

Etec Benedito Storani
Jundiaí - SP

Autores:

Bruno Augusto da Silva Bezerra

Flávio Júnior Santos do Nascimento

Henry Passeti Rogato

Lucas Gabriel Campos de Souza

Orientador(a):

Prof. George Augusto Manzatto
george.manzatto@etec.sp.gov.br

RESISTINDO ÀS FORÇAS DA NATUREZA: ZINCAGEM ELETROLÍTICA NA PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO EM AMBIENTES COSTEIROS.

RESUMO

Dada a prevalência das dificuldades enfrentadas pela corrosão de metais em indústrias localizadas em regiões costeiras, este estudo se concentra na investigação da eficácia da galvanoplastia como método para preservação e remoção da oxidação em aço em ambientes marítimos. O processo envolve a utilização da eletrólise aquosa e da galvanização para proteger o metal. Para alcançar esse objetivo, foi necessário realizar os processos de eletrólise e zincagem no aço selecionado, seguidos após uma pesquisa aprofundada sobre as implicações da galvanização. Os resultados demonstraram a ausência de oxidação na camada mais profunda do metal após o processo de eletrólise e a formação de uma camada de zinco durante a zincagem. Essas descobertas confirmam a eficácia satisfatória desses métodos para a preservação e conservação de metais em ambientes costeiros, oferecendo uma solução eficaz contra os desafios da corrosão.

Palavras-Chave: Corrosão. Preservação. Conservação. Metais. Galvanoplastia. Eletrólise. Zincagem.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão de metais em ambientes costeiros devido à exposição constante à maresia é um desafio crítico enfrentado por várias indústrias e infraestruturas em regiões praianas. Além de causar mau funcionamento em maquinários, a corrosão é responsável por acidentes graves e impõe um considerável prejuízo financeiro às organizações afetadas.

O processo de corrosão é acelerado devida a elevada concentração de sais destas regiões, que propiciam a formação de uma ponte salina, possibilitando o fenômeno da oxirredução entre o oxigênio do ar e o metal.

Neste cenário, a galvanoplastia surge como uma solução altamente indicada, uma vez que essa técnica envolve a deposição de uma camada protetiva de um metal de sacrifício, como no caso o zinco, sobre o metal a ser protegido, resultando no retardamento da oxidação e na prevenção contra a oxidação. A galvanização é, portanto, fundamental para preservar a durabilidade das estruturas metálicas expostas à corrosão marinha.

No entanto, antes de aplicar a galvanização, é essencial garantir a limpeza eficaz das superfícies enferrujadas. Nesse contexto, este estudo visa avaliar não apenas a eficácia da galvanização, mas também a eficiência de três soluções de limpeza aplicadas por meio de eletrólise aquosa na prevenção da corrosão. A eletrólise aquosa não apenas remove as impurezas da superfície, mas também prepara o metal para o processo de galvanização, proporcionando uma proteção completa contra a corrosão.

A necessidade de abordar esse problema de forma eficaz é fundamentada em diversas razões. Em primeiro lugar, a corrosão costeira gera um impacto econômico significativo. De acordo com um estudo recente do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), as perdas econômicas decorrentes da corrosão em ambientes costeiros chegam a cifras alarmantes, afetando negativamente setores chave como construção naval, petroquímica e infraestrutura portuária. Além disso, acidentes causados pela deterioração de estruturas metálicas expostas à corrosão podem resultar em perdas humanas e ambientais irreparáveis.

Por fim, a pesquisa neste campo é crucial para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e manutenção mais eficazes. A falta de uma

abordagem sólida para a proteção contra a corrosão em ambientes costeiros pode ter repercussões de longo alcance, afetando a segurança das estruturas e a viabilidade econômica de projetos de grande escala. Assim, este estudo não apenas busca compreender a eficácia da galvanização e soluções de limpeza, mas também visa abordar uma necessidade premente nas esferas econômicas, ambientais e de segurança. A análise dos resultados obtidos a partir desses procedimentos de limpeza e zincagem será fundamental para determinar a eficácia de cada método na proteção contra a corrosão em ambientes marinhos, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento científico nesta área crítica.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. REMOÇÃO DA CAMADA OXIDADA

2.1.1. PREPARO DAS SOLUÇÕES

Foram meticulosamente pesados os seguintes sais: cloreto de sódio, carbonato de sódio e bicarbonato de sódio. Posteriormente, cada um desses sais foi dissolvido em água destilada, seguindo procedimentos padronizados, a fim de preparar soluções com um volume fixo de 200 mL e apresentando uma solubilidade de 85% em relação ao coeficiente de solubilidade destes sais.

2.1.2. ELETRÓLISE

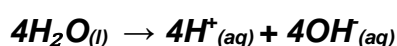
No experimento, procedeu-se à introdução dos eletrodos em três béqueres de 600 mL, consistindo em um vergalhão de aço enferrujado e uma chapa de zinco em cada um. Esses eletrodos foram então conectados a uma fonte de alimentação de computador (*Figura 1*) previamente modificada para fornecer aproximadamente 12 volts. O polo negativo (cátodo) da fonte de alimentação foi devidamente conectado ao aço a ser desenferujado, enquanto o polo positivo (ânodo) foi ligado ao metal de sacrifício, sendo o zinco a escolha para essa função. Destaca-se que medidas foram adotadas para garantir que não houvesse contato direto entre esses metais, a fim de prevenir qualquer possibilidade de curto-circuito, o uso de telas de amianto para evitar choque térmico entre béquer

e bancada, devida a elevada temperatura gerada durante a reação e, a realização do procedimento dentro da capela, uma vez que libera o gás hidrogênio, que é altamente inflamável.



Figura 1 - Eletrodos conectados a fonte de alimentação modificada.

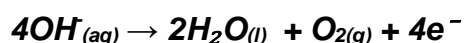
Durante um processo genérico de eletrolise, a água (H₂O) é decomposta em seus componentes, hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂), através da passagem de uma corrente elétrica através da solução eletrolítica. O hidrogênio é liberado no cátodo (o polo negativo), enquanto o oxigênio é liberado no ânodo (o polo positivo), como expresso pela reação:



No cátodo, ocorre a redução:



No ânodo, ocorre a oxidação:



O hidrogênio liberado é um subproduto da reação eletroquímica que ocorre durante a eletrolise e é liberado na forma gasosa. É importante que o hidrogênio seja manipulado com cuidado para evitar riscos de explosão, especialmente em ambientes onde haja presença de chamas ou fontes de ignição. Portanto, a eletrolise deve ser realizada com precauções de segurança adequadas.

Posteriormente, foram adicionadas cada uma das soluções a seus respectivos béqueres, garantindo que ambos os objetos estivessem completamente

submersos na solução eletrolítica para permitir a passagem da corrente elétrica. Após a devida preparação, a fonte de energia foi ativada, dando início ao processo eletroquímico, expresso pela reação:

No ânodo (polo positivo - zinco):

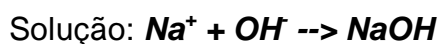
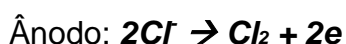


No cátodo (polo negativo - aço):

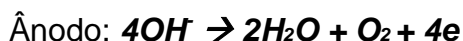


No contexto da eletrólise realizada como parte do trabalho, ocorre uma série de transformações eletroquímicas significativas. Uma das reações observadas é a geração de gás cloro e a conversão da solução em hidróxido de sódio. Esse processo eletroquímico envolve a formação de ânions oxigenados e cátions alcalinos. As reações que ocorrem em cada uma das soluções da eletrólise:

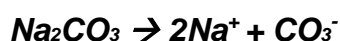
Cloreto de Sódio:



Bicarbonato de Sódio:



Carbonato de Sódio:





Vale ressaltar que a eletrólise é um processo gradual e pode demandar um período considerável para a remoção completa da oxidação, variando conforme a quantidade e a severidade da oxidação presente no objeto, devido a este fato, foram usados eletrodos quase que idênticos de massa, volume e tamanho e sendo realizadas simultaneamente a fim de evitar variações de temperatura do ambiente para não haver variações prejudiciais nos resultados.

2.2. GALVANOPLASTIA

2.2.1. PREPARO DAS SOLUÇÕES

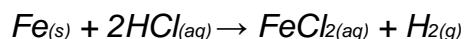
Foram cuidadosamente pesados 86 gramas de cloreto de zinco e, posteriormente, dissolvidos em água destilada até atingir um volume total de 600 mL. O propósito desse procedimento foi a subsequente distribuição igualitária em três soluções de 200 mL, cada uma contendo 28,5 gramas de ZnCl_2 .

2.2.2. DECAPAGEM

Antes do processo de zincagem, as peças recém-limpas, livres da profunda camada de oxidação, passaram por um processo de escovação suave em água corrente, com o auxílio de uma palha de aço, para eliminar a camada residual oxidada ainda presente no aço. Em seguida, os vergalhões de aço foram submetidos a um banho em uma pequena quantidade de ácido clorídrico, como parte da etapa de preparação da superfície metálica para o revestimento eletroquímico. Essa fase é conhecida como decapagem ácida ou decapagem química, com o propósito de remover contaminantes, óxidos, carepas e outros resíduos da superfície do aço. A decapagem ácida é essencial para assegurar uma aderência adequada do revestimento galvanizado e para aprimorar a qualidade geral do acabamento. Durante esse processo, o ácido reage com os óxidos presentes na superfície do aço, dissolvendo-os e abrindo os poros da superfície. Após esse banho em ácido clorídrico, as peças foram novamente lavadas em água corrente para a total remoção residual do ácido utilizado.

REAÇÃO PRESENTE NA DECAPAGEM:

Durante a reação do ácido clorídrico com o ferro (Fe) exposto na superfície do aço para formar cloreto de ferro, é liberado o hidrogênio gasoso (H₂). A equação química balanceada para essa reação é a seguinte:



Nesta reação, o ácido clorídrico (HCl) reage com o ferro (Fe) na superfície do aço para formar cloreto de ferro (FeCl₂) em solução aquosa e libera hidrogênio gasoso (H₂). Essa reação ajuda a remover quaisquer vestígios de oxidação e impurezas da superfície do aço, deixando-a limpa e preparada para o revestimento posteriormente.

2.2.3. ZINCAGEM

Após a conclusão do processo de decapagem, procedemos à remontagem da etapa de eletrólise, seguindo um procedimento semelhante ao realizado inicialmente. Para isso, foram preparados três béqueres, cada um com capacidade de 600 mL. Cada béquer foi equipado com um vergalhão de aço previamente limpo nos estágios anteriores e uma chapa de zinco. Esses elementos foram novamente conectados à fonte de alimentação, que foi ajustada para operar a 12 volts.

É de extrema importância garantir que o polo positivo (ânodo) esteja conectado à chapa de zinco e o polo negativo (cátodo) esteja conectado ao vergalhão de aço. É fundamental tomar medidas para evitar que esses dois metais entrem em contato direto. Isso é um desafio adicional, pois durante a reação pode ocorrer a formação de uma ponte de zinco visível, que é atraída rapidamente do cátodo em direção ao ânodo, com formato de galhos de árvore (*Figura 2*).

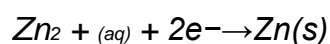
Em seguida, inserimos as soluções de cloreto de zinco nos respectivos béqueres. Certificamo-nos de que todos os eletrodos, ou seja, as chapas de zinco e os vergalhões de aço, estivessem completamente submersos na solução eletrolítica.

Uma vez que tudo estava pronto, ligamos a fonte de alimentação. Durante todo o processo de zincagem, as peças foram cuidadosamente movimentadas para garantir uma deposição uniforme de zinco em toda a superfície das peças de aço. Esse procedimento garante a eficiência e qualidade do revestimento de zinco sobre o aço, sendo essencial para o sucesso do processo.



Figura 2 – Acúmulo de zinco sendo atraído do cátodo em direção ao ânodo. A ramificação lembra bastante os galhos de uma árvore.

REAÇÃO DA ZINCAGEM DO AÇO EM UMA SOLUÇÃO DE CLORETO DE ZINCO:



Nesta reação, os íons de zinco (Zn^{2+}) presentes na solução de cloreto de zinco (ZnCl_2) são reduzidos na superfície da peça de aço (cátodo) com a captura de elétrons (e^{-}), formando zinco metálico (Zn) que é depositado na peça de aço. Essa reação resulta na formação do revestimento de zinco na superfície da peça de aço, proporcionando proteção contra a corrosão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. LIMPEZA

À medida que o processo de eletrólise progredia, foi observado um lento processo de corrosão no metal de sacrifício, o zinco, como ilustrado na *Figura 3*, isso ocorre devido à maior afinidade do zinco pela oxidação em relação ao aço, resultando na corrosão do zinco durante o processo de eletrólise, com a conversão do zinco metálico em íons de zinco na solução. Essa corrosão controlada do zinco é um elemento essencial do mecanismo que o capacita a atuar como um revestimento protetor para o aço, eficazmente prevenindo a corrosão do aço subjacente, o que está de acordo com sua função esperada. Ao mesmo tempo, o aço enferrujado estava sendo gradualmente desprovido de sua camada de oxidação, alcançando assim o resultado desejado.



Figura 3 – Chapa de zinco corroída após o término do procedimento (no vidro de relógio), juntamente do vergalhão escurecido recém-saído da eletrólise.

Ao término do procedimento eletroquímico, obtivemos como resultado peças que estavam livres da camada mais profunda de oxidação. Entretanto, ainda mantinham uma fina e residual casca, apresentando uma textura craquelada e uma coloração amarronzada. Essa camada remanescente oxidada foi facilmente removida durante o processo de lavagem, o qual incluiu uma escovação suave. Como resultado desse processo, as peças assumiram uma aparência fosca e uma coloração cinza-escuro. Isso se deve à formação de uma fina camada de óxido de ferro na superfície do aço após a eletrólise. É importante notar que a formação dessa camada escura é um fenômeno comum em muitos processos de eletrólise, especialmente quando o aço é utilizado como o cátodo (polo negativo) na reação eletroquímica. No entanto, é

fundamental não a confundir com o processo de ferrugem, que envolve uma oxidação mais extensa e prejudicial do aço quando este entra em contato com a umidade e o oxigênio do ar ao longo do tempo.

Posteriormente, todas as condições remanescentes no vergalhão de aço foram completamente removidas durante a etapa de decapagem, seguida de uma lavagem em água corrente para eliminar qualquer resíduo de ácido clorídrico presente na peça. Isso restaurou o aço à sua aparência original, devolvendo-lhe sua coloração prateada e brilhante, bem como seu caráter metálico característico.

3.2. ZINCAGEM

Após a conclusão do processo de zincagem, obtivemos um conjunto de peças de aço com um acabamento satisfatório, apresentando uma coloração esbranquiçada. Contudo, observou-se a formação de ramificações de zinco na superfície dessas peças, conforme ilustrado na *Figura 4*. Essas ramificações surgiram devido à proximidade da superfície do aço com o eletrodo de zinco, resultando em uma deposição mais intensa nessa região do vergalhão. Para resolver esse problema, adotou-se uma abordagem simples: as peças foram submetidas a uma lavagem utilizando apenas uma pisseta contendo água destilada. Felizmente, durante esse processo de lavagem, as lascas de zinco foram facilmente removidas, restaurando a aparência das peças.

Uma estratégia eficaz para evitar a formação dessas ramificações de zinco seria manter uma distância uniforme entre os eletrodos ao longo de todo o processo de zincagem. Além disso, a consideração do uso de múltiplos eletrodos de zinco dispostos ao redor das peças de aço poderia promover uma deposição mais uniforme do revestimento de zinco, eliminando a ocorrência dessas ramificações. Essa abordagem proposta resultaria em um acabamento mais consistente e aprimoraria a qualidade geral do revestimento galvanizado nas peças de aço, atendendo aos requisitos desejados para uma aplicação bem-sucedida.



Figura 4 – Vergalhão de aço logo após a zincagem, apresentando lascas superficiais.

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo avaliar a eficácia da remoção das camadas oxidadas em aço em ambientes costeiros por meio da eletrólise aquosa e da galvanização. Durante a fase experimental, observou-se que a eletrólise aquosa desempenhou um papel fundamental na remoção da oxidação profunda das peças metálicas, preparando a superfície para receber o revestimento de zinco na etapa de galvanização. Os resultados demonstraram que a solução de cloreto de sódio foi a mais eficiente na limpeza do aço, levando apenas 23 minutos para remover a camada densa de oxidação, em comparação com as soluções de carbonato de sódio e bicarbonato de sódio, que levaram consideravelmente mais tempo e energia.

No processo de zincagem, a eletrólise na solução de cloreto de zinco resultou em uma camada eficiente de zinco depositada sobre o aço, proporcionando proteção duradoura contra a corrosão em ambientes costeiros. A manutenção da integridade das peças zincadas foi notável, mesmo após várias semanas de exposição a um ambiente úmido e salino, enquanto as peças não zincadas rapidamente apresentaram sinais de oxidação.

No entanto, é importante destacar as limitações deste estudo, incluindo o custo significativo dos materiais e a disponibilidade de tempo para o processo de eletrólise. Recomendamos a utilização de recipientes maiores para a eletrólise, a fim de tratar mais peças simultaneamente e reduzir os custos. Além disso, considerar um tempo de eletrólise mais prolongado pode garantir a remoção completa da oxidação, minimizando a necessidade de repetir o processo.

Para melhorar o processo de zincagem, sugerimos o uso de mais eletrodos de zinco dispostos uniformemente ao redor da peça de aço, o que pode resultar em um revestimento mais homogêneo e de melhor qualidade. Um controle mais rigoroso durante o processo de zincagem também pode contribuir para aprimorar o acabamento das peças, sendo uma das sugestões utilizar uma espécie de garra ou algo semelhante, que possa segurar a peça a ser zincada sem que haja contato com o fundo do recipiente, fazendo com que a distribuição de zinco também ocorra na parte inferior do aço.

Em resumo, este estudo fornece informações valiosas sobre a eficácia da galvanização e da eletrólise aquosa na prevenção da corrosão em ambientes costeiros. Apesar das limitações identificadas, as recomendações propostas têm o potencial de otimizar esses procedimentos, reduzindo custos e melhorando o desempenho. Esperamos que essas descobertas beneficiem a indústria e a infraestrutura costeira, reduzindo o impacto econômico e aumentando a segurança das estruturas metálicas expostas à corrosão marinha.



Figura 5 – Resultado da parcial zincagem após 2 semanas em ambiente úmido e salino. Na superfície zincada, não houve oxidação ou qualquer tipo de oxidação. Já na parte onde o aço não foi protegido, a oxidação se iniciou em menos de um dia.

REFERÊNCIAS

ABDALA, L.; ALBAGLI, D. **Vergalhão Galvanizado: Vantagens, Aplicações e Desempenho em Estruturas de Concreto Armado**. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos/trab_40.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

ALMEIDA, I.; SOUZA, D. E. **FACULDADE DOCTUM GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**. Disponível em: <<https://dspace.doctum.edu.br/bitstream/123456789/3705/1/Istefani%20de%20Souza.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2023.

ANTONETTI, E. et al. Análise dos processos de cromagem, niquelagem, zincagem e estanhagem. **Brazilian Journal of Development**, 2021.

CAMPOS, L.; FERNANDA, I.; VIEIRA, R. **Estudo da Decapagem da Superfície do Aço Através da Imersão Ácida**. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/tcc_1.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

Corrosão de estruturas: Como a galvanização pode ajudar a combater o problema. Disponível em: <<http://www.galvanisa.com.br/noticia/43/corrosao-de-estruturas-como-a-galvanizacao-pode-ajudar-a-combater-o-problema>>. Acesso em: 10 set. 2023.

DA SILVEIRA RIZZO, E. M. **Processos de decapagem, laminação a frio e recozimento de produtos planos de aço**. [s.l.] Editora Blucher, 2022.

DE SOUZA, E. G. DA L. A. V. **Monitoramento da corrosão no aço carbono SAE 1020, aço galvanizado, alumínio e cobre, considerando as condições climática serranas e litorâneas de Santa Catarina**. Disponível em: <<https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/25983-tcc-ederson-gean-da-luz-eng.-mecanica-2018.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2023.

DE SOUZA, L. A. **Maresia e Oxirredução**. Disponível em: <<https://educador.brasilecola.uol.com.br/estrategias-ensino/maresia-oxirreducao.htm>>. Acesso em: 10 set. 2023.

DILETA. **Zincagem eletrolítica**. Disponível em: <<https://www.dileta.com.br/zincagem-eletrolitica>>. Acesso em: 10 set. 2023.

FOGAÇA, J. R. V. **Galvanoplastia ou Eletrodeposição**. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/galvanoplastia-ou-eletrodeposicao.htm>>. Acesso em: 10 set. 2023.

FUGIVARA, C. S. [UNESP]; BENEDETTI, A. V. [UNESP]; (UNESP), U. E. P. Preparação e estudo eletroquímico de zinco sobre aço CFF e efeito de hidrogênio gerado in situ. p. 136 f.: il., 2011.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Disponível em: <https://www.ipt.br/unidades_de_negocios/MA/livros/11-corrosao_e_protecao_contra_corrosao_em Equipamentos_e_Estruturas_Metalicas.htm>. Acesso em: 10 set. 2023.

Maresia e corrosão dos metais. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/maresia-corrosao-dos-metals.htm>>. Acesso em: 10 set. 2023.

MICHELS, G. S. Projeto de viabilidade para implantação de urna estrutura operacional para tratamento de superfície metálica através da zincagem eletrolítica dentro da empresa pro epóxi pintura eletrostática. 2005.

POLICROMO. **Zincagem eletrolítica.** Disponível em: <<https://www.policromo-ce.com.br/zincagem-eletrolitica>>. Acesso em: 10 set. 2023.

Processo de Galvanização Eletrolítica. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/114221891/Processo-de-Galvanizacao-Eletrolitica>>. Acesso em: 10 set. 2023.

RODRIGUEZ, P. C. **Galvanoplastia Aplicada - Teoria y Practica.** [s.l.] Librerias y Editorial Alsina, 1999.

TUBOS, C. **Galvanização eletrolítica: o que é e como é feito o processo?** Disponível em: <<https://centurytubos.com.br/blog/artigos/galvanizacao-eletrolitica/>>. Acesso em: 10 set. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Disciplina: Eletroquímica aplicada e corrosão TQ-417.** Disponível em: <<http://www.gea.ufpr.br/arquivos/lea/material/Fundamentos%20da%20Corrosao.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2023.

VOX DIGITAL; NACIONAL METAIS. **Calhas galvanizadas: durabilidade diante da maresia em regiões praianas.** Disponível em: <<https://nacionalmetais.com/calhas-galvanizadas-durabilidade-diante-da-maresia-em-regioes-praianas/>>. Acesso em: 10 set. 2023.

ZINC COATING ON STEEL; THEIR APPLICATIONS. **Revestimentos de zinco sobre aços e suas aplicações.** Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/26550/22454.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2023.