

Prof. Dr. Elton Fabiano Sitta (UFscar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Química.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta tese.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ernesto Chaves Pereira, meu muito obrigado pela orientação dedicada, confiança e apoio acadêmico que foram fundamentais para que eu pudesse desenvolver este trabalho com segurança e entusiasmo.

À minha esposa Fernanda, meu agradecimento especial pelo carinho, paciência e compreensão nos momentos em que precisei me dedicar intensamente ao mestrado. Aos meus pais, meu reconhecimento sincero por todo cuidado com as crianças nos dias em que precisei me ausentar, e por terem me dado a base e os valores que me trouxeram até aqui. Aos meus pequenos, Aurora e Augusto, vocês são a luz que me inspira e a força que me impulsiona dia após dia.

Sou grato também à Jacto, que me abriu as portas para essa oportunidade única de crescimento profissional, valorizando e apoiando o desenvolvimento de seus colaboradores, pela confiança, pela disponibilização de materiais, tempo e equipamentos, que tornaram este projeto viável.

Também deixo meu agradecimento à toda equipe do laboratório químico da Jacto, cuja ajuda nos ensaios técnicos e experimentos foram fundamentais para a elaboração desta tese.

Muito obrigado a todos.

Lista de tabelas

TABELA 1.1 - Classificação de agressividade dos ambientes em relação ao potencial corrosivo.	6
Tabela 1.2 - Gastos relacionados à corrosão por setor econômico e região.....	9
TABELA 3.1 - Planejamento experimento fatorial A.....	33
TABELA 3.2 - Experimento fatorial A - condições dos experimentos	34
TABELA 3.3 - Experimento fatorial A - codificação.....	34
TABELA 3.4 - Planejamento do experimento fatorial B.....	34
TABELA 3.5 - Experimento fatorial B - condições dos experimentos.....	34
TABELA 3.6 - Experimento fatorial B - codificação	35
TABELA 3.7 - Resultados de TH fixo x Auto TH.....	45
TABELA 4.2 - Avaliação dos efeitos das medições via processamento de imagens no experimento Fatorial A - Decapagem = cte.....	56
TABELA 4.3 - Avaliação dos efeitos das medições manuais no experimento Fatorial A - Decapagem = cte.....	58
TABELA 4.5 - Avaliação dos efeitos das medições via processamento de imagens no experimento Fatorial B – Tratamento de conversão = cte.....	66
TABELA 4.6 - Avaliação dos efeitos das medições manuais no experimento Fatorial B – Tratamento de conversão = cte.	68

Lista de Ilustrações

FIGURA 1.1 - Ambientes Rurais	7
FIGURA 4.1 - Esquema dos corpos de prova.....	32
FIGURA 4.2 - Câmara Salt spray - CCT 5000 CORR.	36
FIGURA 4.3 - Amostras na câmara de corrosão.....	36
FIGURA 4.4 - exemplos para orientação da medição manual.....	39
FIGURA 4.5 - exemplo para orientação da medição manual	39
FIGURA 4.6 - exemplo para orientação da medição manual	40
FIGURA 4.7 - CP para avaliação de Threshold	41
FIGURA 4.8 - Comparação de métodos de Threshold.....	42
FIGURA 4.9 - Comparação de métodos de Threshold binarizado.....	42
FIGURA 4.10 - CP para determinação de valores do TH.....	43
FIGURA 4.11 - CP para determinação de valores do TH - 77H.....	43
FIGURA 4.12 - CP para determinação de valores do TH - 87H	44
FIGURA 4.13 - CP para determinação de valores do TH - 97H	44
FIGURA 4.14 - CP para determinação de valores do TH - 107H.....	45
FIGURA 4.15 - Exemplo de delimitação manual da ROI.....	46
FIGURA 4.16 - Corpo de prova e ROI (region of interest).....	47
FIGURA 4.17 - Representação dos tratamentos de imagem utilizados.	48
Figura 5.1- Experimento Fatorial 2 ² A: Decapagem = Cte = Jateamento.....	51
Figura 5.2 - Experimento Fatorial 2 ² B: Tratamento de conversão = Cte = Fosfato de Zinco.....	61

Lista de Gráficos

GRÁFICO 4.1 - Dispersão dos dados das medições manuais x via processamento de imagens para o experimento fatorial A.	55
GRÁFICO 4.2 - Contribuição do quadrado dos efeitos para as medições via processamento de imagens para o experimento Fatorial A.	57
GRÁFICO 4.3 - Contribuição do quadrado dos efeitos para as medições manuais para o experimento Fatorial A.....	59
GRÁFICO 4.4 - Dispersão dos dados das medições manuais x via processamento de imagens para o experimento fatorial B.....	65
GRÁFICO 4.5 - Contribuição do quadrado dos efeitos para as medições via processamento de imagens para o experimento Fatorial B.	67
GRÁFICO 4.6 - Contribuição do quadrado dos efeitos para as medições manuais para o experimento Fatorial.....	69

RESUMO

AVALIAÇÃO DE CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À ENSAIO DE NÉVOA SALINA UTILIZANDO O SOFTWARE IMAGEJ PARA O PROCESSAMENTO DE IMAGENS. A avaliação da corrosão após os testes de *salt spray* tem tradicionalmente dependido da inspeção visual, o que pode limitar a precisão das avaliações quantitativas. Este estudo explora a aplicação da análise de imagens via processamento computacional para medir as áreas afetadas pela corrosão em placas de aço carbono, LN 38, revestidas com tintas, submetidas a testes de salt spray, conduzido conforme norma ASTM B117. Utilizando o software ImageJ, diferencia-se os produtos de corrosão das superfícies metálicas não corroídas com base nas variações de tons de cinza da imagem convertida para 8 bits e binarizadas, permitindo uma medição precisa das áreas corroídas. Dois experimentos fatoriais tipo 2^2 com replicata foram utilizados na preparação das amostras e cada painel foi avaliando conforme método 1 da norma ASTM D1654, levando ao cálculo dos efeitos das interações para intervalos de confiança de 95% para cada condição. Esses resultados computacionais foram então comparados com as avaliações feitas por um técnico experiente por meio da medição manual dos painéis. As descobertas sugerem que a análise de imagem computacional pode melhorar significativamente a resolução e a confiabilidade das avaliações de corrosão em comparação com os métodos visuais padrão, indicando seu potencial como uma ferramenta valiosa na pesquisa e avaliação da corrosão.

ABSTRACT

EVALUATION OF TEST SPECIMENS SUBJECTED TO SALT SPRAY TESTING USING IMAGEJ SOFTWARE FOR IMAGE PROCESSING. Corrosion assessment after salt spray tests has traditionally relied on visual inspection, which can limit the accuracy of quantitative evaluations. This study explores the application of image analysis through computational processing to measure the areas affected by corrosion on carbon steel plates, LN 38, coated with paints, subjected to salt spray testing conducted according to ASTM B117 standard. Using ImageJ software, we differentiate corrosion products from uncorroded metal surfaces based on variations in grayscale tones of the image converted to 8-bit and binarized, allowing precise measurement of corroded areas. Two 2^2 factorial experiments with replication were used in sample preparation, and each panel was evaluated following method 1 of ASTM D1654 standard, leading to the calculation of interaction effects with 95% confidence intervals for each condition. These computational results were then compared with evaluations made by an experienced technician through manual measurement of the panels. The findings suggest that computational image analysis can significantly improve the resolution and reliability of corrosion assessments compared to standard visual methods, indicating its potential as a valuable tool in corrosion research and evaluation.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Aspectos Gerais	1
1.1.1. Importância do estudo da corrosão.....	1
1.1.2. Perdas associadas à corrosão.....	3
1.1.3. Perdas associadas à corrosão no agronegócio	5
1.2. Revisão Bibliográfica	10
2. OBJETIVOS	15
3. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	16
3.1. Métodos de estudo da Corrosão	16
3.2. Ensaio Padronizados de Corrosão acelerada	18
3.3. Avaliação dos corpos de prova	19
3.4. O software Image J.....	20
3.5. Técnica de processamento de imagens.....	22
3.6. Desenho de experimentos	23
3.7. Processos de prevenção à corrosão.....	24
3.7.1. Revestimentos protetores.....	25
3.7.1.1. Via de aplicação: tintas líquidas x tintas pó.....	26
3.8. Preparação da Superfície	27
3.8.1. Decapagem Mecânica: Jateamento com Granalha de Aço	28
3.8.2. Decapagem Química.....	29
3.8.3. Camadas de Conversão: Princípios e Funções	30
3.8.3.1. Fosfato de Zinco.....	31
3.8.3.2. Fosfato de Ferro.....	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1. Preparação das amostras e desenho do experimento fatorial.....	32
4.2. Método de Avaliação dos corpos de prova	37

4.2.1.	Medições manuais.....	37
4.2.2.	Avaliação e medição automatizada do avanço de corrosão	40
4.2.3.	Determinação do método e parâmetros do Threshold e filtros.....	41
4.2.4.	Método automatizado	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
5.1.	Experimento Fatorial 2^2 - A	49
5.2.	Experimento Fatorial 2^2 - B	60
6.	CONCLUSÕES.....	71
7.	CONTRIBUIÇÕES PARA A PESQUISA E PERSPECTIVAS FUTURAS	72
8.	REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

1.1.Aspectos Gerais

1.1.1. Importância do estudo da corrosão

A sigla ODS, refere-se à Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e fazem parte da chamada “Agenda 2030” da ONU (<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>, 2023) Trata-se de um pacto global assinado durante a Cúpula das Nações Unidas, em 2015, por 193 países membros. A agenda é composta por 17 objetivos ambiciosos e interconectados, desdobrados em 169 metas, com foco em superar os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo, promovendo o crescimento sustentável global até 2030.

Dos 17 objetivos podemos destacar 9 que tratam de temas, como agricultura, água, energia, produção sustentável, mudanças climáticas e vida. São eles abaixo:

- ODS 2 – Fome zero e agricultura sustentável: acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável.
- ODS 6 – Água potável e saneamento: garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos.
- ODS 7 – Energia limpa e acessível: garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos.
- ODS 12 – Consumo e produção responsáveis: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.
- ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima: tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.
- ODS 14 – Vida na água: conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável.
- ODS 15 – Vida terrestre: proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as

florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da Terra e deter a perda da biodiversidade.

Todos estes temas são permeados pela tecnologia e desenvolvimento de materiais mais duradouros, que possam suportar intempéries sem sofrerem desgaste e perda de propriedades. Neste contexto o estudo da corrosão apresenta-se como um tema de extrema relevância nos desafios propostos. A corrosão de implementos agrícolas promovida por intempéries e agroquímicos utilizados nas fazendas para aumentar a produtividade acarreta custos de produção adicionais que oneram os alimentos produzidos afetando a segurança alimentar da população.

Apesar de muitas famílias ainda sofrerem devido à falta de tratamento de canalização de água e esgoto, em outros locais temos perdas consideráveis no abastecimento de água em função da deterioração das tubulações. Segundo o relatório anual das nações unidas (<https://brasil.un.org/pt-br/301975-relat%C3%B3rio-anual-das-na%C3%A7%C3%B5es-unidas-2025>), atualmente 4 bilhões de pessoas pelo mundo são afetadas pela crise global de água que as Nações Unidas estão enfrentando.

O desenvolvimento de novas tecnologias de conversão de energia depende de materiais que possam suportar as condições adversas para a produção de energia, como a abrasividade do vento, a salinidade da água salgada, ou as reações de células químicas de baterias, de forma que tenham uma vida útil longa o suficiente para viabilizar estes processos, seja em torres eólicas no meio do mar, seja em dutos de petróleo que vão sofrer rupturas ou ainda em reatores nucleares que operam em condições extremas.

E por último temos os 4 objetivos que tratam de consumo responsável, mudança global e vida terrestre e aquática e nesse ponto o desenvolvimento de técnicas que controlem a corrosão aumentando a vida útil dos materiais tem impacto direto, pois consumo responsável significa evitar desperdícios, de forma a promover uma menor necessidade da atividade de mineração que até os dias de hoje ainda causa um forte impacto ambiental nas áreas de mina.

1.1.2. Perdas associadas à corrosão

De acordo com REVIE e UHLIG (2008), as três principais razões que justificam o estudo da corrosão são: economia, segurança e conservação e manutenção.

Para reduzir o impacto econômico da corrosão, as técnicas de controle de corrosão, visam reduzir as perdas de material, bem como as perdas econômicas decorrentes da corrosão de tubulações, tanques, componentes metálicos de máquinas, navios, pontes, estruturas marinhas, e assim por diante (REVIE e UHLIG, 2008). A corrosão pode comprometer a segurança operacional de um equipamento causando falha (com consequências catastróficas), por exemplo em vasos de pressão, caldeiras, recipientes metálicos para produtos químicos tóxicos, pás e rotores de turbinas, pontes, componentes de aviões e mecanismos de direção automotiva, como por exemplo itens do sistema de frenagem ou que atuam na mudança de direção dos veículos.

A degradação metálica por corrosão constitui um desperdício não apenas do material em si, mas também dos insumos energéticos, hídricos e do capital humano empregados nos processos de fabricação e produção das estruturas metálicas. Outrossim, a necessária reconstrução ou reposição dos equipamentos afetados demanda novo dispêndio desses recursos — metal, energia, água e mão de obra — implicando em consideráveis custos adicionais ao sistema produtivo.

Segundo REVIE e UHLIG (2008), em termos de perdas econômicas, estas podem ser divididas em perdas diretas e perdas indiretas.

As perdas diretas incluem os custos de substituição de estruturas e maquinários corroídos e/ou seus componentes, como tubos de condensadores, silenciadores, estruturas, tubulações e coberturas metálicas, incluindo a mão de obra necessária para execução destes serviços. Outros exemplos são a repintura anticorrosiva e os custos de capital mais a manutenção de sistemas de proteção catódica para tubulações subterrâneas.

Em relação às perdas indiretas, estas são mais difíceis de se mensurar, mas suas consequências são tão abrangentes que uma rápida análise sobre estas

perdas típicas nos leva a inferir que seus custos são superiores aos das diretas. São exemplos de perdas indiretas:

- Paralisações de operações por falhas inesperadas.
- Perdas por vazamentos.
- Perda de eficiência de equipamentos, como trocadores de calor.
- Entupimentos ou perdas de carga em tubulações
- Contaminação de produtos
- Superdimensionamento de projetos
- Perdas de monumentos históricos
- Poluição ambiental

Vários estudos foram conduzidos ao longo das décadas tentando mensurar as perdas relacionadas aos vários fatores mencionados acima. A NACE Internacional (*National Association of Corrosion Engineers – NACE*) é uma associação líder global no desenvolvimento de normas de prevenção e controle de corrosão, certificações e educação. Esta possui inúmeras normas para o estudo e proteção no processo de corrosão. Em estudo, denominado *IMPACT* (<http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>, 2016), publicado em 2016 pela NACE (*National Assotiaemon of Corrosion Engineer, hoje AMPP*) chegou à conclusão de que o custo global da corrosão é estimado em US\$ 2,5 trilhões ao ano, o que equivale a 3,4% do PIB global (2013).

Usando práticas de controle de corrosão disponíveis, estima-se que economias entre 15 e 35% do custo da corrosão poderiam ser realizadas; ou seja, entre US\$ 375 e US\$ 875 bilhões anualmente em uma base global.

Esses custos normalmente não incluem segurança individual ou consequências ambientais. Por meio de quase acidentes, incidentes, desligamentos forçados (interrupções), acidentes, etc.

1.1.3. Perdas associadas à corrosão no agronegócio

A norma ISO 12944, foi preparada pelo Comitê Técnico ISO/TC 35, “*Paints and varnishes*”, Subcomissão SC 14, “*Protective paint systems for steel structures*”. Sob o título geral “Tintas e vernizes – Proteção anticorrosiva de estruturas de aço por sistemas de pintura anticorrosiva”, é constituída por 9 partes. Esta norma trata de temas diversos relacionados à proteção de sistemas anticorrosivos baseados em revestimentos que propiciam a proteção contra corrosão de superfícies de aço expostas a diferentes condições de agressividade atmosférica, especialmente para ambientes de extrema corrosividade, como as plataformas de petróleo offshore. A norma trata desde boas práticas de projeto, passando pela orientação na seleção de sistemas protetivos, até a classificação de ambientes e como estes influenciam na seleção de sistemas.

Podemos verificar na tabela abaixo, adaptada desta norma que classifica o ambiente rural como C2, ou baixa corrosividade.

Categoria de corrosividade	Perda de massa por unidade de superfície/perda de espessura (após o primeiro ano de exposição)				Exemplos típicos de ambientes em um clima temperado (somente informativo)	
	Aço baixo carbono		Zinco		Exterior	Interior
	Perda de Massa (g/m ²)	Perda de Espessura (µm)	Perda de Massa (g/m ²)	Perda de Espessura (µm)		
C1 - muito baixo	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	N/A	Edifícios aquecidos com atmosferas limpas, como escritórios, lojas, hotéis.
C2 - baixo	> 10 to 200	> 1,3 to 25	> 0,7 to 5	> 0,1 to 0,7	Atmosferas com baixo nível de poluição. Principalmente áreas rurais.	Edifícios não aquecidos onde pode ocorrer condensação, como armazéns, ginásios.
C3 - médio	> 200 to 400	> 25 to 50	> 5 to 15	> 0,7 to 2,1	Atmosferas urbanas e industriais com moderada poluição de dióxido de carbono. Áreas costeiras com baixa salinidade.	Salas de produção com alguma poluição do ar, como plantas de processamento de alimentos, lavanderias, cervejarias.
C4 - alto	> 400 to 650	> 50 to 80	> 15 to 30	> 2,1 to 4,2	Áreas industriais e costeiras com alta salinidade.	Instalações químicas, piscinas, estaleiros navais com alta poluição e condensação.
C5 - I muito alto (Industrial)	> 650 to 1 500	> 80 to 200	> 30 to 60	> 4,2 to 8,4	Áreas industriais com alta umidade e agressividade.	Edifícios ou áreas com quase permeabilidade e com alta poluição e condensação.
C5 - M muito alto (marítimo)	> 650 to 1 500	> 80 to 200	> 30 to 60	> 4,2 to 8,4	Áreas costeiras e offshore com alta salinidade.	Edifícios ou áreas com quase permeabilidade e com alta poluição e condensação.

Notas:
1 - Os valores de perda utilizados para as categorias de corrosividade são idênticos aos fornecidos na ISO 9223.
2 - Em áreas costeiras, zonas de humidade e zonas de alta salinidade, os limites da categoria C5-M devem ser observados. Precauções especiais devem, portanto, ser tomadas ao selecionar sistemas de revestimento de proteção para estruturas nessas áreas.

TABELA 1.1 - Classificação de agressividade dos ambientes em relação ao potencial corrosivo.

Fonte: Adaptado de ISO 12944-9:2018 - *Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures (ISO 12944-9:2018)*.

A maioria dos ambientes rurais pode sim ser incluído nesta classe, porém quando olhamos detalhadamente a diversidade de situações nas quais o maquinário rural está envolvido, é possível perceber que existem microclimas específicos que podem elevar esta classificação devido às condições adversas, como

por exemplo: estruturas de curral que estão em constante contato com fezes e urina do gado, estruturas de irrigação que permanecem constantemente úmidas, estruturas de estufas que ficam constantemente sob condições de umidade e calor e mais especificamente as máquinas que trabalham com os mais diversos agroquímicos, sejam defensivos ou fertilizantes, todos estes produtos geram situações de alta corrosividade seja para o ambiente de armazenamento seja para as máquinas que trabalham na manipulação e dispersão destes produtos.



FIGURA 1.1 - Ambientes Rurais

Muitos produtos químicos comerciais usados na agricultura, incluindo fertilizantes, produtos químicos para controle de pragas, doenças e ervas daninhas, resíduos agrícolas e lamas também são significativamente corrosivos. Os produtos químicos são frequentemente responsáveis por danificar a estruturas das máquinas agrícolas.

A extensão da corrosão de um metal depende de seu ambiente local; comportamento na atmosfera, em condições permanentemente ou intermitentemente úmidas e do microclima relacionado à utilização destes equipamentos.

Em geral, de acordo com PALGRAVE AND SMITH, 1972, citado por SUNDARAM, MANI e PARRAY, 2019 os componentes de soluções de fertilizantes são semelhantes às empregadas em fertilizantes sólidos.

Alguns fertilizantes são mais corrosivos do que outros, especialmente se se decompõem ou reagem a produzir substâncias agressivas como amônia, ácidos ou sulfeto de hidrogênio.

Segundo MULEY e PARIHAR, 2022, a corrosividade é avaliada pela decomposição ou reações que produzem compostos agressivos como amônia ou sulfeto de hidrogênio, especialmente onde íons cloreto, como cloreto de potássio ou cloreto de amônio, estão presentes ou onde existam ambientes ácidos. Nitratos de amônio e fosfato de amônio di-hidrogenado, por exemplo, são conhecidos por desencadear danos por corrosão através da hidrólise em ácidos, resultando em um declínio do pH. O efeito é mais reconhecível em soluções de fertilizantes contendo aproximadamente 15% de nitrogênio, especialmente quando metade do nitrogênio livre vem da ureia e metade através do nitrato de amônio.

Fertilizantes contendo soluções nitrogenadas de nitrato de amônio e ureia reagem lentamente com aços, de acordo com estudo citado por SUNDARAM, MANI e PARRAY, 2019, e a reação é mais agressiva em soldas e furos de parafusos. Aços soldados sofrem, particularmente, com a degradação de componentes de liga nas zonas afetadas pelo aumento de temperatura (HAZ ou ZTA) e os orifícios dos parafusos incluem fendas onde a corrosão será amplamente severa.

As soluções de fosfato contendo fosfato de amônio são muito menos agressivas ao aço, gerando uma camada passiva que protege o substrato subjacente, segundo o mesmo estudo.

Conforme demonstrado por Eker B., Yuksel E., 2005, citados por MULEY e PARIHAR, 2022, há muito menos ou absolutamente zero ferrugem quando os fertilizantes estão secos, no entanto, principalmente devido à sua natureza higroscópica, os depósitos de fertilizantes secos são sensíveis à absorção de umidade gerando um microclima corrosivo nestas zonas de acúmulo das máquinas agrícolas. Os fertilizantes tornam-se higroscópicos a uma certa umidade relativa, e a estimativa para nitrato de amônio é de 60%, tornando o composto muito corrosivo porque se transforma em líquido nessa baixa umidade relativa. Condição esta que é facilmente alcançada em noites frias onde há a formação de orvalho. Alguns outros fosfatos normalmente absorvem umidade quando a umidade relativa do ar é superior a 90%.

Os fertilizantes químicos são muito mais agressivos para corrosão em aços macios se em comparação com aços galvanizados. Prem K Sundaram, Roaf Ahmad Parray e Indra Mani, 2019, estudaram o efeito do fertilizante UAN, que é constituído de ureia e nitrato de amônio, na corrosão de aço carbono 1010 e aço inox através do método de imersão de cupons metálicos em solução utilizando para

avaliação da corrosão a técnica da perda de massa dos cupons para avaliar os efeitos corrosivos nos metais.

Os pesquisadores identificaram que a taxa de corrosão para ambos os metais iniciava alta e ia decaindo com o passar do tempo. Além disso, puderam observar que a taxa de corrosão era inversamente proporcional à concentração do fertilizante em solução. Este fato foi correlacionado pelos pesquisadores à disponibilidade de H⁺ em solução para a formação de ácido nítrico, que acelerava os processos corrosivos no aço.

No estudo IMPACT realizado pela NACE, já citado anteriormente, foi realizado um recorte na pesquisa evidenciando os impactos financeiros da corrosão na Agricultura.

Aa tabela 1.2 abaixo mostra que a nível mundial os custos relacionados à corrosão na agricultura já atingem a cifra de 152 bilhões de dólares por ano.

CUSTOS DIRETOS COM CORROSÃO						
Economic Regions	Agriculture Bilhões de U\$	Industry CoC Bilhões de U\$	Services CoC Bilhões de U\$	Total CoC Bilhões de U\$	Total GDP Bilhões de U\$	% PIB de cada região
Estados Unidos	\$ 2,0	\$ 303,2	\$ 146,0	\$ 451,3	\$ 1.672	2.7%
Índia	\$ 17,7	\$ 20,3	\$ 32,3	\$ 70,3	\$ 167	4.2%
Região Europeia	\$ 3,5	\$ 401,0	\$ 297,0	\$ 701,5	\$ 15.331	4.6%
Mundo Árabe	\$ 13,3	\$ 34,1	\$ 92,6	\$ 140,1	\$ 2.789	5.0%
China	\$ 56,2	\$ 192,5	\$ 146,2	\$ 394,9	\$ 933	4.2%
Rússia	\$ 5,4	\$ 37,2	\$ 41,9	\$ 84,5	\$ 2.113	4.0%
Japão	\$ 0,6	\$ 45,9	\$ 5,1	\$ 51,6	\$ 5.002	1.0%
Quatro Tigres Asiáticos + Macau	\$ 1,5	\$ 29,9	\$ 27,3	\$ 58,6	\$ 2.302	2.5%
Resto do Mundo	\$ 52,4	\$ 382,5	\$ 117,6	\$ 552,5	\$ 16.057	3.4%
Global	\$ 152,7	\$ 1.446,7	\$ 906,0	\$ 2.505,4	\$ 74.314	3.4%

Tabela 1.2 - Gastos relacionados à corrosão por setor econômico e região.

Fonte: Adaptado de NACE INTERNATIONAL. International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technologies Study - IMPACT. Houston, TX, 2016.

Apesar de não termos um recorte específico do Brasil ou da América do Sul, podemos estimar que as perdas da agricultura no Brasil devem ser algo similar ao observado na Índia.

Dessa forma entende-se primordial o estudo da corrosão e da avaliação as melhores formas de proteção para evitarmos a incidência desses custos no campo.

Para avançar nestes estudos a utilização de técnicas como ensaios padronizados em câmaras de corrosão acelerada são ferramentas uteis que podem ser aliadas à softwares de processamento de imagens para melhorar a avaliação dos resultados.

1.2.Revisão Bibliográfica

A avaliação da corrosão em corpos de prova submetidos à ensaios do tipo resistência à intemperismo, representa um desafio significativo na pesquisa de materiais. O teste de névoa salina é um método padronizado amplamente utilizado para condução de ensaios de corrosão acelerada para avaliação de resistência à corrosão de materiais e revestimentos, fundamentando-se em normas como a ASTM 117B, que estabelece os parâmetros de condução do teste, já as questões de avaliação das amostras após realização dos testes são tratadas em normas como a ASTM D1654, que trata de medição a partir de uma incisão, da ASTM D610-08, que trata de avaliação da área total corroída e da norma ASTM-D7087-05 que propõe um método manual utilizando imagem computadorizada, método este que segundo a própria norma “proporciona resultados mais precisos do que uma avaliação visual, mas não tão precisos quanto técnicas avançadas de imagem digital”. A norma ASTM-D7087-05 foi cancelada em janeiro de 2019, por utilizar um software tão específico que quando o detentor do software deixou o board da ASTM, a comissão julgou necessário cancelar a norma por falta de suporte ao software.

Todos estes métodos tradicionalmente dependem fortemente de análises visuais ou avaliações manuais, o que introduz incertezas significativas devido à subjetividade dos critérios de avaliação.

Portanto, há uma crescente necessidade de métodos mais precisos e confiáveis para a avaliação da corrosão, que possam superar as limitações dos métodos tradicionais.

Diversos estudos vêm sendo realizados na tentativa de associar processamento de imagens para avaliação da corrosão.

Em artigo publicado em 2022, KHAYATAZAD, M.; DE PUE, L. & DE WAELE, W. apresentaram o desenvolvimento de um algoritmo baseado em processamento automático de imagens para identificar áreas corroídas em estruturas de aço. O método proposto combina duas características visuais da corrosão: a textura rugosa da superfície e a coloração característica (tons entre vermelho e marrom) dos produtos da corrosão. Para a análise da rugosidade, é utilizada a Matriz de Co-ocorrência de Níveis de Cinza (GLCM), calculando uma métrica de uniformidade que distingue áreas corroídas pela distribuição não uniforme de tons de cinza. Para a análise da cor, o espaço de cor HSV é adotado, com a construção de histogramas que representam cores típicas da corrosão. A combinação desses dois classificadores resulta em um mapa que localiza as regiões corroídas da imagem. O algoritmo foi testado em um grande conjunto de imagens de componentes corroídos e não corroídos, obtendo alta eficiência na localização das corrosões, especialmente em condições de iluminação uniforme. Desafios permanecem em imagens com iluminação não uniforme e objetos com coloração similar à corrosão. Utilizando a métrica de desempenho recall (sensibilidade ou taxa de verdadeiro positivo: mede a proporção de exemplos positivos reais que foram corretamente identificados pelo modelo), que alcançou até 92% na melhor configuração do método.

BAGATHI, MALLIKAA., ALAPATI R. & LEMUEL et al. (2025), realizaram estudo recente avaliando o uso de redes neurais convolucionais profundas (CNNs), especialmente o modelo ResNet50, para detectar e classificar níveis de corrosão em componentes de aço expostos a ambientes agressivos. O estudo utilizou um conjunto de dados com 300 imagens categorizadas em três classes: sem corrosão, corrosão média e severa. Os resultados mostram que a abordagem baseada em deep learning é eficaz na identificação da severidade da corrosão, podendo melhorar a manutenção preditiva e o monitoramento estrutural.

ALI, JAMALUDIN, IMRAN, AYOB, AHMAD, AKHBAR, SUHRAB & RAMLI; et al.2023, realizaram uma revisão abrangente das técnicas atuais em visão computacional e processamento de imagens aplicadas à detecção, avaliação e previsão da corrosão em materiais metálicos. O artigo descreve as principais etapas do processo de detecção de corrosão via imagens: aquisição, pré-processamento, segmentação, extração de características e classificação. São detalhadas várias técnicas de segmentação, como baseadas em regiões, detecção de bordas, limiarização e redes neurais artificiais. Métodos para extração de características texturais e colorimétricas são discutidos, além de modelos preditivos divididos em conhecimento, probabilísticos, estatísticos e determinísticos. Além disso, são exploradas diversas abordagens avançadas para a captação e tratamento das imagens, como o uso de radar de penetração no solo, termografia, tomografia, análise de espaço de cor e transformação wavelet. A combinação de algoritmos de aprendizado de máquina, incluindo máquinas de vetor de suporte (SVM) e redes neurais convolucionais (CNN), é destacada por seu potencial para melhorar a precisão da detecção e classificação das áreas corroídas. O artigo conclui que não existe uma técnica única capaz de lidar com todas as condições ambientais e parâmetros de corrosão. Assim, a integração de múltiplas abordagens e a adoção de tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas, big data e sensores avançados, são recomendadas para futuros avanços. Os desafios incluem a baixa qualidade das imagens, ruído, distorção e a complexidade dos dados, que podem ser mitigados por pré-processamento e análise de dados avançada e os trabalhos mencionados dedicam-se ao monitoramento da corrosão em campo.

Apesar do grande interesse no desenvolvimento de sistemas de detecção de corrosão utilizando visão computacional e processamento de imagens, os maiores esforços nesta área dedicam-se à avaliação de corrosão em campo, em plataformas de petróleo, dutos, navio, etc. e pouco se estuda em relação à avaliação de corrosão após ensaios de intemperismo acelerado em corpos de prova.

Todavia alguns trabalhos de debruçaram sobre o tema. Uma alternativa proposta no método de preparação de corpos de prova pela norma ASTM D1654 envolve a realização de uma incisão no meio das chapas de teste. Essa abordagem visa facilitar a análise do avanço da corrosão a partir da incisão, permitindo uma melhor compreensão da migração do processo corrosivo. No entanto, apesar de

oferecer uma metodologia mais objetiva, este método ainda apresenta limitações significativas. A precisão na medição do avanço da corrosão frequentemente depende de ferramentas manuais, como paquímetros, e da acuracidade visual do avaliador, o que pode resultar em variações e incertezas nas avaliações realizadas pelos técnicos. A utilização de digitalização de imagens associada a ferramentas de medição computadorizadas, porém operadas manualmente melhora as condições de análise, mas ainda deixa na mão do ser humano a escolha dos limites de medição de cada traçado.

Estudos recentes têm demonstrado a eficácia da análise computacional na avaliação da corrosão em diferentes contextos. Por exemplo, MOREIRA (2020) estudou a mensuração da área afetada por corrosão durante ensaios de salt spray em ligas de alumínio, cobre, aço carbono e aço galvanizado, utilizando o software ImageJ para medir as áreas afetadas, diferenciando os produtos de corrosão do metal base com base nas suas diferentes cores.

YIN, JOSSELYN & CONSIDINE, et al 2021 apresentaram o desenvolvimento de um conjunto de dados único com 600 imagens de painéis de materiais corroídos, avaliados por especialistas com avaliações padronizadas de corrosão ao longo de 10 anos de testes laboratoriais. O objetivo foi criar uma base para criação de algoritmo que automatizasse a avaliação da corrosão usando técnicas de visão computacional e aprendizado profundo. Neste estudo destaca-se que a avaliação de corrosão por não especialistas, mesmo com treinamento, apresenta baixa precisão, evidenciando a complexidade da tarefa. A pesquisa explora modelos de redes neurais convolucionais (CNNs) treinados do zero, além de abordagens de aprendizado auto supervisionado, como PIRL, combinados com técnicas específicas de aumento de dados otimizadas para esse domínio. Os melhores resultados foram obtidos com modelos pré-treinados como ResNet-18 e HRNet, atingindo até 83% de acurácia na classificação das imagens segundo as avaliações especializadas. Isso demonstra o potencial do aprendizado profundo para suportar e acelerar o processo científico de avaliação da corrosão em materiais, reduzindo a necessidade de expertise extensa e economizando tempo.

Essas tentativas refletem um crescente interesse em aplicar técnicas de processamento de imagem tanto para avaliações em campo quanto para ensaios laboratoriais.

Entretanto, apesar das diversas tentativas direcionadas à avaliação da corrosão, encontramos poucos artigos que abordasse o problema sob a perspectiva da migração da corrosão a partir de uma incisão em uma chapa pintada com revestimento orgânico e quando o fazem utilizam-se de técnicas sofisticadas que exigem domínios de programação para o seu utilizador.

2. OBJETIVOS

Diante desse cenário, este projeto de pesquisa propõe-se a desenvolver uma abordagem que utiliza análise de imagem computacional para superar as limitações dos métodos tradicionais.

Pretende-se utilizar ferramentas de fácil acesso como o software gratuito IMAGEJ para o processamento de imagens e um editor de planilhas como o Excel ao invés de algoritmos complexos como redes neurais e Matriz de Co-ocorrência de Níveis de Cinza (GLCM) e um scanner para a simples digitalização de imagens ao invés de sistemas complexos para a captura de imagens.

Ao implementar técnicas de processamento de imagens na medição e quantificação das áreas corroídas, espera-se proporcionar uma avaliação mais precisa e confiável dos corpos de prova submetidos aos ensaios de corrosão de forma acessível. Ao utilizarmos ferramentas mais simples, perdemos em nível de automação, porém há ganhos na questão da acessibilidade e simplicidade do método.

3. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

3.1. Métodos de estudo da Corrosão

Dentre os diversos métodos de estudo da corrosão, alguns focam em avaliar o desempenho de revestimentos protetores, ou ligas às intempéries, com o objetivo de acelerar resultados que demorariam muito tempo para serem obtidos em exposição ao meio ambiente, estes são chamados métodos padronizados, pois existem normas que padronizam a execução destes ensaios e são amplamente utilizados na indústria. Já os métodos eletroquímicos são mais utilizados na área de pesquisa e desenvolvimento e utilizam-se de medidas de sinais elétricos gerados pelas alterações químicas do meio e que fornecem informações sobre as transformações químicas que acontecem no experimento.

- Ensaio de perda de massa: trata-se do método onde realizamos medidas de massa de cupons dos metais os quais desejamos estudar, em seguida expomos os objetos de estudo a intempéries, podendo ser ao meio ambiente real ou à ensaios acelerados de laboratório e a após decorrido o tempo desejado, realizam-se novas medidas de massa. Dessa forma, dividindo-se a diferença de massa calculada pelo tempo de exposição temos a taxa de perda deste material, nestas condições ambientais. Estes resultados são úteis para projeto de estruturas de forma a auxiliar na determinação do tempo de vida médio que se deseja para tais projetos.
- Ensaio padronizados
 - Salt spray: o ensaio conhecido névoa salina neutra ou salt spray neutro é padronizado na norma ASTM b 117, que traz todos os parâmetros para a execução do ensaio bem como concentração da solução salina, pressão de aspensão, volume de névoa, dados construtivos do equipamento. Existem variações que admitem soluções mais complexas, como por exemplos o salt spray com ácido acético.

- Cíclicos: ensaios cíclicos são ensaios de corrosão acelerados similares ao salt spray neutro, porém consideram mais fases além da fase de névoa, podendo mesclar por exemplo fases secas, com fases de alta humidade, podendo incluir em alguns casos fases com exposição à radiação UV. Um exemplo deste tipo de ensaios é o ensaio descrito na ASTM-G 85 - — modificação do ensaio de névoa salina — ciclo Prohesion. Esse ensaio usa solução de eletrólito muito mais diluída que a usado tradicional ensaio de névoa salina: 0,05% de cloreto de sódio e 0,35% de sulfato de amônio. O corpo de prova é submetido a ciclos de exposição à névoa salina, em temperatura ambiente ($\sim 24^{\circ}\text{C}$) e de secagem a 35°C . Os ciclos são alternados e têm a duração de uma hora.
- Ensaio de simples imersão: trata-se da exposição de cupons de metais aos meios que se deseja estudar o comportamento de corrosão, retirando-se da exposição os cupons em intervalos de tempo pré-determinados. Após a remoção da imersão, podemos realizar avaliações como a perda de massa e observação visual.
- Métodos visuais
 - Avaliação visual simples: permite verificar, no caso de ataque, se o mesmo foi uniforme ou localizado com formação de pites;
 - Observação ao microscópio: permite verificar ataque intergranular ou transgranular, dezincificação, profundidade de pites, espessura de camada de revestimento;
 - Processamento digital de imagens: permite quantificação de regiões imagens facilitando a classificação de áreas com ataque corrosivo;
- Acoplamento de métodos de estudos visuais e eletroquímicos: a utilização do processamento digital de imagens está auxiliando na análise e classificação no estudo de corrosão. A compreensão, por meio desta técnica, contribui para a interpretação e como ocorre o ataque no processo corrosivo.

O uso das imagens da superfície corroída fornece informações riquíssimas sobre o avanço da corrosão, na mensuração da profundidade, o tamanho/área na superfície do material que foi atacado e a sua distribuição espacial.

A análise através de imagens torna-se, assim, um artifício de caracterização tanto qualitativa quanto quantitativa para os passos iniciais e seguintes para o entendimento do processo de corrosão

O emprego das imagens para o estudo de corrosão é uma forma complementar na elucidação dos mecanismos de corrosão no material de estudo. Alguns pesquisadores começaram a trabalhar com técnicas acopladas, tendo como objetivo obter novas informações a respeito da evolução do processo corrosivo.

Zimer. (2009) utilizou técnicas eletroquímicas acopladas à microscopia óptica a fim de adquirir series temporais de micrografias durante a corrosão por pites ocasionados pela variação de potencial no aço AISI 1040 em meio aquoso contendo H_2S e Cl^- .

3.2. Ensaios Padronizados de Corrosão acelerada

A norma ASTM B117, intitulada "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus", estabelece diretrizes essenciais para a criação e manutenção de um ambiente controlado destinado à realização de testes de corrosão por névoa salina. O principal objetivo dessa norma é fornecer um método padronizado que permita a avaliação da resistência à corrosão de materiais metálicos e revestimentos de forma acelerada. A norma não especifica o tipo de espécime a ser testado, os períodos de exposição e a forma de análise das amostras, deixando estas definições a critério do usuário, desde que as condições do teste sejam mantidas conforme os parâmetros estabelecidos. Isso proporciona flexibilidade na aplicação da norma em diversas indústrias, como a de máquinas agrícolas, onde a durabilidade dos componentes expostos a ambientes agressivos é crítica.

O ambiente controlado descrito na norma é fundamental para garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados dos testes. O teste é realizado em uma câmara de névoa salina, onde uma solução de cloreto de sódio é atomizada em uma atmosfera saturada. As condições do ambiente de teste são rigorosamente definidas, incluindo temperatura, umidade e composição da solução salina. A norma especifica que a temperatura da zona de exposição deve ser mantida em $35 \pm 2^\circ C$ ($95 \pm 3^\circ F$), e o pH da solução salina deve estar entre 6,5 e 7,2.

As aplicações da norma ASTM B117 são amplas e abrangem diversas indústrias que necessitam avaliar a resistência à corrosão de seus produtos. Na indústria de máquinas, por exemplo, componentes como chassis, peças metálicas e revestimentos de pintura são frequentemente testados utilizando esta norma para garantir que atendam aos padrões de durabilidade exigidos. Além disso, setores como construção civil, eletrônicos e aeroespacial também utilizam essa norma para avaliar a resistência à corrosão de seus materiais e produtos. Essa ampla aplicabilidade demonstra a importância da norma na indústria moderna, onde a durabilidade e a resistência à corrosão são fatores críticos para o desempenho e segurança dos produtos.

Apesar das vantagens oferecidas pela norma ASTM B117, existem limitações associadas ao método. Um dos principais desafios é que os resultados obtidos em testes de névoa salina nem sempre se correlacionam diretamente com o desempenho em ambientes naturais. Isso se deve à natureza controlada do teste, que pode não replicar completamente as variáveis ambientais encontradas no mundo real. Além disso, a reprodutibilidade dos ensaios pode ser afetada por fatores como o tipo de espécime testado e os critérios de avaliação utilizados. A norma reconhece que variações podem ocorrer mesmo quando as condições do teste são nominalmente semelhantes entre diferentes câmaras de névoa salina, o que ressalta a importância de incluir réplicas suficientes nos programas de teste para estabelecer a variabilidade dos resultados.

3.3.Avaliação dos corpos de prova

As normas que tratam do tema de avaliação das amostras após ensaio de corrosão acelerada são ASTM D1654, que tratam de medição a partir de uma incisão, da ASTM D610–08, que trata de avaliação da área total corroída e da norma ASTM-D7087-05 que propõe uma mescla de avaliação de imagens digitais com medição manual.

A norma ASTM D1654-08, intitulada "*Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments*"¹, é uma das normas que trata da avaliação das amostras após serem submetidas à

ensaios de corrosão acelerada, avaliando critérios como formação de bolhas associadas à corrosão, corrosão generalizada ou migração a partir de uma falha no revestimento. O método define procedimentos como lavagem das amostras após teste, limpeza dos produtos de corrosão e remoção do revestimento solto. Especificamente, o Método 1 da norma, conforme detalhado na seção 8.1, descreve o procedimento para avaliar a corrosão, ou seja, a "rust creepage" em corpos de prova que foram previamente riscados. Este método é aplicado após a exposição dos corpos de prova a ambientes corrosivos, como os testes de névoa salina especificados na norma ASTM B117, permitindo determinar a resistência do sistema de revestimento à progressão da corrosão a partir de um dano inicial.

Após o período de exposição e seguindo as diretrizes da seção 8.1 da ASTM D1654-081, o Método 1 requer a remoção do revestimento ao longo do risco para observar a corrosão do substrato. A norma detalha vários métodos para essa remoção, incluindo raspagem (8.1.1), uso de uma faca (8.1.2), decapantes de tinta (8.1.3), jateamento de ar (8.1.4) e lavagem sob pressão (8.1.5)¹. A norma enfatiza que apenas as áreas do substrato com ataque no metal base devido à corrosão deve ser consideradas na avaliação. A largura do avanço da corrosão é medida ao longo do risco, utilizando-se de ferramentas como paquímetro ou réguas, para quantificar o desempenho do revestimento em proteger o substrato metálico da corrosão. Essa avaliação permite comparar o desempenho de diferentes sistemas de revestimento e identificar áreas de melhoria.

Esta norma é a mais utilizada para avaliação de revestimentos na indústria pois a introdução do risco permite a redução dos tempos de exposição das amostras necessário para geração de falha em revestimentos de alto desempenho.

3.4.O software Image J

O ImageJ é um software livre e de código aberto amplamente reconhecido no meio científico para o processamento e análise quantitativa de imagens digitais. Desenvolvido originalmente pelo National Institutes of Health (NIH), o ImageJ distingue-se por sua arquitetura modular e altamente extensível, permitindo a incorporação de uma vasta gama de plugins e scripts que ampliam

significativamente suas funcionalidades. Essa flexibilidade torna o programa apto a atender demandas específicas de diferentes áreas do conhecimento, como biologia, ciências dos materiais, medicina, física e engenharia.

Dentre os principais pontos fortes do ImageJ, destaca-se sua capacidade de manipular diversos formatos de arquivos de imagem, bem como de realizar operações avançadas de processamento, incluindo conversão para escala de cinza, binarização, segmentação de objetos e análise morfométrica. No contexto de estudos sobre corrosão, por exemplo, o ImageJ possibilita a diferenciação precisa entre produtos de corrosão e superfícies metálicas não corroídas, a partir da análise de variações de tons de cinza em imagens convertidas para 8 bits. Tal abordagem contribui para a obtenção de medições quantitativas mais precisas e reprodutíveis, reduzindo a subjetividade inerente às avaliações visuais tradicionais.

Adicionalmente, o ImageJ oferece recursos para automação de processos por meio do uso de macros e scripts, o que viabiliza o processamento em lote de grandes conjuntos de imagens, otimizando o tempo e os recursos empregados nas análises. O software também disponibiliza algoritmos robustos de segmentação, como os métodos de limiarização de Otsu e IsoData, capazes de separar eficientemente regiões de interesse do fundo da imagem, mesmo em situações de baixo contraste. Esses recursos são fundamentais para garantir a confiabilidade e a reprodutibilidade das medições em investigações que envolvem a quantificação de áreas corroídas, a avaliação da espessura de revestimentos ou o monitoramento da evolução de defeitos ao longo do tempo.

Outro aspecto relevante é a ampla comunidade de desenvolvedores e usuários, que contribui continuamente com novos plugins, atualizações e materiais de apoio, consolidando o ImageJ como uma referência no campo do processamento de imagens científicas. Sua interface intuitiva e a extensa documentação disponível facilitam o aprendizado e a aplicação do software, mesmo para usuários sem experiência prévia em programação. Dessa forma, o ImageJ configura-se como uma ferramenta fundamental para pesquisadores que buscam precisão, reprodutibilidade e eficiência na análise quantitativa de imagens em ambientes acadêmicos e laboratoriais.

3.5.Técnica de processamento de imagens

O processamento de imagens é uma área da ciência da computação que se dedica ao desenvolvimento de técnicas e algoritmos para manipular e analisar imagens digitais. Envolve uma série de etapas, desde a aquisição da imagem por câmeras ou scanners até a extração de informações relevantes. As etapas incluem pré-processamento (calibração radiométrica, correção geométrica e remoção de ruído), realce (melhoria da qualidade para discriminação de objetos) e classificação (atribuição de classes aos objetos). O processamento de imagens é um estágio para novos processamentos de dados, como aprendizagem de máquina ou reconhecimento de padrões.

Inicialmente a conversão de imagens RGB (Red, Green, Blue) para escala de cinza de 8 bits reduz a complexidade da imagem, representando cada pixel com um único valor de intensidade (0-255) em vez de três (canais) valores de cor, facilitando o processamento posterior. As técnicas de limiarização e binarização são usadas para segmentar imagens, separando objetos de interesse do fundo. A técnica de limiarização de Otsu, proposto por Nobuyuki Otsu em 1979, se baseia na análise do histograma da imagem, que representa a distribuição de intensidades dos pixels. A ideia central é maximizar a variância entre as duas classes (C0 e C1) resultantes da segmentação, enquanto minimiza a variância intraclasse. Esta técnica é utilizada para determinar automaticamente o limiar ideal para binarização. As técnicas de aprimoramento trabalham nos detalhes da imagem, enfatizando os que estão obscurecidos, bem como destacando certos componentes de interesse na imagem.

Para este trabalho, após alguns testes, foi selecionado a o método Default do ImageJ para seleção do threshold automatizado.

O método IsoData é uma técnica iterativa para seleção automática de threshold, que estima inicialmente o objeto e o fundo da imagem. Essa estimativa inicial baseia-se na suposição de que os cantos da imagem representam o fundo e esta informação é utilizada com primeira estimativa para a função de comutação (função que define se um pixel deve ser considerado parte do objeto (foreground) ou do fundo (background)). O processo iterativo do IsoData, parte da suposição de que os cantos da imagem representam o fundo. Assim, ela atribui valores (0 ou 255) a cada pixel, indicando a qual categoria ele pertence temporariamente. Em seguida, a

função de comutação é utilizada para atribuir pixels ao objeto (foreground) ou ao fundo (background). O algoritmo, então, direciona cada pixel para um dos dois integradores: o integrador de objeto acumula os valores de intensidade dos pixels alocados ao objeto, enquanto o integrador de fundo faz o mesmo para os pixels alocados ao fundo. As médias dos integradores são usadas para calcular um novo threshold, refinando a segmentação. O processo é repetido até que o threshold convirja para um valor otimizado. Diferentemente de abordagens como o método de Otsu, que busca um threshold que minimize a variância intra-classe (Weszka, Nagel, & Rosenfeld, 1974), o IsoData refina iterativamente a segmentação com base nas médias de objeto e fundo, apresentando potencial para melhor desempenho em imagens de baixo contraste, onde o histograma pode não ser bimodal.

3.6.Desenho de experimentos

Experimentos fatoriais são um tipo de experimento planejado que permite observar os efeitos que vários fatores podem ter sobre uma resposta. Esses experimentos permitem estudar, simultaneamente, os efeitos de dois ou mais tipos de tratamentos ou fatores. Ao variar os níveis de todos os fatores ao mesmo tempo, em vez de um de cada vez, é possível estudar as interações entre os fatores.

Em experimentos fatoriais, o experimentador seleciona um número fixo de níveis para cada um dos fatores e executa experimentos com todas as combinações de níveis. O número de tratamentos consiste em todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores. Uma classe de planejamento experimental amplamente utilizada na indústria é a dos experimentos fatoriais com k fatores, cada qual com dois níveis. Para estudar o efeito de um fator, é preciso ter no mínimo dois níveis. Dessa forma, o fatorial 2^k é o tipo de experimento fatorial mais econômico.

Um experimento fatorial pode ser completo ou fracionado. Um experimento fatorial completo mede as respostas em todas as combinações dos níveis de fatores. Um experimento fatorial fracionado realiza apenas um subconjunto selecionado dos ensaios no experimento fatorial completo. Os experimentos fatoriais fracionados são úteis quando os recursos são limitados ou o número de fatores no

experimento é grande, pois eles usam menos ensaios do que os experimentos fatoriais completos.

Os experimentos fatoriais 2^2 (A e B) avaliam efeitos de duas variáveis com 2 níveis cada.

O modelo estatístico:

$$Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_{12}X_1X_2 + \epsilon$$

onde: X_1X_1 e X_2X_2 são fatores codificados (± 1),

Este modelo permite identificar efeitos significativos

$$|\text{Efeito}| \times \sigma.$$

A significância dos efeitos principais (β_1 , β_2) e da interação (β_{12}) foi avaliada comparando-se $|\text{Efeito}| \times \sigma$ (σ =desvio padrão).

Para este trabalho foi utilizado o banco de imagens de ensaios de corrosão relacionados ao monitoramento da resistência à corrosão dos processos de tratamento superfície. A técnica dos experimentos fatoriais foi utilizada para a seleção das amostras com objetivo de permitir que a avaliação dos erros minimizasse a possibilidade de os erros experimentais mascararem os resultados de avaliação dos métodos. Portanto foram selecionados 3 variáveis e 2 fatores para cada variável, porém o experimento 2^3 se mostrou inviável em função de condições da planta industrial que não permitia o processamento da condição de experimental de decapagem química com tratamento de conversão de fosfato de ferro. Em função disso adotamos a estratégia de “quebrar” o experimento dois experimentos 2^2 , mantendo-se uma das variáveis fixa, tipo de decapagem (jateamento fixado como constante) no experimento A e tipo de tratamento de conversão (Fosfato de Zinco fixado como constante) no experimento B.

3.7.Processos de prevenção à corrosão.

Vários métodos de prevenção de corrosão estão disponíveis, cada um com suas próprias vantagens e limitações. A seleção do método mais apropriado depende de fatores como o tipo de material, o ambiente, as condições de operação e

as considerações de custo. Os métodos de prevenção de corrosão podem ser amplamente classificados nas seguintes categorias:

- Seleção de materiais
- Revestimentos protetores
- Proteção catódica
- Inibidores de corrosão
- Modificação do ambiente
- Projeto e manutenção

Vamos explorar os mais relevantes para este trabalho desses métodos em detalhes.

3.7.1. Revestimentos protetores

Os revestimentos protetores são amplamente usados para proteger os materiais da corrosão. Um revestimento atua como uma barreira entre o material e o ambiente, impedindo que os agentes corrosivos atinjam a superfície do material. Existem vários tipos de revestimentos protetores, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens, abordaremos os mais relevantes para este trabalho.

- **Revestimentos orgânicos:** Os revestimentos orgânicos, como tintas e revestimentos, são amplamente usados para proteger os materiais da corrosão. Os revestimentos orgânicos atuam como uma barreira entre o material e o ambiente, impedindo que os agentes corrosivos atinjam a superfície do material. O tipo de revestimento orgânico usado depende do ambiente específico e das propriedades desejadas.
- **Revestimentos de conversão:** Os revestimentos de conversão são formados pela reação química da superfície do metal com uma solução especializada. Esses revestimentos fornecem uma fina camada protetora que melhora a resistência à corrosão. Exemplos de revestimentos de conversão incluem fosfatização e cromatização.

3.7.1.1. Via de aplicação: tintas líquidas x tintas pó

Entre as soluções mais relevantes e amplamente empregadas em sistemas anticorrosivos, destacam-se as tintas em pó e as tintas líquidas. Cada uma dessas tecnologias apresenta características próprias, vantagens e limitações, que as tornam mais adequadas a determinadas situações e substratos. Esta seção explora, os fundamentos, processos de aplicação, desempenho e tendências das tintas em pó e líquidas.

As tintas líquidas e em pó diferenciam-se, primordialmente, pelo estado físico da formulação antes da aplicação e pelos mecanismos de formação da película protetora.

Tintas líquidas são sistemas dispersos, compostos por resinas, pigmentos, solventes e aditivos, aplicados sobre o substrato na forma fluida. A secagem e a cura ocorrem por evaporação de solventes e/ou reações químicas, formando uma película contínua e aderente.

Tintas em Pó, por outro lado, são formulações sólidas, livres de solventes, compostas por partículas finas de resinas termofixas ou termoplásticas, pigmentos e aditivos. A aplicação é realizada por processos eletrostáticos ou triboelétricos, seguida de fusão e cura térmica, resultando em um filme homogêneo e coeso.

A ausência de solventes nas tintas em pó representa um avanço ambiental significativo, reduzindo emissões de compostos orgânicos voláteis (VOC) e riscos ocupacionais.

A aplicação das tintas líquidas pode ser realizada por diversos métodos, como pistola convencional, airless, rolo, pincel, imersão ou flow-coating. A escolha do método depende da geometria do substrato, das condições ambientais e dos requisitos de desempenho.

A flexibilidade de aplicação das tintas líquidas permite seu uso em peças de grandes dimensões, estruturas montadas e locais de difícil acesso, sendo possível realizar retoques e manutenções localizadas.

O revestimento em pó é aplicado, predominantemente, por pulverização eletrostática. O substrato, geralmente metálico, é aterrado, enquanto as partículas de pó são carregadas eletricamente e atraídas para a superfície, formando uma camada uniforme.

Após a aplicação, as peças são submetidas a um forno de cura, onde o pó funde e polimeriza, formando uma película contínua. Os principais processos de aplicação incluem:

- Pulverização eletrostática: método mais comum, eficiente para geometrias simples e produção em série.
- Imersão em leito fluidizado: utilizado para peças pequenas ou com geometria complexa.
- Aplicação triboelétrica: alternativa para substratos sensíveis à eletricidade estática.

A necessidade de cura térmica limita o uso das tintas em pó a substratos que suportem temperaturas elevadas, como metais ferrosos e não ferrosos.

3.8.Preparação da Superfície

A preparação da superfície é uma etapa fundamental para o sucesso de qualquer sistema de pintura anticorrosiva. A durabilidade e a eficiência do revestimento dependem, em grande medida, da qualidade do pré-tratamento realizado. A aderência, a uniformidade e a integridade da película protetora são diretamente influenciadas pelo grau de limpeza, remoção de contaminantes e modificação superficial obtidos antes da aplicação da tinta. Nesta seção, serão abordados os principais métodos de pré-tratamento, suas aplicações, limitações e inovações recentes, com ênfase em processos mecânicos, químicos e nas camadas de conversão.

A superfície metálica, ao sair dos processos de fabricação (laminação, usinagem, soldagem), apresenta uma série de impurezas: óleos, graxas, carepas, óxidos, ferrugem, sais solúveis, poeira e outros contaminantes. Esses resíduos, se não removidos, comprometem a aderência da tinta e favorecem o surgimento de falhas prematuras, como deslocamento, bolhas e corrosão sob o filme.

O pré-tratamento visa não apenas a limpeza, mas também a criação de uma rugosidade controlada (perfil de ancoragem), essencial para a fixação mecânica do revestimento. Além disso, certos tratamentos promovem modificações químicas na superfície, tornando-a menos reativa e mais resistente à corrosão.

A escolha do método de pré-tratamento depende do tipo de substrato, do ambiente de exposição, do sistema de pintura a ser aplicado e das condições operacionais (produção em série, campo, manutenção, etc.).

Os métodos de preparação de superfície podem ser classificados em três grandes grupos:

- Métodos mecânicos: remoção física de contaminantes e modificação da topografia superficial por abrasão, impacto ou corte.
- Métodos químicos: remoção de contaminantes e óxidos por ação de reagentes químicos, promovendo também modificações químicas na superfície.
- Métodos eletroquímicos: envolvem processos como anodização e eletropolimento, mais usuais em ligas leves.

A seguir, detalhamos os métodos mecânicos e químicos, que são os mais empregados na preparação para pintura anticorrosiva.

3.8.1. Decapagem Mecânica: Jateamento com Granalha de Aço

O jateamento abrasivo, especialmente com granalha de aço, é o método mecânico mais utilizado na indústria para preparação de superfícies metálicas. Consiste na projeção, em alta velocidade, de partículas abrasivas contra o substrato, promovendo:

- Remoção eficiente de carepas, óxidos e ferrugem.
 - Grau de Limpeza conforme ISO 8501
- Eliminação de contaminantes superficiais (poeira, tintas antigas, resíduos de solda).
- Criação de perfil de rugosidade (ancoragem), fundamental para a aderência da tinta.

A rugosidade obtida pode ser controlada pela escolha do tipo e granulometria do abrasivo, pressão de jateamento e distância de aplicação. O perfil ideal depende do tipo de tinta a ser utilizada: sistemas epóxi e poliuretano, por exemplo, requerem perfis entre 40 e 100 micrômetros.

O jateamento pode ser realizado em cabines fechadas, sistemas automatizados ou em campo, com equipamentos portáteis. Além da granalha de aço, podem ser usados abrasivos minerais (areia, granalha de vidro, óxido de alumínio) conforme o tipo de substrato e o resultado desejado.

O jateamento possui como principais vantagens:

- Alto grau de limpeza e remoção de contaminantes.
- Controle preciso do perfil de rugosidade.
- Aplicação em grandes superfícies e em peças de geometria complexa.

Porém temos também limitações como:

- Geração de poeira e resíduos abrasivos
- Necessidade de equipamentos específicos e EPI.
- Não remove óleos e graxas, que devem ser eliminados previamente por desengraxe.

3.8.2. Decapagem Química

A decapagem química consiste na imersão ou aplicação de soluções ácidas ou alcalinas sobre o substrato, promovendo a dissolução de óxidos, carepas e ferrugem. Os principais agentes utilizados são: ácidos inorgânicos (sulfúrico, clorídrico, fosfórico) cujas propriedades dissolvem óxidos de ferro e carepas.

Após a decapagem, é fundamental realizar um enxágue rigoroso para remover resíduos ácidos e sais solúveis, que podem comprometer o desempenho do revestimento.

As vantagens do processo de decapagem são:

- Remoção uniforme de óxidos e carepas, inclusive em áreas de difícil acesso.

- Aplicação em peças pequenas, de geometria complexa ou em produção em série.

Falando sobre as limitações do processo de decapagem, podemos citar:

- Geração de efluentes líquidos, exigindo tratamento ambiental adequado.
- Risco de ataque excessivo ao metal base (pitting, hidrogênio absorvido).
- Necessidade de neutralização e secagem imediata para evitar reoxidação.

A escolha entre decapagem mecânica (jateamento com granalha de aço) e decapagem química depende de múltiplos fatores, incluindo o tipo de substrato, a geometria da peça, o ambiente de aplicação e as restrições ambientais.

O jateamento é preferido para estruturas de grande porte e quando a aderência mecânica é crítica, já a decapagem química é vantajosa para produção em série, peças de precisão e geometrias complexas.

Em muitos casos, ambos os métodos são combinados: desengraxe químico seguido de jateamento, ou decapagem química seguida de fosfatização.

3.8.3. Camadas de Conversão: Princípios e Funções

Além da limpeza, muitos processos de pré-tratamento buscam modificar quimicamente a superfície metálica, formando camadas protetoras conhecidas como camadas de conversão. Essas camadas, geralmente de natureza inorgânica, promovem:

- Aumento da aderência da tinta ao substrato.
- Redução da reatividade superficial, dificultando a corrosão sob o filme.
- Melhoria da uniformidade e da molhabilidade da superfície.

Os principais processos de conversão utilizados na preparação para pintura são os baseados em fosfatos (fosfatização) e cromatos (cada vez menos usados por questões ambientais).

A fosfatização é o processo de conversão mais utilizado na preparação de superfícies metálicas para pintura. Consiste na imersão ou aspensão do substrato em soluções contendo íons fosfato e outros aditivos, promovendo a formação de uma camada microcristalina de fosfato insolúvel.

3.8.3.1. Fosfato de Zinco

Sua composição baseia-se na precipitação de fosfato de zinco sobre o aço, é largamente empregado na indústria automobilística, eletrodomésticos e estruturas metálicas.

Possui como principais vantagens: boa resistência à corrosão, aderência satisfatória, processo bem estabelecido e de custo moderado.

Já em relação às limitações da tecnologia, podemos citar: camada menos espessa e menos resistente que o tricationico; desempenho intermediário.

3.8.3.2. Fosfato de Ferro

Possui como base de sua composição a utilização de soluções ácidas contendo fosfato de ferro.

É indicado para ambientes menos agressivos, peças internas, aplicações onde o custo é fator determinante.

As principais vantagens são um processo simples, de baixo custo e com menor geração de resíduos, lodo.

Falando em limitações, podemos observar, uma camada fina e menos protetora; menor resistência à corrosão; requer aplicação rápida da tinta após o tratamento.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.Preparação das amostras e desenho do experimento fatorial

Os corpos de prova utilizados como amostra foram chapas de aço LN38, com dimensões 200x100 mm.

A seleção do aço deve-se ao fato de ser o tipo de aço mais representativo como matéria-prima para as máquinas da Jacto.

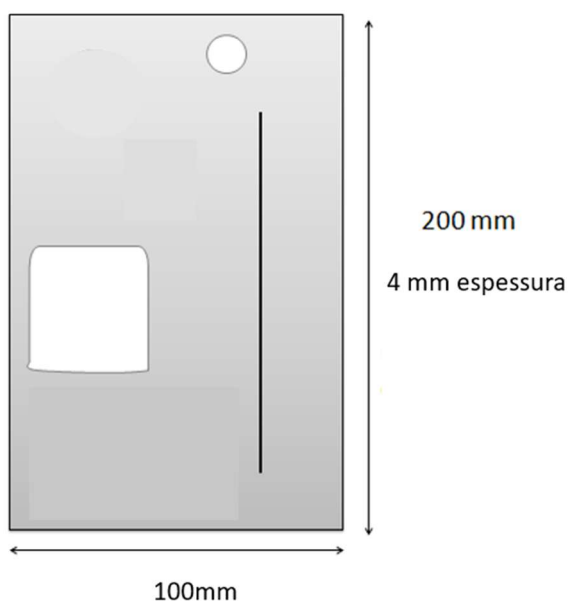


FIGURA 4.1 - Esquema dos corpos de prova

Para isto, foram selecionadas amostras considerando os seguintes sistemas de pintura:

- Decapagem para remoção de carepas de laminação:
 - Mecânica, através do Jateamento Automático
 - química, através da decapagem com ácido Sulfúrico.
- Tratamento de Conversão de camada:
 - Fosfato de Ferro
 - Fosfato de Zinco
- Revestimento orgânico com pintura:

- Tinta líquida
- Tinta pó

Em relação aos tratamentos de decapagem, foi utilizado granalhas de aço da marca Sinto do tipo G-40C, em uma máquina de jateamento automática com velocidade de passagem de 0,6m/min e para decapagem química foi utilizado um banho de ácido sulfúrico a 120g/l aquecido à 65°C.

Para as camadas de conversão, utilizou-se os produtos da linha Gardobond da empresa Chemetall sendo o produto para camadas de fosfato de ferro o “Gardobond A 4954/1” enquanto para as camadas de conversão de fosfato de zinco, utilizou-se o “Gardobond 51/1”.

Em relação às tintas, foram utilizadas um sistema de Primer epóxi catalisado com poliamida e poliuretano catalisado com iso-cianato para os sistemas líquidos e Poliéster Superdurável para a tinta pó, curado em estufa à 260°C por 15 min.

Os esquemas de pintura foram aplicados nas amostras considerando-se dois experimentos fatoriais 2^2 , isto foi necessário devido a uma limitação dos processos industriais disponíveis onde não era possíveis realizarmos uma das combinações (Decapagem química com Tratamento de conversão de Fosfato de ferro). Portanto as combinações dos experimentos fatoriais ficaram conforme tabela abaixo.

Fatorial 2^2 - A – Decapagem mecânica = Jateamento = Cte

Fatores	1	2 (-1)
Tratamento	Fosf Zn	Fosf Fe
Tinta	Pó	Líquida

TABELA 4.1 - Planejamento experimento fatorial A

Fatorial 2² - A – tabela de condições

Condições	Tratamento	Tinta
1	Fosf Zn	Pó
2	Fosf Fe	Pó
3	Fosf Zn	Líquida
4	Fosf Fe	Líquida

TABELA 4.2 - Experimento fatorial A - condições dos experimentos

Fatorial 2² - A – Tabela de condições codificada

Condições	Tratamento	Tinta
1	1	1
2	-1	1
3	1	-1
4	-1	-1

TABELA 4.3 - Experimento fatorial A - codificação

Fatorial 2² - B – Tratamento de conversão = Fosfato de Zinco = Cte

Fatores	1	2 (-1)
Decapagem	Mecânica (Jato)	Química Decapante)
Tinta	Pó	Líquida

TABELA 4.4 - Planejamento do experimento fatorial B

Fatorial 2² - B – Tabela de condições

Condições	Decapagem	Tinta
1	Jato Automático	Pó
2	Decapante químico	Pó
3	Jato Automático	Líquida
4	Decapante químico	Líquida

TABELA 4.5 - Experimento fatorial B - condições dos experimentos

Fatorial 2² - B – Tabela de condições codificada

Condições	Decapagem	Tinta
1	1	1
2	-1	1
3	1	-1
4	-1	-1

TABELA 4.6 - Experimento fatorial B - codificação

Após aplicação dos revestimentos e confirmação de cura completa das tintas, usando um riscador tipo vídea para metal, conforme item 5.1.2 da ASTM D1654, fez-se uma incisão em uma linha única vertical em cada painel de teste, conforme item 6.1.2 da ASTM D1654, certificando-se de que o corte ultrapasse a camada de revestimento e chegue até o metal base, expondo o substrato e tenha aproximadamente 0,5 mm (+/- 0,1 mm) de espessura, em seguida as amostras foram colocadas na câmara salt spray.

Para este ensaio foi utilizado uma câmara da marca Equilam, modelo : CCT 5000 CORR, Serial nº2017121301, ano 2017. Os corpos de prova ficaram expostos à névoa salina neutra (5% em massa de NaCl), temperatura de 35°C e pH de 6,5 a 7,2, conforme definido na norma AST B117, por período de 500h, sem que a câmara fosse aberta.



FIGURA 4.2 - Câmara Salt spray - CCT 5000 CORR.

Fonte: https://equilam.com.br/wp-content/uploads/2020/09/Catalogo-Salt-Spray-Ciclico-CCT_CORR_Rev.10.pdf

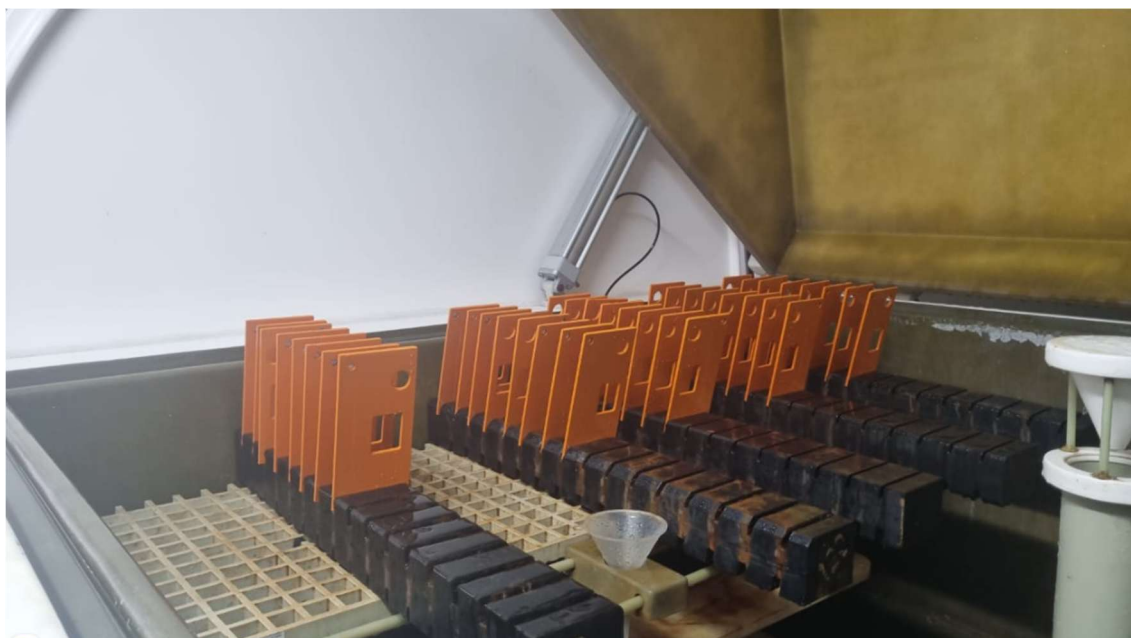


FIGURA 4.3 - Amostras na câmara de corrosão

Após finalizado o período de exposição, os painéis foram lavados com água corrente limpa, removendo a corrosão vermelha da superfície da tinta ao redor

do corte com uma esponja macia não abrasiva, em seguida removeram-se toda a tinta solta ao redor do risco usando a espátula, executando movimentos perpendiculares ao corte, conforme item 8.1.1 método 1 da ASTM D1654;

Em seguida todas as amostras tiveram suas imagens digitalizadas utilizando-se o Scanner HP Scanjet 2200c

Para a avaliação da migração a partir do risco foi utilizado como referência o Procedimento A - "*Evaluation of Rust Creepage for Scribed Specimens*", realizando o procedimento abaixo:

1. Dividiu-se o comprimento total do risco em 10 seções de igual comprimento.
2. O avanço de corrosão em cada uma das 10 seções foi medido separadamente considerando a largura máxima de área corroída na seção.
3. Para o cálculo do avanço de corrosão médio foi utilizado a fórmula abaixo.

$$\text{Resultado} = \frac{L_{\text{maxmed}} - L_{\text{risco}}}{2}$$

Equação 1 -avanço de corrosão médio

Onde:

L_{maxmed} = a largura média do avanço máximo de cada uma das 10 seções

L_{risco} = a largura do risco antes da exposição das amostras à câmara.

A partir das amostras digitalizadas conduzimos medições manuais computadorizadas do avanço de corrosão.

4.2.Método de Avaliação dos corpos de prova

4.2.1. Medições manuais

Inicialmente as medidas foram realizadas utilizando-se paquímetro.

A seção de interesse das chapas de testes tinha seu comprimento, manualmente, dividido em 10 seções iguais, cada seção tinha sua largura medida utilizando-se paquímetro e o resultado era anotado para procedermos aos cálculos de média em seguida. Nesta etapa do trabalho, cada medição de cada corpo de prova tomava em média 15 a 30 minutos.

Já em um segundo momento, iniciamos à utilização do processamento de imagens, seguindo a rotina abaixo.

1. Abrir imagens digitalizadas originais no software imageJ e configurar escala para transformar pixels em milímetros.
 - a) Desenhar reta (*straight*), na largura da base do painel
 - b) Utilizar comando: Analyze → Measure
 - c) Utilizar comando: Analyze → Set Scale
 - d) Abrir uma Janela popup (Set Scale) onde devemos entrar a largura da base do painel (largura conhecida = 100mm) e clicar em ok.
2. Salva em arquivo .tiff
3. Abrir no Paint
4. Traçar retângulo delimitando a ROI
5. Utilizando retângulo, traçar retângulo no comprimento da incisão/corte do teste (altura do retângulo)
6. Traçar 10 áreas de altura igual à 1/10 comprimento da incisão/corte do teste (altura do retângulo)
7. Salva no formato .tiff
8. Abrir arquivo no software imageJ e realizar medição utilizando as ferramentas:
 - a) Utilizando a ferramenta “*Straight*”, traçar uma linha horizontal através da largura da maior seção com corrosão em cada uma das 10 seções delimitadas
 - b) Em seguida, utilizando o comando “*Mesure*” medir a largura de avanço da corrosão ao redor do corte, repetir para cada uma das 10 seções
 - c) Considerações sobre o traço da largura:
 1. Não considerar manchas de corrosão que não estejam “conectadas ao com o corte

2. Corrosão pode ser uma mancha marrom ou uma mancha mais clara, evidenciando que houve ataque na região, mas que o produto de corrosão foi lavado
3. Não considerar áreas onde houve deslocamento do revestimento, mas não há sinais de ataque do material base.

Segue abaixo alguns exemplos de como avaliar a presença de corrosão.

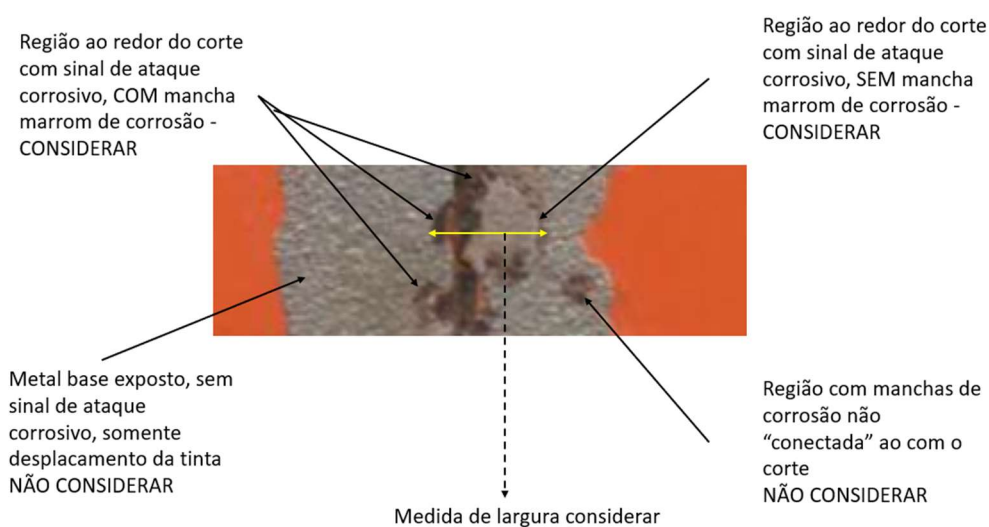


FIGURA 4.4 - exemplos para orientação da medição manual

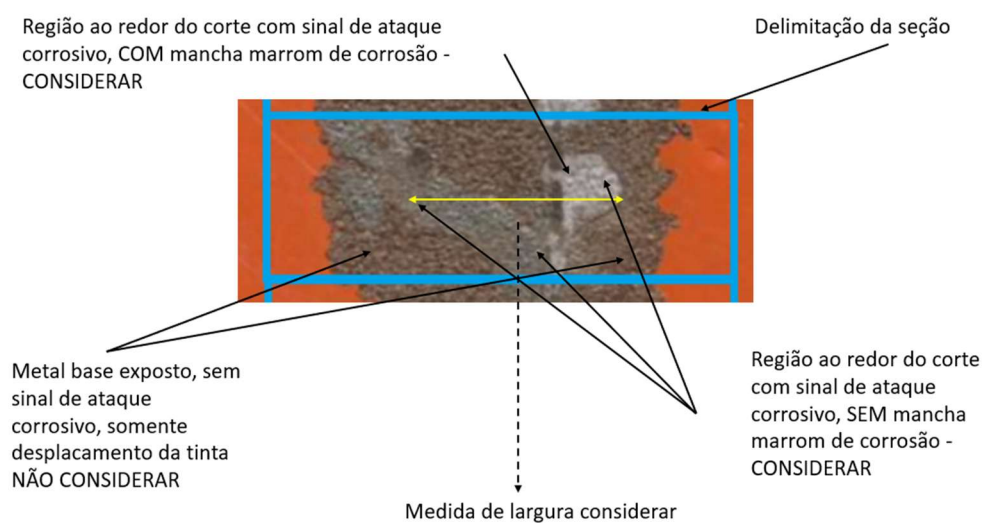


FIGURA 4.5 - exemplo para orientação da medição manual

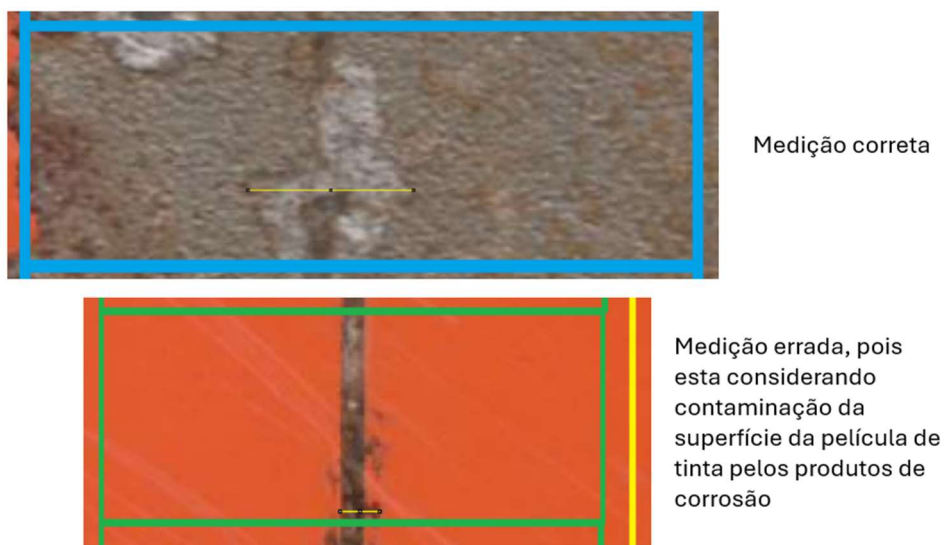


FIGURA 4.6 - exemplo para orientação da medição manual

4.2.2. Avaliação e medição automatizada do avanço de corrosão

Inicialmente nesta etapa, conduzimos vários testes com o objetivo de determinar os melhores parâmetros para utilização do método de medição automatizado.

Os parâmetros avaliados nesta etapa foram:

- Método do Threshold (Isodata, Otsu, etc.)
- Valores de Threshold (valores fixos x valores automatizados)
- Filtros de outliers
- Utilizar um ROI manual x não utilizar ROI

4.2.3. Determinação do método e parâmetros do Threshold e filtros

Para os testes de determinação do método de Threshold selecionamos o CP abaixo, e realizamos vários ensaios de medição manual, considerando os métodos de Threshold. Inicialmente realizamos uma verificação qualitativa com todos os métodos disponíveis no ImageJ, sendo que selecionamos 4 métodos para avaliação mais detalhada: Default, IsoData, Otsu, Yen.



FIGURA 4.7 - CP para avaliação de Threshold



FIGURA 4.8 - Comparação de métodos de Threshold

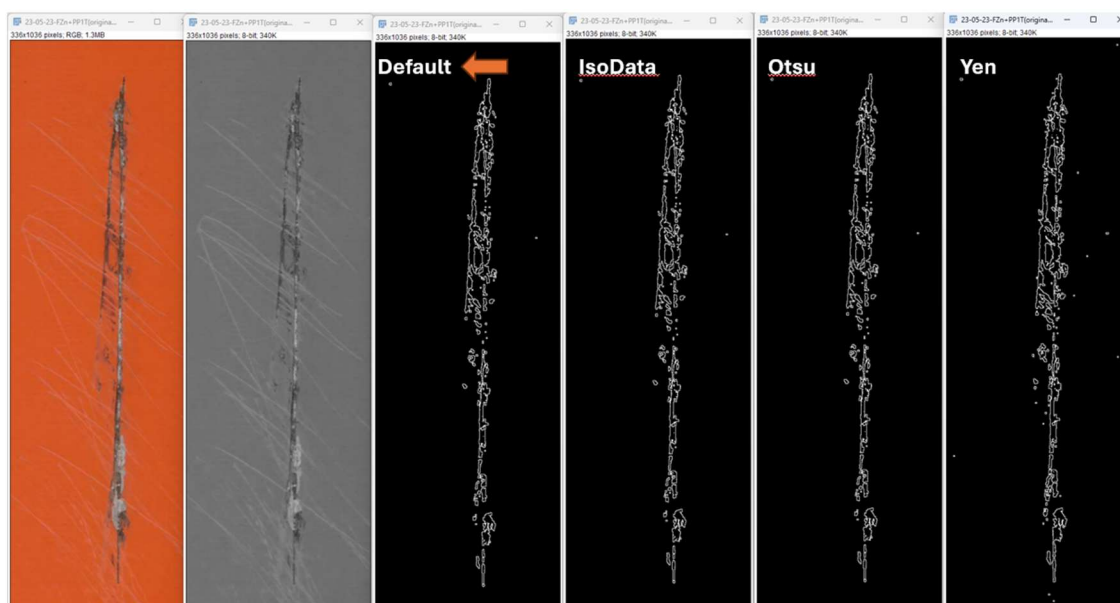


FIGURA 4.9 - Comparação de métodos de Threshold binarizado

Em função de não apresentarem diferenças significativas para o objetivo deste trabalho entre os 4 métodos avaliados, optamos por seguir com o método Default, por razões de mantermos a simplicidade na operação do software.

A partir de então, vencida a etapa de seleção do método de Threshold, selecionamos 4 corpos de prova com o intuito de avaliarmos se seria melhor termos valores fixos para os limites de Threshold, e como lidar com os outliers das imagens.

Como para cada uma das amostras o melhor valor de TH não foi reproduzido, concluímos que a melhor alternativa seria trabalhar com o ajuste automatizado da ferramenta ImageJ.



FIGURA 4.10 - CP para determinação de valores do TH

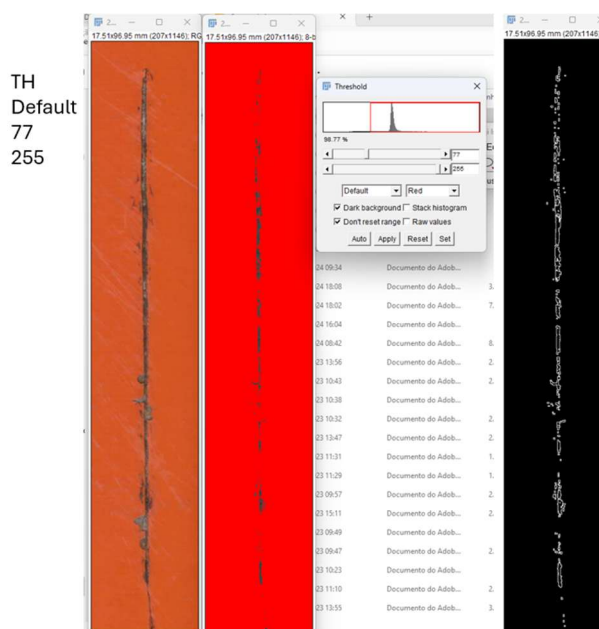


FIGURA 4.11 - CP para determinação de valores do TH - 77H

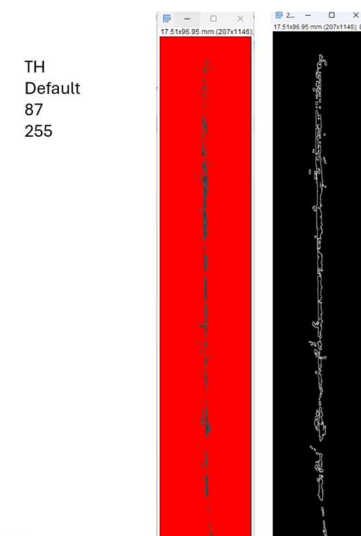


FIGURA 4.12 - CP para determinação de valores do TH - 87H

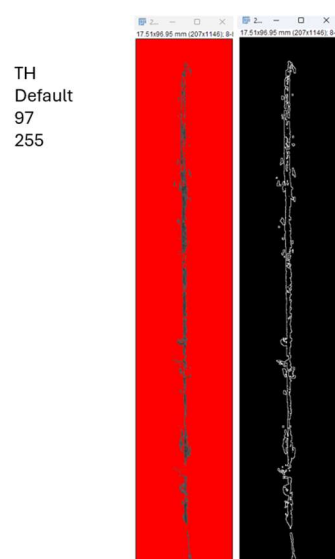


FIGURA 4.13 - CP para determinação de valores do TH - 97H

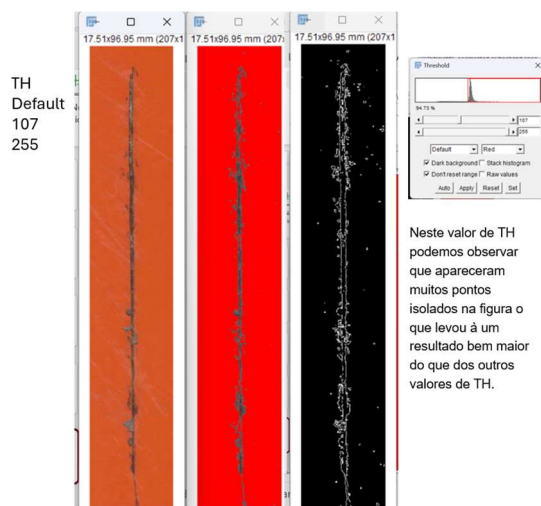


FIGURA 4.14 - CP para determinação de valores do TH - 107H

Referência corte	23/05/23 JM+FF+PL 1T				Ajuste TH manual		Auto TH	
	Rodrigo 1	Rodrigo 2	Vitor 1	Vitor 2	TH 115-255 - no filtro	TH 115-255 - R7 filtro	TH 103-255 - no filtro	TH 103-255 - R2 filtro
0,5 mm								
1	1,48	1,06	1	1,073	0,59	-	-	-
2	1,06	1,1	0,89	1,101	1,44	1,19	-	0,85
3	1,48	1,27	1,2	1,073	1,53	1,44	0,93	1,27
4	1,06	1,4	1,25	1,27	1,61	1,44	1,27	1,02
5	1,19	1,52	1,38	1,693	1,69	1,44	1,02	1,10
6	1,19	1,36	0,97	1,08	1,53	1,27	1,10	1,02
7	1,13	1,06	0,97	1,037	2,03	1,78	1,02	1,44
8	1,38	1,1	0,95	1,045	2,88	2,29	1,53	1,78
9	1,19	1,06	0,87	1,101	5,68	2,03	1,86	1,86
10	1,64	1,52	1,61	1,242	2,37	2,20	4,32	2,03
Média	1,28	1,25	1,11	1,17	2,14	1,51	1,31	1,24
Método 1	0,39	0,37	0,30	0,34	0,82	0,50	0,40	0,37

TABELA 4.7 - Resultados de TH fixo x Auto TH

Na tabela acima, podemos observar que os valores com Auto TH e filtro R2 e R0, foram os que mais se aproximaram das medidas manuais, ao invés dos valores com TH fixo.

E por último identificamos a necessidade de introduzirmos à delimitação manual da região de interesse atrelado à utilização de filtro de Outlier de R0 a R3 para evitar a leitura de pontos da imagem que não pertenciam à incisão original.



FIGURA 4.15 - Exemplo de delimitação manual da ROI

4.2.4. Método automatizado

Por fim, após todos os ajustes utilizamos a sequência abaixo como o método final para avaliação automatizada das imagens.

1. Abrir imagens digitalizadas originais no software imageJ e configurar escala para transformar pixels em milímetros.
 - a) Desenhar reta (*straight*), na largura da base do painel
 - b) Utilizar comando: Analyze → Measure
 - c) Utilizar comando: Analyze → Set Scale
 - d) Abrir uma Janela popup (Set Scale) onde devemos entrar a largura da base do painel (largura conhecida = 100mm) e clicar em ok.
2. Salva em arquivo .tiff
3. Utilizando a ferramenta "*Rectangle*", delimitar a região de interesse (ROI), considerando somente a região da imagem onde temos informação a ser considerada na medição de avanço da corrosão.

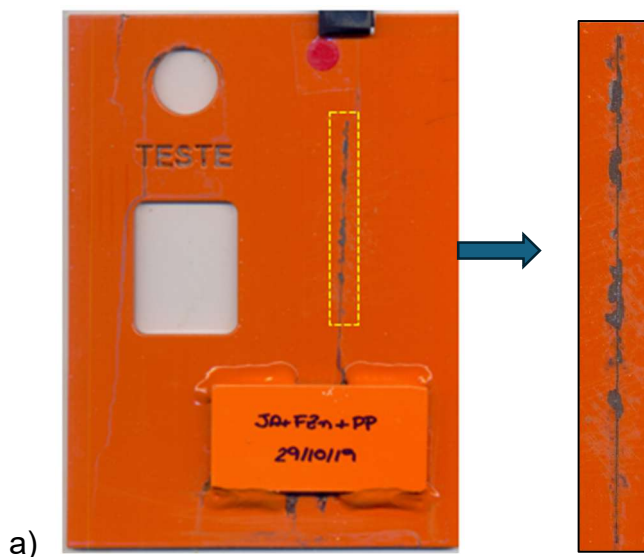


FIGURA 4.16 - Corpo de prova e ROI (region of interest)

4. Converter a imagem colorida em imagem de escala 8bit

a) *Image* → *type* → *8bit*

5. Ajuste de brilho e contraste.

a) *Image* → *adjust* → *Brightness/Contrast (Ctrl+Shift+C)* → *apply*

6. Ajustar o *threshold* para os valores do experimento (Auto)

a) *Image* → *adjust* → *Threshold (Ctrl+Shift+T)* → *apply*

7. Inversão do LUT para facilitar a visualização

a) *Edit* → *Invert*

8. Remover outliers

a) *Process* → *Noise* → *Remove Outliers (R0 a R3)*

9. Binarizar imagem

a) *Process* → *Binary*

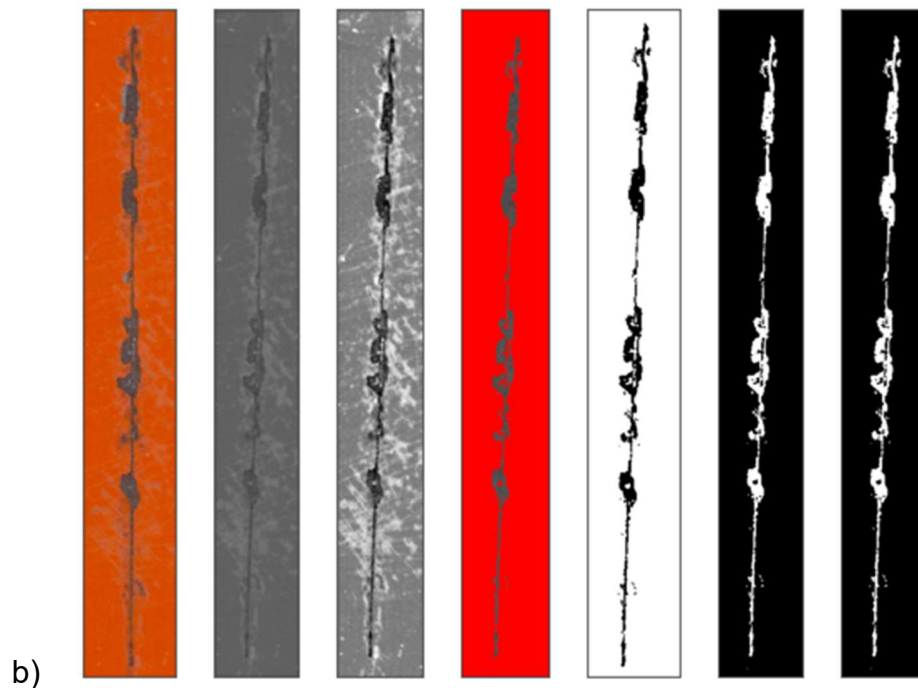


FIGURA 4.17 - Representação dos tratamentos de imagem utilizados.

10.Extrair a tabela de dados da imagem binarizada para trabalho no Excel

a) *Image* → *transform* → *Image to results* → *Salvar tabela de resultado*

11.Abrir tabela no Excel e executar a macro

12.Inserir valor da escala na célula ML2.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme explanado na seção anterior, devido às restrições relacionadas à configuração dos processos de tratamento de superfície da utilizado, não foi possível realizamos um experimento fatorial 2^3 , pois não seria possível executarmos a combinação de decapagem química com tratamento de fosfato de ferro., logo a saída adotada foi “quebrarmos” o experimento em dois experimentos fatoriais 2^2 . Em cada um dos experimentos fixamos uma das 3 variáveis e selecionamos níveis para as outras duas.

Os experimentos foram chamados:

- Fatorial 2^2 - A, onde a variável decapagem foi mantida constante com decapagem mecânica.
- Fatorial 2^2 - B , onde a variável tratamento de conversão foi mantida constante com fosfato de zinco.

5.1.Experimento Fatorial 2^2 - A

Abaixo temos o experimento fatorial “A” completo com suas respectivas condições, fatores, codificação e respostas das medições manuais e via processamento de imagens.

A tabela abaixo traz todas as 4 condições experimentais diferentes, com uma réplica em cada condição, com um total de 8 experimentos. Neste experimento fatorial A, conforme detalhado acima, o fator decapagem foi mantido constante como decapagem mecânica com jateamento de granalha de aço, para o fator tratamento de conversão foi utilizado o fosfato de ferro (nível mais baixo, -1) nos experimentos 3, 4, 7 e 8 enquanto os experimentos 1, 2, 5 e 6 foram preparados utilizando-se fosfato de zinco (nível mais alto, +1) e para o fator tinta foi utilizado tinta pó Poliéster (nível mais alto, +1) nos experimentos 1 a 4 e tinta líquida com sistema primer Epóxi e Top Coat em Esmalte Poliuretano (nível mais baixo, -1) 5 a 8. Em seguida as colunas trazem a codificação utilizada bem como a matriz de interações e as repostas aos métodos utilizados sendo o método manual, aqueles resultados obtidos por meio de análise manual, à esquerda na


coluna de resposta e as repostas ao método via processamento de imagens, PI na tabela abaixo, à direita na coluna de respostas.

Após a tabela de condições experimentais apresentamos algumas amostras avaliadas neste experimento.


Exp	Condições	Decapagem	Tratamento	Tinta	Identificação	Codificação		Interações			Respostas	
								1	2	12	Manual	PI
1	1	Decapagem = Cte = Jato	Fosf Zn	Pó	JA+FZn+PP(1)	1	1	1	1	1	0,32	0,19
2	1	Decapagem = Cte = Jato	Fosf Zn	Pó	JA+FZn+PP(4)	1	1	1	1	1	0,35	0,27
3	2	Decapagem = Cte = Jato	Fosf Fe	Pó	JA-FF-PP	-1	1	-1	1	-1	1,73	1,44
4	2	Decapagem = Cte = Jato	Fosf Fe	Pó	JA-FF-PP (2)	-1	1	-1	1	-1	1,68	1,48
5	3	Decapagem = Cte = Jato	Fosf Zn	Líquida	JA-Fzn-PL (1)	1	-1	1	-1	-1	1,17	1,08
6	3	Decapagem = Cte = Jato	Fosf Zn	Líquida	JA-Fzn-PL (3)	1	-1	1	-1	-1	1,82	1,83
7	4	Decapagem = Cte = Jato	Fosf Fe	Líquida	JA-FF-PL	-1	-1	-1	-1	1	1,49	1,64
8	4	Decapagem = Cte = Jato	Fosf Fe	Líquida	JA-FF-PL (5)	-1	-1	-1	-1	1	1,62	1,44

Figura 5.1- Experimento Fatorial 2² A: Decapagem = Cte = Jateamento

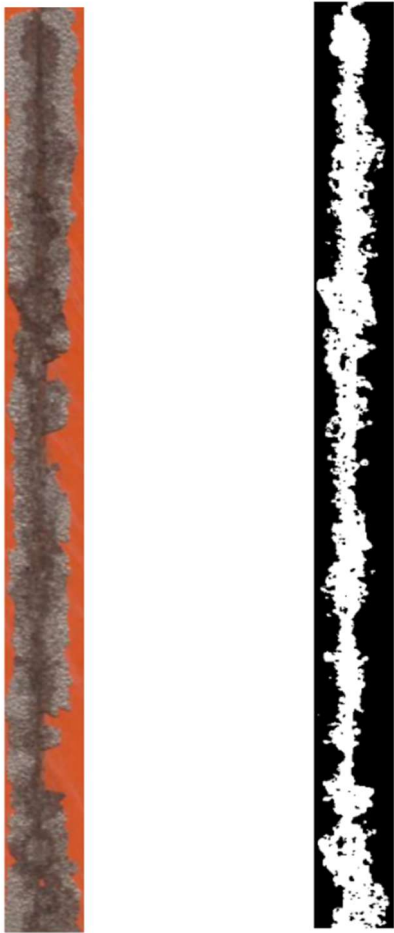
Experimento 1		Auto TH 95-255 -R3 filter	
Método 1 - avaliação manual		Método - PI	
mm	0,32		0,19
Escala	11,8 px/mm		




Experimento 2		Auto TH 91-255 -R1_Out_filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	0,35		0,27
Escala	8,9 px/mm		



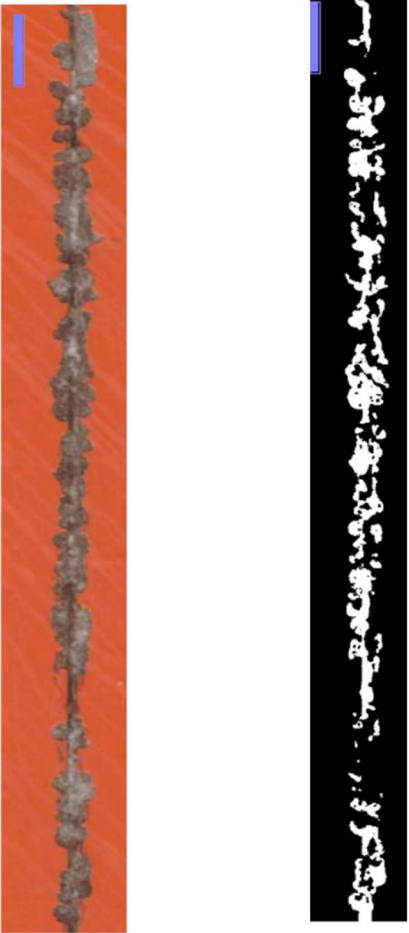
Experimento 3		Auto TH 102-255 -R3 filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	1,73		1,44
Escala	11,8		




Experimento 4		Auto TH 108-255 -R3+Manual filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	1,68		1,48
Escala	11,8 px/mm		

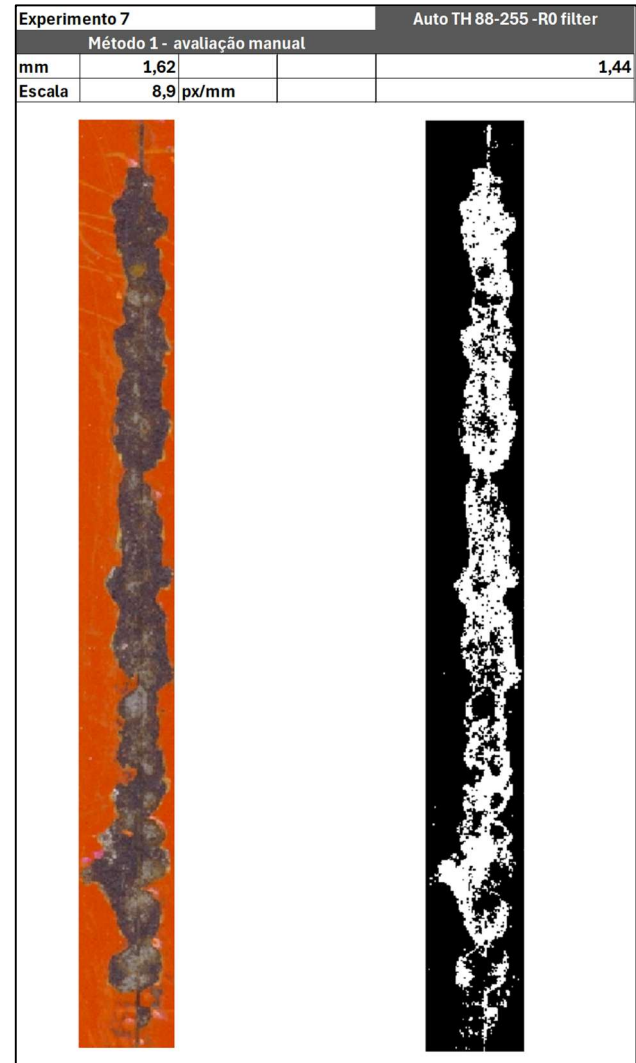
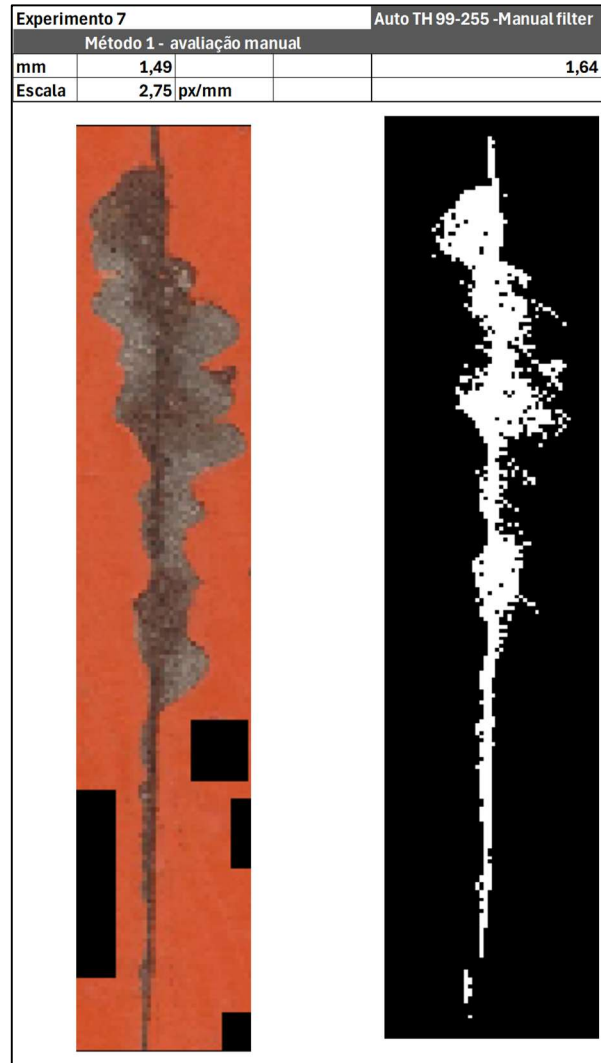


Experimento 5		Auto TH 108-255 -R3 filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	1,17		1,08
Escala	11,8 px/mm		



Experimento 6		Auto TH 93-255 -R2 filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	1,82		1,83
Escala	11,8 px/mm		





Para verificarmos se existia correlação entre as medidas manuais e via processamento de imagens plotamos as respostas manuais no eixo x e as respostas via processamento de imagens no eixo y, dessa forma podemos observar a existência de correlação entre os métodos.

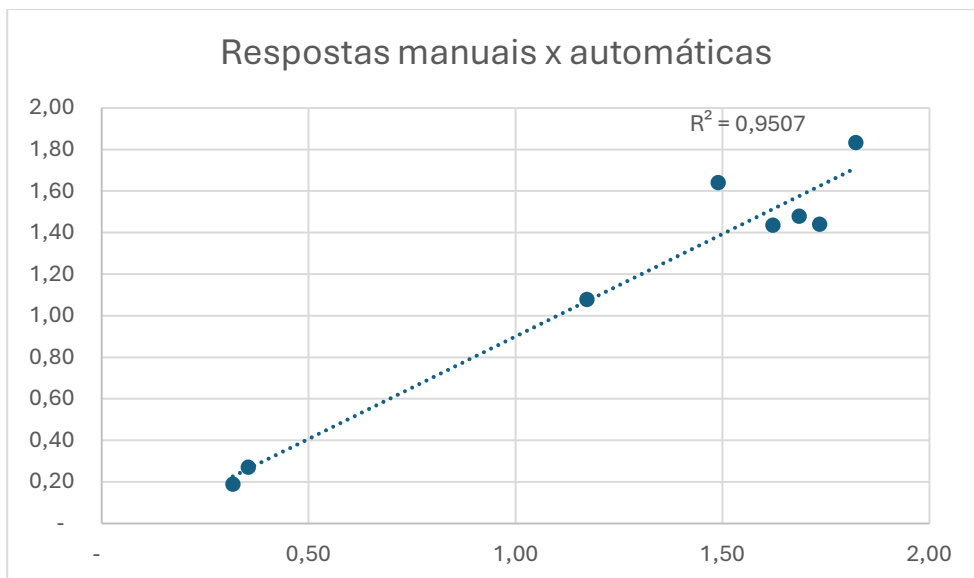


GRÁFICO 5.1 - Dispersão dos dados das medições manuais x via processamento de imagens para o experimento fatorial A.

O gráfico de dispersão demonstra que os valores medidos através do método via processamento de imagens, para as amostras apresentadas, possuem boa correlação com os valores das medições manuais, alcançando valores de 95% de correlação para o espaço amostral deste trabalho.

Em seguida realizamos a avaliação dos efeitos com o intuito de verificar se os dados obtidos por ambos os métodos possuiriam coerência do ponto de vista físico que o efeito das variáveis exerce sobre as respostas.

Segue abaixo a avaliação dos efeitos das respostas via processamento de imagens.



Planejamento Fatorial Completo 2²



Identificação:

Data: 19/02/2025

Ensaio	Nº Rep.	Respostas das repetições				Médias	Variâncias		Efeitos	Erros	t (4)	p	
1	2	1,641	1,435				1,53828	0,02117296	SG Média	1,1713 ±	0,0983	11,912	0,00028
2	2	1,08	1,834				1,45699	0,28423941	SG	1 -0,6556 ±	0,1967	3,3339	0,029
3	2	1,44	1,48				1,46	0,0008	SG	2 -0,6526 ±	0,1967	3,3185	0,02942
4	2	0,19	0,27				0,23	0,0032	SG	12 -0,5744 ±	0,1967	2,9205	0,04322
Variância das observações individuais →							0,07735309	Nível de significância α 0,05					
Variância dos efeitos →							0,03867655						
Erro dos efeitos →							0,19666354						

TABELA 5.1 - Avaliação dos efeitos das medições via processamento de imagens no experimento Fatorial A - Decapagem = cte.

Foi utilizada a rotina em Excel disponibilizada pela Professora Dra. Marcia Ferreira, IQ. Unicamp.

Avaliando a tabela de cálculo dos efeitos, podemos observar as conclusões abaixo:

- O efeito da variável **número 1**, que é o **Tratamento de conversão de superfície**, é **-0,65 mm**, ou seja, ao preparar as amostras **com o nível mais alto**, que é a utilização **de fosfato de zinco** neste caso, obtivemos **0,65 mm à menos** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **via processamento de imagens**.
- O efeito da variável **número 2**, que é o **tipo de tinta**, é **- 0,65 mm**, ou seja, ao preparar as amostras **com o nível mais alto**, que é a utilização **de tinta pó** neste caso, obtivemos **0,65 mm à menos** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método processamento de imagens**.
- O efeito da **interação das variáveis 1 e 2**, possui um efeito igual à **- 0,57 mm**, ou seja, ao preparar as amostras com as duas variáveis no mesmo nível, seja o mais alto ou mais baixo, obtivemos **0,57 mm à menos** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método processamento de imagens**.

Em seguida calculamos os quadrados dos efeitos, com o intuito de avaliar a magnitude de cada efeito e plotamos um gráfico dos percentuais de cada efeito.

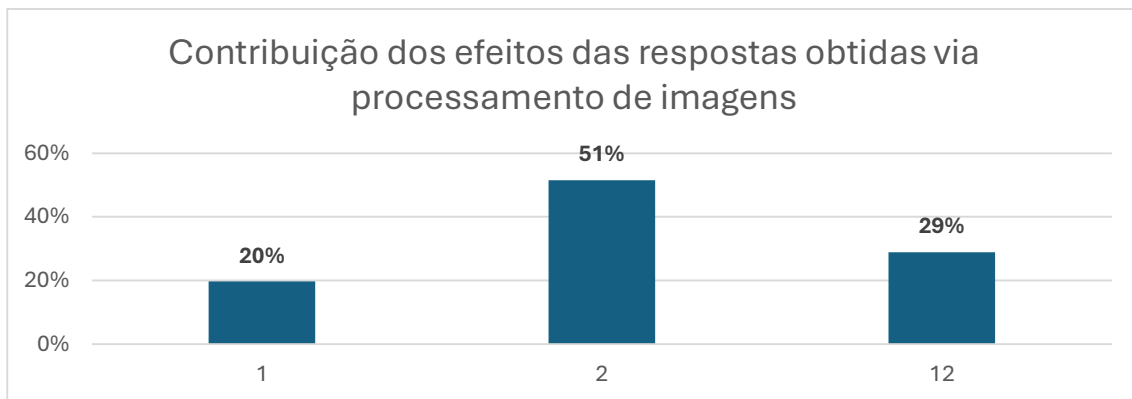


GRÁFICO 5.2 - Contribuição do quadrado dos efeitos para as medições via processamento de imagens para o experimento Fatorial A.

Neste gráfico podemos observar que:

- O efeito da **variável 1**, que é o **tipo de decapagem** responde por **20%** dos efeitos totais.
- O efeito da **variável 2**, que é o **tipo da tinta**, responde por **51%** dos efeitos totais.
- O efeito da **interação das variáveis 1 e 2** responde por **29%** dos efeitos totais.



Planejamento Fatorial Completo 2²



Identificação:

Data: 19/02/2025

Ensaio	Nº Rep.	Respostas das repetições				Médias	Variâncias	Efeitos	Erros	t (4)	p
1	2	1,489	1,622			1,55558	0,00875826	SG Média 1,2743 ± 0,0833	15,303	0,00011	
2	2	1,172	1,822			1,49679	0,21120125	SG 1 -0,7164 ± 0,1665	4,3018	0,01263	
3	2	1,734	1,685			1,70935	0,00121525	SG 2 -0,5039 ± 0,1665	3,0255	0,03895	
4	2	0,317	0,354			0,3353	0,00070688	SG 12 -0,6576 ± 0,1665	3,9488	0,01683	
Variância das observações individuais →							0,05547041	Nível de significância α 0,05			
Variância dos efeitos →							0,0277352				
Erro dos efeitos →							0,1665389				

TABELA 5.2 - Avaliação dos efeitos das medições manuais no experimento Fatorial A - Decapagem = cte.

Foi utilizada a rotina em Excel disponibilizada pela Professora Dra. Marcia Ferreira, IQ. Unicamp.

Avaliando a tabela de cálculo dos efeitos, podemos observar as conclusões abaixo:

- O efeito da variável **número 1**, que é o **Tratamento de conversão de superfície**, é **-0,71 mm**, ou seja, ao preparar as amostras **com o nível mais alto**, que é a utilização **de fosfato de zinco** neste caso, obtivemos **0,71 mm à menos** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método manual**.
- O efeito da variável **número 2**, que é o **tipo de tinta**, é **-0,50 mm**, ou seja, ao preparar as amostras **com o nível mais alto**, que é a utilização **de tinta pó** neste caso, obtivemos **0,50 mm à menos** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método manual**.
- O efeito da **interação das variáveis 1 e 2**, possui um efeito igual à **-0,65 mm**, ou seja, ao preparar as amostras com as duas variáveis no mesmo nível, seja o mais alto ou mais baixo, obtivemos **0,65 mm à menos** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método manual**.

Em seguida calculamos os quadrados dos efeitos, com o intuito de avaliar a magnitude de cada efeito e plotamos um gráfico dos percentuais de cada efeito.

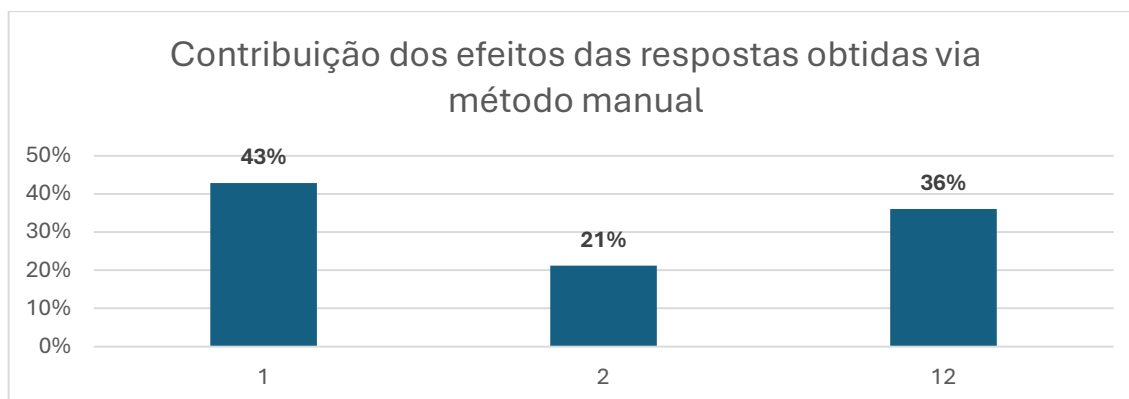


GRÁFICO 5.3 - Contribuição do quadrado dos efeitos para as medições manuais para o experimento Fatorial A.

Neste gráfico podemos observar que:

- O efeito da **variável 1**, que é o **tratamento de conversão** de superfície, responde por **43%** dos efeitos totais.
- O efeito da **variável 2**, que é o **tipo da tinta**, responde por **21%** dos efeitos totais.
- O efeito da **interação das variáveis 1 e 2** responde por **28%** dos efeitos totais.

Em ambos os casos podemos observar que os valores dos efeitos foram maiores dos os valores dos erros, o que indica que as variações observadas nas respostas são atribuíveis principalmente aos fatores manipulados no experimento, e não ao erro aleatório.

Além disso tanto no método manual quanto no método via processamento de imagens, podemos verificar que os efeitos das variáveis possuem coerência com as respostas obtidas, ou seja em ambos os métodos quando a variável 1 está no nível mais alto observamos redução no avanço de corrosão e quando a variável 2 está no nível mais alto também observamos redução no avanço de corrosão.

5.2. Experimento Fatorial 2^2 - B



Abaixo temos o experimento fatorial B completo com suas respectivas condições, fatores, codificação e respostas das medições manuais e via processamento de imagens.



O quadro a seguir apresenta as quatro condições experimentais distintas, cada uma com uma réplica, totalizando oito experimentos. No delineamento fatorial B descrito, o fator decapagem variou entre decapagem química com ácido sulfúrico (nível mais baixo, -1) nos experimentos 3, 4 7 e 8 e decapagem mecânica com jateamento de granalha de aço (nível mais alto, +1) nos experimentos 1, 2, 5 e 6. Quanto ao fator tratamento de conversão, foi mantido constante o tratamento de fosfato de zinco. Para o fator tinta, a aplicação de tinta em pó (nível mais alto, +1) ocorreu nos experimentos 1 a 4, e tinta líquida (nível mais baixo, -1) nos experimentos 5 a 8. As colunas subsequentes apresentam a codificação empregada, a matriz de interações e as respostas obtidas pelos métodos utilizados: o método manual, à esquerda, corresponde aos resultados provenientes de análise manual, e o método referenciado como PI na tabela abaixo, coluna à direita, refere-se aos resultados obtidos por meio de processamento de imagens.



Após a tabela de condições experimentais apresentamos algumas amostras avaliadas neste experimento.

Exp	Condições	Decapagem	Tratamento	Tinta	Identificação	Codificação		Interações			Respostas	
								1	2	12	Manual	PI
1	1	Jato Automático	Cte = FosfZn	Pó	JA+FZn+PP(1)	1	1	1	1	1	0,32	0,19
2	1	Jato Automático	Cte = FosfZn	Pó	JA+FZn+PP(4)	1	1	1	1	1	0,35	0,27
3	2	Decapante químico	Cte = FosfZn	Pó	Dec-FZn-PP(1)	-1	1	-1	1	-1	0,32	0,41
4	2	Decapante químico	Cte = FosfZn	Pó	Dec-Fzn-PP(2)	-1	1	-1	1	-1	0,14	0,23
5	3	Jato Automático	Cte = FosfZn	Líquida	JA-Fzn-PL (1)	1	-1	1	-1	-1	1,17	1,08
6	3	Jato Automático	Cte = FosfZn	Líquida	JA-Fzn-PL (3)	1	-1	1	-1	-1	1,82	1,83
7	4	Decapante químico	Cte = FosfZn	Líquida	Dec-Fzn-PL (4)	-1	-1	-1	-1	1	0,31	0,33
8	4	Decapante químico	Cte = FosfZn	Líquida	Dec-Fzn-PL (5)	-1	-1	-1	-1	1	0,66	0,67

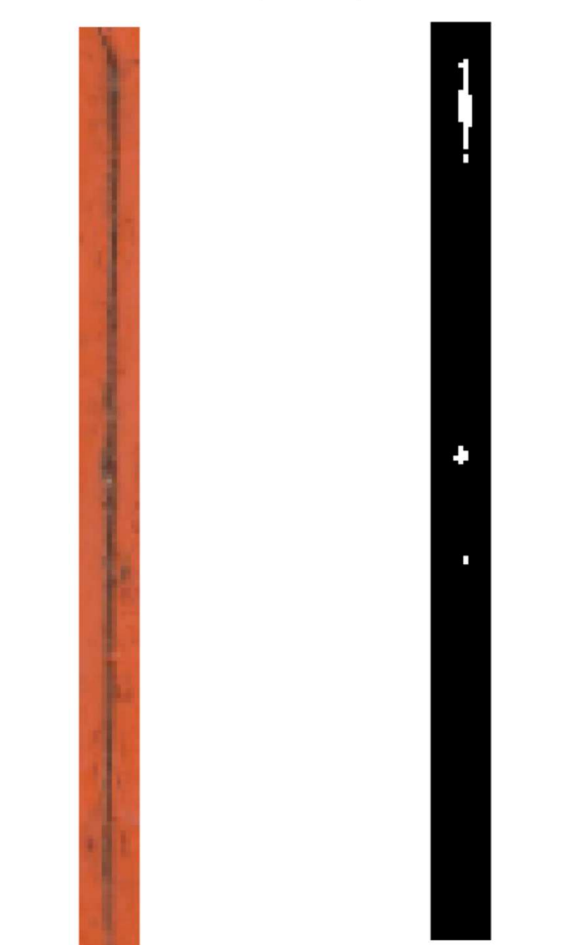
Figura 5.2 - Experimento Fatorial 2² B: Tratamento de conversão = Cte = Fosfato de Zinco.

Experimento 1			Auto TH 95-255 -R3 filter		
Método 1 - avaliação manual		Método - PI			
mm	0,32				0,19
Escala	11,8 px/mm				
					

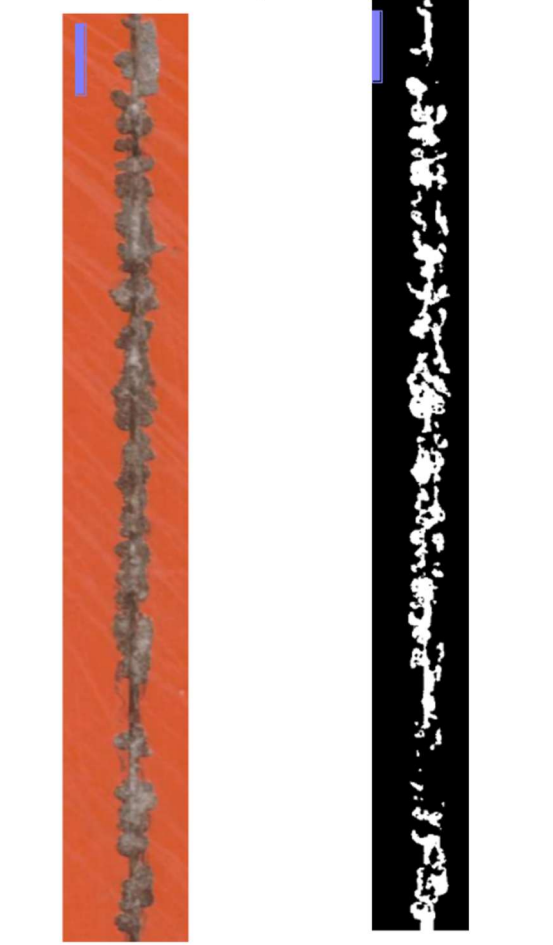
Experimento 2			Auto TH 91-255 -R1_Out_filter		
Método 1 - avaliação manual		Método 1			
mm	0,35				0,27
Escala	8,9 px/mm				
					

Experimento 3			Auto TH 100-255 -R3 filter		
Método 1 - avaliação manual		Método 1			
mm	0,32				0,41
Escala	11,8 px/mm				
					

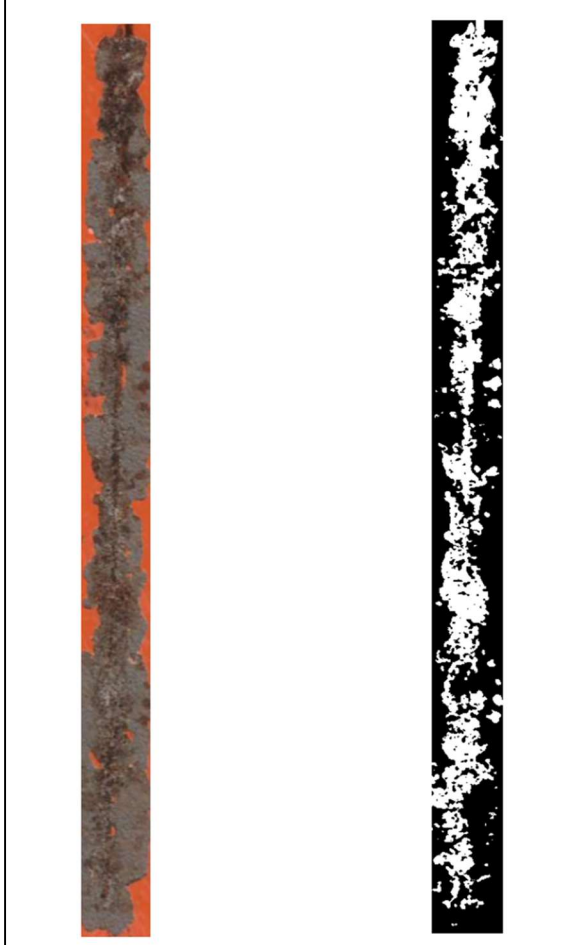
Experimento 4		Auto TH 106-255 -R3 filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	0,14		0,23
Escala	2,75		



Experimento 5		Auto TH 108-255 -R3 filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	1,17		1,08
Escala	11,8 px/mm		



Experimento 6		Auto TH 93-255 -R2 filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	1,82		1,83
Escala	11,8 px/mm		



Experimento 7		Auto TH 102-255 -R2 filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	0,31		0,33
Escala	11,8 px/mm		

Experimento 8		Auto TH 101-255 -R4 filter	
Método 1 - avaliação manual		Método 1	
mm	0,66		0,67
Escala	11,8 px/mm		

The image displays two vertical strips for each experiment. The left strip in each pair shows the original image with a red background and dark, irregular patterns. The right strip shows the result of an automatic thresholding filter, where the background is black and the patterns are white, highlighting the contrast between the two.

Para avaliar a correlação entre as medidas obtidas manualmente e aquelas geradas por processamento de imagens no experimento fatorial B, as respostas manuais foram plotadas no eixo x e as respostas via processamento de imagens no eixo y. Dessa forma, foi possível verificar a relação entre os métodos para o conjunto experimental atual.

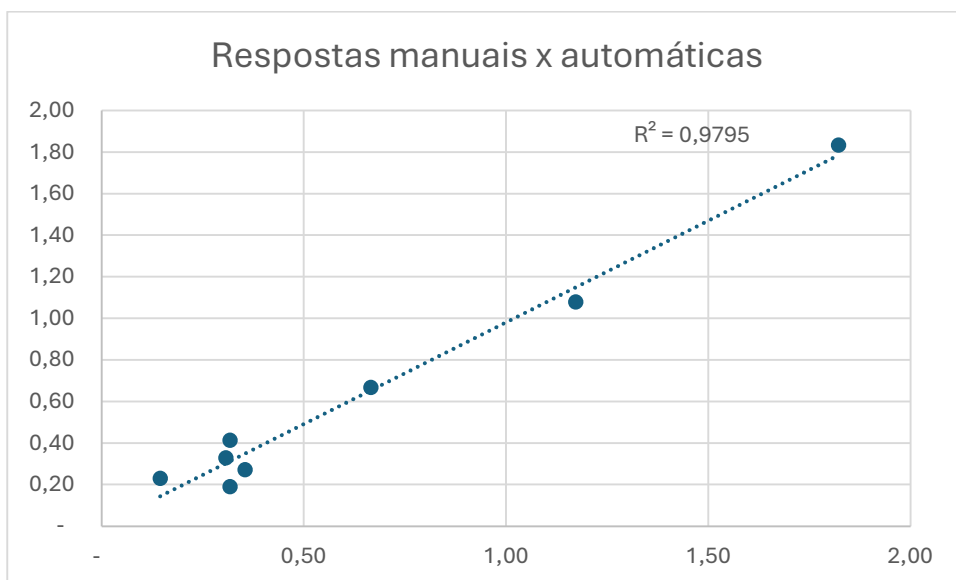


GRÁFICO 5.4 - Dispersão dos dados das medições manuais x via processamento de imagens para o experimento fatorial B.

O gráfico de dispersão evidencia que os valores obtidos pelo método via processamento de imagens no experimento B apresentam boa correlação com as medições manuais, atingindo aproximadamente 97% de correlação para o conjunto amostral analisado.

Em seguida, realizou-se a análise dos efeitos com o objetivo de verificar se os dados obtidos por ambos os métodos apresentam consistência física em relação à influência das variáveis sobre as respostas.

Segue abaixo a avaliação dos efeitos das respostas via processamento de imagens.



Planejamento Fatorial Completo 2²



Identificação:

Data: 19/02/2025

Ensaio	Nº Rep.	Respostas das repetições				Médias	Variâncias	Efeitos	Erros	t (4)	p	
1	2	0,328	0,667			0,4973	0,05745475	SG Média 0,6262 ±	0,1064	5,8825	0,00417	
2	2	1,079	1,834			1,45647	0,28501832	1 0,4341 ±	0,2129	2,0391	0,11105	
3	2	0,413	0,229			0,32095	0,01678459	SG 2 -0,7014 ±	0,2129	3,2945	0,03009	
4	2	0,189	0,271			0,23004	0,00334583	12 -0,525 ±	0,2129	2,4662	0,06923	
Variância das observações individuais →							0,09065087	Nível de significância α				0,05
Variância dos efeitos →							0,04532544					
Erro dos efeitos →							0,21289771					

TABELA 5.3 - Avaliação dos efeitos das medições via processamento de imagens no experimento Fatorial B – Tratamento de conversão = cte.

Foi utilizada a rotina em Excel disponibilizada pela Professora Dra. Marcia Ferreira, IQ. Unicamp.

Avaliando a tabela de cálculo dos efeitos, podemos observar as conclusões abaixo:

- O efeito da variável **número 1**, que é o **tipo de decapagem**, é **0,43 mm**, ou seja, ao preparar as amostras **com o nível mais alto**, que é a utilização **de decapagem mecânica via jateamento automático com granalha de aço** neste caso, obtivemos **0,43 mm à mais** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método via processamento de imagens**.
- O efeito da variável **número 2**, que é o **tipo de tinta**, é **-0,70 mm**, ou seja, ao preparar as amostras **com o nível mais alto**, que é a utilização **de tinta pó** neste caso, obtivemos **0,70 mm à menos** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método via processamento de imagens**.
- O efeito da **interação das variáveis 1 e 2**, possui um efeito igual à **-0,52 mm**, ou seja, ao preparar as amostras com as duas variáveis no mesmo nível, seja o mais alto ou mais baixo, obtivemos **0,52 mm à menos** no

avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método via processamento de imagens**.

Em seguida calculamos os quadrados dos efeitos, com o intuito de avaliar a magnitude de cada efeito e plotamos um gráfico dos percentuais de cada efeito.

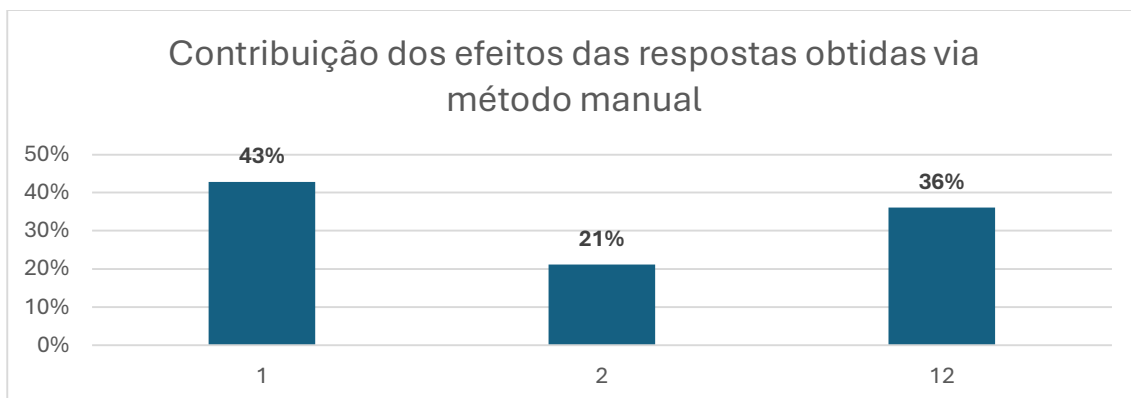


GRÁFICO 5.5 - Contribuição do quadrado dos efeitos para as medições via processamento de imagens para o experimento Fatorial B.

Neste gráfico podemos observar que:

- O efeito da **variável 1**, que é o **tipo de decapagem**, responde por **43%** dos efeitos totais.
- O efeito da **variável 2**, que é o **tipo da tinta**, responde por **21%** dos efeitos totais.
- O efeito da **interação das variáveis 1 e 2** responde por **36%** dos efeitos totais.



Planejamento Fatorial Completo 2²



Identificação:

Data: 19/02/2025

Ensaio	Nº Rep.	Respostas das repetições				Médias	Variâncias		Efeitos	Erros	t (4)	p	
1	2	0,307	0,665			0,48568	0,06420736	SG	Média 0,6371 ±	0,0954	6,6813	0,00261	
2	2	1,172	1,822			1,49679	0,21120125	SG	1 0,5578 ±	0,1907	2,9249	0,04303	
3	2	0,317	0,145			0,23075	0,01487813	SG	2 -0,7082 ±	0,1907	3,7133	0,02059	
4	2	0,317	0,354			0,3353	0,00070688		12 -0,4533 ±	0,1907	2,3767	0,07626	
Variância das observações individuais →							0,0727484		Nível de significância α			0,05	▲▼
Variância dos efeitos →							0,0363742						
Erro dos efeitos →							0,19072022						



TABELA 5.4 - Avaliação dos efeitos das medições manuais no experimento Fatorial B – Tratamento de conversão = cte.

Foi utilizada a rotina em Excel disponibilizada pela Professora Dra. Marcia Ferreira, IQ. Unicamp.

Avaliando a tabela de cálculo dos efeitos, podemos observar as conclusões abaixo:

- O efeito da variável **número 1**, que é o **tipo de decapagem**, é **0,55 mm**, ou seja, ao preparar as amostras **com o nível mais alto**, que é a utilização **de decapagem mecânica via jateamento automático com granalha de aço** neste caso, obtivemos **0,55 mm à mais** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método manual**.
- O efeito da variável **número 2**, que é o **tipo de tinta**, é **-0,70 mm**, ou seja, ao preparar as amostras **com o nível mais alto**, que é a utilização **de tinta pó** neste caso, obtivemos **0,70 mm à menos** no avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método manual**.
- O efeito da **interação das variáveis 1 e 2**, possui um efeito igual à **-0,45 mm**, ou seja, ao preparar as amostras com as duas variáveis no mesmo nível, seja o mais alto ou mais baixo, obtivemos **0,45 mm à menos** no

avanço de corrosão médio a partir da incisão realizada nas amostras quando avaliada com o **método manual**.

Em seguida calculamos os quadrados dos efeitos, com o intuito de avaliar a magnitude de cada efeito e plotamos um gráfico dos percentuais de cada efeito.

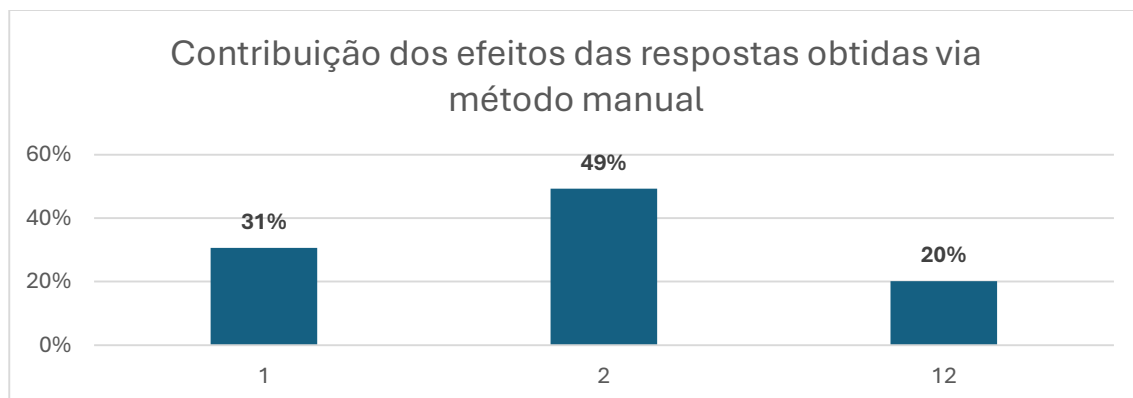


GRÁFICO 5.6 - Contribuição do quadrado dos efeitos para as medições manuais para o experimento Fatorial.

Neste gráfico podemos observar que:

- O efeito da **variável 1**, que é o **tipo de decapagem**, responde por **31%** dos efeitos totais.
- O efeito da **variável 2**, que é o **tipo da tinta**, responde por **49%** dos efeitos totais.
- O efeito da **interação das variáveis 1 e 2** responde por **20%** dos efeitos totais.

Novamente em ambos os casos podemos observar que os valores dos efeitos foram maiores dos os valores dos erros, o que indica que as variações observadas nas respostas são atribuíveis principalmente aos fatores manipulados no experimento, e não ao erro aleatório.

Ademais, nos dois métodos, manual e via processamento de imagens, observa-se que os efeitos das variáveis são coerentes com as respostas obtidas. Especificamente, em ambos os casos, quando a variável 1 encontra-se no nível mais elevado, verifica-se um aumento no avanço da corrosão, já quando a variável 2 está no seu nível mais alto, é observado redução no avanço da corrosão.

Os gráficos de dispersão gerados a partir dos dados coletados revelaram uma correlação significativa (95% e 97%) entre os valores obtidos através do método via processamento de imagens e aqueles obtidos pelas medições manuais. Essa correlação indica que o método de processamento de imagens desenvolvido é capaz de fornecer resultados comparáveis aos métodos tradicionais, validando sua aplicabilidade como ferramenta de análise. Além disso, a avaliação dos efeitos dos fatores (decapagem e tratamento de conversão) nas respostas (avanço da corrosão) demonstrou que as variações observadas são atribuíveis principalmente aos fatores manipulados no experimento, e não a erros aleatórios, o que reforça a confiabilidade dos resultados obtidos por ambos os métodos.

A utilização do ImageJ permitiu a quantificação precisa do avanço da corrosão a partir do risco induzido nos corpos de prova, através de um procedimento via processamento de imagens que envolveu a calibração da escala, a delimitação da região de interesse, a conversão da imagem para escala de 8 bits, o ajuste do *threshold*, a inversão do LUT, a remoção de outliers e a binarização da imagem, procedimentos que podem ainda ser integrados e uma macro única para otimizar ainda mais o método, principalmente quando falamos de economia de tempo da mão de obra técnica.

Embora o método manual seja amplamente utilizado e aceito, ele apresenta limitações inerentes à subjetividade do avaliador e à dificuldade de quantificar precisamente a área corroída e ao tempo dispendido pelo operador para realizar cada avaliação, além de questões de fadiga, que impactam na agilidade e precisão das medidas. O método de processamento de imagens, por sua vez, oferece uma alternativa mais objetiva, precisa e rápida, que pode reduzir a variabilidade nos resultados e aumentar a confiabilidade das conclusões. No entanto, é importante ressaltar que o método automatizado requer um cuidado especial na configuração dos parâmetros de processamento de imagem, como a definição da ROI e a remoção de outliers, para garantir que os resultados obtidos sejam representativos da realidade. Outro ponto importante de se ressaltar é de quanto a delimitação da região corroída será tanto melhor quando for a resolução de captura das imagens.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e apresentados, esta tese demonstra a viabilidade e eficácia da utilização do software ImageJ para o processamento de imagens na avaliação de corpos de prova submetidos a ensaios de corrosão acelerada, em conformidade com a norma ASTM B117 e D1654.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um método alternativo ao método manual tradicionalmente empregado na análise de corrosão, buscando maior precisão, objetividade e reprodutibilidade nos resultados.

Em conclusão, esta tese demonstra que o software ImageJ pode ser utilizado de forma eficaz para o processamento de imagens na avaliação de corpos de prova submetidos a ensaios de corrosão acelerada, oferecendo uma alternativa promissora ao método manual tradicional. Os resultados obtidos indicam que o método automatizado é capaz de fornecer resultados comparáveis aos métodos manuais, com a vantagem de ser mais objetivo, preciso e reprodutível. Este trabalho contribui para o avanço das técnicas de avaliação de corrosão e pode ser utilizado como base para o desenvolvimento de novas metodologias e ferramentas que auxiliem na análise da durabilidade de materiais e revestimentos, mas principalmente, propõe uma forma de otimizar a utilização da mão de obra técnica, liberando recursos para atividades de maior agregação de valor e possibilitando a redução do tempo de treinamento para que novos técnicos possam assumir estas responsabilidades. Apesar disso, imagens onde há grandes deslocamentos de tinta mostraram-se ainda um desafio para a técnica em função da dificuldade de definir o limiar entre tinta x metal base x metal corroído. Outra dificuldade neste tipo de situação é que o metal exposto pode apresentar regiões onde houve ataque corrosivo, porém sem a coloração típica dos produtos de corrosão, necessitando dessa de supervisão humana até que o método seja refinado para identificação de tais áreas.

7. CONTRIBUIÇÕES PARA A PESQUISA E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este trabalho não apenas validou o uso do ImageJ como ferramenta complementar à ASTM D1654, mas também identificou oportunidades para aprimoramentos futuros:

1. Integração com IA: Algoritmos de aprendizado de máquina podem ser treinados para classificar automaticamente padrões de corrosão e classificá-los.
2. Padronização de Parâmetros: Estabelecer valores universais de *threshold* e filtragem de ruído, garantindo comparabilidade entre diferentes equipamentos e softwares.
3. Expansão para outros revestimentos: A metodologia foi aplicada em amostras com tinta cor laranja, por corresponder à 90% das tintas utilizadas na Jacto, dessa forma há oportunidade de o método ser adaptada para analisar outros sistemas e cores.

8. REFERÊNCIAS

AGOSTINHO M. S. L., JAIMES F.V.V. R., BARBOSA N. L.G. O que se pode aprender a partir de medidas de potencial de circuito aberto, INTERCORR 2010, Fortaleza/CE, maio de 2010.

ALI, A.A.I.M.; JAMALUDIN, S.; IMRAN, M.M.H.; AYOB, A.F.M.; AHMAD, S.Z.A.S.; AKHBAR, M.F.A.; SUHRAB, M.I.R.; RAMLI, M.R. Computer Vision and Image Processing Approaches for Corrosion Detection. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11,1954. <https://doi.org/10.3390/jmse11101954>

ANTUNES R. A. Correlação entre ensaios acelerados e ensaios de campo em corpos de provas de aço carbono e aço patinável, sem e com revestimento. São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais - IPEN, 2002, Tese de Mestrado.

Aprieto Jateamento - Aprieto Jato, Curso de Jateamento Industrial – Parte 02

ASTM B117-2016 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.

ASTM D1654-2008 Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments.

ATIKINS P., PAULA J. Físico-química, 9ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2010.

BAGATHI H. V., MALLIKA A., ALAPATI R., LEMUEL S. Corrosion Assessment Using Image Based Deep Learning Models. Procedia Structural Integrity, v. 70, p. 447-452, 2025. DOI: 10.1016/j.prostr.2025.07.076.

Departamento De Engenharia Química metalúrgica E De Materiais - Escola Politécnica Da USP - PMT-3405 - Corrosão e Proteção de Materiais

DR. PARIHAR R. T. AND MULEY, N. S. Corrosion in Agriculture Instruments and Equipments : Reasons and Solutions, 2022 JETIR May 2022, Volume 9, Issue 5.

Eker B, Yuksel E. Solutions to corrosion caused by agricultural chemicals. Trakia Journal of Sciences. 2005;3(7):1-6.

FERRAZ B. M. F. Correlation between electrochemical test methods and standardized corrosion tests on cathodic electrocoatings. Institute of Materials Science, Joining and Forming, 2018, Graz University of Technology.

GENTIL, V. Corrosão. 6a ed. Rio de Janeiro, LTC, 2017.

REVIE R. W. e UHLIG H. H.,. Corrosion and corrosion control : an introduction to corrosion science and engineering. 4th ed. New Jersey. 2008.

<http://web.leg.ufpr.br/ensino/CPI/apostila/experimentos-fatoriais-2k.html>, acessado em 17/10/24.

http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_pro.html, acessado em 17/10/24.

<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>, (Acessado em 18/04/2023).

<https://brasil.un.org/pt-br/301975-relat%C3%B3rio-anual-das-na%C3%A7%C3%B5es-unidas-2025>, (Acessado em 10/01/2025).

<https://imagej.net/plugins/auto-threshold>, acessado em 10/10/2024.

https://pt.wikipedia.org/wiki/Processamento_de_imagem, acessado em 17/01/25.

https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/cienciasexatas/amandalizpacificomannfrim/fatoriais_3_impr.pdf, acessado em 15/10/24.

ISO 12944-9:2018 - Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures (ISO 12944-9:2018).

KHAYATAZAD, M.; DE PUE, L.; DE WAELE, W. Detection of corrosion on steel structures using automated image processing. *Developments in the Built Environment*, v. 3, p. 100022, 2020.

LOPES, S. M. T. Aplicação da técnica de EIS na caracterização de revestimentos anticorrosivos. Porto Programa de Mestrado Integrado em Engenharia Química, 2018, FEUP - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

MOREIRA, B. V., 2020, Computational image analysis as an alternative tool for the evaluation of corrosion in salt spray test.

MULEY, S. N. & PARIHAR, R. T. Corrosion in Agriculture Instruments and Equipments : Reasons and Solutions, JETIR May 2022, Volume 9, Issue 5.

NACE INTERNATIONAL. International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technologies Study - IMPACT. Houston, TX, 2016.

PALGRAVE DA, Smith GD. The corrosion of mild steel by fertilizer solutions. J. agric. Engng Res. 1972; 17:236-245.

PINHEIRO, R. S. G., SOARES M. H. F. B. Robótica educacional, ensino de química e aprendizagem cooperativa: uma proposta para o curso de ensino superior em engenharia civil, October 2022, Química Nova 45

RIOS C. E, Estudo Da Corrosão De Aço AISI 1020 Em Meio De Petróleo. São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Química - UFSCar, 2011, Tese de doutorado.

SANTOS R. D. M., Investigação da corrosão do aço carbono AISI 1020 em soluções de NaCl utilizando microscopia óptica in situ, São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Química - UFSCar, 2016, Tese de Mestrado.

Site ABRACO <https://abraco.org.br/> (Acessado em 18/04/2023).

Site AMPP <https://www.ampp.org/home> (Acessado em 28/04/2023).

Site de e-disciplinas da USP - https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6343675/mod_resource/content/1/Texto%20sobre%20Curvas%20de%20Polariza%C3%A7%C3%A3o_2021-Entrega%20at%C3%A9%2003-08-21.pdf (Acessado em 10/05/2023).

Site o prato da manhã - https://pratodoamanha.com.br/ods-2-conheca-o-objetivo-da-onu-para-o-fim-da-fome-no-mundo/?gclid=CjwKCAjw0ZiiBhBKEiwA4PT9zz0VPMw67HpReDwpfxe18daaJaIU3BXSZvlpX7cITZwKVhPDR4Qi7hoC2aEQAvD_BwE (Acessado em 20/04/2023).

SUNDARAM P. K., MANI I., PARRAY R. A. Effect of urea ammonium nitrogen fertilizer on corrosion of different metals, International Journal of Chemical studies, IJCS 2019; 7(5): 2256-2259, 2019 IJCS

T. W. RIDLER AND S. CALVARD, Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method, 3eee transactions on systems, man, and cybernetics, vol. smc-8, no. 8, august 1978.

TEOFILO, R. F. ; FERREIRA, M, M ,C. quimiometria ii: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial, Química Nova, 2005.

YIN, Biao; JOSSELYN, Nicholas; CONSIDINE, Thomas; et al. Corrosion Image Data Set for Automating Scientific Assessment of Materials. [S.l.], 2021.

ZIMER, A. M. Estudo da corrosão do aço carbono em meio de sulfeto. São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Química - UFSCar, 2009, Tese de doutorado.

9. APÊNDICES

9.1. Macro utilizada para processar os dados das imagens obtidos no ImageJ, realizando o cálculo do avanço máximo de corrosão para cada seção da incisão realizada na chapa de teste.

```

Sub Macro2()
'
' Macro2 Macro
'
' Atalho do teclado: Ctrl+o
'

Columns("A:A").Select
Range("A10").Activate
Selection.TextToColumns Destination:=Range("A1"), DataType:=xlDelimited, _
    TextQualifier:=xlDoubleQuote, ConsecutiveDelimiter:=False, Tab:=True, _
    Semicolon:=False, Comma:=True, Space:=False, Other:=False, FieldInfo _
:=Array(Array(1, 1), Array(2, 1), Array(3, 1), Array(4, 1), Array(5, 1), Array(6, 1), _
    Array(7, 1), Array(8, 1), Array(9, 1), Array(10, 1), Array(11, 1), Array(12, 1), Array(13, 1 _
    ), Array(14, 1), Array(15, 1), Array(16, 1), Array(17, 1), Array(18, 1), Array(19, 1), Array _
    (20, 1), Array(21, 1), Array(22, 1), Array(23, 1), Array(24, 1), Array(25, 1), Array(26, 1), _
    Array(27, 1), Array(28, 1), Array(29, 1), Array(30, 1), Array(31, 1), Array(32, 1), Array( _

```

33, 1), Array(34, 1), Array(35, 1), Array(36, 1)), TrailingMinusNumbers:=True
Columns("A:A").Select
Range("A10").Activate
Selection.ClearContents
Columns("B:B").Select
Range("B10").Activate
Selection.ClearContents
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-9
Rows("1:1").Select
Selection.ClearContents
Range("A1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "XA"
Range("A2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IFERROR(MATCH(255,RC[2]:RC[337],0),0)"
Range("A2").Select
Selection.Copy
Range("C2").Select
Selection.End(xlDown).Select
Range("A254").Select
Range(Selection, Selection.End(xlUp)).Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlUp).Select

Application.CutCopyMode = False
ActiveWindow.ScrollColumn = 2
ActiveWindow.ScrollColumn = 3
ActiveWindow.ScrollColumn = 4
ActiveWindow.ScrollColumn = 5
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
ActiveWindow.ScrollColumn = 7
ActiveWindow.ScrollColumn = 8
ActiveWindow.ScrollColumn = 9
ActiveWindow.ScrollColumn = 10
ActiveWindow.ScrollColumn = 11
ActiveWindow.ScrollColumn = 12
ActiveWindow.ScrollColumn = 13
ActiveWindow.ScrollColumn = 14
Range("LZ1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "XB"
Range("LZ2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IFERROR(XMATCH(255,RC[-335]:RC,0,-1),0)"
Range("LZ2").Select
Selection.Copy
Selection.End(xlToLeft).Select
Selection.End(xlDown).Select

Range("LZ254").Select
Range(Selection, Selection.End(xlUp)).Select
ActiveSheet.Paste
ActiveWindow.ScrollRow = 240
ActiveWindow.ScrollRow = 239
ActiveWindow.ScrollRow = 237
ActiveWindow.ScrollRow = 236
ActiveWindow.ScrollRow = 234
ActiveWindow.ScrollRow = 232
ActiveWindow.ScrollRow = 231
ActiveWindow.ScrollRow = 230
ActiveWindow.ScrollRow = 229
ActiveWindow.ScrollRow = 228
ActiveWindow.ScrollRow = 225
ActiveWindow.ScrollRow = 223
ActiveWindow.ScrollRow = 222
ActiveWindow.ScrollRow = 219
ActiveWindow.ScrollRow = 217
ActiveWindow.ScrollRow = 214
ActiveWindow.ScrollRow = 213
ActiveWindow.ScrollRow = 212
ActiveWindow.ScrollRow = 210

ActiveWindow.ScrollRow = 209
ActiveWindow.ScrollRow = 208
ActiveWindow.ScrollRow = 206
ActiveWindow.ScrollRow = 205
ActiveWindow.ScrollRow = 204
ActiveWindow.ScrollRow = 203
ActiveWindow.ScrollRow = 202
ActiveWindow.ScrollRow = 201
ActiveWindow.ScrollRow = 199
ActiveWindow.ScrollRow = 198
ActiveWindow.ScrollRow = 197
ActiveWindow.ScrollRow = 196
ActiveWindow.ScrollRow = 194
ActiveWindow.ScrollRow = 192
ActiveWindow.ScrollRow = 190
ActiveWindow.ScrollRow = 189
ActiveWindow.ScrollRow = 186
ActiveWindow.ScrollRow = 185
ActiveWindow.ScrollRow = 182
ActiveWindow.ScrollRow = 178
ActiveWindow.ScrollRow = 177
ActiveWindow.ScrollRow = 174

ActiveWindow.ScrollRow = 169
ActiveWindow.ScrollRow = 168
ActiveWindow.ScrollRow = 166
ActiveWindow.ScrollRow = 164
ActiveWindow.ScrollRow = 162
ActiveWindow.ScrollRow = 161
ActiveWindow.ScrollRow = 158
ActiveWindow.ScrollRow = 156
ActiveWindow.ScrollRow = 154
ActiveWindow.ScrollRow = 152
ActiveWindow.ScrollRow = 151
ActiveWindow.ScrollRow = 150
ActiveWindow.ScrollRow = 149
ActiveWindow.ScrollRow = 148
ActiveWindow.ScrollRow = 147
ActiveWindow.ScrollRow = 146
ActiveWindow.ScrollRow = 145
ActiveWindow.ScrollRow = 140
ActiveWindow.ScrollRow = 139
ActiveWindow.ScrollRow = 138
ActiveWindow.ScrollRow = 137
ActiveWindow.ScrollRow = 136

ActiveWindow.ScrollRow = 135
ActiveWindow.ScrollRow = 134
ActiveWindow.ScrollRow = 131
ActiveWindow.ScrollRow = 130
ActiveWindow.ScrollRow = 128
ActiveWindow.ScrollRow = 126
ActiveWindow.ScrollRow = 125
ActiveWindow.ScrollRow = 123
ActiveWindow.ScrollRow = 120
ActiveWindow.ScrollRow = 119
ActiveWindow.ScrollRow = 117
ActiveWindow.ScrollRow = 116
ActiveWindow.ScrollRow = 114
ActiveWindow.ScrollRow = 111
ActiveWindow.ScrollRow = 109
ActiveWindow.ScrollRow = 102
ActiveWindow.ScrollRow = 101
ActiveWindow.ScrollRow = 99
ActiveWindow.ScrollRow = 97
ActiveWindow.ScrollRow = 96
ActiveWindow.ScrollRow = 92
ActiveWindow.ScrollRow = 90

ActiveWindow.ScrollRow = 88
ActiveWindow.ScrollRow = 84
ActiveWindow.ScrollRow = 82
ActiveWindow.ScrollRow = 80
ActiveWindow.ScrollRow = 78
ActiveWindow.ScrollRow = 75
ActiveWindow.ScrollRow = 73
ActiveWindow.ScrollRow = 71
ActiveWindow.ScrollRow = 70
ActiveWindow.ScrollRow = 68
ActiveWindow.ScrollRow = 66
ActiveWindow.ScrollRow = 64
ActiveWindow.ScrollRow = 63
ActiveWindow.ScrollRow = 61
ActiveWindow.ScrollRow = 58
ActiveWindow.ScrollRow = 57
ActiveWindow.ScrollRow = 56
ActiveWindow.ScrollRow = 53
ActiveWindow.ScrollRow = 51
ActiveWindow.ScrollRow = 49
ActiveWindow.ScrollRow = 47
ActiveWindow.ScrollRow = 46

ActiveWindow.ScrollRow = 45
ActiveWindow.ScrollRow = 44
ActiveWindow.ScrollRow = 43
ActiveWindow.ScrollRow = 42
ActiveWindow.ScrollRow = 40
ActiveWindow.ScrollRow = 39
ActiveWindow.ScrollRow = 38
ActiveWindow.ScrollRow = 37
ActiveWindow.ScrollRow = 36
ActiveWindow.ScrollRow = 34
ActiveWindow.ScrollRow = 31
ActiveWindow.ScrollRow = 30
ActiveWindow.ScrollRow = 28
ActiveWindow.ScrollRow = 27
ActiveWindow.ScrollRow = 26
ActiveWindow.ScrollRow = 25
ActiveWindow.ScrollRow = 24
ActiveWindow.ScrollRow = 23
ActiveWindow.ScrollRow = 21
ActiveWindow.ScrollRow = 20
ActiveWindow.ScrollRow = 19
ActiveWindow.ScrollRow = 18

ActiveWindow.ScrollRow = 17
ActiveWindow.ScrollRow = 16
ActiveWindow.ScrollRow = 15
ActiveWindow.ScrollRow = 14
ActiveWindow.ScrollRow = 13
ActiveWindow.ScrollRow = 12
ActiveWindow.ScrollRow = 11
ActiveWindow.ScrollRow = 7
ActiveWindow.ScrollRow = 6
ActiveWindow.ScrollRow = 5
ActiveWindow.ScrollRow = 4
ActiveWindow.ScrollRow = 3
ActiveWindow.ScrollRow = 2
ActiveWindow.ScrollRow = 1
Range("LZ14").Select
Application.CutCopyMode = False
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IFERROR(XMATCH(255,RC[-335]:RC[-1],0,-1),0)"
Range("LZ14").Select
Selection.Copy
Range("LZ12").Select
Selection.End(xlUp).Select
Range("LZ2").Select

```
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
ActiveSheet.Paste
Range("M12").Select
Selection.End(xlToLeft).Select
Range("MA1").Select
Application.CutCopyMode = False
Range("MA1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "L = largura"
Range("MA2").Select
Columns("MA:MA").EntireColumn.AutoFit
Range("MA2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-1]-RC[-337]"
Range("MA2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-1]-RC[-337]"
Range("MA2").Select
Selection.Copy
Selection.End(xlToLeft).Select
Selection.End(xlDown).Select
Range("MA254").Select
Range(Selection, Selection.End(xlUp)).Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlUp).Select
```

```
Range("MA1").Select
Application.CutCopyMode = False
Range("MB1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Lmax = máximo seção"
Range("MC1").Select
Columns("MB:MB").EntireColumn.AutoFit
Range("MD1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Número de linhas"
Range("MD4").Select
Columns("MD:MD").EntireColumn.AutoFit
Range("MD2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=COUNT(RC[-3]:R[1035]C[-3])"
Range("MD3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Linhas por seção"
Range("MD4").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=ROUND((R[-2]C/10),0)"
Range("MC1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Numeração seções"
Range("MC4").Select
Columns("MC:MC").EntireColumn.AutoFit
Range("MC2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"
```

```
Range("MC3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "2"
Range("MC4").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "3"
Range("MC2:MC4").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("MC2:MC26"), Type:=xlFillDefault
Range("MC2:MC26").Select
Range("MB27").Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=6
Range("MB26").Select
Application.CutCopyMode = False
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-24]C[-1]:RC[-1])"
Range("LZ20").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IFERROR(XMATCH(255,RC[-335]:RC[-1],0,-1),0)"
Range("MA20").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-1]-RC[-338]"
Range("MA20").Select
Selection.Copy
Selection.End(xlUp).Select
Range("MA2").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
ActiveSheet.Paste
```

```
Range("MC2").Select
Application.CutCopyMode = False
Range("MB26").Select
Selection.Copy
Selection.End(xlDown).Select
Selection.End(xlUp).Select
Selection.End(xlUp).Select
Range("MB2:MC2").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB27").Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB52").Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB77").Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB102").Select
```

ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB127").Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB152").Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB177").Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB202").Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB227").Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Range("MB252").Select
ActiveSheet.Paste
Selection.End(xlDown).Select
Selection.End(xlUp).Select
Selection.End(xlUp).Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "Referência largura corte"
Range("MF1").Select
Columns("MF:MF").EntireColumn.AutoFit
ActiveWindow.SmallScroll ToRight:=7
Range("MF2").Select
*ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[1]C*RC[6]"*
Range("MF3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0.5"
Range("MG1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Método 1"
Columns("MH:MH").Select
Columns("MG:MG").EntireColumn.AutoFit
Range("MG2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=(AVERAGE(RC[-5]:R[274]C[-5])-RC[-1])/2"
Range("MG3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-1]C/R[-1]C[5]"
Range("MH1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Método 2"
Range("MH2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _

"=((R[24]C[-6]-RC[-2])/2+(R[49]C[-6]-RC[-2])/2+(R[74]C[-6]-RC[-2])/2+(R[99]C[-6]-RC[-2])/2+(R[124]C[-6]-RC[-2])/2+(R[149]C[-6]-RC[-2])/2+(R[174]C[-6]-RC[-2])/2+(R[199]C[-6]-RC[-2])/2+(R[224]C[-6]-RC[-2])/2+(R[249]C[-6]-RC[-2])/2+(R[274]C[-6]-RC[-2])/2)/10"

Range("MH3").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-1]C/R[-1]C[4]"

Range("MI1").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "Método 3"

Range("MI2").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=(AVERAGE(RC[-8]:R[252]C[-8])-RC[-3])/2"

Range("MI3").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[-1]C/R[-1]C[3]"

Range("ML1").Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "Escala"

Range("ML1:MO1").Select

ActiveWindow.SmallScroll ToRight:=3

With Selection

.HorizontalAlignment = xlCenter

.VerticalAlignment = xlBottom

.WrapText = False

.Orientation = 0

.AddIndent = False

.IndentLevel = 0

```
.ShrinkToFit = False  
.ReadingOrder = xlContext  
.MergeCells = False  
End With  
Selection.Merge  
Range("ML2").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "2.74"  
Range("MM2").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "px"  
Range("MN2").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"  
Range("MO2").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "mm"  
Range("MG2:MI3").Select  
Selection.Style = "Comma"  
Range("ML1:MO2").Select  
With Selection  
.HorizontalAlignment = xlGeneral  
.VerticalAlignment = xlBottom  
.WrapText = False  
.Orientation = 0  
.AddIndent = False
```

```
.IndentLevel = 0  
.ShrinkToFit = False  
.ReadingOrder = xlContext  
End With  
With Selection  
.HorizontalAlignment = xlCenter  
.VerticalAlignment = xlBottom  
.WrapText = False  
.Orientation = 0  
.AddIndent = False  
.IndentLevel = 0  
.ShrinkToFit = False  
.ReadingOrder = xlContext  
End With  
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone  
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)  
.LineStyle = xlContinuous  
.ThemeColor = 1  
.TintAndShade = -0.349986266670736  
.Weight = xlThin  
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ThemeColor = 1
    .TintAndShade = -0.349986266670736
    .Weight = xlThin
End With
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ThemeColor = 1
    .TintAndShade = -0.349986266670736
    .Weight = xlThin
End With
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ThemeColor = 1
    .TintAndShade = -0.349986266670736
    .Weight = xlThin
End With
With Selection.Borders(xlInsideVertical)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ThemeColor = 1
    .TintAndShade = -0.349986266670736
```

```
.Weight = xlThin
End With
With Selection.Borders(xlInsideHorizontal)
.LineStyle = xlContinuous
.ThemeColor = 1
.TintAndShade = -0.349986266670736
.Weight = xlThin
End With
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
.LineStyle = xlContinuous
.ThemeColor = 1
.TintAndShade = -0.349986266670736
.Weight = xlThin
End With
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
.LineStyle = xlContinuous
.ThemeColor = 1
.TintAndShade = -0.349986266670736
.Weight = xlThin
End With
```

With Selection.Borders(xlEdgeBottom)

.LineStyle = xlContinuous

.ThemeColor = 1

.TintAndShade = -0.349986266670736

.Weight = xlThin

End With

With Selection.Borders(xlEdgeRight)

.LineStyle = xlContinuous

.ThemeColor = 1

.TintAndShade = -0.349986266670736

.Weight = xlThin

End With

With Selection.Borders(xlInsideVertical)

.LineStyle = xlContinuous

.ThemeColor = 1

.TintAndShade = -0.349986266670736

.Weight = xlThin

End With

With Selection.Borders(xlInsideHorizontal)

.LineStyle = xlContinuous

.ThemeColor = 1

.TintAndShade = -0.349986266670736

```
.Weight = xlThin  
End With  
Range("MF1:MI3").Select  
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone  
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)  
    .LineStyle = xlContinuous  
    .ThemeColor = 1  
    .TintAndShade = -0.349986266670736  
    .Weight = xlThin  
End With  
With Selection.Borders(xlEdgeTop)  
    .LineStyle = xlContinuous  
    .ThemeColor = 1  
    .TintAndShade = -0.349986266670736  
    .Weight = xlThin  
End With  
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)  
    .LineStyle = xlContinuous  
    .ThemeColor = 1  
    .TintAndShade = -0.349986266670736  
    .Weight = xlThin
```

End With

With Selection.Borders(xlEdgeRight)

.LineStyle = xlContinuous

.ThemeColor = 1

.TintAndShade = -0.349986266670736

.Weight = xlThin

End With

With Selection.Borders(xlInsideVertical)

.LineStyle = xlContinuous

.ThemeColor = 1

.TintAndShade = -0.349986266670736

.Weight = xlThin

End With

With Selection.Borders(xlInsideHorizontal)

.LineStyle = xlContinuous

.ThemeColor = 1

.TintAndShade = -0.349986266670736

.Weight = xlThin

End With

Range("MF1:MI1").Select

With Selection

.HorizontalAlignment = xlCenter

```
.VerticalAlignment = xlBottom  
.WrapText = False  
.Orientation = 0  
.AddIndent = False  
.IndentLevel = 0  
.ShrinkToFit = False  
.ReadingOrder = xlContext  
.MergeCells = False  
End With  
With Selection.Interior  
.Pattern = xlSolid  
.PatternColorIndex = xlAutomatic  
.ThemeColor = xlThemeColorLight1  
.TintAndShade = 0.349986266670736  
.PatternTintAndShade = 0  
End With  
With Selection.Font  
.ThemeColor = xlThemeColorDark1  
.TintAndShade = 0  
End With  
Selection.Font.Bold = True  
Range("ML1:MO1").Select
```

With Selection.Interior

.Pattern = xlSolid
.PatternColorIndex = xlAutomatic
.ThemeColor = xlThemeColorLight1
.TintAndShade = 0.349986266670736
.PatternTintAndShade = 0

End With

With Selection.Font

.ThemeColor = xlThemeColorDark1
.TintAndShade = 0

End With

Selection.Font.Bold = True

Range("MF2:MF3").Select

With Selection

.HorizontalAlignment = xlCenter
.VerticalAlignment = xlBottom
.WrapText = False
.Orientation = 0
.AddIndent = False
.IndentLevel = 0
.ShrinkToFit = False
.ReadingOrder = xlContext

```
.MergeCells = False  
End With  
End Sub
```