

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

GABRIEL COSTA SILVA
VAGNER APARECIDO DA SILVA JUNIOR

OXIDAÇÃO NEGRA: ANÁLISE TÉCNICA E EFICÁCIA DA
CAMADA PROTETORA EM MATERIAIS METÁLICOS

CAMPINAS/SP
2025

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

GABRIEL COSTA SILVA

VAGNER APARECIDO DA SILVA JUNIOR

OXIDAÇÃO NEGRA: ANÁLISE TÉCNICA E EFICÁCIA DA
CAMADA PROTETORA EM MATERIAIS METÁLICOS

Trabalho de Graduação apresentado por Gabriel Costa Silva e Vagner Aparecido da Silva Junior, como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Processos Químicos, da Faculdade de Tecnologia de Campinas, elaborado sob a orientação da Profa. Dra. Juliana Canto Duarte.

FICHA CATALOGRÁFICA
CEETEPS - FATEC Campinas - Biblioteca

S586o

SILVA JUNIOR, Vagner Aparecido da
Oxidação negra: análise técnica e eficácia da camada protetora em
materiais metálicos. Vagner Aparecido da Silva Junior e Gabriel
Costa Silva. Campinas, 2025.
29 p.; 30 cm.

Trabalho de Graduação do Curso de Processos Químicos
Faculdade de Tecnologia de Campinas.
Orientador: Prof. Dra. Juliana Canto Duarte.

1. Oxidação negra. 2. Proteção superficial. 3. Resistência à
corrosão. 4. Durabilidade. 5. Técnicas de proteção. I. Autor. II.
Faculdade de Tecnologia de Campinas. III. Título.

CDD 620.162

Catálogo-na-fonte: Bibliotecária: Aparecida Stradiotto Mendes – CRB8/6553

TG PQ 25.1

GABRIEL COSTA SILVA
VAGNER APARECIDO DA SILVA JUNIOR

**Oxidação Negra: análise técnica e eficácia da camada protetora
em materiais metálicos**

Nelson Maniasso

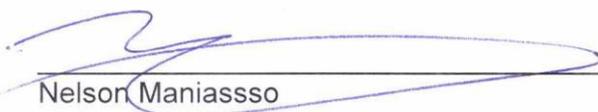
Trabalho de Graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Processos Químicos, pelo CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – Fatec Campinas.

Campinas, 04 de julho de 2025.

BANCA EXAMINADORA



Juliana Canto Duarte
Fatec Campinas



Nelson Maniasso
Fatec Campinas



Aurimar Moreira Reis
Fatec Campinas

RESUMO

Este trabalho investiga a oxidação negra em materiais metálicos, destacando sua importância para a indústria devido à sua influência na durabilidade e desempenho dos materiais. A pesquisa aborda a problemática da falta de informações detalhadas sobre as melhores práticas de aplicação e os fatores que afetam a formação da camada protetora. A oxidação negra é um processo químico que forma uma camada de óxidos na superfície dos metais, oferecendo proteção contra corrosão e desgaste. Este estudo visa caracterizar os processos envolvidos na formação da camada, realizar testes de resistência à corrosão e ao desgaste e comparar a oxidação negra com outras técnicas de proteção superficial. Os resultados esperados contribuirão para a melhoria da aplicação dessa técnica, impactando positivamente a qualidade dos produtos, a segurança e a economia de recursos.

Palavras-chave: durabilidade; oxidação negra; proteção superficial; resistência à corrosão; técnicas de proteção.

ABSTRACT

This study investigates black oxidation in metallic materials, highlighting its importance for the industry due to its influence on the durability and performance of materials. The research addresses the issue of the lack of detailed information on best application practices and the factors affecting the formation of the protective layer. Black oxidation is a chemical process that forms an oxide layer on the surface of metals, providing protection against corrosion and wear. This study aims to characterize the processes involved in the formation of the layer, conduct corrosion and wear resistance tests, and compare black oxidation with other surface protection techniques. The expected results will contribute to improving the application of this technique, positively impacting product quality, safety, and resource economy.

Keywords: corrosion resistance; durability; oxidation black; protection techniques; surface protection.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2	JUSTIFICATIVA/PROBLEMÁTICA	15
1.3	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1	MATERIAIS.....	18
3.2	MÉTODO	19
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Placa de aço virgem pré-corrosão.....	23
Figura 2-Placa de aço virgem pós-corrosão.	24
Figura 3-Placa com oxidação negra pré-corrosão.	25
Figura 4-Placa com oxidação negra pós-corrosão.	25
Figura 5- Placa de aço galvanizado pré-corrosão.....	26
Figura 6-Placa de aço galvanizado pós-corrosão.	26
Figura 7- Comparativo final entre as 3 placas (1 - sem tratamento; 2 - Tratada com oxidação negra; 3 - Galvanizada).	28

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização, o ser humano demonstra curiosidade e necessidade de compreender os materiais ao seu redor, buscando controlar os fenômenos naturais e aprimorar suas ferramentas. Segundo Sandim (2009), a descoberta dos metais representou um marco decisivo para o progresso humano, permitindo o desenvolvimento de instrumentos, armas e estruturas mais duráveis. O cobre, primeiro metal utilizado, surgiu na Idade dos Metais por volta de 5.000 a.C., inicialmente em sua forma nativa e posteriormente fundido para fins específicos. Exemplo do uso histórico e duradouro de metais pode ser visto na empresa japonesa Kongo Gumi, fundada em 578 d.C., que se destaca por sua longevidade na construção de templos (GUPTA, 2020). No Brasil, a Real Fábrica de Ferro São João de Ipanema, inaugurada em 1810 por ordem de D. João, marcou o início da produção industrial de ligas metálicas no país (ZEQUINI, 2019).

Os metais, de acordo com Zempulski e Zempulski (2008), são elementos químicos sólidos à temperatura ambiente, com exceção do mercúrio. Caracterizam-se por serem opacos brilhantes quando polidos e excelentes condutores de calor e eletricidade. Essas propriedades se devem à presença de elétrons livres, que não estão ligados a átomos específicos. Tais características tornam os metais indispensáveis como materiais estruturais na tecnologia moderna. Contudo, seu uso está frequentemente associado ao desafio da corrosão, que compromete sua integridade e durabilidade. A corrosão, conforme Fontana (2003), é um processo eletroquímico que causa a deterioração do metal pela interação com o meio, sendo uma preocupação constante nas aplicações industriais. Compreender esse fenômeno e desenvolver técnicas eficazes de proteção é fundamental para garantir segurança e longevidade aos materiais metálicos.

A evolução tecnológica impulsionou o desenvolvimento de ligas metálicas como forma de potencializar as propriedades dos metais puros. Segundo Callister (2008), as ligas são desenvolvidas para melhorar características como resistência mecânica, ductilidade e condutividade térmica e elétrica. Essas ligas resultam da combinação de dois ou mais elementos, sendo pelo menos um metálico. Smith e Hashemi (2006) apontam que a adição de elementos de liga altera significativamente o comportamento mecânico e térmico do material, permitindo a adaptação a diferentes exigências técnicas. O aço, por exemplo, é uma liga de

ferro e carbono cujas propriedades variam conforme o teor de carbono e a presença de elementos como silício, fósforo e enxofre.

Roosevelt (2010) explica que as ligas com até 2,11% de carbono são classificadas como aço, enquanto aquelas com teores superiores são denominadas ferro fundido. Essa divisão permanece válida mesmo com a adição de elementos de liga, sendo o limite de 2,11% o critério central. O autor também destaca que a formação de aços-liga, com elementos como níquel, cromo e molibdênio, resulta em materiais com desempenho superiores aos aços carbono convencionais.

Apesar de suas vantagens, o aço carbono é vulnerável à corrosão. Frauches-Santos, Albuquerque e Oliveira (2013) indicam que cerca de 20% da produção de aço destina-se à substituição de partes corroídas, evidenciando o impacto econômico e estrutural do problema. A corrosão ocorre de diversas formas, como a uniforme, galvânica, por frestas ou por pite, sendo esta última menos frequente, mas não menos prejudicial. A presença de umidade, oxigênio e outros agentes corrosivos intensifica esse processo, exigindo medidas de proteção eficazes.

A proteção dos metais contra a corrosão é um objetivo perseguido desde a Antiguidade. Fontana (2003) relata que, há mais de 2.500 anos, ligas com zinco já eram utilizadas com esse propósito. Com o tempo, métodos como a galvanização, a aplicação de inibidores e a formação de camadas de óxido protetoras foram desenvolvidos e aprimorados. Entre eles, destaca-se a oxidação negra. Conforme Cotting e Aoki (2018), essa técnica cria uma película de óxido de ferro sobre a superfície do aço, funcionando como barreira protetora contra agentes corrosivos, além de melhorar o acabamento estético da peça tratada.

Dentre as várias técnicas disponíveis, optou-se neste trabalho pela oxidação negra. Trata-se de um processo simples, seguro e economicamente viável, utilizado em diversos setores industriais. Segundo Zempulski e Zempulski (2008), esse método forma um filme negro aderente e uniforme, que não só oferece proteção contra a corrosão, mas também reduz o atrito e melhora a resistência ao desgaste. Também conhecida como “bluing”, a oxidação negra consolidou-se como uma solução eficiente e de ampla aplicabilidade na indústria moderna, justificando sua escolha como foco deste estudo.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A oxidação negra é um processo químico aplicado a metais ferrosos que forma uma camada de óxidos na superfície do material, conferindo-lhe maior resistência à corrosão, ao desgaste e a fatores ambientais diversos. Essa técnica, também chamada de escurecimento ou enegrecimento, consiste na conversão química da camada externa do metal em óxidos de ferro pretos, por meio de imersão em soluções alcalinas com agentes oxidantes controlados (FRAUCHES-SANTOS; ALBUQUERQUE; OLIVEIRA, 2024).

Segundo Cotting e Aoki (2019), o filme de óxido gerado por esse processo não apenas melhora a aparência do metal, conferindo-lhe um acabamento estético uniforme e fosco, como também atua como uma barreira protetora que reduz a ação de agentes corrosivos. Vale destacar que, embora o revestimento por si só não proporcione uma proteção anticorrosiva tão robusta quanto outros métodos, como a galvanização, sua eficácia é significativamente aumentada quando associado ao uso de óleos ou selantes apropriados.

Historicamente, a técnica da oxidação negra remonta ao século XIX, quando foi introduzida como uma alternativa mais econômica e funcional aos revestimentos metálicos mais pesados. Com o avanço da ciência dos materiais e das tecnologias de tratamento de superfície, esse método passou a ser amplamente utilizado em setores como o bélico, automotivo e de ferramentas manuais (ZEMPULSKI; ZEMPULSKI, 2008).

No contexto industrial contemporâneo, a corrosão representa um dos principais desafios econômicos e operacionais. Rodrigues (2019) destaca que os custos relacionados à corrosão são expressivos, impactando diretamente a produtividade e a durabilidade de estruturas metálicas. De acordo com Fontana (2003), cerca de 5% do produto interno bruto (PIB) de países industrializados é perdido anualmente devido a danos causados por processos corrosivos.

Nesse sentido, conforme argumenta Magalhães (2019), em um mundo cada vez mais globalizado, os investimentos da indústria na fabricação de eletrodomésticos, veículos, máquinas e equipamentos exigem soluções que minimizem as perdas estruturais causadas pela corrosão. Por isso, técnicas como a oxidação negra ganham relevância estratégica desde a fase de concepção de projetos industriais, visando não apenas reduzir custos de manutenção, mas também aumentar a eficiência e a vida útil dos produtos.

Portanto, o estudo contínuo sobre a oxidação negra revela-se fundamental para ampliar suas aplicações industriais e aprimorar seus mecanismos protetivos. A evolução desse tipo de tratamento de superfície representa uma resposta técnica e econômica às demandas crescentes por materiais mais duráveis, seguros e competitivos no mercado global.

1.2 JUSTIFICATIVA/PROBLEMÁTICA

A escolha do tema baseia-se na relevância do processo de oxidação negra para a indústria, especialmente na durabilidade e desempenho de materiais metálicos. Esse tratamento químico forma uma camada de óxidos na superfície dos metais, proporcionando proteção contra corrosão e desgaste. No entanto, há uma carência de informações detalhadas sobre as melhores práticas de aplicação e os fatores que influenciam a formação dessa camada protetora, pois encontram-se desafios como a uniformidade da camada protetora, a adesão em diferentes tipos de metais e a resistência a condições extremas.

A problemática reside na necessidade de compreender melhor os processos envolvidos, difundi-los e aperfeiçoar a aplicação dessa técnica.

Além disso, a pesquisa sobre esse método de proteção pode contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas de proteção superficial, comparando sua eficácia com outros métodos disponíveis. Isso pode levar a inovações que beneficiem a indústria como um todo, promovendo a sustentabilidade e a eficiência dos processos produtivos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral: Este trabalho tem como objetivo principal investigar a oxidação negra em materiais metálicos, compreendendo seus mecanismos e avaliando sua relevância prática na proteção de peças metálicas de pequeno a médio porte, como por exemplo facas, roelas, parafusos, entre outros.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Caracterizar os processos envolvidos na formação da camada por meio da oxidação negra.
- Realizar testes para verificar a resistência à corrosão e ao desgaste dessa camada.
- Comparar a oxidação negra com outras técnicas de proteção superficial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A oxidação negra é um método amplamente utilizado na indústria para aumentar a resistência à corrosão em superfícies metálicas. Esse processo envolve a imersão das peças em soluções específicas que induzem a formação de uma camada protetora de óxido de ferro, normalmente magnetita (Fe_3O_4), que atua como barreira contra agentes. Segundo Zempulski e Zempulski (2008), essa camada de óxido funciona como uma barreira protetora, dificultando a interação do metal subjacente com agentes corrosivos presentes no ambiente, como a umidade e o oxigênio. A eficácia dessa técnica de proteção depende de vários fatores, incluindo a qualidade do pré-tratamento da superfície, a concentração da solução de imersão e o tempo de exposição do metal à solução oxidante.

Frauches-Santos *et al.* (2013) destacam que a eficácia da camada protetora de óxido de ferro depende diretamente das condições de execução do processo. Variáveis como a temperatura do banho de imersão e a composição química da solução têm um impacto significativo sobre a espessura e a uniformidade da camada formada o que, por sua vez, influencia a resistência final da peça à corrosão.

Mas como a oxidação negra se compara a outros métodos, como a galvanização e a fosfatização? Bem, ela tem algumas limitações. A galvanização, por exemplo, oferece uma proteção mais robusta, especialmente em ambientes agressivos assim como Lupinacci (2004) menciona que a galvanização, além de criar uma barreira física, oferece proteção catódica. Isso é algo que a oxidação negra não consegue fazer, o que pode ser uma desvantagem em ambientes muito corrosivos.

Apesar de suas limitações, a oxidação negra continua sendo amplamente utilizada devido à sua simplicidade e baixo custo. Assim como Zempulski e Zempulski (2008) sugerem, o processo é relativamente fácil de implementar em ambientes industriais e não requer equipamentos complexos ou caros, onde para aplicações onde o custo é uma preocupação primordial e a exposição a ambientes corrosivos é limitada, a oxidação negra pode ser a solução ideal. Isso explica sua popularidade em setores como o de ferramentas e o automotivo, onde a resistência moderada à corrosão combinada com o acabamento estético escuro faz com que o processo seja uma escolha prática e econômica.

Além das considerações funcionais, este método oferece vantagens em termos de manutenção. Frauches-Santos *et al.* (2013) indicam que as peças tratadas com esse método podem ser mantidas com relativa facilidade, uma vez que a camada de óxido é capaz de resistir ao desgaste e à abrasão em níveis moderados. Isso é particularmente importante em aplicações

industriais onde as peças estão sujeitas a movimentação e atrito constantes, como em rolamentos ou engrenagens. A adição de um tratamento com óleo após a oxidação também pode aumentar a vida útil da camada protetora, reduzindo ainda mais a necessidade de manutenção.

Frauches-Santos *et al.* (2013) destacam que o sucesso da oxidação negra depende, em grande parte, da preparação adequada da superfície antes do tratamento, qualquer contaminação, como óleo, graxa ou ferrugem, pode comprometer a adesão da camada de óxido de ferro, resultando em falhas de proteção. Zempulski e Zempulski (2008) ressaltam a importância de uma limpeza meticulosa da superfície metálica antes da imersão no banho de oxidação. Isso geralmente envolve o uso de soluções alcalinas para desengraxe, seguidas por etapas de decapagem e neutralização para garantir que a superfície esteja livre de contaminantes que possam interferir no processo de formação do óxido.

No contexto deste trabalho, que busca comparar a eficácia da oxidação negra com outros métodos de proteção em peças metálicas expostas a ambientes corrosivos, é importante destacar que cada método de proteção tem suas vantagens e desvantagens. A realização de testes comparativos, envolvendo a imersão de peças tratadas com diferentes métodos em meios corrosivos, permitirá quantificar a eficácia de cada técnica em termos de resistência à corrosão. Lupinacci (2004) afirma que a escolha do método de proteção deve sempre considerar o ambiente específico em que a peça será utilizada, bem como os requisitos de durabilidade e estética. No caso da oxidação negra, sua eficácia pode ser aumentada com a aplicação de óleos ou outros produtos de selagem, que ajudam a reforçar a barreira protetora e evitar a penetração de umidade e oxigênio, principais agentes da corrosão.

Com base nas referências mencionadas, é possível concluir que a oxidação negra, embora não seja o método mais resistente em ambientes extremamente corrosivos, é uma técnica de proteção eficiente e econômica para muitas aplicações industriais. Os testes planejados neste trabalho, que envolverão a exposição de peças tratadas com diferentes métodos a ambientes corrosivos, fornecerão dados valiosos sobre a eficácia comparativa da oxidação negra e de outros métodos de proteção, como a galvanização e a fosfatização.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS:

- Béquer de inox 5 L
- Nitrato de sódio (Salitre do Chile) 150 g
- Hidróxido de sódio 450 g
- Água deionizada 500 mL
- Fogão portátil
- Termômetro laser digital
- Proveta de 1 L
- Chapas de aço (2 unidades)
- Óculos de proteção
- Jaleco de algodão
- Luvas nitrílicas

3.1.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS:

➤ **Béquer de inox 5 L (1 unidade)**

Recipiente de aço inoxidável com capacidade para 5 litros, utilizado para misturar e aquecer soluções. O material é resistente a produtos químicos e temperaturas elevadas, sendo ideal para reações que exigem aquecimento.

➤ **Nitrato de sódio (Salitre do Chile) 150 g**

Composto químico inorgânico utilizado principalmente como fonte de íons potássio e nitrato. No experimento, ele é adicionado para participar das reações químicas desejadas.

➤ **Hidróxido de sódio 450 g**

Composto altamente alcalino, também conhecido como soda cáustica. Ele é utilizado para ajustar o pH da solução e promover reações específicas. A manipulação deve ser cuidadosa devido ao seu caráter corrosivo.

➤ **Água deionizada 500 mL**

Água purificada e livre de íons que possam interferir nas reações químicas. É utilizada para preparar soluções e diluir reagentes, garantindo a pureza das misturas.

➤ **Fogão portátil**

Dispositivo portátil de aquecimento, utilizado para aquecer a mistura no béquer e promover as reações químicas necessárias. Permite controle sobre a temperatura e facilita o aquecimento em campo ou laboratório.

➤ **Termômetro laser digital**

Instrumento de medição de temperatura que utiliza a radiação infravermelha para medir a temperatura de uma superfície sem contato direto. Usado para monitorar a temperatura do béquer durante o processo, garantindo que as reações ocorram nas condições ideais

➤ **Chapas de aço (2 unidades)**

Foi utilizado um exemplar metálico virgem, sem a presença de camadas passivadoras, e outro exemplar com acabamento galvanizado, ambos com as mesmas dimensões: largura de 7,0 cm e comprimento de 6,7 cm, para fins de comparação no experimento.

3.2 MÉTODO:

O processo de oxidação negra foi realizado por meio de etapas sequenciais e padronizadas, com o objetivo de garantir a formação de um revestimento uniforme e eficaz sobre as peças metálicas. As etapas executadas foram as seguintes:

- **Preparação da peça de aço virgem:**

- Limpeza mecânica: Inicialmente, foram utilizados métodos manuais (como escovas de aço e lixas) e mecanizados (tais como politrizes). Também foram empregadas técnicas

como esmerilhamento, de forma a garantir uma superfície homogênea e com o acabamento ideal para as etapas subsequentes.

- Desengraxe: Na etapa seguinte, foi promovida a eliminação de substâncias orgânicas por meio de detergente neutro.

- Enxágue inicial: Após o desengraxe, foi efetuado o enxágue das peças com água corrente, com o intuito de remover os resíduos químicos remanescentes da etapa anterior.

• **Preparação da solução oxidante:**

- Em um béquer de inox de 5 L, foram adicionados 500 mL de água deionizada.

- Em seguida o béquer foi colocado sobre o fogão portátil.

- Cuidadosamente adicionou-se 150 g de nitrato de sódio (salitre do Chile) na água deionizada, sob constante agitação até total dissolução.

- Em seguida, cuidadosamente foram adicionados 450 g de hidróxido de sódio (soda cáustica), e homogeneizou-se a solução.

OBS: O hidróxido de sódio é corrosivo e gerar calor durante a dissolução.

• **Aquecimento da solução:**

- Levou-se a solução a aquecimento para temperatura na faixa de 130 °C a 140 °C. Certificou-se de manter a temperatura estável durante todo o procedimento.

OBS: Monitorou-se a temperatura com o termômetro laser digital.

• **Processo de oxidação negra:**

- O exemplar da chapa de aço virgem foi cuidadosamente imergido na solução.

- Manteve-se a peça na solução em temperatura constante de 130 °C a 140 °C por 15 minutos, permitindo que a reação de formação da camada de óxido ocorresse de forma completa e uniforme.

- **Remoção e resfriamento:**

- Retirou-se a peça cuidadosamente da solução.
- Enxaguou-se imediatamente a peça com água deionizada fria para remover qualquer resíduo de solução e interromper a reação.

OBS: Todas as etapas foram realizadas em ambiente controlado, com o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e de acordo com normas de segurança do trabalho. Os resíduos químicos gerados ao longo do processo foram devidamente armazenados e encaminhados para descarte conforme a legislação ambiental vigente.

- **Avaliação da resistência à corrosão:**

- Após o término do processo de oxidação negra e resfriamento, três placas metálicas foram submetidas a um teste acelerado de corrosão para avaliar comparativamente a resistência das diferentes camadas protetoras aplicadas: uma chapa de aço virgem (sem tratamento), uma chapa submetida ao processo de oxidação negra e uma chapa galvanizada.
- Cada uma das placas foi completamente imersa em solução salina composta por água deionizada contendo 3,5% de cloreto de sódio (NaCl), simulando um ambiente de elevada agressividade corrosiva, e acondicionada individualmente em frascos âmbar, de forma a garantir condições experimentais uniformes e minimizar a interferência da luz no processo corrosivo.
- As placas permaneceram continuamente imersas nessa solução pelo período de uma semana (sete dias), à temperatura ambiente controlada (aproximadamente 25 °C).
- Após o período de exposição, as placas foram cuidadosamente retiradas da solução salina, lavadas com água deionizada para remover o excesso de sal e secas ao ar livre.

- A avaliação dos resultados foi realizada por meio de inspeção visual detalhada, com a finalidade de identificar e classificar os tipos predominantes de corrosão observados em cada placa, como corrosão uniforme e por pite, além da extensão e heterogeneidade do ataque corrosivo ocorrido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Após um período de exposição de uma semana (7 dias), todas as placas analisadas demonstraram evidências de corrosão, porém de maneira bastante heterogênea, o que permitiu uma clara avaliação comparativa entre os métodos de proteção aplicados.

- **Placa virgem (sem tratamento):** apresentou o maior grau de corrosão, com formação generalizada e uniforme sobre quase toda a superfície metálica (Figuras 1 e 2). Esta corrosão uniforme caracteriza-se pela formação de uma camada extensa de óxidos de ferro hidratados, popularmente conhecidos como ferrugem. Este comportamento evidencia a total vulnerabilidade do aço carbono quando exposto diretamente a meios agressivos sem nenhuma proteção superficial. As propriedades mecânicas e estéticas do material foram significativamente comprometidas.

Figura 1 - Placa de aço virgem pré-corrosão.



Figura 2 - Placa de aço virgem pós-corrosão.



- **Placa tratada com oxidação negra:** mostrou claramente um nível intermediário de proteção (Figuras 3 e 4). Embora tenha ocorrido corrosão significativa, esta se apresentou de forma heterogênea, manifestando-se predominantemente na forma de corrosão por pite (ou alveolar). Tal forma de corrosão é caracterizada por ataques pontuais, mais profundos e localizados, que ocorrem especialmente em regiões onde a camada protetora apresenta falhas ou defeitos microscópicos. Esses defeitos podem estar relacionados às irregularidades no processo de formação da camada de óxido, inconsistências no pré-tratamento ou imperfeições intrínsecas da superfície metálica original. Apesar disso, a maior parte da superfície ainda permaneceu relativamente intacta, indicando que a barreira protetora da oxidação negra oferece uma resistência significativa à corrosão uniforme, ainda que limitada contra-ataques localizados.

Figura 3 - Placa com oxidação negra pré-corrosão.



Figura 4 - Placa com oxidação negra pré-corrosão.



- **Placa galvanizada:** apresentou o melhor desempenho entre todas, demonstrando apenas pequenas áreas pontuais de corrosão, caracterizadas por leve corrosão galvânica localizada (Figuras 5 e 6). A camada de zinco atuou eficazmente como proteção

catódica, sacrificando-se para proteger o aço subjacente, limitando de forma considerável a extensão e profundidade dos ataques corrosivos. Os pontos onde a corrosão foi observada estão relacionados principalmente a pequenas falhas ou descontinuidades na cobertura de zinco, típicas em processos industriais convencionais. Tal comportamento confirma a eficácia amplamente conhecida da galvanização para aplicações em ambientes agressivos e com elevada umidade e salinidade.

Figura 5 - Placa de aço galvanizado pré-corrosão.



Figura 6 - Placa de aço galvanizado pós-corrosão.



Após sete dias de exposição contínua a uma solução salina com 3,5% de NaCl, observou-se a ocorrência de corrosão em todas as amostras metálicas avaliadas, embora com comportamentos

significativamente distintos. As placas foram acondicionadas individualmente em frascos âmbar, a fim de garantir condições experimentais uniformes e minimizar a interferência da luz no processo corrosivo. A temperatura foi mantida estável, em torno de 25 °C.

A amostra de aço carbono sem qualquer tipo de tratamento apresentou um quadro severo de corrosão uniforme, com degradação visível em toda a superfície. Esse tipo de ataque, caracterizado pela distribuição homogênea de óxidos de ferro hidratados (ferrugem), comprometeu de forma expressiva tanto a integridade mecânica quanto o aspecto visual do material, revelando sua vulnerabilidade em ambientes agressivos.

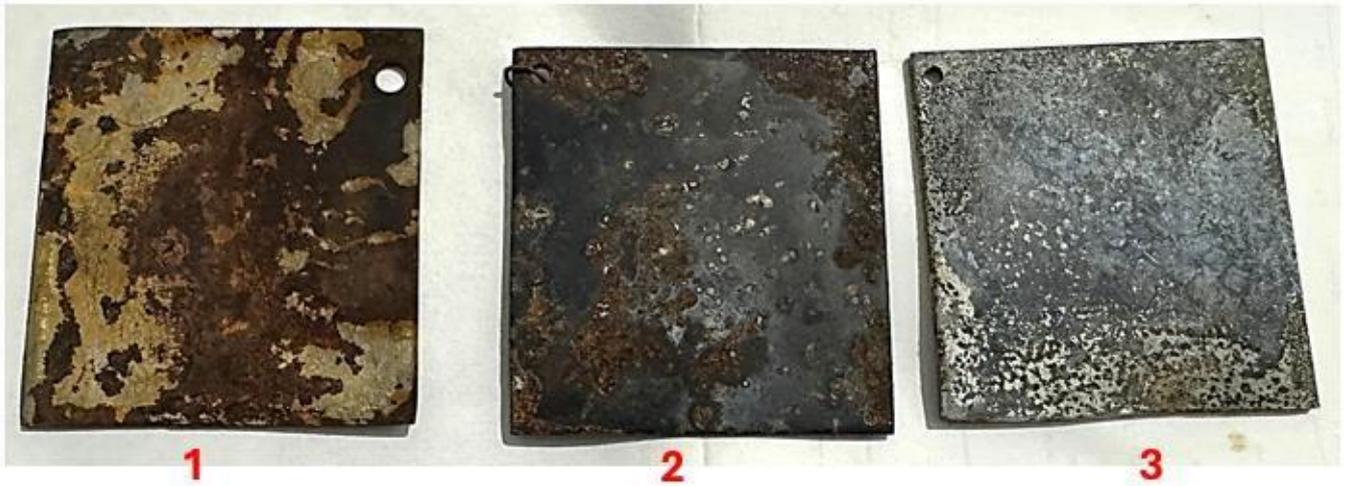
Por sua vez, a chapa submetida ao processo de oxidação negra demonstrou um desempenho intermediário. Embora tenha ocorrido corrosão, esta se concentrou em pontos específicos, manifestando-se na forma de corrosão por pite (alveolar), associada a falhas microscópicas na camada de óxido. Tais falhas podem ter origem em etapas inadequadas de preparação da superfície ou na própria descontinuidade da película protetora. Apesar disso, boa parte da área permaneceu preservada, sugerindo que o método é eficaz na contenção da corrosão difusa, mas limitado frente a falhas pontuais.

A amostra galvanizada foi a que apresentou melhor resposta à exposição salina. Os sinais de corrosão foram mínimos e restritos a regiões com imperfeições na cobertura, evidenciando a atuação eficiente da camada de zinco como ânodo de sacrifício. Esse tipo de proteção catódica é amplamente reconhecido por sua durabilidade e capacidade de impedir a progressão do ataque ao substrato metálico.

A diferença no comportamento das três amostras reflete diretamente as propriedades morfológicas e químicas dos revestimentos aplicados (Figura 7). Enquanto a oxidação negra promove uma barreira superficial de natureza passiva, a galvanização agrega proteção ativa, mais duradoura, mesmo em ambientes de elevada agressividade.

A análise visual pós-ensaio revelou a importância da aplicação correta e da continuidade das camadas protetoras. A presença de falhas, irregularidades ou incompatibilidade entre o material e o revestimento compromete significativamente o desempenho do tratamento. Assim, a seleção do método de proteção deve considerar não apenas a agressividade do meio, mas também as exigências operacionais e os recursos disponíveis para implementação e manutenção.

Figura 7 - Comparativo final entre as 3 placas (1 - sem tratamento; 2 - Tratada com oxidação negra; 3 - Galvanizada).



5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a eficácia do processo de oxidação negra como método de proteção superficial aplicado a materiais metálicos, com ênfase na resistência à corrosão. A pesquisa combinou uma fundamentação teórica sólida com uma abordagem experimental que comparou a oxidação negra a duas condições de referência: o aço carbono sem tratamento e o aço com galvanização.

Os resultados obtidos evidenciaram que a oxidação negra oferece uma proteção moderada contra a corrosão, sendo eficaz na mitigação da corrosão uniforme, mas ainda suscetível à corrosão localizada, como a do tipo pite. Esse comportamento foi atribuído a falhas na uniformidade da camada formada, além de possíveis imperfeições superficiais não corrigidas durante o pré-tratamento. Apesar dessas limitações, a técnica demonstrou potencial relevante em aplicações onde o custo, a estética e a facilidade de implementação são fatores decisivos.

Em contraponto, a galvanização apresentou desempenho superior, reforçando seu reconhecimento na literatura como um dos métodos mais eficientes de proteção, especialmente por oferecer não apenas barreira física, mas também proteção catódica. Já o aço sem qualquer tratamento confirmou sua elevada vulnerabilidade, apresentando corrosão intensa e disseminada após o ensaio acelerado. A comparação experimental mostrou que a escolha do tratamento superficial deve estar diretamente relacionada às condições ambientais às quais a peça será submetida. Enquanto a galvanização é mais indicada para ambientes agressivos e úmidos, a oxidação negra pode ser satisfatória em ambientes de menor agressividade, principalmente quando associada a selantes, óleos protetores ou manutenção periódica.

Do ponto de vista econômico, observou-se que a oxidação negra se destaca por apresentar um dos menores custos por área tratada, podendo ser realizada com valores médios a partir de R\$ 4,50 por quilograma de peça, o que favorece sua adoção por pequenas indústrias e oficinas. A fosfatização, embora não incluída nos ensaios práticos deste estudo, é reconhecida por oferecer bom equilíbrio entre custo e proteção, com valores geralmente abaixo de R\$ 10,00 por metro quadrado, sendo indicada como alternativa intermediária. Já a galvanização a quente, embora apresente o maior custo médio (variando entre R\$ 15,00 e R\$ 30,00 por metro quadrado, dependendo da espessura e região), oferece a melhor performance anticorrosiva, especialmente em ambientes altamente agressivos, o que pode compensar o investimento inicial com uma significativa redução de custos de manutenção ao longo do tempo.

Como contribuição prática, este trabalho demonstrou que é possível executar o processo de oxidação negra em escala laboratorial com simplicidade, segurança e baixo custo, o que pode beneficiar pequenas indústrias ou oficinas que necessitam de alternativas viáveis para proteção anticorrosiva. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a inclusão de análises quantitativas mais precisas, como espectroscopia, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e testes eletroquímicos (como Tafel e EIS), a fim de aprofundar a compreensão sobre a morfologia das camadas formadas e os mecanismos de falha envolvidos. Além disso, seria relevante estudar o comportamento da oxidação negra em outros tipos de ligas metálicas, bem como avaliar o impacto da aplicação de selantes sobre sua durabilidade.

Dessa forma, conclui-se que a oxidação negra representa uma alternativa funcional, tecnicamente viável e economicamente interessante, com potencial de aplicação ampliado, desde que seu uso esteja adequado ao perfil de exigência da aplicação e às condições do ambiente operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER, W. D. Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais: uma abordagem integrada. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Acesso: 06 de abril de 2025.

COTTING, F.; AOKI, I. V. Avaliação de um revestimento anticorrosivo com efeito de autorreparação com sistema bicomponente. Revista Corrosão & Proteção, ABRACO, 2019. Acesso em: 2 nov. 2024.

CLUBE DA QUÍMICA. Galvanização: tudo começou com o zinco. 2022. Disponível em: <https://clubedaquimica.com/2022/09/22/galvanizacao-tudo-comecou-com-o-zinco/>. Acesso em: 7 out. 2024.

CONCEITOS DO MUNDO. Corrosão: conceito, tipos, exemplos, prevenção e oxidação. Disponível em: <https://conceitosdomundo.pt/corrosao/>. Acesso em: 28 set. 2024.

FONTANA, M. G. Corrosão: fundamentos, inspeção e controle. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. Acesso: 06 de abril de 2025.

FRAUCHES-SANTOS, C.; ALBUQUERQUE, M. A.; OLIVEIRA, M. C. C. A corrosão e os agentes anticorrosivos. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/download/490/422/3888>. Acesso em: 7 out. 2024.

GUPTA, A. Building through the ages: Kongō Gumi's 1446-year journey. Business History, 2020. Disponível em: <https://businesshistory.domain-b.com/focus/building-through-ages-kong%C5%8D-gumi-s-1446-year-journey>. Acesso em: 2 nov. 2024.

MANUAL DA QUÍMICA. Ligas metálicas. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/ligas-metalicas.htm>. Acesso em: 7 out. 2024.

REGIS, Roosevelt de Carvalho. Influência dos elementos de liga nos aços carbono, baixa e média liga: uma revisão. FIEB, 2010. Disponível em: http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/bitstream/fieb/1563/1/ARTIGO_ROOSEVELT%20DE%20CARVALHO%20REGIS.pdf. Acesso em: 2 nov. 2024.

RODRIGUES, Rafael Magalhães. Estudo do processo de prevenção à corrosão utilizado em materiais metálicos, pelo método de proteção catódica. 2019. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/24932/1/RAFAEL_MAGALHAE_S_DEFESA.pdf?form=MG0AV3. Acesso em: 2 nov. 2024.

SANDIM, M. J. R. Materiais: contextualização histórica. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), 2009. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/984972/LOM3018/IEM-Aula1.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2024.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. Fundamentos de ciência e engenharia dos materiais. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

SÓ HISTÓRIA. A Idade dos Metais. Disponível em: <https://www.sohistoria.com.br/ef2/periodos/p3.php>. Acesso em: 7 out. 2024.

ZEMPULSKI, L. N.; ZEMPULSKI, M. F. S. Oxidação negra. jan. 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/9123382/Oxida%C3%A7%C3%A3o_negra. Acesso em: 7 out. 2024.

ZEQUINI, A. Mineiros e práticos: a produção de ferro no Morro de Ipanema. ANPUH, 2019. Disponível em: https://anpuh.org.br/uploads/anais-simposios/pdf/2019-01/1548772006_c23fa32831a0246228018cb2bedeaf7d.pdf. Acesso em: 2 nov. 2024.