



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNA RAFAELA ARAUJO LIMA**

**O DIMENSIONAMENTO DA PROTEÇÃO CATÓDICA EM UMA EMBARCAÇÃO:  
ESTUDO DE CASO**

**RUSSAS**  
**2024**

BRUNA RAFAELA ARAUJO LIMA

O DIMENSIONAMENTO DA PROTEÇÃO CATÓDICA EM UMA EMBARCAÇÃO:  
ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof. Dra, Caroliny Gomes de Oliveira

RUSSAS

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

L696d Lima, Bruna Rafaela Araujo.  
O dimensionamento da proteção catódica em uma embarcação: estudo de caso / Bruna Rafaela Araujo  
Lima. – 2024.  
66 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,  
Curso de Ciência da Computação, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dra, Caroliny Gomes de Oliveira .

1. corrosão. 2. dimensionamento da proteção catódica. 3. anodos de sacrifício. 4. embarcação. I. Título.

CDD

---

BRUNA RAFAELA ARAUJO LIMA

O DIMENSIONAMENTO DA PROTEÇÃO CATÓDICA EM UMA EMBARCAÇÃO:  
ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 24/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Caroliny Gomes de Oliveira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Sérgio Xavier Barbosa Araújo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha família, que sempre acreditou em mim e me apoiou em todas as fases da minha vida acadêmica. Em especial, dedico à minha querida vizinha, Terezinha, que agora está no céu. Uma grande mulher, que sempre amarei e a quem serei eternamente grata.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar e dar forças ao longo deste caminho, iluminando meus passos e concedendo-me sabedoria para concluir este trabalho.

Aos meus pais, Maria Lucia e Francisco das Chagas por ter acreditado em mim e sempre me apoiado.

À minha irmã, Teresa Raquel, meu porto seguro, que esteve sempre ao meu lado, trazendo calma e conforto nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos, Marcos Paulo, Marcelo Henrique e Marcilio Bruno, minha sincera gratidão. Em especial, ao Marcelo, que sempre acreditou em mim e investiu no meu aprendizado ao longo de toda a minha jornada acadêmica.

Ao meu namorado, Matheus da Silva, por estar ao meu lado em cada etapa deste trabalho. Sua presença constante e compreensão foram essenciais para tornar o processo mais leve e agradável.

A empresa Inace Iates, pela oportunidade de me permitir realizar o estudo de caso e pelo valioso aprendizado proporcionado ao longo deste trabalho.

A professora Dra. Caroliny Gomes de Oliveira, por ter aceitado o convite para ser minha orientadora e por sua orientação valiosa e dedicada no decorrer desta pesquisa.

Aos meus amigos de turma, Laianny, Luana, Aderson, Lucas e Yuri, agradeço por estarem ao meu lado em todos os trabalhos e por se tornarem minha segunda família nos momentos em que mais precisei.

À minha amiga Elaine Fernanda, pela motivação e pelo auxílio durante a realização deste trabalho.

A todos os professores e colegas que contribuíram para a minha formação acadêmica, expresso minha imensa gratidão.

“Não importa o quão devagar você vá, desde que você não pare.”

Autor: Confúcio.

## RESUMO

A indústria naval enfrenta constantemente o desafio da corrosão em navios, barcos e iates devido à interação eletroquímica entre o metal do casco e o ambiente marinho, que é altamente corrosivo. A água do mar é rica em sais dissolvidos e atua como um excelente eletrólito, do qual facilita as formações das pilhas de corrosão. Para mitigar esse processo, são utilizados métodos de combate a corrosão. Em embarcações, na região externa do casco, são aplicados revestimentos anticorrosivo (pintura) em conjunto com a proteção catódica, onde ambos se complementam, garantindo uma proteção mais eficiente contra o processo de corrosão. Este trabalho teve como objetivo analisar o dimensionamento por anodos de sacrifício em uma embarcação em construção no estaleiro situado no estado do Ceará. A partir de estudos bibliográficos, foram identificadas as etapas do dimensionamento, que visam transformar a superfície metálica em uma região catodicamente protegida. Para isso, a estrutura metálica a ser protegida é transformada em uma pilha artificial, na qual é aplicado um fluxo de corrente elétrica. Esse fluxo é gerado pela diferença de potencial entre o metal a ser protegido e outro metal, escolhido como anodo, que possui um potencial mais negativo, conforme a ordem dos potenciais de oxidação dos metais. Com os cálculos do dimensionamento realizados pode-se determinar que a corrente total liberada pelos anodos foi de 9 A, que é superior a corrente necessária para a proteção, de 2,88 A, portanto, a superfície encontra-se catodicamente protegida. Para a distribuição do fluxo de corrente de proteção, foram dimensionados 20 anodos de zinco, distribuídos uniformemente para assegurar a proteção completa de toda a superfície submersa. Conclui-se que, mesmo nas condições agressivas do ambiente marinho, com um dimensionamento adequado e executado de maneira correta, o sistema de proteção catódica é capaz de reduzir significativamente os efeitos da corrosão nas estruturas metálicas das embarcações.

**Palavras-chave:** corrosão; dimensionamento da proteção catódica; anodos de sacrifício; embarcação.

## ABSTRACT

The shipbuilding industry constantly faces the challenge of corrosion in ships, boats and yachts due to the electrochemical interaction between the hull metal and the marine environment, which is highly corrosive. Seawater is rich in dissolved salts and acts as an excellent electrolyte, which facilitates the formation of corrosion cells. To mitigate this process, methods to combat corrosion are used. In vessels, anti-corrosive coatings (paint) are applied to the external region of the hull together with cathodic protection, where both complement each other, ensuring more efficient protection against the corrosion process. This study aimed to size the amount of sacrificial anodes in a vessel under construction at the shipyard located in the state of Ceará. Based on bibliographic studies, the sizing steps were identified, which aim to transform the metal surface into a cathodically protected region. To this end, the metal structure to be protected is transformed into an artificial cell, to which an electric current flow is applied. This flow is generated by the potential difference between the metal to be protected and another metal, chosen as the anode, which has a more negative potential, according to the order of the oxidation potentials of the metals. With the calculations performed, it can be determined that the total current released by the anodes was 9 A, which is higher than the current required for protection, 2.88 A, therefore, the surface is cathodically protected. To distribute the protective current flow, 20 zinc anodes were used, evenly distributed to ensure protection of the entire submerged surface. It can be concluded that, even in the aggressive conditions of the marine environment, with adequate and correctly executed sizing, the cathodic protection system is capable of significantly reducing the effects of corrosion on the metal structures of vessels.

**Keywords:** corrosion; sizing of cathodic protection; sacrificial anodes; vessel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Inverso da metalurgia .....	17
Figura 2 - Processo de corrosão química .....	18
Figura 3 - Esquema de pilha eletroquímica .....	19
Figura 4 - Classificação dos tipos de corrosão.....	21
Figura 5 - Corrosão uniforme.....	22
Figura 6 - Corrosão por pite.....	22
Figura 7 - Corrosão por frestas .....	23
Figura 8 - Corrosão galvânica.....	24
Figura 9 - Processo de proteção catódica por corrente galvânica .....	30
Figura 10 - Anodos de sacrifício instalados nos propulsores de uma embarcação. ....	33
Figura 11 - Sistema da proteção por corrente de impressa .....	35
Figura 12 - Etapas do dimensionamento da proteção catódica.....	38
Figura 13 - Anodos de sacrifício do tipo APCE 100.....	50
Figura 14 - Anodos de sacrificio do tipo APCE10.....	50
Figura 15 - Distribuição dos anodos de sacrifício no casco da embarcação.....	53
Figura 16 - Base dos anodos na região de proa e bombordo .....	54
Figura 17 - Fixação do anodo de sacrifício.....	54
Figura 18 - Fixação dos anodos do tipo APCE100.....	55
Figura 19 - Fixação dos anodos do tipo APCE10.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração de sais em água do mar .....	26
Tabela 2 - Série Galvânica Prática .....	31
Tabela 3 - Fator de correção da velocidade .....	41
Tabela 4 - Eficiência utilizada em projetos de proteção catódica .....	42
Tabela 5 - Principais características dos anodos galvânicos.....	44
Tabela 6 - Tipos de anodos escolhido. ....	50
Tabela 7 - Parâmetros do dimensionamento. ....	57

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Aplicações típicas dos anodos galvânicos.....	32
Quadro 2 - Aplicação dos anodos inertes.....	36
Quadro 3 - Comparação do sistema galvânico e o sistema por corrente de impressa.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área molhada protegida
B	<i>Breadth</i>
BC	<i>Block coefficient</i>
C	Capacidade de corrente do anodo
D	Draft
Dc	Densidade de corrente
E	Eficiência do revestimento
F	Fator de correção da velocidade
I	Corrente de proteção
I	Corrente liberada por anodo no eletrólito considerado
LBP	<i>Length between perpendiculars</i>
M	Massa total de anodos
N	Número de anodos
$\rho$	Resistividade elétrica do eletrólito
V	Vida dos anodos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>15</b>
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral</i> .....	<i>15</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i> .....	<i>15</i>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Conceito de Corrosão</b> .....	<b>16</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Classificação dos mecanismos de corrosão</i> .....	<i>17</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Corrosão química</i> .....	<i>17</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Corrosão eletroquímica</i> .....	<i>18</i>
<i>2.1.3.1</i>	<i>Pilha de corrosão eletroquímicas</i> .....	<i>18</i>
<b>2.2</b>	<b>Classificação dos tipos de corrosão</b> .....	<b>20</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Corrosão uniforme</i> .....	<i>21</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Corrosão por pite</i> .....	<i>22</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Corrosão por frestas</i> .....	<i>23</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Corrosão galvânica</i> .....	<i>23</i>
<b>2.3</b>	<b>Meios que influenciam o processo de corrosão</b> .....	<b>24</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Atmosfera</i> .....	<i>24</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Corrosão introduzida por micro-organismos</i> .....	<i>25</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Águas naturais</i> .....	<i>25</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Água doce</i> .....	<i>25</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Água do mar</i> .....	<i>26</i>
<b>2.4</b>	<b>Métodos para inibição da corrosão</b> .....	<b>27</b>
<i>2.4.1</i>	<i>Revestimentos</i> .....	<i>27</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Técnicas de modificação do meio corrosivo</i> .....	<i>27</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Inibidores de corrosão</i> .....	<i>27</i>
<i>2.4.4</i>	<i>Proteção anódica</i> .....	<i>28</i>
<i>2.4.5</i>	<i>Proteção catódica</i> .....	<i>28</i>
<b>2.5</b>	<b>Mecanismos da proteção catódica</b> .....	<b>28</b>

<b>2.5.1</b>	<b><i>Métodos de aplicação da Proteção catódica.....</i></b>	<b>30</b>
<b>2.5.2</b>	<b><i>Proteção catódica por anodos de sacrifício.....</i></b>	<b>30</b>
2.5.2.1	<i>Anodos de sacrifício.....</i>	31
2.5.2.2	<i>Localização dos anodos galvânicos e inertes.....</i>	32
2.5.2.3	<i>Vantagens e desvantagens da proteção catódica por anodos de sacrifício. ....</i>	33
2.5.2.3.1	<i>Vantagens por anodos de sacrifício .....</i>	33
2.5.2.3.2	<i>Desvantagens por anodo de sacrifício .....</i>	34
<b>2.5.3</b>	<b><i>Proteção catódica por corrente de impressa .....</i></b>	<b>34</b>
2.5.3.1	<i>Anodos inertes .....</i>	35
2.5.3.2	<i>Vantagens e desvantagens da proteção por corrente de impressa.....</i>	36
2.5.3.2.1	<i>Vantagens por corrente de impressa .....</i>	36
2.5.3.2.2	<i>Desvantagens por corrente de impressa .....</i>	37
<b>2.6</b>	<b><i>Manutenção do sistema de proteção catódica.....</i></b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b><i>METODOLOGIA.....</i></b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b><i>Escolha do método de proteção catódica .....</i></b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b><i>Dimensionamento do sistema.....</i></b>	<b>39</b>
<b>3.2.1</b>	<b><i>Cálculo da corrente de proteção catódica .....</i></b>	<b>40</b>
3.2.1.1	<i>Cálculo da área molhada a ser protegida.....</i>	40
3.2.1.2	<i>Densidade de corrente elétrica de proteção.....</i>	41
3.2.1.3	<i>Fator de correlação em função da velocidade .....</i>	41
3.2.1.4	<i>Eficiência do revestimento.....</i>	42
<b>3.2.2</b>	<b><i>Escolha do anodo utilizado.....</i></b>	<b>42</b>
<b>3.2.3</b>	<b><i>Cálculo da massa de anodo requerido .....</i></b>	<b>43</b>
3.2.3.1	<i>Vida dos anodos de proteção.....</i>	43
3.2.3.2	<i>Capacidade de corrente dos anodos.....</i>	44
<b>3.2.4</b>	<b><i>Cálculo do número de anodo requerido.....</i></b>	<b>44</b>
<b>3.2.5</b>	<b><i>Verificação da corrente elétrica total liberada pelos anodos.....</i></b>	<b>45</b>
<b>3.2.6</b>	<b><i>Distribuição e fixação dos anodos de sacrifício.....</i></b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b><i>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</i></b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b><i>Dimensionamento da proteção catódica .....</i></b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b><i>Método empregado da pesquisa.....</i></b>	<b>47</b>

<b>4.3</b>	<b>Dimensionamento da corrente de proteção catódica.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.1</b>	<b><i>Área molhada a ser protegida.....</i></b>	<b>47</b>
<b>4.3.2</b>	<b><i>Obtenção da densidade de corrente elétrica de proteção.....</i></b>	<b>48</b>
<b>4.3.3</b>	<b><i>Determinação do fator de correlação em função da velocidade .....</i></b>	<b>48</b>
<b>4.3.4</b>	<b><i>Análise da eficiência do revestimento .....</i></b>	<b>49</b>
<b>4.3.5</b>	<b><i>Obtenção da corrente de proteção catódica .....</i></b>	<b>49</b>
<b>4.4</b>	<b>Escolha do anodo utilizado.....</b>	<b>49</b>
<b>4.4.1</b>	<b><i>Determinação da massa total de anodo requerido .....</i></b>	<b>51</b>
<b>4.4.1.1</b>	<b><i>Análise da vida dos anodos de proteção .....</i></b>	<b>51</b>
<b>4.4.1.2</b>	<b><i>A capacidade de corrente dos anodos.....</i></b>	<b>51</b>
<b>4.4.1.3</b>	<b><i>Obtenção da massa de anodo requerido .....</i></b>	<b>51</b>
<b>4.4.2</b>	<b><i>Cálculo do número de anodo requerido.....</i></b>	<b>52</b>
<b>4.4.3</b>	<b><i>Corrente total liberada pelos anodos de sacrifício .....</i></b>	<b>52</b>
<b>4.4.4</b>	<b><i>Distribuição dos anodos de sacrifício .....</i></b>	<b>53</b>
<b>4.4.5</b>	<b><i>Montagem dos anodos de sacrifício.....</i></b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>
	<b>ANEXO 1 – DIMENSÕES DO ANODO DE ZINCO .....</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXO 2 – CORRENTE LIBERADA PELO ANODO DE ZINCO.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria naval exerce um papel primordial no desenvolvimento econômico global e nacional, sendo importante para o transporte de mercadorias, passageiros e recursos naturais. Suas aplicações são amplas, abrangendo desde a construção de embarcações comerciais, como navios de carga e petroleiros, até navios militares, barcos de pesca, e iates. Além de proporcionar empregos diretos e indiretos em estaleiros e setores correlatos, a indústria naval é vital para o comércio internacional, uma vez que a maior parte do transporte global de mercadorias é realizada por via marítima.

Os cascos de navios são predominantemente construídos em aço, material cujo componente principal é o ferro. O ferro, sendo eletroquimicamente reativo, tende a perder elétrons, transformando-se em íons livres. A corrosão, ou ferrugem, ocorre quando o ferro (Fe) reage quimicamente com o oxigênio (O<sub>2</sub>). Essa reação é facilitada pela presença de água (H<sub>2</sub>O), que atua como meio para a transferência de elétrons. A combinação de Fe, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O forma o óxido de ferro, conhecido como ferrugem. Em ambientes marinhos, onde a água é salgada, esse processo de corrosão é acelerado.

Com o avanço na indústria naval, foram desenvolvidos métodos capazes de controlar a corrosão. Entre os métodos mais amplamente utilizados em embarcações está a proteção catódica. Essa técnica foi implementada primeiramente nos países mais desenvolvidos após sua primeira aplicação na Inglaterra em 1824, por Sir Humphrey Davy. Ele a utilizou para retardar a corrosão das chapas de cobre que revestiam os cascos de madeira dos navios, fixando pequenos pedaços de materiais como ferro, estanho e zinco nessas estruturas (Gomes, 1995).

A proteção catódica é uma técnica amplamente disseminado do qual tem o propósito de para evitar a corrosão nas estruturas metálicas, como cascos de navios e dutos. Esse processo acontece ao transformar a estrutura a ser protegida no cátodo de uma célula eletroquímica, o que impede a oxidação do metal.

Portanto, o método de proteção catódica é fundamental para a preservação dos cascos de navios, pois atua diretamente na prevenção da corrosão, que é um dos principais fatores de deterioração estrutural. Essa técnica prolonga a vida útil das embarcações, reduzindo a necessidade de reparos frequentes e, conseqüentemente, os custos de manutenção.

## **1.1 Justificativa**

A corrosão dos cascos dos navios é um problema sério que compromete a integridade estrutural e a segurança das embarcações. Esse processo é agravado por diversos fatores, como a exposição contínua à água salgada, que acelera a oxidação do metal, e o ambiente marinho, composto por micro-organismos, contribuem para a degradação do material. Diante dessa problemática, a proteção catódica se destaca como uma solução essencial, pois atua de forma eficaz na prevenção da corrosão, prolongando a vida útil dos cascos e garantindo a segurança e eficiência das operações marítimas.

A correta aplicação do dimensionamento da proteção catódica é crucial para garantir a integridade estrutural e a longevidade do casco de uma embarcação. Realizar os cálculos de forma precisa assegura que todos os requisitos de proteção sejam atendidos, prevenindo a oxidação, conseqüentemente, evitando falhas que poderiam comprometer a eficiência operacional da embarcação. Ao contrário disso, o dimensionamento inadequado pode resultar na degradação da estrutura, impactando em um aumento nos custos de manutenção.

## **1.2 Objetivos**

Neste tópico, serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

### ***1.2.1 Objetivo geral***

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o método da proteção catódica e dimensionar o sistema da proteção catódica para uma embarcação em construção.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

1. Descrever o processo de corrosão presente nas estruturas metálicas de embarcações
2. Identificar as técnicas contra a corrosão.
3. Analisar o método de proteção catódica mais adequado para a embarcação em estudo.
4. Identificar o metal de sacrifício mais eficiente para a proteção catódica.
5. Confirmar se o dimensionamento da proteção catódica atende aos critérios de proteção estabelecidos pelo método.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção do referencial teórico irá explorar conceitos e práticas fundamentais que servirão de base para a compreensão aprofundada do trabalho.

### 2.1 Conceito de Corrosão

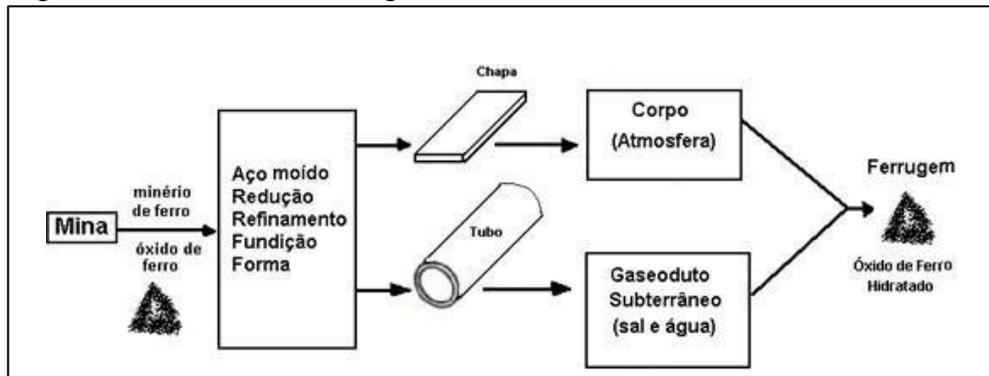
A corrosão é amplamente reconhecida como a deterioração de um material, geralmente metálico, devido à ação química ou eletroquímica do ambiente, com ou sem a presença de esforços mecânicos. Essa deterioração resulta em alterações prejudiciais indesejáveis, como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando o material inadequado para uso (Gentil, 2011).

Corrosão é um problema comum que afeta diversas áreas, incluindo as indústrias química, petrolífera, naval, construção civil, automobilística, transporte aéreo, ferroviário, marítimo, entre outros setores. Além disso, também se manifesta em produtos do cotidiano, como sistemas de telecomunicações, aparelhos de prótese odontológica, dispositivos médicos e obras de arte, como monumentos e esculturas (Gentil, 2011).

A natureza continuamente converte os metais em compostos mais estáveis, como óxidos, hidróxidos e sais, por meio de reações espontâneas que liberam energia. Por essa razão, os metais são geralmente encontrados na natureza nessa forma combinada. Em contrapartida, a siderurgia desempenha o papel de reverter esse processo natural, transformando minérios em metais mais puros ou em ligas metálicas. Assim, as reações envolvidas na siderurgia são opostas às naturais, não ocorrendo de forma espontânea, e demandam uma significativa quantidade de energia para serem realizadas (Carbó, 2001).

Como mencionado por Fontana (1967), a corrosão é o processo oposto à metalurgia extrativa, onde o metal retorna ao seu estado original, isto é, semelhante ao estado encontrado no minério do qual foi extraído, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Inverso da metalurgia.



Fonte: Fontana (1967).

A ênfase deste trabalho será na corrosão dos materiais metálicos, conhecida como corrosão metálica. Esse tipo de corrosão ocorre nos cascos das embarcações e deve ser prevenido para garantir a integridade estrutural da estrutura do barco.

### 2.1.1 Classificação dos mecanismos de corrosão

Os processos de corrosão podem ser classificados em dois grupos: corrosão química e corrosão eletroquímica. A classificação depende de como o meio corrosivo interage com o material.

### 2.1.2 Corrosão química

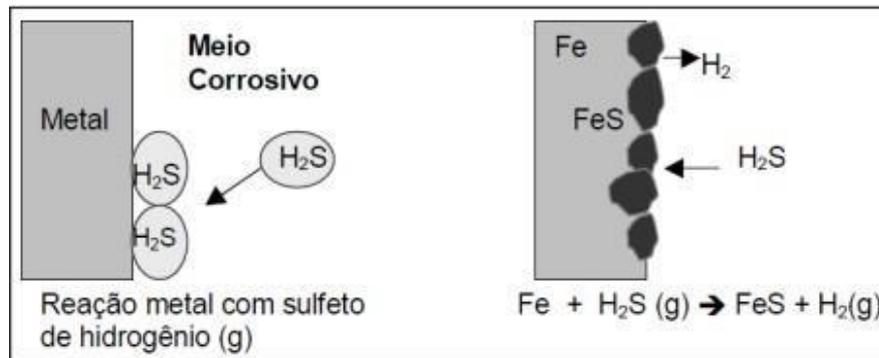
Segundo Fontana (1987), a corrosão seca, também conhecida como corrosão química, ocorre na ausência de uma fase líquida ou acima do ponto seco do ambiente. Nesses casos, gases e vapores são geralmente os agentes corrosivos. A corrosão química é frequentemente associada a altas temperaturas, como o ataque do aço pelos gases de forno.

A corrosão química ocorre quando um agente químico ataca diretamente o material. Nesse mecanismo não há um fluxo de elétrons no metal, com a reação restrita à superfície sem que seja formada uma corrente elétrica. O processo consiste na reação química entre o meio corrosivo e o material exposto a ele, resultando na formação de um produto de corrosão na superfície do material (Mainier, 2007).

A Figura 2 ilustra o processo de corrosão química. Nesse processo, a placa de ferro reage com o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), na sua forma gasosa, em um ambiente desprovido de

umidade atmosférica. Inicialmente, ocorre a adsorção do gás ( $H_2S$ ) na superfície do ferro, desencadeando a formação de uma película de sulfeto ferroso ( $FeS$ ).

Figura 2- Processo de corrosão química.



Fonte: Mainier (2007).

### 2.1.3 Corrosão eletroquímica

De acordo com Martins (2014), os processos de corrosão eletroquímica são os mais comuns na natureza e se caracterizam basicamente por: realizarem-se necessariamente na presença de água, em temperaturas abaixo do ponto de orvalho, que é a temperatura até a qual o ar deve ser resfriado, com pressão constante, para obter a saturação (em relação à água líquida), sendo manifestada principalmente em temperatura ambiente devido formação de pilhas de corrosão.

As reações que ocorrem na corrosão eletroquímica envolvem a transferência de elétrons, onde há um fluxo desses elétrons que se desloca de uma área da superfície metálica para outra, devido à diferença de potencial entre elas. Essas reações incluem tanto processos anódicos quanto catódicos, correspondentes às reações de oxidação e redução. Além disso, a corrosão eletroquímica ocorre na presença de uma solução eletrolítica, que permite o movimento dos íons (Martins, 2014). Na seção seguinte, é apresentado o funcionamento das pilhas de corrosão eletroquímica.

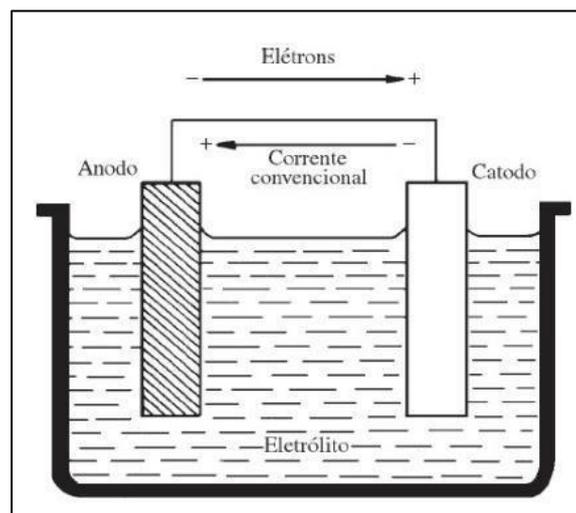
#### 2.1.3.1 Pilha de corrosão eletroquímicas

No estudo da corrosão as pilhas eletroquímicas são de grande importância nos processos corrosivos. Esse fenômeno eletroquímico pode ser dividido em quatro etapas principais (Gentil, 2011):

- Anodo: eletrodo em que há oxidação (corrosão) e onde a corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- Eletrólito: condutor (usualmente um líquido) contendo íons que transportam a corrente elétrica do anodo para o catodo;
- Cátodo: eletrodo onde a corrente elétrica sai do eletrólito ou o eletrodo no qual as cargas negativas (elétrons) provocam reações de redução;
- Circuito metálico: ligação metálica entre o anodo e o catodo por onde escoam os elétrons, no sentido anodo-catodo.

A Figura 3 ilustra a representação de uma pilha eletroquímica.

Figura 3 - Esquema de pilha eletroquímica.



Fonte: Gentil (2011).

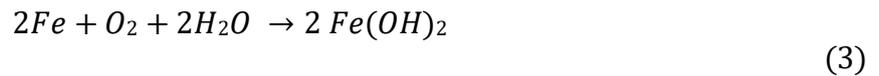
Um exemplo muito comum é a corrosão do ferro quando ele é imerso em água (doce ou salgada) e exposto à atmosfera. O ferro perde dois elétrons, se oxidando, ocasionando a reação anódica, como observado na Equação 1:



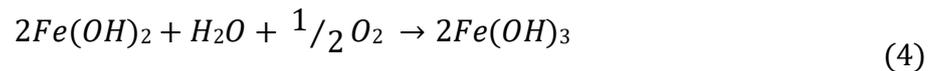
Como o meio é exposto à atmosfera, contém oxigênio dissolvido. Como a água (doce ou do mar) é quase neutra, o oxigênio ganha 4 elétrons, formando 4 íons hidróxido, resultando em uma reação catódica, como mostrado na equação 2:



Os íons metálicos,  $Fe^{2+}$ , migram em direção ao cátodo e os íons hidróxidos,  $OH^-$ , migram em direção ao anodo. Em região intermediária, esses íons encontram e formam o  $Fe(OH)_2$  através da reação:



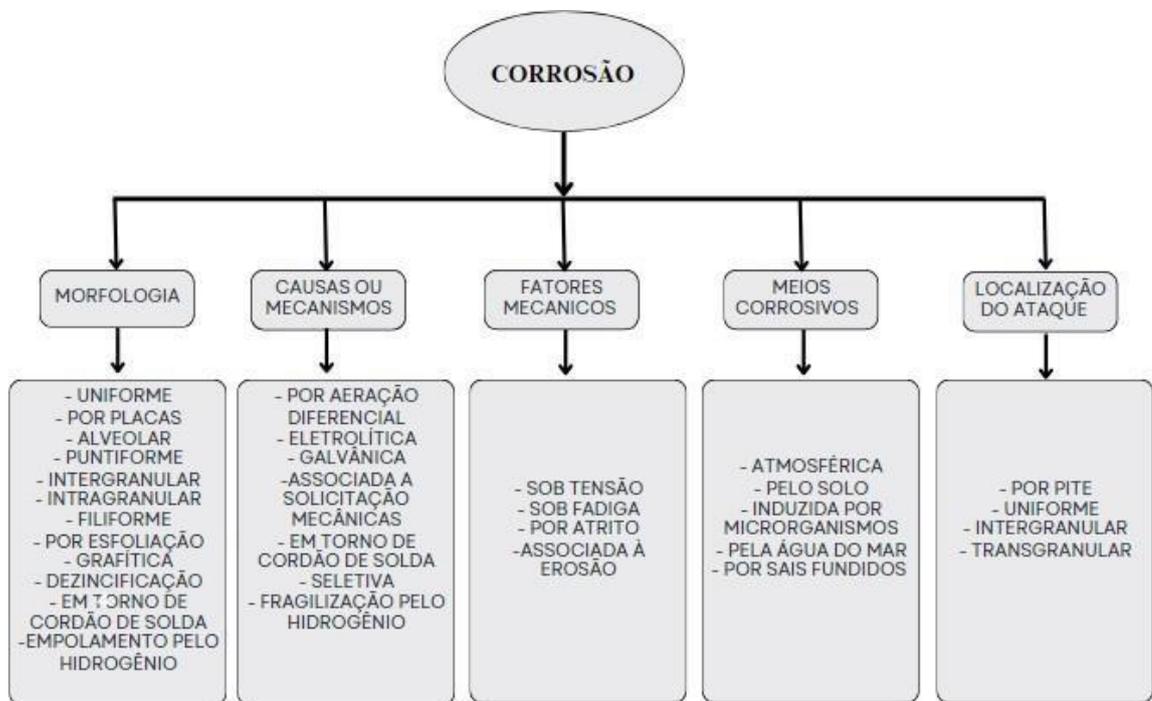
O hidróxido ferroso é precipitado da solução. Como o mesmo é instável em soluções oxigenadas, ocorrerá oxidação para hidróxido férrico. O produto final é conhecido como ferrugem, conforme destacado na Equação 4:



## 2.2 Classificação dos tipos de corrosão

As formas de corrosão podem ser classificadas com base em diferentes critérios, como a morfologia da superfície, as causas do processo corrosivo, os fatores mecânicos envolvidos, o meio corrosivo e a localização do ataque. A Figura 4 apresenta uma ilustração dessas classificações.

Figura 4 - Classificação dos tipos de corrosão



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Conforme discutido por Gentil (2021), os cascos de navios estão sujeitos a diversos tipos de corrosão, incluindo corrosão uniforme, corrosão por pite, corrosão por frestas e corrosão galvânica. A seguir, serão detalhadas as características de cada um desses tipos de corrosão.

### 2.2.1 Corrosão uniforme

Segundo Jambo e Fófano (2008), ocorre quando toda a superfície metálica exposta ao meio corrosivo sofre desgaste uniforme, resultando em uma perda de espessura praticamente igual em toda a área afetada pelo processo corrosivo. É o tipo mais comum de corrosão, especialmente em estruturas expostas à atmosfera e outros ambientes que exercem uma ação uniforme sobre a superfície metálica, como observado na Figura 5.

Figura 5 - Corrosão uniforme.



Fonte: Rijesa Metalogia (2024).

### ***2.2.2 Corrosão por pite***

A corrosão por pites é um tipo de ataque altamente localizado, onde a destruição se concentra em pequenas áreas, da ordem de milímetros quadrados ou menos. Esse processo resulta na formação de pequenos furos que penetram no metal, enquanto as demais partes da superfície continuam passivas (Galvele, 1978).

De acordo com Galvele (1983), a ocorrência de corrosão por pites está relacionada à presença de certos ânions corrosivos no meio. O mesmo metal pode apresentar diferentes potenciais de corrosão dependendo dos ânions presentes, mas em geral, íon cloreto é um dos mais agressivos pois ele causa um baixo potencial de pite e é também é o mais abundante na natureza. A Figura 6 evidencia o processo de corrosão por pite em uma estrutura metálica.

Figura 6 - Corrosão por pite.



Fonte: Sulcromo (2021).

### ***2.2.3 Corrosão por frestas***

A corrosão por frestas é um tipo de corrosão localizada que ocorre em fendas ou fissuras entre duas superfícies metálicas ou entre uma superfície metálica e uma não metálica. Esse fenômeno também pode ocorrer em dutos, entre a tubulação e seu suporte. Para evitar esse tipo de corrosão, é recomendável vedar as frestas com massa antes da pintura (Ferreira et al, 2002). A Figura 7 apresenta a evolução da corrosão por frestas em uma estrutura de tubulação metálica.

Figura 7 - Corrosão por frestas.



Fonte: Inspeção de equipamentos (2014).

### ***2.2.4 Corrosão galvânica***

De acordo com Jambo e Fófano (2008), quando dois ou mais metais estão eletricamente conectados em um eletrólito, pode ocorrer a transferência de elétrons do metal menos nobre para o metal mais nobre, formando pilhas galvânicas. Como resultado, os metais menos nobres (anódicos) são oxidados, enquanto os metais mais nobres (catódicos) são protegidos da corrosão. Um exemplo de corrosão galvânica é a combinação de cobre e ferro imersos em água. Nesse caso, o ferro se corrói rapidamente, enquanto o cobre permanece protegido, desde que ainda haja ferro presente na solução.

Figura 8 - Corrosão galvânica.



Fonte: Canal solar (2019).

## 2.3 Meios que influenciam o processo de corrosão

A corrosão ocorre em diversos meios, compreender e analisar esses ambientes é fundamental para conduzir uma investigação eficaz dos processos corrosivos, pois seu impacto é direto.

### 2.3.1 Atmosfera

Segundo o autor Araujo (1994), o meio corrosivo atmosférico comprova sua importância pelo número significativo de publicações científicas que investigam a influência desse meio em diferentes regiões do planeta. As perdas econômicas devido à corrosão atmosférica representavam a metade dos custos totais relacionados à corrosão.

Shereir (1978), relatou que a umidade relativa é um dos principais fatores desse ambiente, levando à proposta de uma classificação da corrosão atmosférica com base nesse aspecto. Dessa forma, ao analisar a umidade na superfície metálica, foi possível classificar a corrosão como seca, úmida ou molhada. Abaixo está definido cada tipo de corrosão.

- Corrosão atmosférica seca: não há qualquer sinal de umidade, o que indica a ausência do filme eletrolítico necessário para o contato imediato com a superfície metálica. Nesse caso, a corrosão é caracterizada pela lenta oxidação do metal, resultando na formação de produtos de corrosão através de reações puramente químicas.
- Corrosão atmosférica úmida: meio com umidade relativa abaixo de 100%. Forma-se um filme de eletrólito em contato com a superfície metálica. A velocidade do processo corrosivo é proporcional ao nível de umidade relativa presente.

- Corrosão atmosférica molhada: ambiente de umidade relativa bem próxima de 100%, ocorre a condensação na superfície metálica.

### ***2.3.2 Corrosão introduzida por micro-organismos***

Conforme observado por Pina et al. (2011), micro-organismos, como as bactérias, influenciam a velocidade das reações anódicas e catódicas. As *Desulfovibrio desulfuricans*, por exemplo, são bactérias anaeróbicas que se desenvolvem na ausência de ar e recolhem somente a energia necessária para manter seus processos a serem realizados pelo metabolismo.

Ainda autora Pina et al. (2011), revela que ocorre corrosão alveolar ou pontual, caracterizada por tubérculos do qual formam pites profundos e pela presença de sulfeto de ferro, que modifica a coloração para preto, evidenciando o produto de corrosão. As condições favoráveis incluem pH entre 5,5 e 8,5, ausência de oxigênio, presença de sulfato, nutrientes e matéria orgânica, além das temperaturas entre 25°C e 60°C.

### ***2.3.3 Águas naturais***

Os materiais metálicos em contato com a água estão sujeitos à corrosão, que depende de várias substâncias presentes na água. Entre os contaminantes mais comuns estão gases dissolvidos, sais dissolvidos, matéria orgânica, sólidos suspensos, bactérias, limo e algas. (Gentil, 2011). A água, presente na natureza como água doce ou salgada, possui características específicas que influenciam o tipo de corrosão.

### ***2.3.4 Água doce***

A durabilidade dos aços em contato com a água doce depende de várias características, como a qualidade mineral da água, acidez, presença de oxigênio dissolvido, velocidade do fluxo, temperatura e condições ambientais. Os gases dissolvidos são os que mais induzem a taxa de corrosão (Martins, 2014).

Além do efeito dos gases dissolvidos, pode-se verificar também o efeito do pH da água de sais que a maioria dissolvida em água tende a diminuir tanto a solubilidade do oxigênio quanto a do hidróxido de ferro. Porém, alguns sais também tendem a aumentar o pH, o que diminui tendência a corrosão ácida (Martins, 2014).

### 2.3.5 Água do mar

Segundo Gentil (2011), a água do mar, como meio corrosivo, apresenta uma complexa composição de sais, matéria orgânica viva, *silt*, gases dissolvidos e matéria orgânica em decomposição. Assim, a ação corrosiva da água do mar não pode ser atribuída apenas à presença de uma solução salina, mas sim à interação entre seus diversos constituintes. A Tabela 1 a seguir apresenta a composição presente na água do mar.

Tabela 1- Concentração de sais em água do mar.

Sal	%
NaCl	77,8
MgCl <sub>2</sub>	10,9
MgSO <sub>4</sub>	4,7
CaSO <sub>4</sub>	3,6
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,5
CaCO <sub>3</sub>	0,3
MgBr <sub>2</sub>	0,2

Fonte: Gentil (2011).

São também características marcantes, desse meio corrosivo formas de corrosão uniforme, por placas e por pite ou alvéolos. Os fatores que podem causar corrosão por pite em materiais metálicos expostos à atmosfera marinha são: sais, contaminantes ou poluentes atmosféricos, fatores metalúrgicos, como defeitos superficiais, segregações e falhas em películas protetoras (Gentil, 2011).

Considerando que a água do mar se comporta como um eletrólito forte, ocorre uma acentuada corrosão quando materiais metálicos diferentes são ligados e expostos à atmosfera marinha ou submersos em água do mar. Assim, um dos metais servirá como anodo da pilha galvânica formada entre eles, e a intensidade de ataque dependerá da posição que esses metais ocuparem na série galvânica para o ambiente marinho (Gentil, 2011).

## **2.4 Métodos para inibição da corrosão**

De acordo com Frauches-Santos et al (2014), as técnicas ou métodos de proteção anticorrosiva utilizados em materiais de amplo uso industrial envolvem a passivação ou polarização do material. Esses métodos incluem revestimentos, técnicas que modificam o meio, inibidores de corrosão, além da proteção anódica e catódica. Nas seções subsequentes será apresentado cada método de inibição contra a oxidação do metal.

### ***2.4.1 Revestimentos***

Segundo Nunes e Lobo (2007), os revestimentos são aplicados em superfícies metálicas para dificultar o contato com ambientes corrosivos. O objetivo da aplicação dos revestimentos é minimizar a degradação superficial devido à ação do meio corrosivo. O principal mecanismo de proteção dos revestimentos é através de barreiras físicas, mas também podem atuar através de inibição catódica e anódica.

Existem três tipos principais de revestimentos anticorrosivos: metálicos, não metálicos inorgânicos e não metálicos orgânicos. Conforme destacado por Vergés (2005), os revestimentos não metálicos orgânicos, comumente conhecidos como tintas, são o método de controle da corrosão mais amplamente utilizado. Aproximadamente 90% das superfícies metálicas são protegidas por tintas, devido à ampla variedade de tipos de pintura, cores disponíveis e processos de aplicação.

### ***2.4.2 Técnicas de modificação do meio corrosivo***

A corrosão pode ser evitada pela alteração do meio corrosivo, controlando o pH e a desaeração. O controle do pH busca favorecer a passivação dos metais, o que ocorre em um pH ligeiramente básico. A desaeração consiste na remoção do oxigênio do meio, pois o oxigênio atua como agente despolarizante. A remoção do oxigênio favorece a polarização catódica, resultando na diminuição da intensidade do processo corrosivo (Mainier, 2006).

### ***2.4.3 Inibidores de corrosão***

Inibidores são substâncias orgânicas ou inorgânicas que, quando adicionadas ao meio corrosivo, evitam ou reduzem o avanço das reações de corrosão. Esses inibidores geralmente

são adsorvidos, formando um filme muito fino e persistente que diminui a taxa de corrosão ao abrandar as reações anódicas, catódicas ou ambas (Şafak et al. 2012).

#### ***2.4.4 Proteção anódica***

A proteção dos materiais metálicos pode ser realizada por meio da aplicação de corrente anódica ou impedindo a difusão de oxigênio através de um processo catódico. Em 1954, Edeleanu sugeriu a utilização da proteção anódica, que consiste na formação de uma película protetora nos materiais metálicos por meio da aplicação de uma corrente anódica externa. Essa corrente provoca a polarização anódica, possibilitando a passivação do material metálico (Gentil, 2007).

Mainier (2006) afirma que a proteção anódica é utilizada com sucesso apenas para metais e ligas que formam películas protetoras, especialmente titânio, cromo, ligas de ferro-cromo e ligas de ferro-cromo-níquel.

#### ***2.4.5 Proteção catódica***

A finalidade da proteção catódica é complementar a ação protetora dos revestimentos, que sempre contêm poros e falhas, e se tornam deficientes com o tempo. A proteção catódica e o revestimento são aliados importantes que, de maneira econômica e segura, confirmam a integridade das estruturas metálicas ao longo dos anos (Gentil 2007).

Este trabalho concentra-se principalmente na proteção catódica, dedicando atenção especial a esse tópico ao longo do desenvolvimento do estudo.

### **2.5 Mecanismos da proteção catódica**

Para a compreensão mecanismo da proteção catódica, primeiro faz-se necessário entender como se processa a corrosão de um metal. De acordo com Gomes (1995), quando uma instalação metálica está enterrada ou submersa, ocorre um fluxo contínuo de corrente através do eletrólito, partindo da área anódica e dirigindo-se para a área catódica. O retorno da corrente se processa por intermédio do circuito externo. No momento que a corrente deixa o anodo ou a área anódica e entra no eletrólito, é gerada uma reação eletroquímica na sua superfície.

Essa reação envolve a interação entre íons positivos do metal nas áreas anódicas e os íons negativos presentes no eletrólito, resultando como produto de corrosão. A corrente elétrica

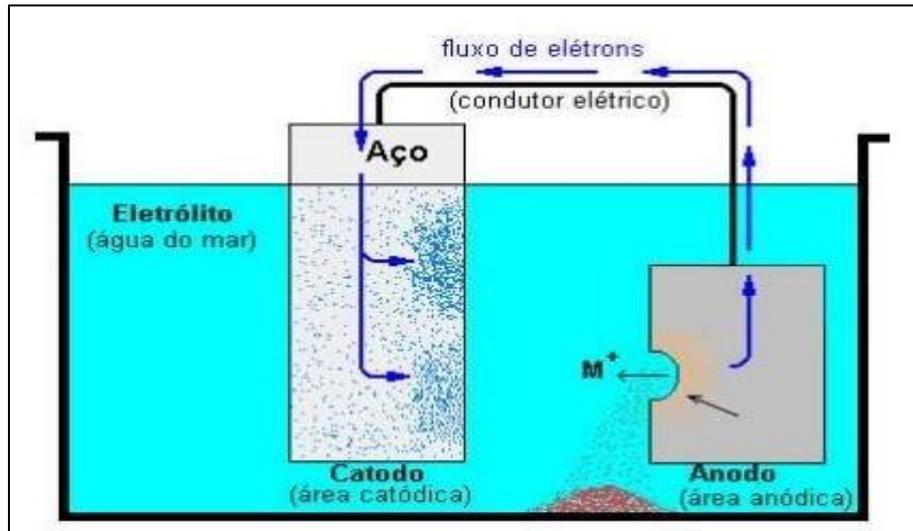
migra através do eletrólito e penetra na área catódica, onde os íons positivos da solução são liberados, geralmente na forma de hidrogênio atômico (Gomes, 1995).

Nas áreas catódicas as reações não se processam com o material metálico e, sim, com eletrólito, razão pela qual existe ausência de corrosão. A formação de hidrogênio e outros compostos na superfície do cátodo é conhecida como polarização catódica, um fenômeno que visa diminuir a atividade da célula de corrosão. No entanto, agentes despolarizantes, como o oxigênio, podem reagir com o hidrogênio, formando íons hidroxila ou água, o que mantém a atividade das células de corrosão (Gomes, 1995).

Com base nessas considerações, é possível concluir que, se conseguirmos fazer com que toda a superfície de uma instalação metálica enterrada ou submersa apresente comportamento catódico, a estrutura ficará protegida contra a corrosão. Isso pode ser alcançado fornecendo à estrutura um fluxo de corrente de proteção proveniente de uma fonte externa, com intensidade suficiente para neutralizar as correntes de corrosão das diversas pilhas existentes na superfície metálica (Gomes, 1995).

Ainda, segundo o autor Gomes (1995), quando a estrutura está completamente polarizada, a corrosão é interrompida. No entanto, na prática, a corrosão não é totalmente eliminada, mas sim transferida para um material metálico de baixo custo, utilizado como anodo. Dessa forma, a estrutura metálica valiosa, como uma tubulação, casco de navio, estaca cravada no mar, plataforma de petróleo, base de tanque de armazenamento ou armadura de aço em uma obra de concreto, permanece protegida. A Figura 9 ilustra o processo de proteção catódico por corrente galvânica.

Figura 9 - Processo de proteção catódica por corrente galvânica.



Fonte: Abraco (2014).

### 2.5.1 Métodos de aplicação da Proteção catódica

Existem dois métodos para a aplicação do sistema de proteção catódica: o método galvânico, também conhecido como anodos de sacrifício, e o método de corrente impressa. Ambos os métodos envolvem o fornecimento de uma corrente contínua, que é injetada para proteger a estrutura metálica contra a corrosão. As seções seguintes destinaram ao detalhamento dos dois métodos.

### 2.5.2 Proteção catódica por anodos de sacrifício

A proteção catódica com anodos galvânicos é baseada na dissimilaridade de potencial eletroquímico entre dois metais ou ligas metálicas. Nesse processo, o metal que atua como anodo é corroído para proteger o metal que atua como cátodo. Por esse motivo, o metal que se degrada é conhecido como anodo de sacrifício (Lazzari, 2006).

Neste método anticorrosivo, a proteção é fornecida por um fluxo de corrente elétrica, que se origina na diferença de potencial entre o metal a ser protegido e o anodo escolhido, que possui um potencial mais negativo de acordo com a ordem de potenciais de oxidação dos metais. A Tabela 2 apresenta a série galvânica dos metais (Gentil, 2011).

Tabela 2- Série Galvânica Prática.

Material	Volt
Magnésio comercialmente puro	- 1,75
Liga de magnésio (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	- 1,60
Zinco	- 1,10
Liga de alumínio (5% Zn)	- 1,05
Alumínio comercialmente puro	- 0,80
Aço (limpo)	- 0,50 a - 0,80
Aço enferrujado	- 0,20 a - 0,80
Ferro fundido (não grafitizado)	- 0,50
Chumbo	- 0,50
Aço em concreto	- 0,20
Cobre, bronze, latão	- 0,20
Ferro fundido com alto teor de silício	- 0,20
Aço com carepa de laminação	- 0,20
Carbono, grafite, coque	+ 0,30

Fonte: Gentil (2011).

De acordo com Alves (2018), para que se tenha uma proteção catódica eficaz, é necessário que o potencial da superfície de aço seja polarizado (alterado) mais negativamente até que a superfície apresente um potencial uniforme. Destaca-se que nesta fase, a força motriz para a reação de corrosão na superfície protegida é removida. O anodo galvânico, no entanto, continua a ser corroído, tendo o seu material consumido até que necessite ser substituído.

#### 2.5.2.1 Anodos de sacrifício

Os anodos de sacrifício são geralmente utilizados em eletrólitos de baixa resistividade elétrica (até 3000 ohm.cm), pois as diferenças de potencial são relativamente pequenas. Dessa forma, são necessários circuitos de baixa resistência elétrica para permitir a liberação da corrente de proteção catódica. (Maia, 2014). A proteção catódica galvânica é mais recomendada, tanto técnica quanto economicamente, para estruturas metálicas que necessitam de pequenas quantidades de corrente, geralmente até 5 A (Gentil, 2011).

Os metais mais comuns como anodos de sacrifício nos sistemas de proteção galvânica são o zinco, magnésio e alumínio, devido às baixas características de polarização anódica ou potencial mais negativo.

A utilização dos anodos depende das características da estrutura a ser protegida e do tipo de eletrólito em contato com o material metálico, como observado no Quadro 1.

Quadro 1 - Aplicações típicas dos anodos galvânicos.

<b>Anodos</b>	<b>Aplicação</b>
Alumínio	Estruturas metálicas imersas em água do mar.
Magnésio	Estruturas metálicas imersas em água doce, de baixa resistividade, ou enterradas em solos com resistividade elétrica até 3.000 $\Omega$ . cm
zinco	Estruturas metálicas imersas em água do mar ou enterradas em solos com resistividade elétrica até 1000 $\Omega$ .cm

Fonte: Gentil (2011).

#### 2.5.2.2 *Localização dos anodos galvânicos e inertes*

Os anodos são distribuídos de forma uniforme que atenda toda a área que entra em contato com o meio corrosivo. Nas embarcações são fixados a baixo da linha de água. Nas regiões do leme e propulsor necessitam de uma maior quantidade de anodos, pois é uma região que particularmente são vulneráveis à corrosão, visto que:

- Alta Exposição ao Fluxo de Água: o propulsor e o leme estão constantemente em contato com água em movimento, o que pode acelerar o processo de corrosão devido ao aumento da oxigenação e à erosão que remove as camadas protetoras naturais, como óxidos.
- Diferença de Potencial: essas partes geralmente são feitas de materiais diferentes do restante do casco, como ligas metálicas específicas para alta resistência mecânica e durabilidade. a diferença de potencial eletroquímico entre esses materiais e o casco cria um ambiente propício à corrosão galvânica.
- Movimento e Vibração: o movimento constante do propulsor e a vibração no leme aumentam o desgaste mecânico, o que pode expor o metal a condições que facilitam a corrosão.

- Acesso Dificultado para Inspeção e Manutenção: Devido à sua localização e função, o propulsor e o leme são mais difíceis de inspecionar e manter, o que torna a proteção catódica com anodos de sacrifício ainda mais crucial para garantir a integridade dessas áreas críticas.

A Figura 10 ilustra anodos de sacrifício instalados em uma embarcação na região do leme e propulsor.

Figura 10 - Anodos de sacrifício instalados nos propulsores de uma embarcação.



Fonte: Náutica (2022).

### 2.5.2.3 Vantagens e desvantagens da proteção catódica por anodos de sacrifício.

Segundo Nunes, Caetano e Araujo (2012), as vantagens e desvantagens do método de proteção catódica por anodos de sacrifício são as seguintes.

#### 2.5.2.3.1 Vantagens por anodos de sacrifício

As vantagens da proteção por anodos de sacrifício são apresentadas a seguir:

- Não requer suprimento de corrente alternada no local.
- Ter custos de manutenção muito baixos, após o sistema instalado;
- Não oferecerem riscos de interferência com outras instalações metálicas enterradas;

- Não oferecerem riscos de superproteção;
- Ter, em geral, custos de instalação mais baixos.

#### 2.5.2.3.2 Desvantagens por anodo de sacrifício

As desvantagens da proteção por anodos de sacrifício são apresentadas a seguir:

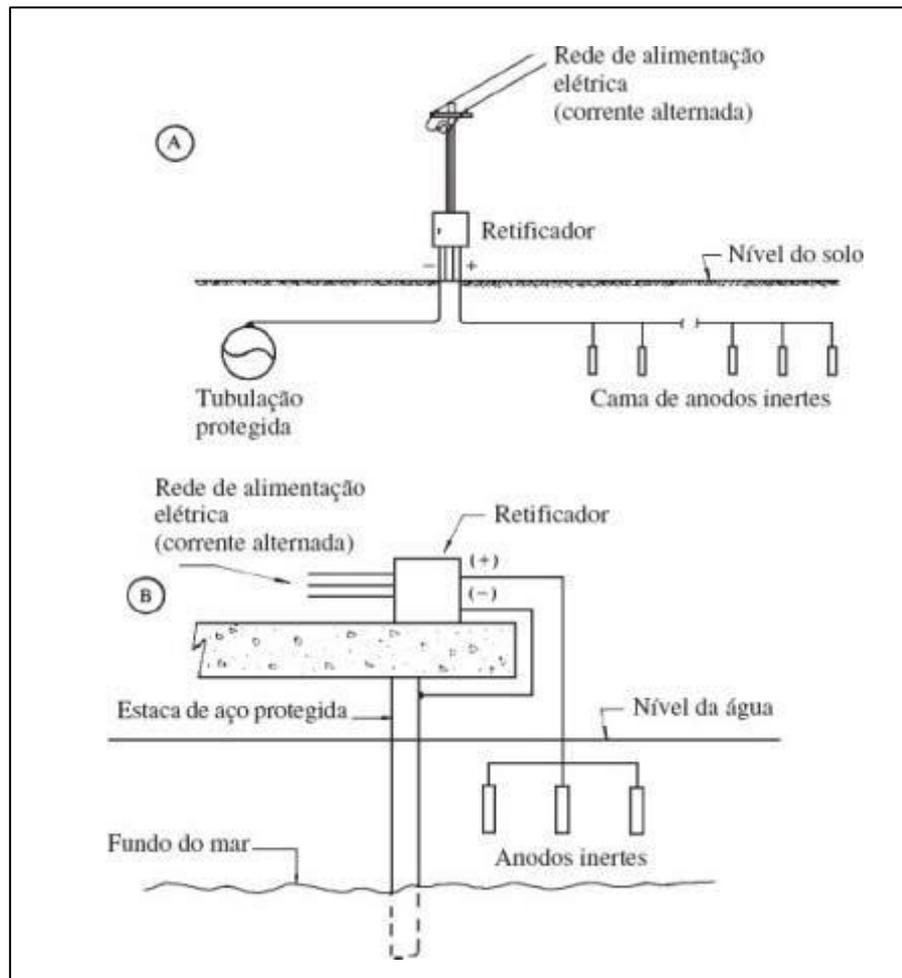
- Ter a quantidade de corrente fornecida à estrutura limitada pela diferença de potencial, entre os anodos e a estrutura;
- Ter a proteção dificultada se as resistividades elétricas do meio no local não forem suficientemente baixas;
- Ter a proteção dificultada se o revestimento protetor não for muito bom, ou se a estrutura, tiver uma grande superfície a proteger.

#### 2.5.3 *Proteção catódica por corrente de impressa*

Outra maneira de aplicar proteção catódica em uma instalação metálica enterrada ou submersa é utilizando uma fonte externa de força eletromotriz. Este método é conhecido como proteção catódica por corrente impressa. As fontes externas de força eletromotriz amplamente utilizadas na prática são os retificadores. Esses equipamentos são alimentados por intermédio de um circuito de corrente alternada, fornecem a quantidade de corrente contínua necessária para a exclusão das pilhas de corrosão na superfície metálica que se deseja proteger (Gomes, 1995).

A Figura 11 ilustra duas aplicações do processo de proteção catódica por corrente impressa. Na letra (A), é mostrada a proteção catódica por corrente impressa para uma tubulação enterrada. Já na letra (B), é apresentada a proteção catódica de uma estaca de pír para atração de navios. Conforme ilustrado, o polo positivo é conectado aos anodos, enquanto o polo negativo é conectado à estrutura a ser protegida.

Figura 11 - Sistema da proteção por corrente de impressa.



Fonte: Gentil (2011).

### 2.5.3.1 Anodos inertes

No sistema por corrente impressa, uma pilha eletrolítica é criada, na qual a estrutura a ser protegida atua como cátodo e a cama de anodos libera corrente para o solo. Os anodos utilizados são geralmente produzidos de grafite ou de ligas metálicas, como ferro e silício, chumbo, antimônio, prata, sendo que as hastes de titânio ou nióbio com revestimento fino de platina ou óxidos especiais. Recentemente, foram desenvolvidos anodos não metálicos à base de polímeros especiais (Gomes, 1995).

Para a dispersão da corrente elétrica no eletrólito são utilizados anodos especiais, pois eles possuem características e aplicações que variam de acordo com o eletrólito em que são empregados. O Quadro 2 apresenta as aplicações dos anodos inertes (Gentil, 2011).

Quadro 2 - Aplicação dos anodos inertes.

<b>Anodos</b>	<b>Aplicações</b>
Grafite	Solos, água do mar não profunda e água doce
Ferro-silício-cromo (14,5% Si, 4,5% Cr)	Solos ou água com teor de cloreto inferior a 60 ppm
Chumbo-antimônio-prata (93% Pb, 6% Sb, 1% Ag)	Solos, água do mar, fundo do mar ou água doce
Titânio, nióbio ou tântalo platinizados	Água do mar, suspensos, sem trocar o fundo do mar
(Ti-Pt, Nb-Pt ou Ta-Pt)	Solos, água doce, água do mar e concreto (na proteção das armaduras de aço)
Titânio revestido com óxidos mistos de metais nobres como cério	Solos, água doce, água do mar e outros eletrólitos
Magnetita	Solos, água doce e água do mar
Ferrita	Solos, água doce e água do mar
Anodo polimérico anodefex	Solos (tubulações nuas ou com revestimento deficiente)

Fonte: Gentil (2011).

### 2.5.3.2 Vantagens e desvantagens da proteção por corrente de impressa

Segundo Nunes, Caetano e Araujo (2012) as vantagens e desvantagens do método de proteção catódica por corrente de impressa são as seguintes.

#### 2.5.3.2.1 Vantagens por corrente de impressa

As vantagens da proteção por corrente de impressa são apresentadas a seguir:

- Fornecer maiores quantidades de corrente às estruturas de acordo com a necessidade de proteção, independente do tamanho da estrutura e da qualidade dos revestimentos protetores;

- Permitir um maior controle das quantidades de corrente fornecidas;
- Ser aplicável em qualquer meio, mesmo naqueles cujo eletrólito seja de elevada resistividade elétrica;
- Ser aplicável, com eficácia, para a proteção de estruturas nuas ou com revestimentos protetores pouco eficientes.

#### 2.5.3.2.2 Desvantagens por corrente de impressa

As desvantagens da proteção por corrente de impressa são listadas a seguir:

- Exigir manutenção periódica, ainda que de fácil realização;
- Exigir um dispêndio de energia elétrica, embora de pequeno valor;
- Oferecer riscos de interferência com outras estruturas metálicas enterradas nas proximidades.

## 2.6 Manutenção do sistema de proteção catódica

Segundo Gomes (1995), para que os sistemas de proteção catódica sejam eficazes, é necessário realizar inspeções regulares e efetuar reparos sempre que necessário. Isso garante que as tubulações ou estruturas permaneçam continuamente energizadas, com potenciais suficientemente negativos em relação ao solo ou à água, dentro dos limites adequados de proteção catódica.

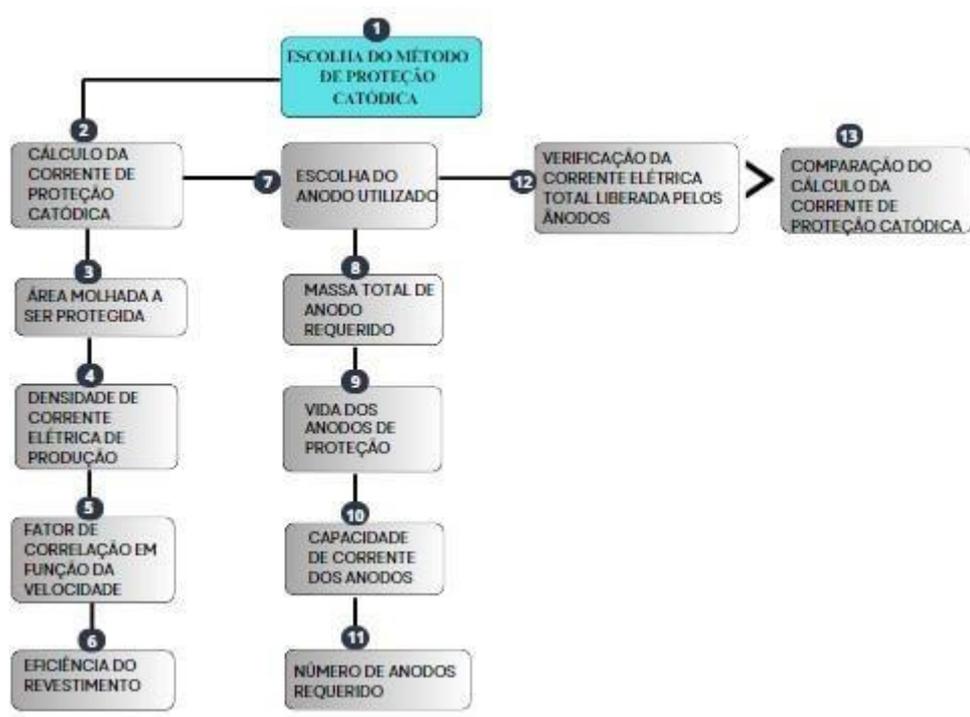
Além disso, o autor destaca que as inspeções periódicas e os trabalhos de manutenção devem ser realizados com rigor por técnicos devidamente treinados. Isso é essencial para garantir que os sistemas de proteção continuem operando com eficiência ao longo dos anos.

### 3 METODOLOGIA

O processo de corrosão nos cascos de navios é um fenômeno que ocorre de maneira espontânea e inevitável devido à exposição contínua ao ambiente marinho. Dada a gravidade desse processo, é fundamental identificar e implementar métodos eficazes para combatê-lo. Conforme discutido no capítulo anterior, existem diversas técnicas disponíveis para a prevenção da corrosão. A seleção do método mais adequado depende de fatores como o custo envolvido, as características específicas das estruturas a serem protegidas e as condições do ambiente corrosivo.

Neste capítulo, serão apresentadas as etapas do dimensionamento da proteção catódica, com ênfase do método por anodos de sacrifício. O desenvolvimento dos cálculos foi fundamentado em bibliografias específicas a respeito do assunto. A Figura 12 ilustra as etapas principais do dimensionamento.

Figura 12- Etapas do dimensionamento da proteção catódica.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

### 3.1 Escolha do método de proteção catódica

Segundo Gomes (1995), a escolha do método de proteção catódica depende essencialmente de uma análise técnica e econômica. Nesse conceito, devem ser avaliadas as vantagens e desvantagens de cada sistema, além do custo e da viabilidade técnica de se empregar o sistema galvânico ou o sistema por corrente impressa. O Quadro 3 apresenta uma comparação entre os dois métodos utilizados na proteção catódica.

Quadro 3 - Comparação do sistema galvânico e o sistema por corrente de impressa.

<b>Sistema galvânico</b>	<b>Sistema por corrente impressa</b>
Não necessita fonte externa de corrente elétrica.	Requer fonte externa da corrente elétrica
Em geral, econômico para requisitos de corrente elétrica de até 5 A.	Em geral, econômico para requisitos de corrente elétrica acima de 5 A
Manutenção mais simples.	Manutenção menos simples.
Possui vida limitada.	Pode ser projetado para vida bastante longa.
Necessita de acompanhamento operacional	Necessita de acompanhamento operacional.
Somente eletrólito de muita baixa resistividade elétrica, em geral de até 3.000 $\Omega$ .cm.	Pode ser usado em eletrólitos com qualquer valor de resistividade elétrica, inclusive os de muito baixa resistividade.
Não apresenta problemas de interferências com estruturas estranhas.	Pode apresentar problemas de interferência com estruturas estranhas.

Fonte: Gentil (2011).

### 3.2 Dimensionamento do sistema

O cálculo de um sistema de proteção catódica é relativamente simples, desde que se consultem as fórmulas presentes na literatura especializada e se assumem valores corretos para alguns parâmetros importantes, como a resistividade elétrica do eletrólito, a densidade de corrente elétrica e a eficiência do revestimento aplicado (Gentil, 2011).

A concepção do sistema, no entanto, é uma tarefa complexa que exige do projetista um domínio aprofundado do assunto e experiência prática com instalações semelhantes. Isso se deve à necessidade de tomar decisões como a escolha do método de proteção mais adequado, a

seleção do tipo e posicionamento dos anodos, além de definir os detalhes de sua instalação e a quantidade necessária (Gentil, 2011).

### 3.2.1 Cálculo da corrente de proteção catódica

A corrente necessária à proteção de determinada estrutura independe do tipo de sistema que se utiliza, seja galvânico ou por corrente impressa. Essa corrente pode ser calculada pela seguinte fórmula (Gomes, 1995).

$$I = A * Dc * F * (1 - E) \quad (1)$$

Onde:

I: corrente de proteção, em A;

A: área da estrutura a ser protegida é determinada com base na sua forma geométrica, considerando apenas a superfície em contato com o eletrólito, em m<sup>2</sup>;

Dc: densidade de corrente, é a corrente necessária por unidade de área, em mA/m<sup>2</sup>

F: fator de correção da velocidade;

E: eficiência do revestimento.

#### 3.2.1.1 Cálculo da área molhada a ser protegida

De acordo com Craig (2000), é necessário estimar a área da superfície molhada do casco. Essa estimativa pode ser calculada usando a equação 2.

$$A = (1,8 LPP * D) + (LPP * BC * B) \quad (2)$$

Onde:

LBP: *Length between perpendiculars*, em m.

D: *Draft*, em m;

BC: *Block coefficient*;

B: *Breadth*, em m.

### 3.2.1.2 Densidade de corrente elétrica de proteção

A densidade de corrente utilizada é obtida em função da resistividade do eletrólito e considera-se à estrutura sem revestimento, sendo expressa em mA/m<sup>2</sup>. De acordo com Gomes (1995), cálculo da densidade de corrente pode ser realizado pela seguinte fórmula:

$$Dc = 73,73 - 13,35 * \log \rho \quad (3)$$

Onde:

$\rho$ : resistividade elétrica do eletrólito, em  $\Omega$ .cm.

### 3.2.1.3 Fator de correlação em função da velocidade

O fator de correlação em função da velocidade é utilizado quando há movimentação do eletrólito em relação à estrutura. No caso das embarcações, o eletrólito em questão é a água do mar, o que torna essencial a consideração desse fator nos cálculos. A Tabela 3 apresenta os valores do fator de correlação em função da velocidade.

Tabela 3 - Fator de correção da velocidade

<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>F</b>
1	1,00
2	1,11
3	1,17
4	1,22
5	1,24
6	1,25
7 e maior	1,27

Fonte: Gentil (2011).

### 3.2.1.4 Eficiência do revestimento

Uma estrutura revestida apresenta uma quantidade de corrente significativamente menor do que uma estrutura nua. É importante estimar corretamente a eficiência do revestimento no projeto de proteção catódica. A Tabela 4 ilustra a eficiência de projetos de proteção catódica.

Tabela 4- Eficiência utilizada em projetos de proteção catódica

Estrutura	Qualidade revestimento	Eficiência	
		Inicial (%)	Final (%)
Tubulações enterradas	Excelente	95	90
	Bom	90	80
	Regular	80	50
	Ruim	50	0
Fundos de tanques (parte externa)	Bom	80	60
	Regular	60	40
	Ruim	40	0
Fundos de tanques (parte interna)	Excelente	95	90
	Bom	90	80
	Regular	80	50
	Ruim	50	0
Embarcações	Excelente	95	90
	Bom	90	80
	Regular	80	50
	Ruim	50	0

Fonte: Gomes 1995.

### 3.2.2 Escolha do anodo utilizado

Conforme Gomes (1995), a escolha do metal protetor a ser utilizado dependerá de fatores como onde será colocado, a eficiência do anodo de sacrifício e o custo dele. As ligas de magnésio, devido ao seu elevado potencial em circuito aberto, não são usadas para a proteção dos cascos de navios que naveguem em água do mar. Eventualmente, para embarcações que só

naveguem em água doce, o magnésio pode ser considerado como uma alternativa de proteção catódica galvânica.

Quando se trata do alumínio, o íon cloreto tem a capacidade de destruir sua camada protetora de óxido de alumínio, com isso usa-se ligas de alumínio para que ocorra menor desgaste e, por conseguinte, maior rendimento que o magnésio. É necessário que seja evitada a formação natural do óxido protetor de alumínio sobre o metal de sacrifício pois pode sofrer processo corrosivo muito heterogêneo (Lenor 2017).

O zinco, mesmo sendo o metal com menor potencial de oxidação entre os três já citados, ele é o que apresenta o maior rendimento como metal a ser sacrificado, o tornando bastante atrativo para o uso (Lenor 2017).

### 3.2.3 Cálculo da massa de anodo requerido

O cálculo para determinar a massa necessária de anodos para uma determinada vida útil pode ser realizada através da seguinte expressão (Gomes, 1995).

$$M = \frac{8760 * V * I}{0,85 * C} \quad (4)$$

Onde:

M: massa total de anodo, em kg;

8760: número de horas em um ano;

V: vida dos anodos, em anos;

I: corrente liberada pelos anodos, em A;

C: capacidade de corrente do anodo em Ah/kg;

0,85: fator de utilização do anodo (85%).

#### 3.2.3.1 Vida dos anodos de proteção

Para calcular a vida útil dos anodos galvânicos, utiliza-se a equação 4, isolando a variável correspondente ao tempo de duração dos anodos (Gomes, 1995).

$$V = \frac{MC * 0,85}{8760 * I} \quad (5)$$

Onde:

V: vida dos anodos, em anos;

M: massa total de anodos, em kg;

C: capacidade de corrente do anodo em Ah/kg

0,85: fator de utilização do anodo (85%);

8760: número de horas em um ano;

I: corrente liberada pelos anodos, em A.

### 3.2.3.2 Capacidade de corrente dos anodos

As características principais dos anodos galvânicos são a capacidade de corrente ( $A \cdot h/kg$ ), o potencial em circuito aberto, medido em relação ao eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub> (volts) e o peso específico ( $g/cm^3$ ). A Tabela 5 apresenta as principais características dos anodos galvânicos mais utilizados pelo método.

Tabela 5 - Principais características dos anodos galvânicos

Anodo	Capacidade de corrente C(A*h/kg)	Potencial em circuito aberto (Cu CuSO <sub>4</sub> )	Eficiência (%)
Zinco	740	- 1,10 V	90 – 95
Alumínio	2.200 - 2.844	-1,10 V	75 – 95
Magnésio	1.100	-1,60 V	50 - 60

Fonte: (Gomes, 1995).

### 3.2.4 Cálculo do número de anodo requerido

Pela consulta dos catálogos de fabricantes identifica-se os formatos e as massas unitárias dos anodos disponíveis no mercado. Ao dividir a massa total necessária pela massa unitária do anodo selecionado, determina-se o número de anodos a ser utilizado. (Gomes, 1995).

$$n^{\circ} \text{ de ânodos} = \frac{\text{Peso total requerido}}{\text{Peso líquido individual}} \quad (6)$$

### 3.2.5 Verificação da corrente elétrica total liberada pelos anodos

Para as instalações submersas, deve-se consultar o catálogo do fabricante para verificar a corrente liberada por cada tipo de anodo. Multiplicando esse valor pelo número total de anodos, obtém-se a corrente total liberada, que deve ser igual ou superior à corrente total necessária. (Gomes, 1995).

$$I = N * i \quad (7)$$

Onde:

N: número de anodos

i: corrente liberada por anodo no eletrólito considerado, em A.

A corrente liberada pelo anodo é determinada exclusivamente por sua geometria. Normalmente, os fabricantes de anodos galvânicos especificam esse valor em seus catálogos.

### 3.2.6 Distribuição e fixação dos anodos de sacrifício

A distribuição e o método de fixação dos anodos galvânicos ao longo da estrutura a proteger são decisões importantes, uma vez que deles dependerão a boa distribuição de corrente, facilidade ou dificuldade de instalação e o maior ou menor custo do sistema. Não há regras estritas para essas escolhas. Segundo Gentil (2011), o bom senso e a experiência do projetista são essenciais para alcançar resultados satisfatórios. Como orientação geral, os anodos podem ser fixados do seguinte modo:

- Com solda exotérmica, para os anodos fornecidos com cabo elétrico. Nesses casos, o cabo elétrico utilizado possui isolamento duplo, com uma camada isolante de polietileno e capa protetora externa de composto de cloreto de polivinila. A ligação do cabo elétrico do anodo, construída pelo fabricante do anodo, é normalmente selada com epóxi;

- Com solda elétrica, para os anodos fabricados com alma de aço, como, por exemplo, na proteção catódica galvânica de navios e plataformas de petróleo;
- Com o auxílio de parafusos, em locais de difícil substituição dos anodos;
- Com o auxílio de rosca no próprio anodo, como nos motores marítimos e alguns equipamentos industriais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos no dimensionamento da proteção catódica de uma embarcação por meio do método de anodos galvânicos. Além disso, a pesquisa detalha o processo de implementação da proteção catódica, com registros fotográficos do método.

### 4.1 Dimensionamento da proteção catódica

O estudo de caso foi realizado em um estaleiro localizado no estado do Ceará, uma empresa com mais de 50 anos de experiência no mercado. O dimensionamento da proteção catódica foi aplicado a uma embarcação em construção. Portanto a elaboração dos cálculos, foi baseada nas pesquisas bibliográficas mencionadas no capítulo anterior e em dados extraídos de documentos da empresa.

### 4.2 Método empregado da pesquisa

Adotou-se o método de proteção catódica utilizando anodos de sacrifício. A escolha desse método se justifica pelas dimensões relativamente pequenas do iate, um barco de recreio com 32,30 metros de comprimento, tornando essa solução tecnicamente viável e eficiente. Além disso, o custo financeiro, é economicamente mais viável e atente os requisitos de proteção.

### 4.3 Dimensionamento da corrente de proteção catódica

De acordo com a equação 1, a corrente de proteção catódica é calculada.

$$I = A * Dc * F * (1 - E)$$

Para obter a solução dessa equação, é preciso calcular outros parâmetros que serão determinados nas próximas seções.

#### 4.3.1 Área molhada a ser protegida

De acordo com a equação 2, a corrente de proteção catódica é calculada

$$A = (1,8 LPP * D) + (LPP * BC * B)$$

Os valores foram retirados da documentação técnica fornecida pela empresa, desenvolvida com base na arquitetura naval elaborada pelo setor de engenharia.

Onde:

$$LBP = 27,96 \text{ m}$$

$$D = 2,15 \text{ m}$$

$$BC = 0,48$$

$$B = 7,15 \text{ m}$$

Substituindo os valores mencionados, na equação 2 temos:

$$A = (1,8 * 27,96 * 2,15) + (27,96 * 0,48 * 7,15)$$

$$A = 204,164 \text{ m}^2, \text{ aproximadamente } 210 \text{ m}^2$$

#### ***4.3.2 Obtenção da densidade de corrente elétrica de proteção***

Em água do mar, o valor da resistividade elétrica é aproximadamente 25  $\Omega$ .cm (Gomes, 1995).

$$DC = 73,73 - 13,35 * \log 25$$

$$DC = 55 \text{ mA/m}^2$$

#### ***4.3.3 Determinação do fator de correlação em função da velocidade***

De acordo com a especificação técnica da embarcação, o iate tem uma velocidade máxima de 12,5 nós. Convertendo essa velocidade de nós para metros por segundo (m/s) e observando a Tabela 3, encontramos o fator de correlação em função da velocidade.

$$V = 12,5 \text{ nós}$$

$$V = 6,43 \text{ m/s}$$

$$F = 1,25$$

#### **4.3.4 Análise da eficiência do revestimento**

Com base na Tabela 4 e na experiência adquirida com o dimensionamento da proteção catódica em embarcações já construídas no estaleiro, adotou-se boa qualidade para o revestimento, ou seja, uma eficiência final de 80%.

$$E = 80\%$$

#### **4.3.5 Obtenção da corrente de proteção catódica**

Retornando à Equação (1) e substituindo os valores encontrados nos itens anteriores, obtemos a corrente de proteção catódica.

$$I = A * Dc * F * (1 - E)$$

$$I = 210 * 55 * 1,25 * (1 - 0,8)$$

$$I = 2887,5 \text{ mA} \rightarrow 2,88 \text{ A}$$

#### **4.4 Escolha do anodo utilizado**

A escolha do anodo foi fundamentada em uma análise detalhada dos dados técnicos fornecidos pelos catálogos dos fabricantes, levando em consideração a vida útil, massa, dimensões e a corrente liberada pelo material. Dessa forma, o anodo selecionado para a proteção catódica foi o de zinco, devido à sua alta eficiência em ambientes de água salgada (eletrólito).

Os anodos atendem aos requisitos estabelecidos pela norma PETROBRAS N-1732, Rev. B, de maio de 2001, que define as condições exigíveis para a encomenda, fabricação e fornecimento de anodos de liga de zinco.

O anodo selecionado foi o tipo APCE 100. Além disso, anodos de dimensões menores do tipo APCE10 foram selecionados para atender as regiões que precisam maior proteção. A Tabela 6 apresenta as especificações dos anodos fornecidos pela fabricante Sacor Siderotécnica S.A. O Anexo 1 apresentam as informações mais detalhadas dos anodos de zinco.

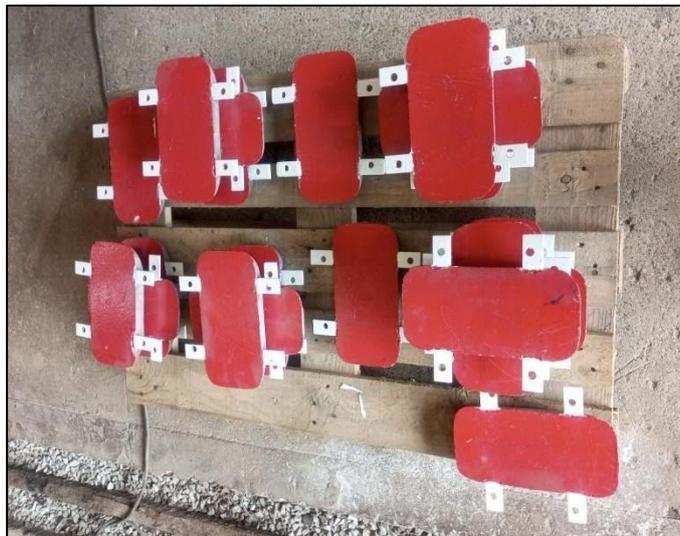
Tabela 6 - Tipos de anodos escolhido.

<b>Tipo APCE 100</b>	<b>APCE 10</b>
Peso Bruto/Líquido: 10,0 kg/9,6 kg	Peso Bruto/Líquido: 1,0/0,9 kg
Dimensões: 300 x 150 x 40 mm	Dimensões: 100 x 75 x 25 mm

Fonte: Sacor Siderotécnica S.A.

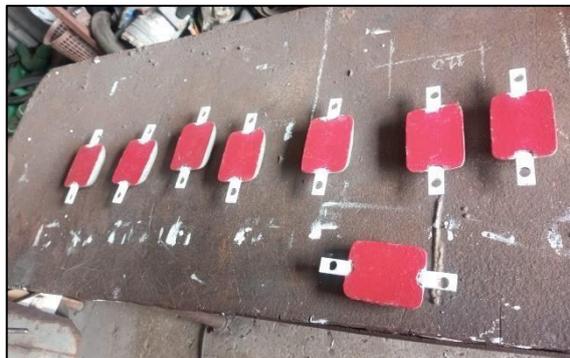
As Figuras 13 e 14 evidenciam os anodos de sacrifício antes de serem instalados no iate. Observa-se que os anodos foram pintados. De acordo com Gentil (2011), a pintura interna dos anodos tem como objetivo otimizar a distribuição da corrente elétrica de proteção ao longo do casco da embarcação.

Figura 13 - Anodos de sacrifício do tipo APCE 100.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 14 - Anodos de sacrificio do tipo APCE10.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

#### 4.4.1 Determinação da massa total de anodo requerido

De acordo com a equação 4, a massa de anodo requerido é calculada

$$M = \frac{8760 * V * I}{0,85 * C}$$

A resposta dessa equação é obtida com os dados encontrados sequencialmente nos itens a seguir.

##### 4.4.1.1 Analise da vida dos anodos de proteção

Conforme o projeto desenvolvido, foi adotada uma vida útil de 5 anos para os anodos, com a justificativa baseada no intervalo de docagem da embarcação e nas experiências adquiridas em outras embarcações construídas no estaleiro. A docagem corresponde ao período destinado à manutenção das máquinas, equipamentos e estruturas da embarcação.

*V: 5 anos*

##### 4.4.1.2 A capacidade de corrente dos anodos

Com a escolha do anodo de zinco, o valor da capacidade de corrente correspondente pode ser encontrado na Tabela 5. Nessa tabela verificamos que a capacidade de corrente para o anodo de zinco é:

$$C = 740 C(A * h/kg)$$

##### 4.4.1.3 Obtenção da massa de anodo requerido

Retornando à Equação (4) e substituindo os valores encontrados nos itens anteriores, obtemos a massa de anodo requerido.

$$M = \frac{8760 * 5 * 2,88}{0,85 * 740} \quad M = 200,55 \text{ Kg}$$

#### 4.4.2 Cálculo do número de anodo requerido

Pela equação 5 e conforme as informações já mencionadas do anodo de zinco, a massa líquida do anodo APCE100 é 9,6 kg. Assim, o número de anodos requerido é:

$$n^{\circ} \text{ de anodos} = \frac{200,55}{9,6} = 20,89$$

Portanto, foram dimensionados 20 anodos do tipo APCE 100 para a proteção catódica do iate. Para verificar se o número de anodos é suficiente para proteger a estrutura do casco, calcula-se a corrente total liberada pelos anodos de sacrifício.

#### 4.4.3 Corrente total liberada pelos anodos de sacrifício

Pela equação 7, a corrente total liberada pelos anodos de sacrifício é:

$$I = N * i$$

A corrente liberada pelo anodo de zinco no eletrólito, determinada exclusivamente por sua geometria, é de 0,45 A, conforme especificado no catálogo do fabricante, o Anexo 2 apresenta a corrente liberada pelo anodo de zinco. Substituindo na equação, obtemos:

$$I = 20 * 0,45$$

$$I = 9 A$$

Com base na corrente elétrica total liberada pelos anodos, pode-se afirmar que o casco da embarcação está protegido catodicamente. Isso ocorre devido a corrente liberada pelos anodos ser maior que a corrente elétrica necessária para a proteção catódica.

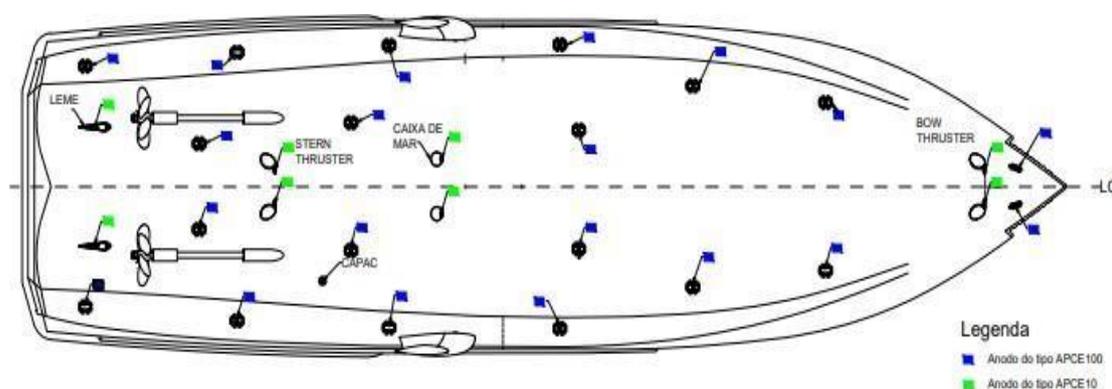
Além disso, o valor total de corrente elétrica liberada foi comparado com os valores de correntes de embarcações semelhantes à estudada, constatando-se que os resultados são próximos, o que confirma a precisão do cálculo.

#### 4.4.4 Distribuição dos anodos de sacrifício

Conforme as diretrizes do setor de engenharia do estaleiro, os anodos de sacrifício são distribuídos em linhas longitudinais simétricas em relação à linha de centro do casco, ou seja, são dispostos de forma simétrica ao longo dos dois bordos. Os anodos devem ser alinhados horizontalmente, interligados entre si e posicionados a 1 metro abaixo da linha d'água.

Além dos 20 anodos fixados no casco, foram instalados anodos do tipo APCE 10 nas regiões expostas à corrosão severa. Esses anodos foram posicionados no leme, nas caixas de mar, no *stern thruster* e no *bow thruster* (propulsores). alinhados pela linha de centro de cada bordo, bombordo e boresta, dois anodos por região, totalizando 8 anodos. Os anodos do tipo APCE 10 não é calculado no dimensionamento visto que são anodos fixados nas áreas que precisam de uma maior proteção. A Figura 15 ilustra o desenho esquemático da localização de cada anodo no iate.

Figura 15 - Distribuição dos anodos de sacrifício no casco da embarcação



Fonte: adaptado autora (2024).

#### 4.4.5 Montagem dos anodos de sacrifício

Como citado na pesquisa, a proteção catódica complementa as medidas de controle da oxidação. A primeira etapa desse processo nos cascos dos navios é a aplicação de revestimentos, utilizando tintas especiais nas áreas sujeitas à corrosão. Essas tintas possuem propriedades anti-incrustantes e anticorrosivas. Para a fixação dos anodos, é essencial que a região esteja previamente pintada com essa tinta.

Como ilustrado na Figura 16, a base do anodo é composta por quatro parafusos sextavados, que suportam o anodo de sacrifício. A 16 figura também destaca a aplicação da tinta de acabamento na região que acomodara o anodo.

Figura 16 - Base dos anodos na região de proa e bombordo



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na etapa da montagem, os anodos foram fixados por uma ligação aparafusada por meio da alma do aço. Esse método é vantajoso pois facilita a troca do anodo quando for necessário. A figura 17 evidencia o desenvolvimento dessa atividade.

Figura 17 - Fixação do anodo de sacrifício.



Fonte: Autora, (2024).

As Figuras 18 e 19 ilustram a instalação dos anodos do tipo APCE100 e APCE10 no casco da embarcação. Ao todo, foram fixados 20 anodos do tipo APCE100 e 8 anodos do tipo APCE10, assegurando assim a proteção catódica eficaz de toda a estrutura do casco.

Figura 18 - Fixação dos anodos do tipo APCE100.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 19 - Fixação dos anodos do tipo APCE10.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos na etapa do dimensionamento. Os valores destacados em **negrito** são os parâmetros mais relevantes do dimensionamento, pois indicam que a corrente de proteção é de **2,88 A**, enquanto a corrente total liberada pelos anodos é de **9 A**, o que supera a corrente de proteção necessária. E para a distribuição da corrente foram instalados 20 anodos de sacrifício do tipo APCE 100, acrescentado 8 anodos do tipo APCE 10 para estrutura que necessitam de uma proteção contra a oxidação maior.

Tabela 7- Parâmetros do dimensionamento.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultado</b>
Escolha do método	Proteção catódica por anodos de sacrifício
LPP	27,96
D	2,15
BC	0,48
B	7,15
Área molhada se ser Protegida	210 m <sup>3</sup>
DC	55 mA/m <sup>2</sup>
F	1,25
Eficiência do revestimento	80%
<b>Corrente de proteção Catódica</b>	<b>2,88 A</b>
Escolha do anodo	Zinco-tipo: APCE100 e APCE10
Corrente liberada pelo anodo de zinco da Sacor	0,45 A
V	5 anos
C	740 C(A*h/kg)
Massa total de anodo Requerido	200,55 kg
<b>Número de anodos Requeridos</b>	<b>20 anodos do tipo APCE 100 e 8 do tipo APCE10</b>
<b>Corrente total liberada pelos anodos</b>	<b>9 A</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

## 5 CONCLUSÃO

A corrosão identificada na estrutura do casco é de natureza eletroquímica, um fenômeno espontâneo que ocorre naturalmente devido à interação com a água salgada do mar. Diante disso, torna-se essencial a implementação de métodos para inibir esse processo corrosivo. No caso de embarcações, os métodos anticorrosivos mais eficazes incluem a aplicação de revestimentos (pintura) e a utilização da proteção catódica.

No estudo de caso, a pesquisa concentrou-se no método de proteção catódica. Constatou-se que a escolha da proteção catódica por anodos de sacrifício é a mais adequada para atender aos requisitos de proteção do barco em questão. Essa decisão foi fundamentada por meio de estudos bibliográficos, complementados pelo dimensionamento da proteção catódica.

Conforme observado, a embarcação analisada é considerada de pequeno a médio porte, para o qual o método de proteção por anodos de sacrifício é comumente utilizado. Essa escolha se justifica pelo dimensionamento realizado, que indicou uma corrente de proteção de 2,88 A, valor inferior ao limite de 5 A do método por anodo de sacrificio. Ao contrário do método de corrente de impressa, que é utilizado em estruturas que requerem correntes de proteção superiores a 5 A.

A aplicação da proteção catódica por anodos de sacrifício da embarcação em estudo baseou-se nos princípios eletroquímicos do método. O fluxo de corrente de proteção é gerado pela diferença de potencial entre o casco da embarcação e os anodos, que possuem um potencial de oxidação mais elevado, ou seja, uma maior tendência de se corroer. Como resultado, os anodos se corroem preferencialmente, transferindo o processo corrosivo para si mesmos e preservando o casco da embarcação contra o processo corrosivo.

A escolha do anodo de sacrifício é fundamental para o dimensionamento adequado da proteção catódica, visto que essa medida depende do meio ao qual está exposto e suas características influenciam diretamente nos cálculos. No iate analisado, o anodo de zinco foi identificado como o mais adequado para garantir a proteção necessária.

Conclui-se que a superfície da embarcação está protegida catodicamente, uma vez que, conforme calculado no dimensionamento, a corrente elétrica total fornecida pelos anodos, de 9 A, é superior que a corrente necessária para a proteção catódica, de 2,88 A. Para a distribuição uniforme da corrente de proteção foram instalados 20 anodos de zinco em toda a superfície do casco.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A proteção catódica é um método complementar às medidas de combate à corrosão da estrutura do casco, que incluem o uso de revestimentos anticorrosivos e anodos de sacrifício. Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar os diferentes métodos de revestimento aplicáveis à região do casco, a fim de aprimorar ainda mais as estratégias de proteção.

Além disso, recomenda-se uma comparação do dimensionamento da proteção catódica utilizando um tipo diferente de anodo, como o anodo de alumínio. Essa análise permite avaliar a eficiência dos anodos de zinco em relação aos de alumínio, e determinar a quantidade ideal de anodos para embarcações que navegam em águas salinas.

## REFERÊNCIAS

ARAUJO, M.M. **Participação brasileira no projeto “Mapa Ibero-Americano de Corrosividade Atmosférica”**. Anais do 2º Colóquio Nacional sobre corrosão atmosférica, IPT-ABRACO, 1994.

ALVES, Flávia. InfoQuímica: **Corrosão: um fenômeno químico**. 2018.

CANAL SOLAR. **Corrosão galvânica em estruturas metálicas**. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/corrosao-galvanica-em-estruturas-metalicas/>. Acesso em: 26 set. 2024.

CARBÓ, Héctor Mário. Aço inoxidável: aplicações e especificação. **Associação Brasileira do Aço Inox**, 2001.

Craig Botha (Paradigm Projects). **Corrosion Prevention: Cathodic protection for ships**. Mechanical Technology, May 2000.

FERREIRA, Luiz Antonio et al. **Curso de formação de operadores de refinaria: química aplicada-corrosão**. UnicenP, Curitiba, 2002.

FONTANA, M. G.; GREENE, N. D. **Corrosion Engineering**. New York: McGraw Hill Book Company, Inc, 1967.

FONTANA, M.G. **Corrosion Engineering**. 3ª ed. McGraw-Hill: Editorial Board, 1987.

FRAUCHES-SANTOS, Cristiane et al. **A corrosão e os agentes anticorrosivos**. Revista virtual de química, v. 6, n. 2, p. 293-309, 2014.

GALVELE, J.R. **Passivity of metals**. In: FRANKENTHAL, R. P., KRUGER, J. (eds.). New Jersey: The Electrochemical Society, Inc, 1978.

GALVELE, J.R. Pitting corrosion (J.C.Scully, ed.) **Treatise on Materials Science and Technology**, 1983.

GENTIL, R. **Types of Corrosion in Ship Hulls and Their Impact on Structural Integrity**. Marine Engineering Review, v. 3, n. 1, p. 12-24, 2021.

GENTIL, Vicent. **Corrosão**. 6ª Edição, 2011. 1192 p.

Gentil, V. **Corrosão**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora: Rio de Janeiro, 2007.

GOMES, Luiz Paulo. **Sistemas de proteção catódica**. Rio de Janeiro: IEC-Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda, 1995.

JAMBO, Hermano Cezar Medaber; FÓFANO, Sócrates. **Corrosão: fundamentos, monitoração e controle**. Ciência Moderna, 2008.

LAZZARI, L.; PEDEFERRI, P. **Cathodic Protection**. Milão: Polipress, 2006.

MAINIER, F. B. **Corrosão e Inibidores de Corrosão**. Universidade Federal Fluminense, 2007.

MAINIER, F. B. **Material do curso Corrosão e Inibidores**. Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

MAIA, Daltamir Justino. **Experimento sobre a influência do pH na corrosão do ferro**. São Paulo-SP: Experimentação no ensino de química. 2014.

MARTINS, Anderson da Silva; **Tecnologias anticorrosivas aplicadas a bordo**, Rio de Janeiro. Orientador: Profª. Elizabeth F. Lourenço, 2014. 46 p. Dissertação (TCC) Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha do Rio de Janeiro, 2014.

NUNES, L.P.; LOBO, A. C. O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. Rio de Janeiro, 2007.

NUNES, Laerce de P.; CAETANO, Antonio C.; ARAUJO, Alexandre A. **Proteção catódica galvânica—passado, presente e futuro**. 2012.

PETROBRAS N-1473, “**Anodos de liga de zinco**”, REV. B, MAI/ 2001.

PINA, João P. et al. **Análise do Desempenho de Inibidores de Corrosão à Base de Misturas de Na<sub>2</sub> MoO<sub>4</sub>. 2H<sub>2</sub> O, ZnSO<sub>4</sub> e Uréia na Proteção do Aço-Carbono**. Revista Processos Químicos, v. 5, n. 10, p. 75-80, 2011.

RIJEZA. **Corrosão uniforme: o que é e como evitar**. Disponível em: <https://rijeza.com.br/blog/corrosao-uniforme-o-que-e-e-como-evitar/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

ŞAFKAK, Serpil et al. **Schiff bases as corrosion inhibitor for aluminium in HCl solution**. **Corrosion Science**, v. 54, p. 251-259, 2012.

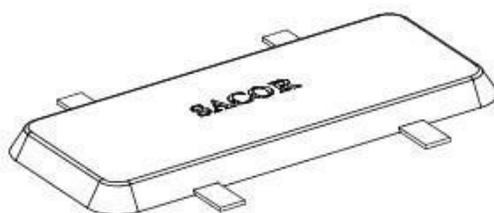
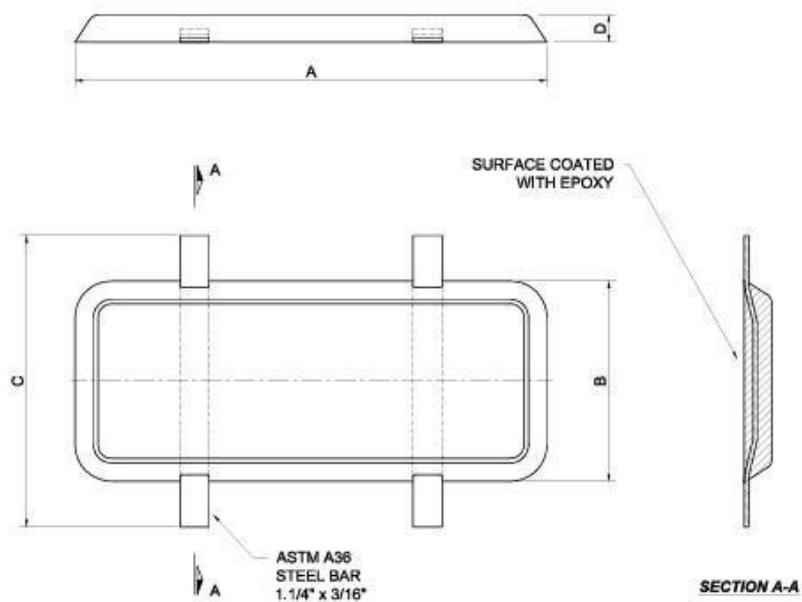
SHREIR, L.L. **Corrosion**, Vol 1, “Metal/Environment Reactions”, Newnes-Butterworths, London, 1978.

VERGÉS, G. R. **Estudo do desempenho de sistemas de pintura para materiais das redes de distribuição de energia elétrica situadas em regiões litorâneas**. Curitiba, 2005. 213 p. Tese de Doutorado. Dissertação (mestrado)—PIPE, Universidade Federal do Paraná.

## ANEXO 1 – DIMENSÕES DO ANODO DE ZINCO



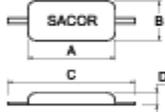
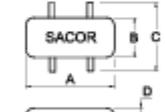
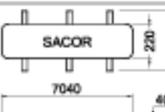
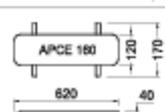
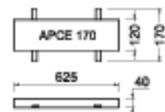
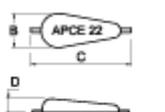
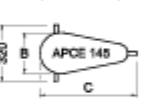
ZINC ANODE TYPE APCE



TYPE		DIMENSION (mm)				WEIGHT (kg)	
SACOR APCE	PETROBRAS ZES	A	B	C	D	NET	GROSS
100	10	300	150	250	40	9,6	10,0
135	-	515	120	220	40	13,0	13,5
155	15,5	640	120	220	40	15,0	15,5
240	24	640	220	320	30	23,2	24,0

1. - ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS, EXCEPT WHERE INDICATED .

## ANEXO 2 – CORRENTE LIBERADA PELO ANODO DE ZINCO

DESENHO	NÚMERO		REVISÃO						
	SS-001		E						
USUÁRIO:	EMPRESAMENTO:			FOLHA:	1 de 1				
EMPRESAMENTO:	PROTEÇÃO CATÓDICA			SETOR:	-				
UNIDADE:				ESCALA:	-				
TÍTULO:	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS ANODOS SACOR DE ZINCO								
TÍPO	TÍPO		DIMENSÕES (mm)				MASSA (Kg)		CORRENTE (A)
	SACOR APCE	PETROBRAS ZES	A	B	C	D	LÍQUIDA	BRUTA	
	10	1	100	75	170	25	0,8	1,0	0,23
	35	3,5	220	100	290	29	3,3	3,5	0,32
	60	6	220	160	290	29	5,8	6,0	0,38
	100	10	300	150	250	40	9,6	10,0	0,45
	135	-	515	120	220	40	13,0	13,5	0,63
	155	15,5	640	120	220	40	15,0	15,5	0,76
	240	24	640	220	320	30	23,2	24,0	0,86
	400	40	1040	220	320	30	38,9	40,0	1,26
	320	-	1240	120	170	40	31,5	32,0	1,36
	490	-	1865	120	170	40	48,5	49,0	1,97
	660	-	2490	120	170	40	65,5	66,0	2,61
	22	2,2	230	75	300	23	2,0	2,2	0,24
	145	14,5	400	220	450	60	12,9	13,7	0,47
									

NOTAS:

- 1- A COLUNA, "CORRENTE" NESTA E NAS DEMAIS TABELAS, INDICA A CORRENTE LIBERADA PELO ANODO, NUM ELETRÓLITO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA IGUAL A 25 ohm-cm, PARA A SUPERFÍCIE POLARIZADA A -0,80V x Ag/AgCl.
- 2- OS ANODOS 320,490 ETC. SÃO COMPOSTOS COM AS PEÇAS 160 E 170 MOSTRADAS NA FIGURA, PODENDO-SE USAR QUALQUER NÚMERO DE PEÇAS.
- 3- ESTE DESENHO SS-001 - REV. D DE 18/09/06 É A REVALIDAÇÃO DO DESENHO SS-001 REV. C DE 28/03/95, NÃO TENDO SIDO ALTERADO O SEU CONTEÚDO.

	ORIGINAL	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. F	REV. G	REV. H
DATA	4º - 1980	JAN / 88		28/03/95	18/09/06	06/09/16			
EXECUÇÃO	A. C. D.	HAMILTON		RAFAEL	P. ANTUNES	P. ANTUNES			
VERIFICAÇÃO	H. SANTOS	OSORIO			HUGO	HUGO			
APROVAÇÃO	A. C. D.	YUKIZAKI			H. OSORIO	H. OSORIO			