

CORROSÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM ÁGUAS E SUA PROTEÇÃO



Amanda Gaddi Gasparoni
Luciana Machado Rodrigues
(Orgs.)



Rfb
Editora

**CORROSÃO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS EM ÁGUAS
E SUA PROTEÇÃO**



Amanda Gaddi Gasparoni
Luciana Machado Rodrigues

CORROSÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM ÁGUAS E SUA PROTEÇÃO

1ª Edição

Belém-PA



2020

<https://doi.org/10.46898/rfb.9786558890515>

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

C825

Corrosão de estruturas metálicas em águas e sua proteção [recurso digital]
/ Amanda Gaddi Gasparoni, Luciana Machado Rodrigues. -- 1. ed.

-- Belém: RFB Editora, 2020.

2.723 kB; PDF: il.

Inclui Bibliografia.

Modo de acesso: world wide webe.

ISBN: 978-65-5889-051-5

DOI: 10.46898/rfb.9786558890515

1. Corrosão. 2. Pesquisa. 3. Estudo.

I. Título.

CDD 670.1



Copyright © 2020 Edição brasileira.
by RFB Editora.

Copyright © 2020 Texto.
by Autoras.



Todo o conteúdo apresentado neste livro, inclusive correção ortográfica e gramatical, é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Obra sob o selo *Creative Commons*-Atribuição 4.0 Internacional. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.

Conselho Editorial:

Prof. Dr. Ednilson Sergio Ramalho de Souza - UFOPA (Editor-Chefe).

Prof.^a Dr.^a. Roberta Modesto Braga - UFPA.

Prof. Me. Laecio Nobre de Macedo - UFMA.

Prof. Dr. Rodolfo Maduro Almeida - UFOPA.

Prof.^a Dr.^a. Ana Angelica Mathias Macedo - IFMA.

Prof. Me. Francisco Robson Alves da Silva - IFPA.

Prof.^a Dr.^a. Elizabeth Gomes Souza - UFPA.

Prof.^a Me. Neuma Teixeira dos Santos - UFRA.

Prof.^a Me. Antônia Edna Silva dos Santos - UEPA.

Prof. Dr. Carlos Erick Brito de Sousa - UFMA.

Prof. Dr. Orlando José de Almeida Filho - UFSJ.

Prof.^a Dr.^a. Isabella Macário Ferro Cavalcanti - UFPE.

Diagramação:

Laiane Borges de Souza.

Arte da capa:

Pryscila Rosy Borges de Souza.

Imagens da capa:

www.canva.com

Revisão de texto:

As autoras.



Home Page: www.rfbeditora.com.

E-mail: adm@rfbeditora.com.

Telefone: (91)98885-7730.

CNPJ: 39.242.488/0001-07.

Barão de Igarapé Miri, sn, 66075-971, Belém-PA.

SUMÁRIO

PREFÁCIO.....	7
1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Corrosão	14
2.2 Formas de Corrosão	14
2.2.1 Corrosão uniforme	14
2.2.2 Corrosão por placas.....	15
2.2.3 Corrosão alveolar	15
2.2.4 Corrosão por pite.....	16
2.2.5 Corrosão intergranular	16
2.2.6 Corrosão transgranular	17
2.2.7 Corrosão filiforme	18
2.2.8 Corrosão por esfoliação.....	18
2.2.9 Corrosão por empolamento pelo hidrogênio.....	19
2.2.10 Corrosão em torno do cordão de solda.....	19
2.3 Meios Corrosivos	20
2.3.1 Corrosão atmosférica.....	20
2.3.2 Corrosão em solos	20
2.3.3 Corrosão por produtos químicos.....	21
2.3.4 Corrosão em águas	21
2.4 Qualidades das Águas	22
2.5 Proteção contra a Corrosão	25
2.6 Inibidores Naturais da Corrosão.....	26
2.7 Segurança Associada a Processos Corrosivos.....	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 Materiais	32
3.1.1 Amostras de águas	32
3.1.2 Amostras metálicas	33
3.2 Métodos.....	34
3.2.1 Coleta e caracterização das amostras de águas	34
3.2.2 Preparação e caracterização das amostras metálicas.....	34
3.2.3 Ensaio de corrosão por exposição direta	34
3.2.4 Desenvolvimento do revestimento polimérico.....	35
3.2.5 Ensaio de corrosão em amostras com revestimento.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Ensaio de Corrosão por Exposição Direta	40
4.2 Ensaio de Corrosão em Amostras com Revestimento	43
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
REFERÊNCIAS.....	51
ÍNDICE REMISSIVO.....	56

PREFÁCIO

Este livro nasceu a partir da elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso da então acadêmica de graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA - Campus Bagé/RS), Amanda Gaddi Gasparoni sob a orientação da docente, Luciana Machado Rodrigues. A obra apresenta um estudo sobre o fenômeno de Corrosão em estruturas de aço carbono submetidas ao contato com águas de diferentes fontes, e investiga uma forma de proteção contra a corrosão.

O estudo indica a água do mar como o meio que produziu a maior taxa de corrosão do aço carbono, sendo classificada como corrosão de alta agressividade, após um período de 90 dias de exposição. As águas provenientes de lago, poço artesiano e arroio promoveram uma moderada corrosão ao aço, enquanto a água tratada (potável) foi o meio menos agressivo, ocasionando um baixo nível de ataque ao metal. A substância cafeína pura foi testada como inibidor natural da corrosão do aço carbono. Os revestimentos sintetizados com adição de cafeína promoveram a proteção do metal exposto à água do mar. Concluiu-se ser possível a proteção de estruturas metálicas de aço carbono em meio aquoso salino pelo emprego de revestimento orgânico com adição de cafeína, aumentando o tempo de proteção do metal, gerando um baixo impacto ambiental e à saúde.



Amanda Gaddi Gasparoni

Acadêmica de Engenharia Química
UNIPAMPA – Campus Bagé/RS



Dra. Luciana Machado Rodrigues

Docente do Curso de Engenharia Química,
Especialização em Gestão de Processos
Industriais Químicos (GESQUIM)
UNIPAMPA – Campus Bagé/RS



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A corrosão é um processo espontâneo de degradação que deve ser analisado com atenção, pois afeta os metais de modo que a sua durabilidade e desempenho reduzam, além de envolver custos e perigos para a sociedade (GENTIL, 2011). Os processos corrosivos têm sido responsáveis por elevados gastos para repor estruturas e equipamentos degradados pela ação do meio, bem como ocasionam acidentes graves, devido à falha estrutural que pode vir a ocorrer (FONTANA, 1987). Os custos mundiais com a corrosão podem atingir valores muito elevados, em torno de 4-5% do PIB de um país. No Brasil, estimativas realizadas pela Associação Brasileira de Corrosão (2019), indicam que os danos ocasionados pelos processos corrosivos consomem cerca de 5% do PIB, o equivalente a R\$ 25 bilhões/ano.

Devido aos elevados prejuízos proporcionados pela corrosão, a busca por métodos de proteção tornou-se cada vez maior. Dentre as diferentes formas de se controlar os processos corrosivos em metais, uso de revestimentos e inibidores são os métodos mais comuns, por serem eficientes e de fácil execução. Os inibidores são compostos químicos orgânicos ou inorgânicos que são inseridos, normalmente em pequenas quantidades, ao meio agressivo ou no revestimento do metal, de forma a proteger a estrutura metálica de processos de dissolução e agressão. Essas substâncias, se adicionadas em concentrações adequadas, podem retardar ou inibir o desenvolvimento das reações anódicas e/ou catódicas que favorecem a corrosão, reduzindo por consequência as perdas econômicas proporcionadas por esses processos corrosivos (GENTIL, 2011).

Infelizmente, grande parte dos compostos utilizados como inibidores de corrosão são produtos químicos sintéticos não biodegradáveis que, apesar de garantir elevada eficiência de inibição, podem ser muito caros, além de possuir elevado nível de toxidez, tornando-se perigosos para os seres vivos e para o meio ambiente, como, por exemplo, compostos à base de nitrogênio ou enxofre. Esses efeitos aliados à preocupação em gerar processos não agressivos ao ecossistema proporcionaram um aumento na busca por produtos econômica e ecologicamente viáveis (SANTOS *et al.*, 2016).

Diante disso, existe um crescente interesse no uso de extratos de folhas, cascas de frutas e sementes como inibidores naturais de corrosão, pois esses produtos são fontes inesgotáveis e de fácil acesso, além de possuir um baixo custo de obtenção. Pesquisas realizadas mostram que muitos desses extratos de plantas e frutas possuem compostos como taninos, flavonoides, alcaloides e glicosídeos que garantem um efeito inibidor, comprovando a eficiência desses produtos naturais (QUADROS; RODRIGUES; SILVA, 2020).

A cafeína é uma metilxantina presente em diversas bebidas como o café, chás, guaraná, refrigerantes à base de cola, entre outros, tendo como principal efeito, a estimulação do sistema nervoso central. Trabalhos apontam a cafeína como potencial inibidor de corrosão natural em diversos meios (QUADROS; RODRIGUES; SILVA, 2020).

Deve-se destacar a importância que representa a natureza do meio corrosivo que se encontra na imediata proximidade da superfície metálica. Os materiais metálicos em contato com águas tendem a sofrer corrosão, a qual vai depender de várias substâncias que podem estar contaminando-os (FURTADO, 1981; GENTIL, 2011). Contaminantes mais frequentes são gases dissolvidos (O_2 , N_2 , CO_2 , Cl_2 , SO_2 , SO_3 , H_2S ,...), sais dissolvidos (cloreto de sódio, de ferro e de magnésio, carbonato de sódio, bicarbonato de cálcio,...), matéria orgânica de origem animal ou vegetal, bactérias, sólidos suspensos, etc. Também deve ser considerado o pH, a temperatura e a velocidade de agitação da água.

Os sais podem agir acelerando ou retardando a velocidade do processo corrosivo. Entre os sais que influenciam com maior frequência a corrosão estão: cloretos, sulfatos, bicarbonatos de cálcio, magnésio e de ferro. O efeito do cloreto de sódio, na corrosão, deve-se ao fato de ser um eletrólito forte, ocasionando, portanto, aumento de condutividade elétrica, que é fundamental no mecanismo eletroquímico. O íon cloreto atua também na despassivação do aço e das ligas de alumínio, visto que pode penetrar na camada protetora de óxido de Cr e de Al (FONTANA, 1987).

Neste estudo, propõe-se a investigação da corrosão promovida por águas de diferentes fontes, sendo salgadas, salobras e doces, além de superficiais e subterrâneas, sobre o aço carbono, material comumente empregado na construção de tubulações. Além disso, pretende-se desenvolver e testar um revestimento contra a corrosão metálica contendo cafeína como um inibidor natural da corrosão.





CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção serão abordados assuntos sobre a corrosão, qualidade da água, proteção contra corrosão, inibidores de corrosão, e aspectos de segurança associados à corrosão.

2.1 CORROSÃO

A corrosão é a deterioração de um material, geralmente um material metálico, pela ação química ou eletroquímica do meio, associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o meio promove alterações prejudiciais ao material, como modificações estruturais e desgaste, tornando-o inapropriado ao uso (GENTIL, 2011).

A corrosão também pode ocorrer em materiais não-metálicos, por exemplo, na borracha, madeira, concreto e polímeros. Neste caso, a corrosão ocorre por meio da ação química ou térmica do meio sobre o material. A perda da elasticidade da borracha, devido à oxidação por ozônio, altera suas propriedades; as madeiras que são expostas a elevados teores de umidade, liberam vapores ácidos orgânicos, reduzindo sua resistência mecânica; e a deterioração do cimento do tipo Portland, o qual é empregado no concreto, é causada pela ação dos íons sulfato. Todos esses fenômenos são considerados corrosão, mas o termo mais empregado para designá-los é degradação (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Para materiais metálicos, o processo de corrosão é geralmente eletroquímico, uma reação química com transferência de elétrons de um componente químico para o outro. A reação de oxidação é a corrosão que ocorre de diversas formas em materiais metálicos (GEMELLI, 2001).

2.2 FORMAS DE CORROSÃO

A corrosão pode ocorrer sob diferentes formas, e o seu conhecimento é importante no estudo dos processos corrosivos. As formas de corrosão podem ser reconhecidas através de sua aparência, causa e forma de ataque. Neste trabalho, serão descritas as formas de corrosão que podem ser verificadas em aços carbono. Dessa maneira, Gentil (2011) apresenta a classificação das formas de corrosão metálica, de acordo com a sua morfologia, fatores mecânicos, meio corrosivo, causa ou mecanismo, que será tratada nas subseções 2.2.1 até 2.2.10.

2.2.1 Corrosão uniforme

A corrosão do tipo uniforme é também conhecida como corrosão generalizada, por se processar em toda a extensão da superfície do material (Figura 1). Esse tipo de corrosão ocasiona a perda uniforme da espessura da estrutura. Esta é a forma mais

comum de corrosão, sendo facilmente visualizada a olho nu, permitindo a rápida recuperação ou substituição da seção atacada.

Figura 1 - Corrosão uniforme em chapa de aço carbono



Fonte: Engenheiro de materiais (2017)

2.2.2 Corrosão por placas

A corrosão por placas é uma forma localizada de ataque. Nos locais onde ocorre, são formados depósitos de produtos de corrosão, os quais aumentam com o tempo de ataque, representando elevado relevo na morfologia da superfície do material (Figura 2). Sob os depósitos, o material metálico é consumido por oxidação, formando-se placas com escavações, ocasionando a redução das propriedades mecânicas e estruturais do material.

Figura 2 - Corrosão por placas



Fonte: Gentil (2011)

2.2.3 Corrosão alveolar

A corrosão alveolar ocorre com a produção de sulcos ou escavações similares a alvéolos, apresentando uma forma arredondada de ataque. É também classificada como um tipo localizado de corrosão, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Corrosão alveolar

Fonte: Engenheiro de materiais (2017)

2.2.4 Corrosão por pite

A corrosão por pite, também conhecida como corrosão puntiforme, é a forma localizada de ataque mais agressivo. Ocorre em pontos ou pequenas áreas produzindo os pites (Figura 4). Geralmente é de difícil visualização, pois apresenta pequeno diâmetro e elevada profundidade. A técnica de análise microscopia é importante ferramenta para a detecção e caracterização da corrosão por pites (RAMANATHAN, 1998). A morfologia do ataque por pite apresenta-se na forma cônica (AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS, 1986).

Figura 4 – Corrosão por pite em aço carbono

Fonte: Losinox (2019)

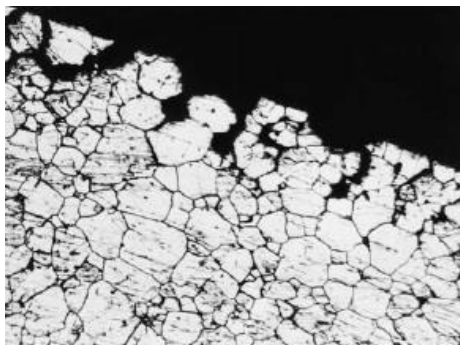
2.2.5 Corrosão intergranular

A corrosão intergranular ocorre nos grãos da rede cristalina do material metálico (Figura 5). Os contornos de grão se tornam reativos, sob certas condições, sofrendo oxidação. O metal perde resistência mecânica e torna-se susceptível a fraturas. O processo de corrosão intergranular decorre do empobrecimento principalmente nos elementos Cr, Mo, Si e P, os quais proporcionam resistência à corrosão, devido à precipitação de carbonetos e/ou nitretos nos contornos de grãos. Esses precipitados são normalmente

mais nobres do que a matriz metálica, atuando como cátodo, tornando a região adjacente anódica e susceptível à corrosão intergranular (RAMANATHAN, 1998).

Segundo Gentil (2011), a corrosão intergranular ocorre quando existe um caminho preferencial para a corrosão na região dos contornos de grãos, devido à presença de células de ação local nas vizinhanças dos contornos. O ataque inicia nos contornos e cresce para o interior dos grãos.

Figura 5 – Corrosão intergranular

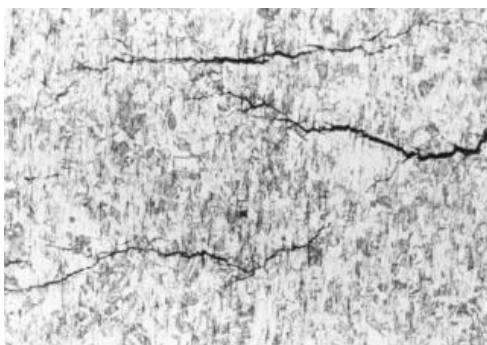


Fonte: Gentil (2011)

2.2.6 Corrosão transgranular

A corrosão transgranular (Figura 6) é uma das mais perigosas formas de corrosão, pois surge nos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual tem muito reduzido a sua resistência mecânica e pode fraturar à menor sollicitação de força. Nesse caso, o processo também pode ser denominado de corrosão sob tensão fraturante.

Figura 6 – Corrosão transgranular

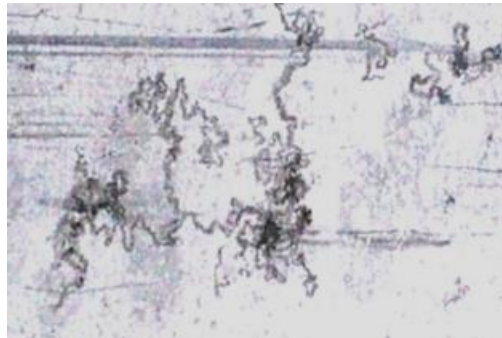


Fonte: Gentil (2011)

2.2.7 Corrosão filiforme

A corrosão filiforme processa-se sob a forma de filamentos, não profundos, os quais se propagam em diferentes direções (Figura 7). Geralmente ocorre em superfícies metálicas com um revestimento polimérico, como tinta, provocando o descolamento da camada protetora, expondo o metal ao meio. Quando a umidade relativa do ambiente é maior do que 85%, pode ocorrer a penetração de água nas falhas ou fissuras provocadas na camada de tinta.

Figura 7 – Filamentos em uma chapa de aço carbono pintada



Fonte: Engenheiro de materiais (2017)

2.2.8 Corrosão por esfoliação

A corrosão por esfoliação ocorre com a formação de múltiplas camadas paralelas à superfície metálica (Figura 8). Pode ocorrer em materiais extrudados ou chapas, os quais tiveram seus grãos alongados e achatados, criando as condições necessárias para que inclusões ou segregações, presentes nos metais, sejam deformadas em planos alongados. Esses alongamentos e formações de camadas surgem com a aplicação de força mecânica ao metal.

Figura 8 – Corrosão por esfoliação em aço carbono



Fonte: Gentil (2011)

2.2.9 Corrosão por empolamento pelo hidrogênio

A corrosão por empolamento pelo hidrogênio ocorre quando o hidrogênio atômico penetra e se difunde no interior de materiais metálicos, acumulando-se em defeitos já existentes. A força exercida pelo acúmulo de hidrogênios atômicos confinados, provoca a sua passagem à hidrogênio molecular. As moléculas de hidrogênio ganham volume e aumentam a pressão interna exercida no metal, forçando a formação de bolhas na sua superfície (Figura 9). O metal tem sua morfologia e resistência mecânica alteradas, pois adquire um grau de porosidade na sua estrutura.

Figura 9 – Empolamento por hidrogênio em chapa de aço carbono



Fonte: Gentil (2011)

2.2.10 Corrosão em torno do cordão de solda

A corrosão localizada em torno de cordão de solda é uma forma comum de ataque, facilmente visualizada (Figura 10). Ocorre em aços inoxidáveis e aços com um teor de carbono acima de 0,03%. Essa forma de corrosão se processa intergranularmente, e ocorre devido à formação de pilha galvânica entre os diferentes materiais da matriz metálica e o metal da solda.

Figura 10 – Corrosão em tubulação de aço em torno de cordão de solda



Fonte: Gentil (2011)

2.3 MEIOS CORROSIVOS

Os meios corrosivos mais comuns são a atmosfera, os solos, os produtos químicos e as águas.

2.3.1 Corrosão atmosférica

A atmosfera é um meio corrosivo que envolve a presença de vários fatores relevantes como umidade relativa, temperatura, ventos, gases, materiais particulados e poluentes atmosféricos em geral. A corrosão atmosférica é classificada em seca, úmida ou molhada (GENTIL, 2011).

A corrosão atmosférica seca ocorre na atmosfera sem umidade, onde não há qualquer presença de filme de eletrólito na superfície metálica; a corrosão atmosfera úmida ocorre com a umidade relativa menor que 100%; e na corrosão atmosférica molhada tem-se a umidade relativa próxima a 100%, ocorrendo em uma camada de condensação na superfície do material metálico. O maior tempo de permanência de filme líquido sobre a superfície metálica promove a ocorrência das reações eletroquímicas, sendo a oxidação do metal, a corrosão (FURTADO, 1981).

2.3.2 Corrosão em solos

O solo é considerado como um meio corrosivo complexo, dificultando a avaliação da corrosão de estruturas metálicas enterradas. O conhecimento das características do solo é fundamental para a previsão da corrosão. Segundo Preima (2017), a velocidade de corrosão no solo não é muito influenciada por pequenas variações na composição ou estrutura do aço. O fator que mais influencia é a natureza do solo. Os principais fatores a serem destacados no estudo da corrosão em solos são pH, umidade, aeração, sais dissolvidos, porosidade e microorganismos.

Não somente as características físico-químicas e microbiológicas do solo podem influenciar no processo corrosivo, mas também as condições climáticas, como incidência de chuvas, temperatura e umidade relativa da atmosfera; a composição do material metálico da estrutura enterrada; e a profundidade da sua instalação (GENTIL, 2011).

Correntes de fuga ou parasitas também são casos específicos de corrosão em solos, os quais provocam agressivo ataque às tubulações e aos tanques enterrados, progredindo para a sua perfuração (PANOSSIAN, 1993). Neste caso, riscos de acidentes, explosões e incêndios são comuns.

2.3.3 Corrosão por produtos químicos

Produtos químicos podem ocasionar o ataque corrosivo ao material metálico de tubulação ou equipamento. A pureza, concentração, pH, temperatura e composição do produto químico são parâmetros importantes para predizer a sua ação corrosiva (GENTIL, 2011). Também se deve levar em consideração a contaminação do produto químico com os óxidos e hidróxidos formados durante o ataque corrosivo do metal.

De modo a manter as características do material metálico, sem que ocorra o seu ataque, após a obtenção dos produtos químicos, deve-se seguir procedimentos de armazenagem, transporte e embalagem, empregando materiais apropriados, resistentes à corrosão (FONTANA, 1987).

2.3.4 Corrosão em águas

Materiais metálicos, quando entram em contato com água, estão sujeitos a sofrer corrosão. Os fatores que mais contribuem para a corrosão metálica em águas são pH, temperatura, sais dissolvidos, gases dissolvidos, matéria orgânica, materiais sólidos suspensos e microorganismos. As águas naturais podem apresentar fatores agravantes da sua ação corrosiva, como poluentes, agrotóxicos, efluentes residenciais e industriais, além da sua agitação natural (LAQUE, 1975).

As águas do tipo potável, para geração de vapor, para processo industrial e para sistemas de resfriamento são casos particulares de meios que devem ter reduzida a sua ação corrosiva sobre os metais, evitando-se o risco de explosões de equipamentos e formação de depósitos do tipo incrustação por sais nas paredes internas de tubulações. Já a água do mar é uma solução salina complexa, consistindo predominantemente de cloretos de sódio e magnésio, outros minerais solúveis, microorganismos e organismos animais e vegetais. A maioria dos sais dissolvidos se ioniza e aumenta a condutividade elétrica da água, a qual tem potencializada sua ação corrosiva, promovendo ataques severos aos metais submersos (LAQUE, 1975).

A taxa de corrosão referenciada para o aço carbono em água do mar é 130 mm/ano, sendo linear até um tempo de 8 anos (SILVA, 2010). Depois desse período a taxa de corrosão decresce a um patamar mais baixo e constante. O aumento da velocidade da água em geral aumenta a taxa de corrosão.

Para águas salinas estagnadas a taxa de corrosão para aços carbono está em cerca de 70 mm/ano, para períodos de imersão entre 5 e 10 anos. Para águas salinas fluindo em baixa velocidade a taxa de corrosão para aços carbono é de cerca de 95 mm/ano (SILVA, 2010).

Águas doces incluem todas as águas naturais não salinas, poluídas ou não, encontradas em córregos, rios, lagos e lagoas. Nessa categoria também são incluídas águas oriundas de precipitações como chuva e neve, água de poços, nascentes e águas tratadas. Trabalhos apontam que as águas doces também apresentam ação corrosiva sobre estruturas metálicas submersas (PETERS *et al.*, 2015). Existe pouca diferença na taxa de corrosão de aços em água doce com valores de pH entre 4,5 e 9,5 (GENTIL, 2011).

Dados sobre a corrosão do aço carbono em águas doce e água do mar são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Corrosão do aço carbono em águas doces e salgadas

Águas	Taxas de Corrosão (mm/ano)		
	1 ano	8 anos	16 anos
Doce	150	65	45
Salgada	195	80	75

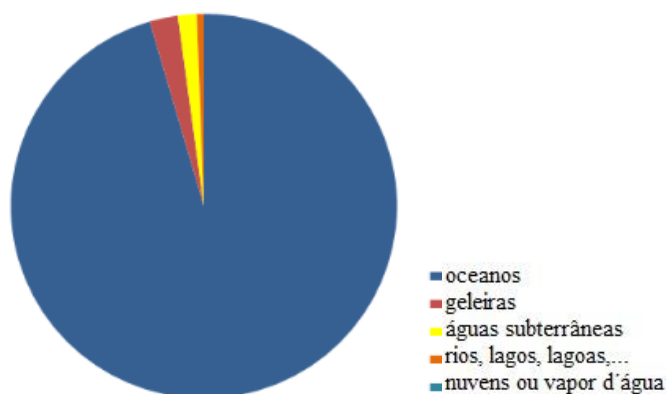
Fonte: Panossian (1993)

A corrosão que ocorre no interior de tubulações de aço carbono, as quais conduzem a água, pode promover a contaminação do meio líquido, aumentando o seu teor de ferro, alterando o pH, coloração, odor, condutividade elétrica e turbidez, tornando-a imprópria para o uso em diversas áreas (PANOSSIAN, 1993).

2.4 QUALIDADES DAS ÁGUAS

Conforme Braga *et al.* (2002), a água encontra-se disponível sob várias formas, cobrindo cerca de 70% da superfície do planeta. É encontrada principalmente no estado líquido, constituindo um recurso natural renovável seguindo o ciclo hidrológico. A disponibilidade da água é um dos fatores mais importantes para conformar os ecossistemas, sendo assim necessário que os recursos hídricos possuam boas condições químicas e físicas, tornando a água própria para a sua utilização, não contendo substâncias que possam contaminar os organismos que compõem a cadeia alimentar (MOTA, 2010).

Segundo a Agência Nacional de Águas (2005), 97,5% da água contida no planeta é inadequada para o consumo direto e irrigações, sendo esta água salgada. Cerca de 2,5% da água do planeta é doce, como se visualiza na Figura 11.

Figura 11 – Água contida no planeta

Fonte: Meteorópole (2011)

A Agência Nacional de Águas (2005) desenvolveu um estudo sobre a distribuição de água existente no planeta, sendo apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição de água no planeta

Localização	Volume (x10 ⁶) (km ³)
Oceanos	1338
Águas Subterrâneas	23,4
Doces	0,76
Umidade do Solo	0,0012
Calotas Polares	24,1
Geleiras	0,041
Lagos	0,176
Doce	0,091
Salgado	0,085
Pântanos	0,011
Rios	0,002
Biomassas	0,0001
Vapor na atmosfera	0,001
Total de água doce	2,53
Total	1.386

Fonte: Adaptada de Braga *et al.* (2005, p. 73)

O Brasil representa 8% do potencial de água potável do mundo, estando 80% da água na região Amazônica e 20% no restante do país (MOTA, 2010). A quantidade de água disponível e a sua qualidade têm sido alvo de pesquisas, encontros internacionais e debates.

A qualidade das águas é normatizada por legislações ambientais e normas técnicas. O Ministério da Saúde atua com a Portaria MS n. 2.914/2011, também conhecida como a Portaria da Potabilidade da Água, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2011).

A Fundação Nacional de Saúde, por sua vez, tem a competência para apoiar as ações de controle da qualidade da água para consumo humano em sistema de abastecimento de água. Nesse sentido, a portaria FUNASA n. 190/2014 dispõe sobre o conjunto de ações exercidas pelas unidades regionais de controle da qualidade da água, instaladas nas unidades federativas brasileiras (BRASIL, 2014).

A Fundação Nacional de Saúde Portaria n. 1.469/2000, anexo XX, dispõe sobre o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2000)

O Ministério do Meio Ambiente atua através do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), o qual apresenta a Portaria n. 357/2005, sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências (BRASIL, 2005).

A norma técnica ABNT NBR 12.216/1992 “Projeto de estação para tratamento de água para o abastecimento público” fornece diretrizes e estabelece valores para o dimensionamento de estações de tratamento de água potável para o consumo público (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS, 1992).

As características básicas das águas, para serem consideradas de boa qualidade, segundo as legislações são apresentadas na Tabela 3. A cor na água representa a parte dissolvida da matéria orgânica. Geralmente é ocasionada devido à presença de compostos orgânicos, oriundos da decomposição animal e vegetal. Também pode ser gerada pela presença de íons ferro e manganês ou descartes industriais (BERNARDO; PAZ, 2010; VIANNA, 1992).

Tabela 3 – Parâmetros de qualidade de águas

Parâmetros	Limites	Legislações
Cor	Incolor	Portaria Consolidação n. 5/2017
pH	6,0 a 9,0	Resolução CONAMA n. 357/2005
Condutividade Elétrica	10 a 100 μ S/cm	Portaria FUNASA n. 190/2014
Turbidez	Até 100 NTU	Resolução CONAMA n. 357/2005
Sólidos Totais Dissolvidos	500 mg/L	Resolução CONAMA n. 357/2005
Teor de Oxigênio Dissolvido	Não inferior a 5 mg/L O ₂	Resolução CONAMA n. 357/2005
Teor de Íons Metálicos	Fe 0,3 Mn 0,1 Cu 1 Zn 5 mg/L	Portaria FUNASA n. 190/2014

Fonte: Autoras (2020)

2.5 PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO

Uma maneira simples para o entendimento da corrosão eletroquímica é ressaltar a necessidade de existência de três componentes principais: metal, oxigênio e eletrólito. As reações eletroquímicas irão se processar na superfície do material metálico imerso em um meio contendo oxigênio. Para fim de evitar a corrosão, é necessário eliminar ou isolar um dos três componentes. De acordo com esse princípio, alguns dos métodos para evitar a corrosão são: diminuição ou eliminação da umidade do ambiente, desaeração do eletrólito, emprego de revestimentos inorgânicos ou orgânicos no metal, adição de inibidores de corrosão no eletrólito ou no revestimento (LU *et al.*, 1998).

Tais métodos são utilizados para criar uma barreira física na qual o metal é separado do eletrólito, do oxigênio ou de ambos. Caso a execução do processo tenha sucesso, ocorre a proteção contra a corrosão eletrolítica, no entanto, devido a ocorrências práticas, em decorrência de problemas operacionais, isto não é facilmente alcançado (PANOSSIAN, 1993).

O uso de revestimentos orgânicos para a proteção de estruturas metálicas oferece o método mais econômico contra a corrosão em água do mar. Plataformas de petróleo, tubulações e outros equipamentos fazem uso desse método. Quanto menos poroso o revestimento e mais aderente ao metal, maior será a eficiência na impermeabilização do material (NUNES, 2007). A proteção ocorre através da interposição de uma camada de natureza orgânica entre o meio corrosivo e a superfície metálica. Principais

revestimentos orgânicos utilizados são as tintas anticorrosivas, aplicadas por pintura industrial, e empregadas para o controle da corrosão em estruturas aéreas, submersas ou enterradas. Revestimentos para tubulações enterradas ou submersas, como oleodutos, gasodutos, adutoras, em geral, apresentam elevada espessura e composição à base de betume. Revestimentos empregando borrachas ocorrem através do recobrimento da superfície metálica com uma camada polimérica, sendo esse método efetuado pelo processo da Vulcanização (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO, 2019).

O uso de inibidores de corrosão tornou-se importante para a proteção de metais, devido a sua elevada eficiência. Dentre os inibidores mais conhecidos e comuns, estão os compostos inorgânicos que, na maioria das vezes, mostram-se tóxicos e prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Por essa razão e devido à exigência crescente de desenvolver processos e usar produtos químicos não agressivos ao ecossistema, a busca por inibidores de corrosão naturais e não tóxicos aumentou consideravelmente nos últimos anos (FORNAZARI; GONÇALVES; SPINELLI, 2006).

Devido ao baixo custo e à facilidade de aquisição, muitos pesquisadores investigam a possibilidade de utilização de extratos aquosos de plantas e vegetais como inibidores de corrosão nos mais variados materiais e meios (básico, ácido e neutro). Muitos desses extratos consistem de misturas orgânicas complexas e ricas em componentes químicos que favorecem a inibição à corrosão, como, por exemplo, alcaloides, flavonoides, taninos, entre outros (ROCHA; GOMES, 2017).

Pesquisas apresentam, por meio de técnicas como medidas de perda de massa, curvas de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica, que muitos desses extratos são eficazes no uso como inibidores, sendo alternativas promissoras para substituir os inibidores convencionais (FELIPE *et al.*, 2013).

2.6 INIBIDORES NATURAIS DA CORROSÃO

Pesquisas sobre compostos orgânicos naturais como inibidores de corrosão são essenciais por dois motivos principais: por serem produtos aceitáveis do ponto de vista ecológico, representando baixo impacto ambiental; e pelo seu baixo custo, reduzindo o investimento necessário para a sua utilização. Devido ao aumento da consciência ambiental, os inibidores de natureza não tóxica vêm sendo muito procurados (GUNAVATHY; MURUGAVEL, 2012). Contudo, a grande vantagem dos inibidores naturais também denominados como inibidores verdes está no fato de, além de não ser tóxico ao meio ambiente, serem derivados de recursos naturais renováveis, biodegradáveis, de baixo custo, não contêm metais e podem ser produtos de reaproveitamento de resíduos industriais ou domésticos (FELIPE *et al.*, 2013).

Estudos mostraram que extratos vegetais, extraídos de plantas e também de seus subprodutos, como cascas de frutas, são consideradas como inibidores no processo de corrosão de alguns materiais metálicos (Al, Zn, Cu e aço carbono) em meios ácidos ou básicos (QUARTARONE; BELLOMI; ZINGALES, 2003).

Torres *et al.* (2016) realizaram um estudo para avaliar a eficiência de inibição de extratos da semente do mamão papaia na corrosão de aço carbono 1020, imerso em solução de ácido clorídrico 1 M. A pesquisa consistiu em produzir dois extratos, um deles sendo obtido por técnica de infusão e outro, por extração em meio ácido, e posterior neutralização, com o intuito de avaliar a influência do pH e da temperatura na eficiência do inibidor, além de investigar os efeitos da variação da concentração. Ao fim, com o auxílio de ensaios gravimétricos e eletroquímicos, comprovou-se que ambos os extratos possuíam eficiência de inibição à corrosão do aço, a qual aumentou com a concentração, e reduziu levemente com o aumento da temperatura.

Neto *et al.* (2015) realizaram um estudo para investigar a ação inibidora do extrato da planta *Byrsonima sericea*, também conhecida como murici-da-praia, sobre a corrosão do aço carbono 1040 em solução de ácido clorídrico a 1 M. No estudo, foi possível verificar, por ensaios de polarização e voltametria cíclica, que a adição do extrato de murici-da-praia promove uma influência na reação catódica, sobre a superfície do aço, ou seja, o extrato age por mecanismo catódico.

Abdel-gaber, Abd-el-nabey e Sidahmed (2006) avaliaram o mecanismo de ação inibidora dos extratos de camomila, halfabar, cominho preto e feijão kidney na corrosão de aço carbono em presença de ácido sulfúrico 1 M. Apresentaram, pela realização de ensaios de polarização potenciodinâmica, que os extratos em estudo se comportaram como inibidores mistos. Avaliaram também o potencial inibidor da planta *Lupinus albus*, em aço carbono imerso em soluções de ácido sulfúrico e ácido clorídrico, e verificaram que esse extrato apresentou ação inibidora por adsorção. Em ambos os casos, os extratos mostraram-se eficientes no processo de inibição de corrosão.

Pesquisas empregando a cafeína como inibidor de corrosão, em vários meios, têm sido realizadas. Anthony *et al.* (2004) avaliaram o desempenho da cafeína na inibição da corrosão do aço carbono em meio neutro e na presença de íons cloreto, obtendo êxito na proteção do metal.

Spinelli *et al.* (2006) mostraram evidências eletroquímicas do desempenho da cafeína como inibidor de corrosão do aço carbono ABNT 1005, em solução de sulfato de sódio 0,1 mol L⁻¹. Foram realizados ensaios com a técnica de voltametria cíclica, na qual foi confirmada a forte interação entre o metal e o composto. Também afirmou no

resultado uma redução de até 78% na taxa de perda de massa do metal, com a adição de 1,5 mmol L⁻¹ de cafeína.

A cafeína foi estudada como inibidor de corrosão em Zn e aço com baixo carbono em etanol (TRINDADE; GONÇALVES, 2009); aço laminado a frio em solução de HCl; aço em solução de H₂SO₄; e Cu em solução aquosa de NaCl a 3,5% (EBADI *et al.*, 2012). Propriedades da inibição de corrosão com o emprego da cafeína foram analisadas no aço carbono imerso em água de poço e em solução aquosa de NaCl corrosivo. Os resultados experimentais desse estudo mostraram que a cafeína foi eficiente inibidor de corrosão, e os valores da eficiência da inibição se elevaram com o aumento da concentração do inibidor (ANTHONY *et al.*, 2004).

Saba, Brown e Omanovic (2006) estudaram a interação da platina com a cafeína em uma solução tamponada de fosfato com pH 7,0, em diferentes temperaturas. A técnica utilizada foi a voltametria cíclica, sendo verificado pelos pesquisadores que o composto orgânico se adsorve na platina, bloqueando seus sítios ativos. Com isso, reduziu os valores das correntes devido ao decréscimo da área metálica disponível para os processos eletroquímicos.

A atuação da cafeína como inibidor de corrosão ocorre através da diminuição da área de reação catódica disponível e da mudança da energia de ativação da reação anódica. O composto orgânico que é adsorvido na superfície metálica atua diminuindo as correntes anódicas. Os principais centros de adsorção são a presença de anéis aromáticos e heteroátomos (HALEEM *et al.*, 2013).

A cafeína como inibidora de corrosão da liga de alumínio AA3104-H19 utilizada para embalagens metálicas de bebidas foi avaliada por Quadros, Rodrigues e Silva (2020). Estudos eletroquímicos realizados na liga de Al em soluções sintéticas de ácido fosfórico e cítrico, simulando bebidas à base de cola e guaraná, respectivamente, com e sem adição de cafeína, comprovaram a inibição da corrosão da liga de Al em presença de cafeína.

2.7 SEGURANÇA ASSOCIADA A PROCESSOS CORROSIVOS

A corrosão pode causar muitos acidentes, ocasionando prejuízos financeiros, perdas de produtos, e danos às pessoas e ao meio ambiente. Alguns casos de acidentes registrados são apresentados a seguir: no ano de 1998 no interior das instalações da Refinaria do Vale do Paraíba (REVAP) houve um rompimento ocorrido por corrosão do oleoduto do sistema, gerando o vazamento de grande quantidade de óleo, o qual atingiu o córrego Lambari, lagoa e charcos, ocasionando em um grave impacto ao

meio ambiente e a parada da produção (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2020).

No ano 2000 ocorreu o rompimento de Oleoduto do Sistema de São Paulo (OSSP) da Petrobrás, localizado na Refinaria Presidente Bernardes, na cidade de Cubatão. O rompimento foi devido a um processo de corrosão do duto, o qual juntamente com a forte pressão com que o produto era bombeado, promoveu um significativo impacto ambiental no bioma Mata Atlântica. Foram realizados muitos esforços para cessar o vazamento. Também, em 2004, ocorreu o vazamento de petróleo transportado em oleoduto, contaminando o rio Guaecá, na região da Praia de Guaecá, em São Sebastião. Foi identificado pela Petrobrás Transpetro que a causa do vazamento foi devido a uma fenda longitudinal no oleoduto, originado por ataque corrosivo ao metal. Nesta ocorrência um grande impacto ambiental e sócio-econômico no turismo local foram gerados (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2020).

Em 2018 ocorreu o desabamento de uma ponte em Gênova na Itália, ponte construída na década de 60 pelo projetista e engenheiro Riccardo Morandi. O engenheiro haveria registrado a necessidade de manutenção constante da ponte para fim de evitar problemas por corrosão da estrutura metálica, devido aos efeitos da maresia e poluição. De acordo com a mídia televisiva, Morandi teria alertado sobre a instauração de processo corrosivo em um relatório técnico, realizado 12 anos após a inauguração da ponte. As principais hipóteses das causas do desabamento foram apontadas como a corrosão da estrutura metálica do concreto armado e a vulnerabilidade da ponte, junto da qualidade dos materiais utilizados na construção. Esse acidente ocasionou a morte de 43 pessoas e prejuízo financeiro ao governo municipal (CANAL DIGITAL G1, 2018).

Para fim de evitar esses acidentes e prejuízos devem ser adotadas medidas de prevenções e manutenção. Cientistas da Universidade do Arizona, localizada nos Estados Unidos, realizaram uma pesquisa para auxiliar na previsão destes riscos. As pessoas que trabalham na manutenção das indústrias devem ter o conhecimento dos riscos de corrosão, podendo assim agir de forma eficiente no seu combate. Na indústria utilizam materiais que tentam repelir a água e proteger o material, como, por exemplo: tintas, vernizes entre outros modos para a prevenção da corrosão (NETO, 2016).





CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Nas subseções a seguir serão apresentados os materiais e as etapas desenvolvidas durante a execução deste trabalho de conclusão de curso.

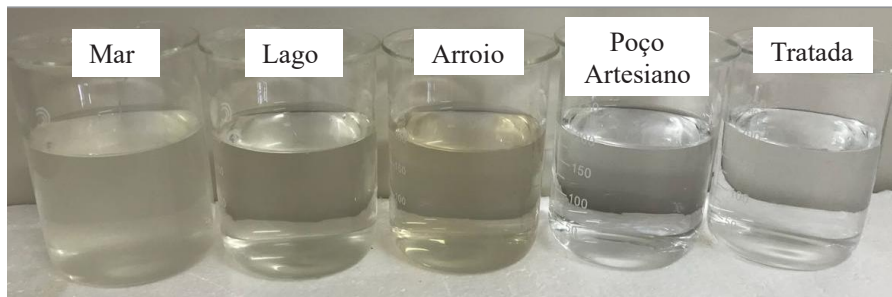
3.1 MATERIAIS

Os materiais empregados neste trabalho consistem em amostras de águas de diferentes fontes, amostras metálicas e equipamentos empregados na fase experimental.

3.1.1 Amostras de águas

As amostras de águas selecionadas para este estudo foram salinas e doces, sendo: água do mar (Porto Seguro-BA), água de lago (Bagé-RS), água de arroio (Bagé-RS), água de poço artesiano (Bagé-RS) e água tratada pelo departamento de águas e esgotos do município de Bagé/RS. As amostras podem ser visualizadas na Figura 12.

Figura 12 - Amostras de água



Fonte: Autoras (2020).

A caracterização das amostras de águas foi realizada em laboratório empregando equipamentos portáteis, digitais, com leitura de valores via sonda de medição. Os equipamentos foram: medidor multiparâmetros (condutividade elétrica e teor de sólidos totais dissolvidos), medidor de índice de turbidez e medidor de pH, apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Equipamentos para a caracterização das amostras de águas, medidor multiparâmetros, índice de turbidez e pH (esquerda para direita)



Fonte: Autoras (2020)

3.1.2 Amostras metálicas

As amostras metálicas empregadas foram de aço carbono API 5L grau B, utilizado em tubulações. Esse material foi cedido pela empresa Transpetro, responsável pelo transporte de petróleo e derivados via tubulações. A composição nominal desse aço carbono é apresentada na Tabela 4.

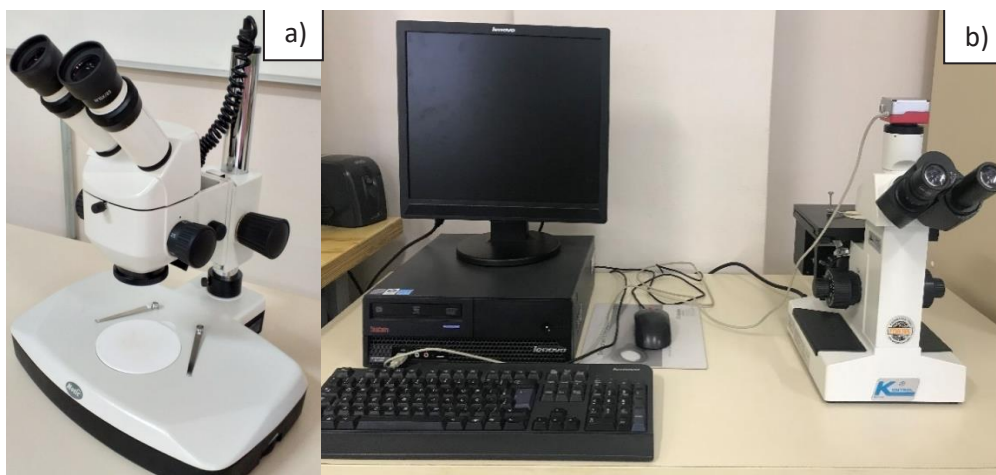
Tabela 4 - Composição nominal do aço carbono API 5L grau B (%peso)

	C	Mn	P	S
Aço carbono API 5L Grau B	0,28	1,20	0,03	0,03

Fonte: Silva (2010)

As amostras metálicas foram caracterizadas antes e após ensaios de corrosão por microscopia óptica, empregando estereomicroscópio e microscópio metalúrgico com sistema acoplado para aquisição de dados. Os microscópios empregados são apresentados na Figura 14. As amostras foram também monitoradas por pesagens em balança analítica.

Figura 14 - Estereomicroscópio (a) e microscópio metalúrgico (b)



Fonte: Autoras (2020)

A etapa de desenvolvimento de revestimento protetor contra a corrosão foi desenvolvida testando-se dois tipos de revestimentos:

1) um verniz natural contendo componentes antimicrobianos e cargas minerais funcionais fabricado pela Empresa AkzoNobel Brasil;

2) um esmalte sintético, resina alquídica de cadeia longa para recobrimento decorativo fabricado pela Empresa Resicolor Tintas. Ambos produtos adquiridos no mercado local de Bagé.

A cafeína testada como inibidor da corrosão foi adquirida com concentração de 350 mg. Para a etapa de aplicação do revestimento nas amostras metálicas foi empregada balança digital, para a quantificação das partículas de cafeína a serem inseridas.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Coleta e caracterização das amostras de águas

As águas foram coletadas com o devido cuidado, para evitar a contaminação das amostras, empregando-se luvas e frascos plásticos limpos, com boa vedação e identificados. Foram mantidas sob refrigeração até sua caracterização. As amostras coletadas foram caracterizadas com a determinação dos parâmetros: pH, condutividade elétrica, índice de turbidez e teor de sólidos totais dissolvidos.

3.2.2 Preparação e caracterização das amostras metálicas

As amostras metálicas foram cortadas manualmente com serra de ourives de forma a apresentarem área de cerca de 2 cm². Em seguida, foram lixadas com lixas d'água de carbetto de silício com granulometrias de #400 a #2000, de forma a padronizar e homogeneizar as superfícies de todas as amostras. As amostras metálicas foram avaliadas por microscopia óptica em várias fases do estudo, antes e após a corrosão.

3.2.3 Ensaio de corrosão por exposição direta

Em uma primeira etapa deste trabalho, foram realizados ensaios de corrosão por exposição direta das amostras de aço carbono nas águas coletadas, durante 90 dias. Cada sistema metal/meio foi mantido em um recipiente fechado. A morfologia do ataque às amostras metálicas foi monitorada por microscopia após 7, 14, 21, 30 e 90 dias. A variação de massa das amostras de aço carbono também foi registrada.

Para o cálculo da taxa de corrosão das amostras metálicas, após a exposição de 90 dias, foi procedida a limpeza dos produtos de corrosão depositados no metal, através do processo de decapagem química, na qual as amostras metálicas são imersas, à temperatura ambiente, em solução de Clarke (1 L de ácido clorídrico, 20 g de trióxido de antimônio e 50 g de cloreto estano II) até a remoção dos resíduos aderidos, de acordo com a norma técnica ASTM G1-90 (AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS, 1999) "*Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*". As amostras foram pesadas previamente e após os ensaios e limpeza dos

produtos de corrosão. A perda de massa em função do tempo de exposição do aço carbono no meio pode ser transformada em taxa de corrosão uniforme (TC).

O cálculo da taxa de corrosão uniforme (mm/ano) é realizado pela Equação 1:

$$TC = (K \times W) / (A \times t \times d) \quad (1)$$

na qual K = constante para ajuste de unidades ($8,76 \times 10^4$); W = perda de massa em g; A = área em cm^2 ; t = tempo em h; d = densidade em g/cm^3 (para o aço carbono = $7,86 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Segundo Nunes (2007), a técnica de perda de massa das amostras metálicas é muito empregada na indústria de óleo e gás para se obter de maneira bastante simples as taxas de corrosão em tubulações e equipamentos fabricados em aço carbono. De acordo com o valor obtido para a taxa, o processo corrosivo pode ser classificado qualitativamente como baixo, moderado, alto ou severo, conforme a norma técnica NACE SP0775 (NATIONAL ASSOCIATION CORROSION ENGINEERS, 2018) "*Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations*" (Tabela 5).

Tabela 5 – Classificação qualitativa da corrosão uniforme do aço carbono

Corrosão	Taxa de Corrosão (mm/ano)
Baixa	< 0,025
Moderada	0,025 a 0,12
Alta	0,13 a 0,25
Severa	> 0,25

Fonte: National Association Corrosion Engineers (2018)

3.2.4 Desenvolvimento do revestimento polimérico

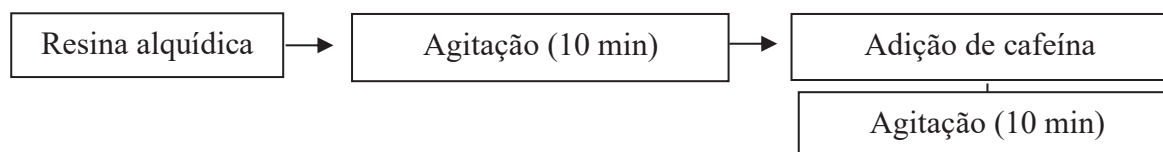
Anterior ao desenvolvimento do revestimento, foi testado o potencial inibidor da cafeína 350 mg no meio aquoso considerado o mais agressivo, de acordo com os resultados obtidos até o momento. Portanto, a cafeína foi adicionada diretamente em uma amostra de água do mar, sendo então submergida a amostra de aço sem nenhuma proteção, e mantida durante 24 h.

Para o desenvolvimento dos revestimentos testados foram utilizados um verniz natural contendo componentes antimicrobianos e cargas minerais funcionais, e um esmalte sintético (resina alquídica) não diluídos, conforme as recomendações dos fa-

bricantes. As partículas de cafeína foram moídas em gral de cerâmica e misturadas aos revestimentos conforme literatura (QUADROS; RODRIGUES; SILVA, 2020).

O fluxograma do procedimento de preparo do revestimento é apresentado na Figura 15 e foi baseado em trabalho anterior de Machado *et al.* (2015), os quais estudaram a inserção de partículas de cinza da combustão da casca do arroz em revestimento protetor.

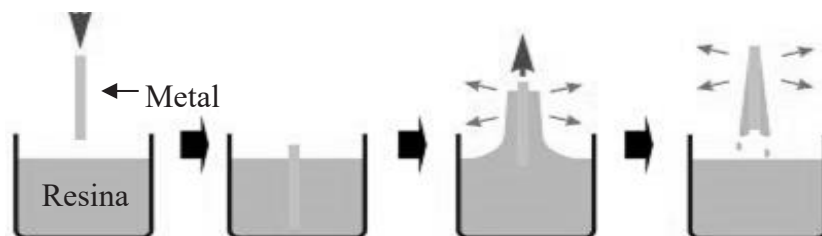
Figura 15 – Fluxograma do procedimento de preparo do revestimento



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2015)

A aplicação do revestimento irá garantir a maior espessura possível de filme úmido sobre a amostra metálica, sem haver seu escorrimento. O recobrimento foi realizado por imersão do metal, conforme Figura 16, a frio.

Figura 16 – Método de aplicação do revestimento



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2015)

3.2.5 Ensaios de corrosão em amostras com revestimento

As amostras de aço revestidas foram expostas por 24 e 48 h em água do mar, para avaliação da sua morfologia por microscopia óptica. Foram avaliados ambos os tipos de revestimentos com e sem a adição das partículas de cafeína para comparação.

Foram também realizados testes de corrosão em amostras metálicas em que o revestimento sofreu uma incisão em forma de "X", com o objetivo de verificar a progressão da corrosão a partir de uma falha no revestimento. As amostras foram imersas em água do mar, e monitoradas visualmente.

Os ensaios de corrosão foram avaliados pelas normas ASTM D714-02 (AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS, 2017) “*Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints*” para quantificação de tamanho e frequência de bolhas, e norma ASTM D610-08 (AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS, 2019) “*Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces*” para avaliação de enferrujamento.



CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos na execução deste trabalho.

4.1 ENSAIOS DE CORROSÃO POR EXPOSIÇÃO DIRETA

As amostras de águas foram caracterizadas pela análise dos parâmetros pH, condutividade elétrica (CE), índice de turbidez (T) e teor de sólidos totais dissolvidos (STD), apresentados na Tabela 6. Observa-se que a amostra de água do mar apresentou valores muito elevados de condutividade elétrica, índice de turbidez e teor de sólidos totais dissolvidos. Esse meio é rico nos componentes salinos cloreto de sódio, sulfato de cálcio, sulfato de magnésio e cloreto de magnésio, sendo que o cloreto de sódio equivale a 80% do total dos sais (LAQUE, 1975). Esse fato contribui para os elevados valores encontrados, os quais provavelmente irão influenciar a ação corrosiva da amostra de água do mar sobre o aço carbono.

A amostra de água de arroio apresentou elevados valores de condutividade elétrica, índice de turbidez e teor de sólidos totais dissolvidos dentre as águas doces analisadas, sendo que a água subterrânea de poço artesiano se destacou pelo valor mais elevado de teor de sólidos totais dissolvidos.

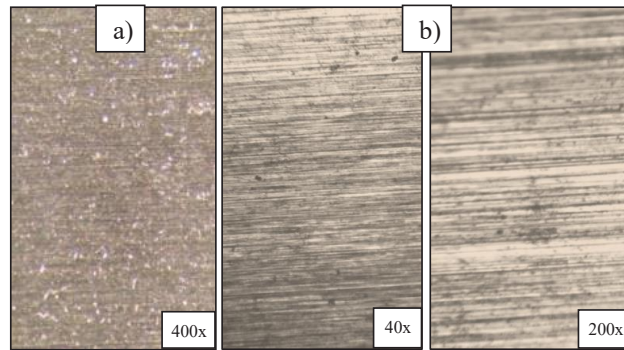
Tabela 6 – Caracterização das amostras de águas

Água	pH	CE (mS/cm)	T (NTU)	STD (ppm)
Mar	7,5	> 500,00	51,8	295.000
Lago	9,7	1,07	9,77	560
Arroio	7,3	72,00	33,0	350
Poço Artesiano	8,4	5,90	0,31	2.800
Tratada	5,9	0,94	0,28	250

Fonte: Autoras (2020)

A morfologia da amostra de aço carbono preparada por lixamento, anterior à exposição às águas, é apresentada na Figura 17, sendo visualizado somente o sentido do polimento, sem qualquer ataque ou defeito na superfície metálica.

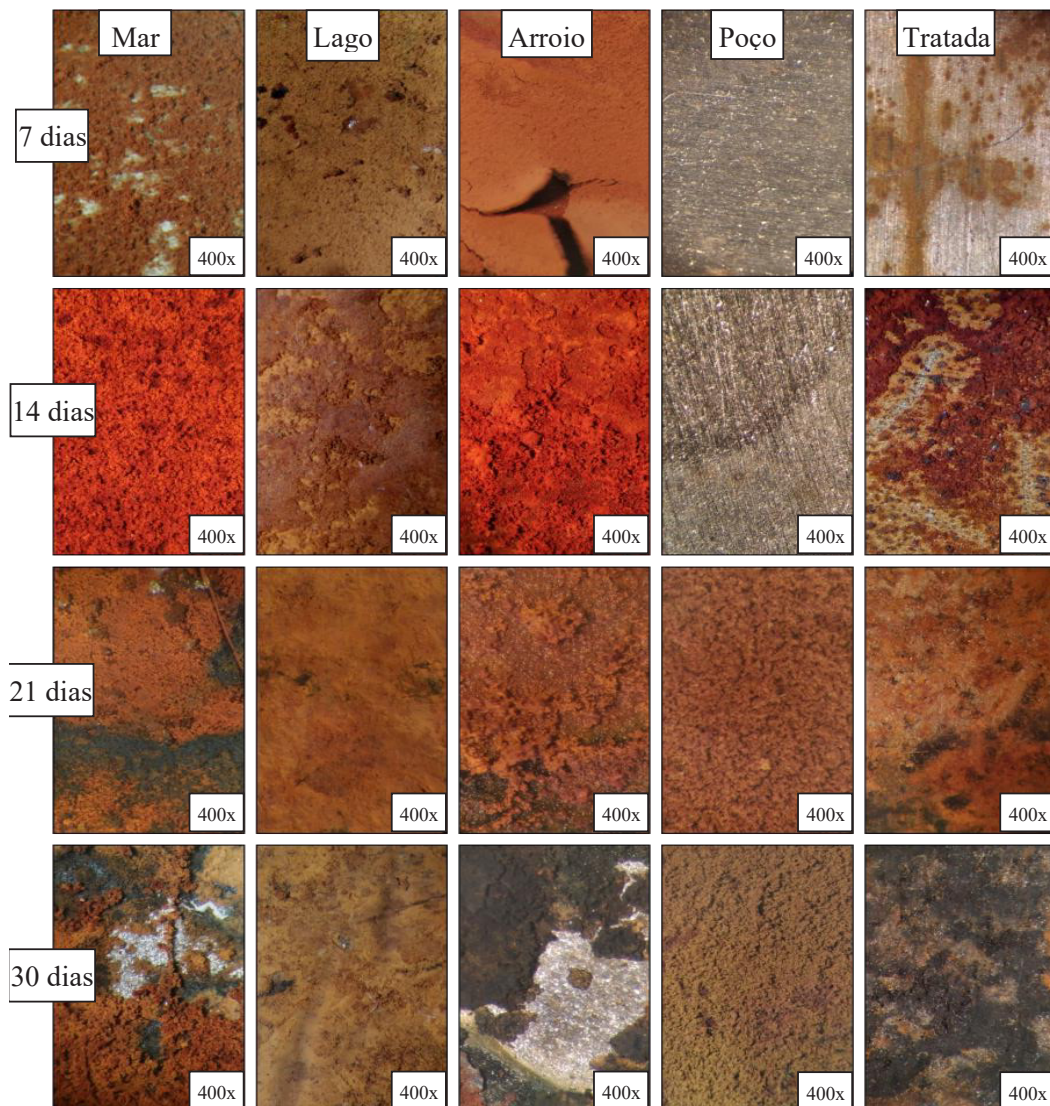
Figura 17 – Morfologia do aço antes da exposição às águas por estereomicroscópio (a) e microscópio metalúrgico (b)



Fonte: Autoras (2020)

A morfologia das amostras de aço carbono, após a exposição direta nas águas por 7, 14, 21 e 30 dias, é apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Morfologia do aço após exposição direta às águas por estereomicroscópio



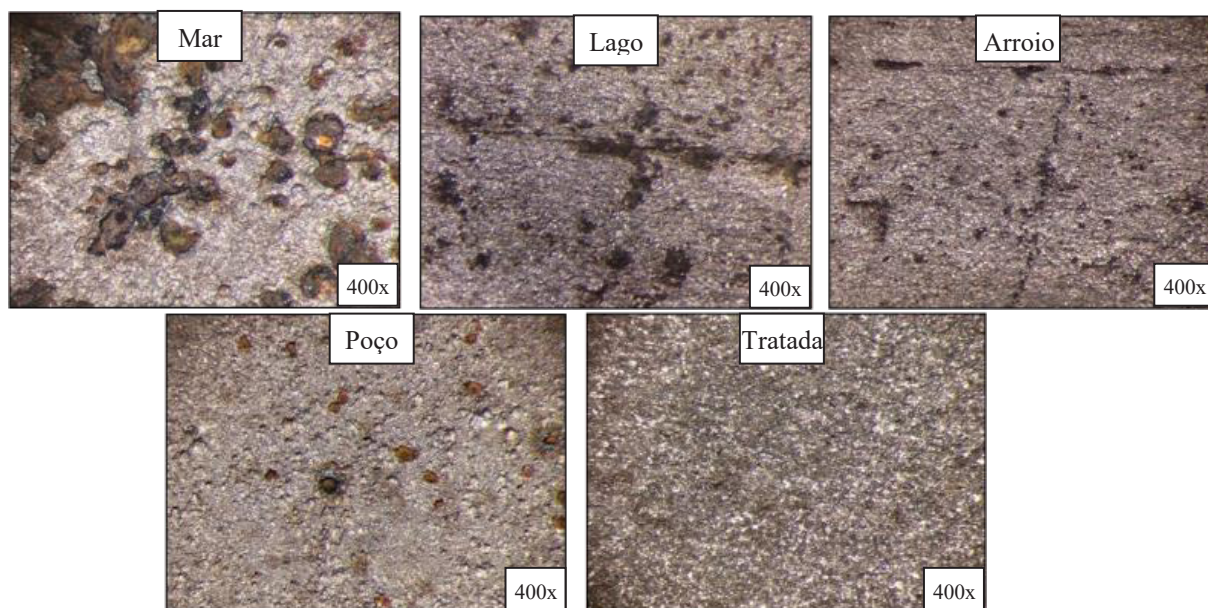
Fonte: Autoras (2020)

As amostras de águas de mar, lago e arroio promoveram um rápido ataque generalizado (menos de 1 semana), com formação de camada de produtos de corrosão, provavelmente, hidróxidos e óxidos de ferro. Essa camada se tornou cada vez mais espessa e extensa, cobrindo toda a superfície metálica. Com o tempo de 1 mês de exposição, partes da camada de produtos de corrosão formada começaram a se desprender do metal, em água do mar e água do arroio.

As águas de poço artesiano e tratada (potável) promoveram ataques mais lentos ao metal, iniciando de forma localizada, por pite. Somente após 21 dias de exposição, o ataque progrediu abrangendo toda a superfície metálica, no entanto, a camada de produtos de corrosão formada foi fina e porosa.

As amostras de aço carbono foram mantidas nas águas durante 90 dias, quando a exposição foi encerrada, e os produtos de corrosão foram removidos por decapagem química. A morfologia resultante do ataque ao metal, registrada por estereomicroscópio, é apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Morfologia do ataque final ao aço após a remoção dos produtos de corrosão



Fonte: Autoras (2020)

Os pontos de ataque à matriz metálica foram bem nítidos e pronunciados, facilmente observados por microscopia. A morfologia do ataque indicou que a água do mar foi o meio que promoveu o ataque mais intenso, comparativamente, seguido pela água de lago, arroio, poço e, por fim, a água tratada. Esta última praticamente não produziu ataque significativo ao aço carbono durante os 90 dias de exposição.

A perda de massa metálica por área de amostra (g/cm^2), a taxa de corrosão uniforme (mm/ano), ao final de 90 dias de exposição às águas, e a classificação da corrosão ocorrida são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Perda de massa metálica, taxa de corrosão e classificação da corrosão

Água	Perda de Massa (g/cm^2)	Taxa de Corrosão (mm/ano)	Corrosão
Mar	0,053	0,14	Alta
Lago	0,037	0,11	Moderada
Arroio	0,034	0,10	Moderada
Poço Artesiano	0,027	0,071	Moderada
Tratada	0,003	0,007	Baixa

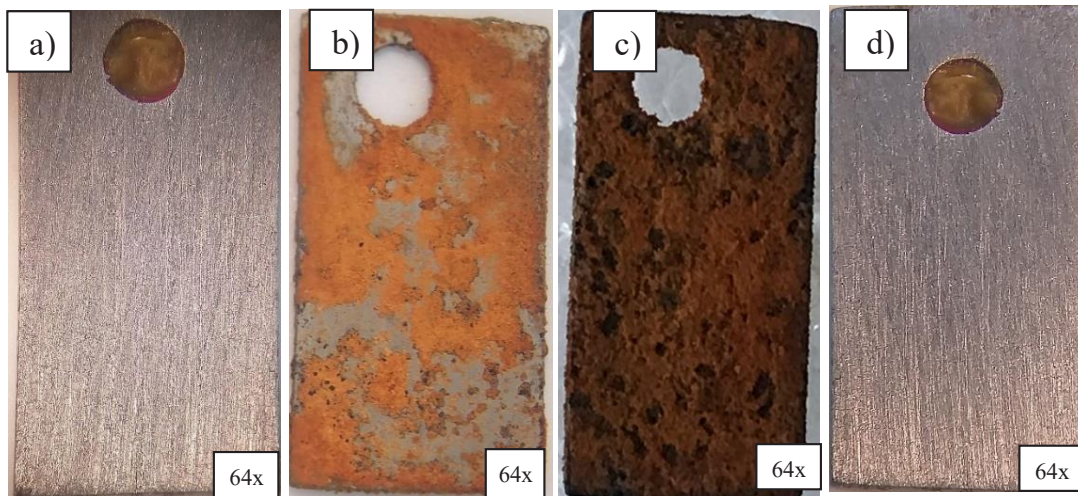
Fonte: Autoras (2020)

A amostra de água do mar foi o meio que produziu o maior consumo de aço carbono e taxa de corrosão, sendo classificada como alta. Em seguida, as águas de lago e poço artesiano apresentaram valores próximos de taxa de corrosão, sendo ambas classificadas de moderada. A água de arroio promoveu uma corrosão classificada como moderada e, finalmente, a água tratada foi o meio menos agressivo ao aço carbono, promovendo uma corrosão baixa.

4.2 ENSAIOS DE CORROSÃO EM AMOSTRAS COM REVESTIMENTO

O teste preliminar do potencial inibidor da cafeína foi realizado dissolvendo-a diretamente em água do mar e expondo o aço sem nenhuma proteção, durante 24 h. Na Figura 20 é possível observar a diferença entre as morfologias da amostra de aço antes da exposição, após 24 e 48 h em água do mar, e após 24 h em água do mar contendo cafeína, avaliada em estereomicroscópio. A adição de cafeína ao meio promoveu a formação de uma película transparente sobre a superfície do metal, a qual provavelmente influenciou na sua proteção contra o ataque. Diante deste resultado promissor, foram desenvolvidos dois tipos de revestimento contendo a cafeína para a proteção da amostra de aço.

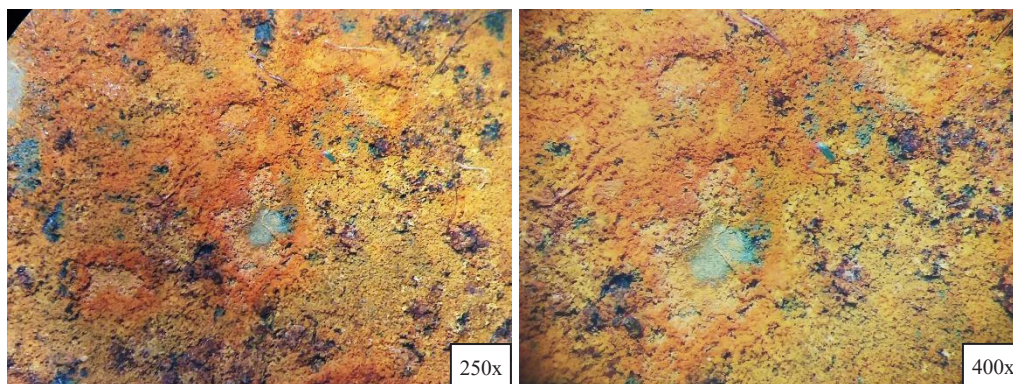
Figura 20 – Morfologia do aço antes da exposição (a), após 24 e 48 h em água do mar (b, c), e após 24 h em água do mar com adição de cafeína (d)



Fonte: Autoras (2020)

Um detalhe da amostra de aço sem nenhuma proteção submetida à água do mar durante 24 h é apresentado na Figura 21, revelando um ataque rápido e uniforme sobre a amostra metálica.

Figura 21 – Morfologia do ataque ao aço carbono em água do mar 24 h



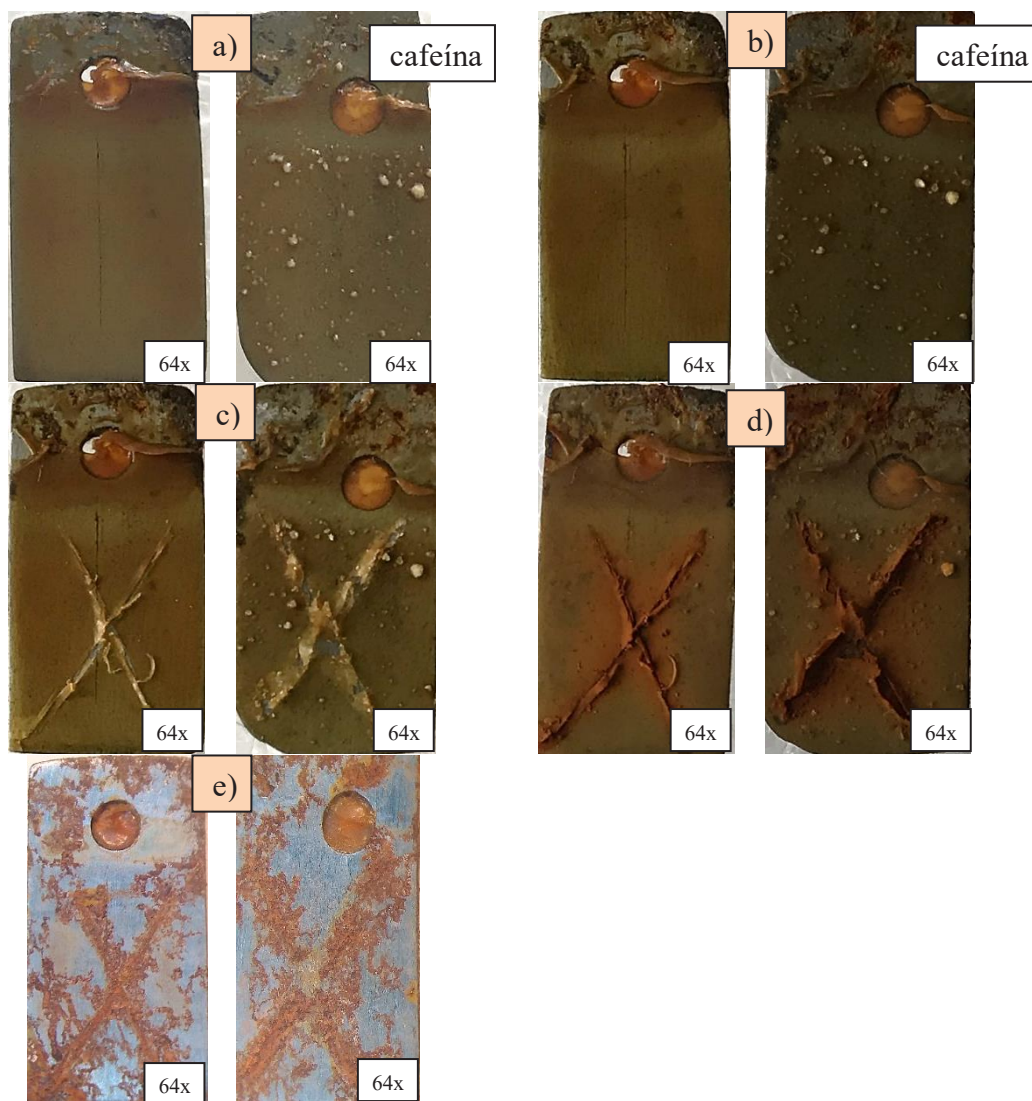
Fonte: Autoras (2020)

Foram testadas duas formulações de revestimentos contendo partículas de cafeína 350 mg: um verniz natural com componentes antimicrobianos e cargas minerais funcionais, e um esmalte sintético (resina alquídica). Os revestimentos testados foram formulados da seguinte maneira:

- verniz
- verniz + cafeína 10% (p/p)
- resina alquídica
- resina alquídica + cafeína 10% (p/p)

Na Figura 22 são apresentadas as morfologias das amostras metálicas que receberam o revestimento à base do verniz natural, sem e com partículas de cafeína, na sequência das etapas: a) após aplicação do revestimento; b) 24 h de exposição em água do mar; c) incisão do defeito em "X"; d) 24 h em água do mar, e; e) remoção mecânica do revestimento.

Figura 22 - Morfologia do aço com o revestimento de verniz natural sem e com cafeína



Fonte: Autoras (2020)

Foi possível observar que o revestimento aplicado apresentou uma coloração marrom escura, a qual dificultou o monitoramento do início do processo corrosivo, nas primeiras 24 h de exposição em água do mar; as partículas de cafeína, mesmo após o tempo de agitação, permaneceram aglomeradas no revestimento; após as 24 h de exposição ao meio, o revestimento com o defeito fabricado, teve sua coloração alterada, podendo-se perceber a formação de produtos de corrosão alaranjados, mesmo abaixo do revestimento; e por fim, a remoção do revestimento demonstrou que a corrosão

foi preferencialmente localizada sob o defeito em “X”. Acredita-se que o revestimento tenha sido protetor contra a corrosão do aço, no entanto, foi difícil inferir sobre a eficiência da cafeína.

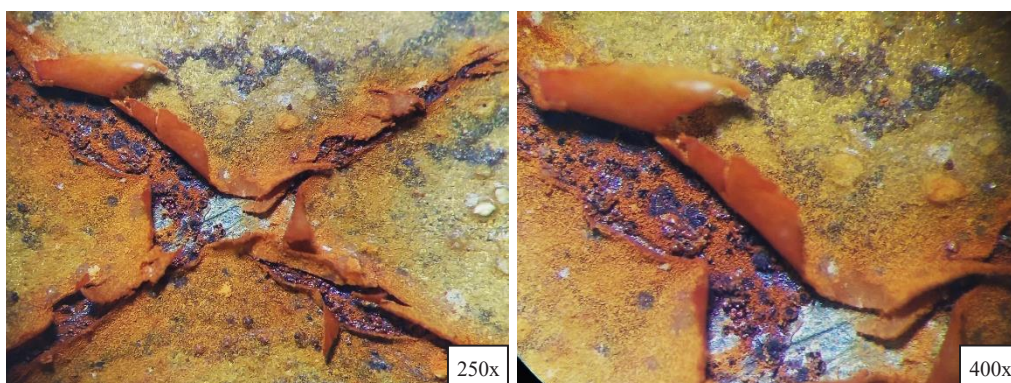
Para tentar elucidar sobre a eficiência da cafeína, as amostras revestidas com o verniz, com e sem a adição da cafeína, após a incisão do defeito em “X” e exposição de 24 h em água do mar, foram detalhadamente analisadas por microscopia óptica (Figuras 23 e 24).

Figura 23 – Morfologia do ataque ao aço revestido pelo verniz em água do mar



Fonte: Autoras (2020)

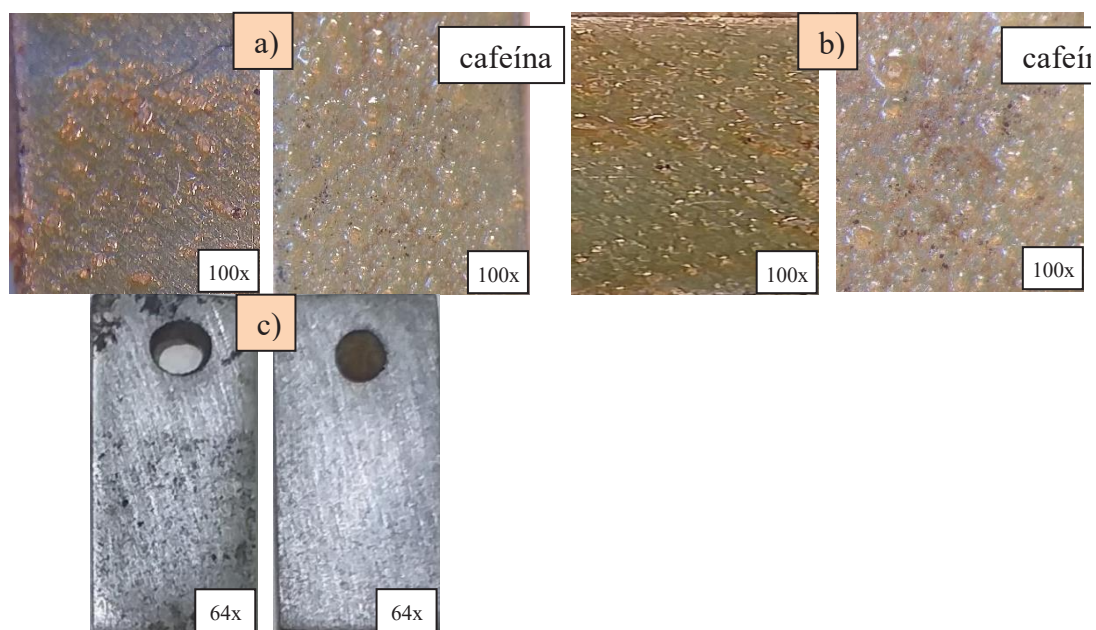
Figura 24 – Morfologia do ataque ao aço revestido pelo verniz com cafeína em água do mar



Fonte: Autoras (2020)

Na ausência da cafeína a formação de produtos de corrosão parece ter sido mais intensa, mesmo abaixo do filme. A presença de cafeína permitiu uma maior proteção abaixo do verniz, no entanto, sobre o defeito, o ataque ao metal exposto ocorreu.

Na Figura 25 são apresentadas as morfologias das amostras metálicas que receberam o revestimento à base da resina alquídica, sem e com partículas de cafeína, na sequência das etapas: a) após aplicação do revestimento; b) 24 h de exposição em água do mar, e; e) remoção mecânica do revestimento.

Figura 25 – Morfologia do aço com o revestimento de resina alquídica sem e com cafeína

Fonte: Autoras (2020)

Foi possível observar que este segundo revestimento aplicado apresentou uma coloração clara, facilitando o monitoramento do início do processo corrosivo; as partículas de cafeína, novamente permaneceram aglomeradas no revestimento; a remoção do revestimento demonstrou que o ataque corrosivo foi mais efetivo na ausência da cafeína. Com o emprego deste segundo revestimento, também foi observada a sua ação como uma barreira física, a qual impermeabilizou o metal em relação ao meio, mas ainda possibilitando a formação de pontos localizados de oxidação.



CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A corrosão do aço carbono em amostras de águas de mar, lago e arroio foi rápida e generalizada, com formação de camada de produtos de corrosão, provavelmente, hidróxidos e óxidos de ferro (em 7 dias). Esta camada evoluiu com o tempo de exposição, cobrindo toda a superfície metálica, de forma espessa e compacta.

As águas de poço artesiano e tratada (potável) promoveram ataques mais lentos sobre o aço, iniciando de forma localizada, por pite. Somente após 21 dias de exposição, o ataque progrediu abrangendo toda a superfície metálica, no entanto, a camada de produtos de corrosão formada foi fina e porosa.

A amostra de água do mar foi o meio que produziu a taxa de corrosão mais elevada, sendo classificada como alta. Em seguida, as águas de lago e poço artesiano apresentaram valores próximos de taxa de corrosão, sendo ambas classificadas como moderada. A água de arroio promoveu uma corrosão classificada como moderada e, finalmente, a água tratada foi o meio menos agressivo ao aço carbono, promovendo uma corrosão de intensidade baixa.

Os revestimentos propostos neste trabalho, contendo um material natural que possivelmente atue como inibidor da corrosão, a cafeína, seria uma opção ambientalmente mais amigável e menos nociva à saúde, comparado às partículas metálicas e íons cromatos dos produtos comercializados. A cafeína demonstrou poder inibidor da corrosão do aço carbono, mas outros testes, como eletroquímicos, deveriam ser realizados para quantificar o valor de eficiência de inibição da corrosão e também o tempo de durabilidade e integridade do filme aplicado e exposto a diferentes meios agressivos.

REFERÊNCIAS

ABDEL-GABER, A. M.; ABD-EL-NABEY, B. A.; SIDAHMED, I. M, Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media. **Corrosion Science**, v. 48, n. 9, p. 2765–2779, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X05003227>. Acesso em: 10 out. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Panorama do enquadramento dos corpos d'água**. Brasília, DF: ANA, 2005. (Cadernos de recursos hídricos). Disponível em: http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/PANORAMA_DO_ENQUADRAMENTO.pdf. Acesso em: 10 out. 2019.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **D1986-14** - *Standard Test Method for Determining the Apparent Viscosity of Polyethylene Wax*. Pensilvânia: ASTM, 1986.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **D610-08** - *Standard practice for evaluating degree of rusting on painted steel surfaces*. Pensilvânia: ASTM, 2019.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **D714-02** - *Standard test method for evaluating degree of blistering of paints*. Pensilvânia: ASTM, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **G1-90** - *Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens*. Pensilvânia: ASTM, 1999.

ANTHONY, N. *et al.* Corrosion inhibition by caffeine-Mn system. **Indian Journal of Chemical Technology**. v. 11, p. 346–350, 2004. Disponível em: <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/9516/1/IJCT%2011%283%29%20346-350.pdf>. Acesso em: 27 set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. **Corrosão** - normas publicadas. Rio de Janeiro: ABRACO, 2019. Disponível em: <https://abraco.org.br/abnt-cb43/normas-publicadas/>. Acesso em: 10 out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.216** - Projeto de estação para tratamento de água para o abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

BERNARDO, L. P.; PAZ, L. P. S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2010.

BRAGA, B. *et al.* **Introdução a engenharia ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

BRASIL, Ministério da Saúde. **Portaria n. 2.914**, de 12 de dezembro de 2011 - Portaria da potabilidade da água. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2011.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Portaria n. 1.469/2000**, de 29 de dezembro de 2000 - Aprova o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: Fundação Nacional de Saúde, 2000.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Portaria n. 190/2014**, de 16 de abril de 2014 - Controle da qualidade da água nos estados brasileiros. Brasília, DF: Fundação Nacional de Saúde, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n. 357** - Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, e condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente/CONAMA, 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação n. 5**, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Anexo XX - Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2017.

CALLISTER JÚNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 9. ed, São Paulo: LTC, 2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Principais acidentes**. 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/tipos-de-acidentes/dutos/principais-acidentes/>. Acesso em: 4 nov. 2019.

CANAL DIGITAL G1. **Projetista da ponte que desabou na Itália alertou sobre risco de corrosão em 1979**. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2018/08/19/projetista-da-ponte-que-desabou-na-italia-alertou-sobre-risco-de-corrosao-em-1979.ghtml>. Acesso em: 4 nov. 2019.

EBADI, M. *et al.* Investigation of corrosion inhibition properties of caffeine on nickel by electrochemical techniques. **J. Electrochem Science**, v. 11, n. 7, p. 8052–8063, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/235943698_Investigation_of_Corrosion_Inhibition_Properties_of_Caffeine_on_Nickel_by_Electrochemical_Techniques. Acesso em: 27 set. 2019.

ENGENHEIRO DE MATERIAIS. **As formas de corrosão**. 2017. Disponível em: <https://engenheirodemateriais.com.br/2017/04/26/as-formas-de-corrosao/>. Acesso em: 10 set. 2019.

FELIPE, M. B. *et al.* Aspectos gerais sobre corrosão e inibidores vegetais. **Revista Virtual de Química**. v. 5, n. 4, p. 746–758, Ano. 2013. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v5n4a15.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

FONTANA, M. G. **Corrosion engineering**. Singapore: McGraw Hill International Editions, 1987.

FORNAZARI, M.; GONÇALVES, R. S.; SPINELLI, A. Corrosão do cobre na presença de cafeína. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA. 29., Florianópolis, 2006. **Resumos**. Florianópolis: SBQ, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14363/000663314.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 4 nov. 2019.

FURTADO, P. **Introdução à corrosão e proteção das superfícies**. Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG, 1981.

GEMELLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GUNAVATHY, N.; MURUGAVEL, S. C. Corrosion inhibition studies of mild steel in acid medium using musa acuminate fruit peel extract. **E-Journal of Chemistry**, v. 9, n. 1, p. 487-495, 2012. Disponível em: [file:///C:/Users/lucia/Downloads/Corrosion Inhibition Studies of Mild Steel in Acid.pdf](file:///C:/Users/lucia/Downloads/Corrosion%20Inhibition%20Studies%20of%20Mild%20Steel%20in%20Acid.pdf). Acesso em: 27 set. 2019.

HALEEM, S. M. *et al.* **Corrosion science**. São Paulo: IFC Editorial, 2013.

LAQUE, F. L. **Marine corrosion**. Nova York: John Wiley & Sons, 1975.

LOSINOX. **Corrosão por pite em aço** - saiba identificar. 2019. Disponível em: <http://blog.losinox.com.br/2019/03/06/corrosao-por-pite-em-aco-inox-saiba-identificar/>. Acesso em: 10 set. 2019.

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

MACHADO, L. M. M. *et al.* Desenvolvimento de revestimentos contendo adições de cinzas da combustão da casca do arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA INICIAÇÃO CIENTÍFICA. 11., 2015, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: COBEQ IC, 2015. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/desenvolvimento-de-revestimentos-contendo-adies-de-cinzas-da-combustao-da-casca-do-arroz-20010>. Acesso em: 08 out. 2019.

METEORÓPOLE. Ciclo hidrológico. 2011. Disponível em: <https://meteoropole.com.br/2011/10/ciclo-hidrologico/>. Acesso em: 10 set. 2019.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: ABES, 2010.

NATIONAL ASSOCIATION CORROSION ENGINEERS. **SP0775 - Preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations**. Texas: NACE, 2018.

NETO, M. F; GOMES, R. S; ALENCAR, M. F; MARREIRA, R. D; NASCIMENTO, J. G. Extrato da folha do "murici" como inibidor da corrosão do aço carbono em meio ácido. **Blucher Chemistry Proceedings** v. 3, n. 1, p. 494-504, 2015. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/extrato-da-folha-do-murici-como-inibidor-da-corrosao-do-ao-carbono-em-meio-acido-22106>. Acesso em: 08 out. 2019.

NETO, D. V. L. **O processo de corrosão e a proteção catódica**. 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Marinha do Brasil Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2016.

NUNES, L. P. **Fundamentos de resistência à corrosão**. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993.

PETERS, S. R. *et al.* Corrosão de aço carbono para dutos em águas naturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA INICIAÇÃO CIENTÍFICA. 11., 2015, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: COBEQ IC, 2015. Disponível em: <http://>

pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobeqic2015/038-31909-242128.pdf. Acesso em: 10 set. 2019.

PREIMA, B. **Formas de corrosão e meios corrosivos**. In: ENESSUL – ENGENHARIA DE CORROSÃO. 10 maio 2017. Disponível em: <https://www.enessul.com.br/2017/05/10/formas-de-corrosao-e-meios-corrosivos/>. Acesso em: 27 set. 2019.

QUADROS, G. P.; RODRIGUES, L. M.; SILVA, S. N. Avaliação eletroquímica da cafeína como inibidor de corrosão do alumínio em meio ácido. In: Práticas de corrosão. Belém: RFB Editora. 2020. (E-book) Disponível em: https://d545c17b-f3d5-41c9-bf-28-a48acf4c19a8.filesusr.com/ugd/baca0d_f8ade576d84748219798be8c1e893a5d.pdf. Acesso em: 05 out. 2019.

QUARTARONE, G.; BELLOMI, T.; ZINGALES, A. Inibição pela corrosão do cobre pela isatina em 0,5 M H₂SO₄ aerado. **Corrosion Science**, v. 45, n. 4, p. 715-733, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X02001348?via%3Dihub>. Acesso em: 27 set. 2019.

RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e seu controle**. São Paulo: Hemus, 1998.

ROCHA, J. C.; GOMES, J. A. C. P. Inibidores de corrosão naturais - proposta de obtenção de produtos ecológicos de baixo custo a partir de resíduos industriais. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, suplemento, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rmat/v22s1/1517-7076-rmat-22-suppl-e11927.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2019.

SABA, P.; BROWN, W. A.; OMANOVIC, S. Interactive behavior of caffeine at a platinum electrode surface. **Materials Chemistry and Physics**, v. 100, n. 1-2, p. 285-291, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058405008898?via%3Dihub>. Acesso em: 10 out. 2019.

SANTOS, J. E. P. *et al.* Estudo da inibição de corrosão do aço carbono em ácido clorídrico na presença de mangiferina. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 1045-1053, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762016000401045&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 10 out. 2019.

SILVA, A. L. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Blucher, 2010.

SILVA, E. *et al.* Propostas à prevenção de riscos ambientais relacionados ao tratamento de superfícies com cromatos. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda, ano 3, edição especial, p. 48-58, 2008. Disponível em: <http://revistas.unifoa.edu.br/index.php/cadernos/article/view/1196>. Acesso em: 01 jul. 2020.

SOUZA, J. E. Efeito de metais pesados: chumbo, cádmio e zinco na vida de prateleira de alimentos enlatados. **VETOR**, Revista de Ciências Exatas e Engenharias, v. 3, 1993.

SPINELLI, A. *et al.* Caracterização da atuação da cafeína como inibidor de corrosão do aço-carbono ABNT 1005 em meio aquoso. In: REUNIÃO ANUAL DA SBQ. 29., 2006. **Anais [...]**. Águas de Lindóia: USP, 2006.

TORRES, V. V. *et al.* Inhibitory action of papaya seed extracts on the corrosion of carbon steel in 1 mol.L⁻¹ HCl solution. **Química Nova**, v. 39, n. 4, p. 423-430, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/qn/v39n4/0100-4042-qn-39-04-0423.pdf>.

Acesso em: 15 out. 2019.

TRINDADE, L. G.; [GONÇALVES](#), R. S. **Corrosion Science**. Rio de Janeiro: Pergamon, 2009.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. Belo Horizonte: Instituto de Engenharia Aplicada, 1992.

VIRGA, R. H. P.; GERALDO, L. P.; SANTOS, F. H. Avaliação de contaminação por metais pesados em amostras de siris azuis. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 27, n. 4, 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612007000400017. Acesso em: 01 jul. 2020.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aço 9, 13, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 29, 30, 35, 36, 37, 38, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 55, 56

Águas 4, 6, 9, 13, 22, 23, 24, 26, 27, 34, 36, 42, 43, 44, 45, 52, 55

Amostras 6, 34, 35, 45

Ataque 9, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 31, 36, 42, 44, 45, 46, 48, 49, 52

C

Cafeína 9, 13, 29, 30, 36, 37, 38, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 54, 56

Carbono 9, 13, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 29, 30, 35, 36, 37, 42, 43, 44, 45, 46, 52, 55, 56

Corrosão 3, 28, 53, 56

Corrosivo 13, 16, 22, 23, 27, 30, 31, 37, 47, 49

D

Dissolvidos 13, 22, 23, 34, 36, 42

E

Eficiência 12, 27, 28, 29, 30, 48, 52

Estruturas 4, 9, 12, 22, 24, 27, 28, 55

I

Inibidor 9, 12, 13, 29, 30, 36, 37, 45, 52, 55, 56

M

Metal 9, 12, 18, 20, 21, 22, 23, 27, 29, 30, 31, 36, 38, 44, 45, 48, 49

Metálicas 4, 6, 9, 20, 22, 24, 27, 30, 34, 35, 36, 37, 38, 47, 48, 52, 55

Morfologia 16, 17, 18, 21, 36, 38, 42, 43, 44

P

Produtos 6, 12, 17, 22, 23, 28, 30, 36, 37, 44, 47, 48, 52, 56

Proteção 4, 9, 12, 16, 27, 28, 29, 37, 45, 46, 48, 54, 55

R

Revestimento 6, 9, 12, 13, 20, 27, 35, 36, 37, 38, 45, 47, 48, 49

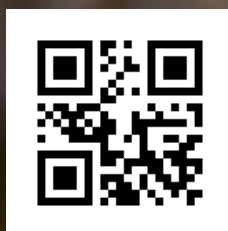
S

Superfície 13, 16, 17, 20, 21, 22, 24, 27, 28, 29, 30, 42, 44, 45, 52

**CORROSÃO DE ESTRUTURAS
METÁLICAS EM ÁGUAS
E SUA PROTEÇÃO**



CORROSÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM ÁGUAS E SUA PROTEÇÃO



Rfb
Editora