



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARIA ULLY EDUARDO MARTINS

**AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DO AÇO CARBONO S355 EM ÁGUA DO MAR
PARA APLICAÇÃO EM FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS *OFFSHORE***

FORTALEZA

2023

MARIA ULLY EDUARDO MARTINS

AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DO AÇO CARBONO S355 EM ÁGUA DO MAR PARA
APLICAÇÃO EM FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS *OFFSHORE*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia Eólica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro de Lima Neto.

FORTALEZA

2023

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)

M344a Martins, Maria Ully Eduardo.

Avaliação da corrosão do aço carbono S355 em água do mar para aplicação em fundações de turbinas eólicas offshore / Maria Ully Eduardo Martins. – 2023.
63 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Pedro de Lima Neto.

1. Corrosão. 2. Aço Carbono. 3. Energia Eólica Offshore. I. Título.

CDD 620.1

MARIA ULLY EDUARDO MARTINS

AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DO AÇO CARBONO S355 EM ÁGUA DO MAR PARA
APLICAÇÃO EM FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS *OFFSHORE*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia Eólica.

Aprovada em: 10/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro de Lima Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Thiago Mielle Brito Ferreira Oliveira
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

A Deus.

Aos meus pais e ao meu marido.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e ao meu marido por todo o apoio durante essa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro de Lima Neto, minha enorme gratidão pela excelente orientação, pela paciência e pelas contribuições.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof.^a Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios, Prof. Dr. Thiago Mielle Brito Ferreira Oliveira e Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire pela disponibilidade e pelas valiosas sugestões.

A todos do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC), do Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS), do Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) e do Laboratório de Materiais Avançados da Universidade Federal do Ceará pelo suporte no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao secretário do Programa de Pós-Graduação, Valdi, e aos colegas da turma de mestrado, em especial ao Igor, Helson e Emanuelle pela amizade, colaboração e parceria durante o curso.

“Vós sois a luz do mundo. Não se pode esconder uma cidade situada sobre uma montanha. Nem se acende uma luz para colocá-la debaixo do alqueire, mas sim para colocá-la sobre o candeeiro, a fim de que brilhe a todos os que estão em casa.” (Mateus 5, 14-15)

RESUMO

A participação da energia eólica *offshore* na matriz energética brasileira é uma realidade cada vez mais próxima. Embora na costa brasileira ainda não haja nenhum parque eólico *offshore* em operação, o vasto potencial já foi apontado, destacando o litoral cearense, devido à excelente incidência de ventos. As fundações eólicas *offshore* do tipo monopilha representam o projeto mais comum e o aço mais utilizado na fabricação destas estruturas de suporte é o aço carbono S355. Estas estruturas são expostas ao ambiente marinho, logo, a corrosão deste material é um problema complexo e dispendioso na manutenção *offshore*. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi o de avaliar a resistência à corrosão do aço carbono S355 em água do mar, que foi coletada na região metropolitana de Fortaleza, Ceará. A investigação do processo corrosivo do aço foi conduzida por meio de ensaios gravimétricos e de testes eletroquímicos: Potencial de Circuito Aberto (PCA), Polarização Potenciodinâmica (PP) e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE). Os ensaios de imersão foram realizados em triplicata, e a perda de massa foi obtida para determinar a taxa de corrosão após 24 horas e 45 dias de imersão. O monitoramento do PCA e o acompanhamento da evolução dos diagramas de EIE foram feitos por até 96h de imersão, sendo observada a diminuição dos arcos capacitivos com o aumento do tempo de imersão, reduzindo a resistência à polarização. Adicionalmente, no decorrer do tempo de imersão, os valores dos potenciais tornaram-se mais negativos. Todos estes indicadores caracterizam a corrosão do material em água do mar. A morfologia superficial das amostras, após os testes de corrosão, foi caracterizada por Microscopia Óptica (MO). Foi identificada a presença de corrosão uniforme e localizada. Os produtos de corrosão formados na superfície das amostras foram caracterizados por Difração de Raios-X e Espectroscopia de Mössbauer. A magnetita (Fe_3O_4) e a lepidocrocita (γ -FeOOH) foram identificadas, sendo esta última observada em predominância. Por fim, a agressividade do processo corrosivo foi classificada como severa no primeiro dia de imersão e moderada no decorrer do período de imersão. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que para a aplicação do aço S355 em fundações de turbinas eólicas *offshore* é indicado a escolha de um sistema de proteção catódica (PC), com a finalidade de mitigar a corrosão. Ressaltando também a importância do avanço em pesquisas na área, que contribuem diretamente com a funcionalidade e segurança das operações em estruturas de geração de energia eólica em um ambiente tão desafiador.

Palavras-chave: corrosão; aço carbono; energia eólica *offshore*.

ABSTRACT

The participation of *offshore* wind energy in the Brazilian energy matrix is an increasingly close reality. Although there is still no *offshore* wind farm in operation on the Brazilian coast, the vast potential has already been pointed out, highlighting the on the coast of Ceará, due to the excellent wind index. Monopile *offshore* wind foundations represent the most common design and the steel most used in the manufacture of these support structures is carbon steel S355. These structures are exposed to the marine environment, so corrosion of this material is a complex and expensive problem in *offshore* maintenance. Therefore, the objective of this research was to evaluate the corrosion resistance of S355 carbon steel in seawater, which was collected in the metropolitan region of Fortaleza, Ceará. The investigation of the steel corrosive process was conducted using gravimetric tests and electrochemical tests: Open Circuit Potential (OCP), Potentiodynamic Polarization (PP) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). The immersion test was performed in triplicate, and the mass loss was obtained to determine the corrosion rate after 24 hours and 45 days of immersion. The OCP monitoring of the and the evolution of the EIS diagrams were carried out for up to 96 hours of immersion, with a decrease in the capacitive arcs being observed with the increase in the immersion time, reducing the resistance to polarization. Additionally, in the course of immersion time, the potential values became more negative. All these indicators characterize the corrosion of the material in seawater. The surface morphology of the samples after the corrosion tests was characterized using Optical Microscopy (OM). The presence of uniform and localized corrosion was identified. The corrosion products formed on the surface of the samples were characterized by X-Ray Diffraction and Mössbauer Spectroscopy. Magnetite (Fe_3O_4) and lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$) were identified, the latter being predominantly observed. Finally, the aggressiveness of the corrosive process was classified as moderate. Based on the results obtained, it is concluded that for the application of S355 steel in foundations of *offshore* wind turbines, it is recommended to choose a cathodic protection system (PC), in order to mitigate corrosion. Highlighting the importance of advancing research in the area, directly contributing to the functionality and safety of operations in wind energy generation structures in such a challenging environment.

Keywords: corrosion; carbon steel, *offshore* wind energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Batimetria: Faixas de profundidade ao longo da costa brasileira	22
Figura 2 – Velocidade do vento a 100 m de altura	23
Figura 3 – Intensidade dos ventos do litoral cearense	25
Figura 4 – Perfil batimétrico de Pecém/Ce.....	25
Figura 5 – Principais tipos de fundações de turbinas eólicas <i>offshore</i>	26
Figura 6 – Ambientes, componentes e materiais metálicos indicados para uma turbina eólica <i>offshore</i>	27
Figura 7 – Zonas de corrosão em ambiente marinho.....	29
Figura 8 – Diagrama de Nyquist	32
Figura 9 – Curvas de polarização	34
Figura 10 – Formato dos corpos de prova do aço S355 para os seus respectivos ensaios: a) Ensaio conduzido em temperatura ambiente do laboratório; b) Ensaio em autoclave; c) Testes eletroquímicos	37
Figura 11 – Fluxograma da Metodologia	42
Figura 12 – Microscopia óptica do corpo de prova antes da exposição ao meio corrosivo	45
Figura 13 – Corpo de prova do Aço S355 após 45 dias de imersão em água do mar: a) Antes da limpeza e decapagem; b) Após limpeza e decapagem	46
Figura 14 – Microscopia óptica do corpo de prova após remoção do produto de corrosão	46
Figura 15 – Potencial de circuito aberto para o aço S355 imerso em água do mar por 96 horas	47
Figura 16 – Diagrama de Nyquist para o aço S355 imerso em água do mar por 8 horas	48
Figura 17 – Diagrama de Nyquist para o aço S355 imerso em água do mar por 96 horas	48
Figura 18 – Desenho ilustrativo do circuito equivalente utilizado para modelar a interface ...	49
Figura 19 – Gráfico de Bode (log f versus log Z) para o aço S355 imerso em água do mar por 8 horas.....	50
Figura 20 – Gráfico de Bode (log f versus log Z) para o aço S355 imerso em água do mar por 96 horas.....	51
Figura 21 – Gráfico de Bode (log f versus defasagem) para o aço S355 imerso em água do mar por 8 horas	51
Figura 22 – Gráfico de Bode (log f versus defasagem) para o aço S355 imerso em água do mar por 96 horas	52

Figura 23 – Curvas de polarização anódica e catódica para o aço S355 imerso em água do mar	53
Figura 24 – Difratoograma do produto de corrosão formado no aço S355 imerso em água do mar por 45 dias. M - Magnetita (Fe_3O_4); L - Lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$).....	54
Figura 25 – Espectros Mössbauer para caracterização do produto de corrosão aço S355 imerso em água do mar por 45 dias: Produto formado na superfície do aço	56
Figura 26 – Espectros Mössbauer para caracterização do produto de corrosão aço S355 imerso em água do mar por 45 dias: Produto decantado no fundo do recipiente.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial Eólico <i>Offshore</i> do Ceará	24
Tabela 2 – Composição química do aço S355	36
Tabela 3 – Parâmetros do ensaio de imersão em autoclave.....	38
Tabela 4 – Classificação do processo corrosivo	39
Tabela 5 – Classificação da agressividade do processo corrosivo do aço S355 de acordo com o tempo e as condições de imersão.....	43
Tabela 6 – Parâmetros do circuito equivalente para o processo de corrosão do aço S355 imerso em água do mar.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ADECE	Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS EN	<i>British Standard / European Norm</i>
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
DRX	Difração de Raios-X
EIE	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica
FIEC	Federação das Indústrias do Estado do Ceará
G	Goetita
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
L	Lepidocrocita
M	Magnetita
MO	Microscopia Óptica
NACE	<i>National Association of Corrosion Engineers</i>
PC	Proteção Catódica
PCA	Potencial de Circuito Aberto
PCAG	Proteção Catódica por Ânodos Galvânicos
PP	Polarização Potenciodinâmica
PT	Peça de Transição
SEBRAE	Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Estado do Ceará
TC	Taxa de Corrosão

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitância
C _{dc}	Capacitância da dupla camada elétrica
E	Potencial
f	Frequência
<i>J_{corr}</i>	Densidade de corrente
pH	Potencial hidrogeniônico
R	Resistência
R _p	Resistência à polarização
R _s	Resistência da solução
Z	Magnitude da impedância
Z'	Impedância real
-Z''	Impedância imaginária
θ	Ângulo de fase

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa e motivação	17
1.2. Objetivo geral	19
1.3 Objetivos específicos	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 Energia Eólica <i>Offshore</i>	21
<i>2.1.1 Panorama eólico offshore</i>	21
<i>2.1.2 Atlas Eólico e Solar - Ceará</i>	23
<i>2.1.3 Componentes e Materiais para Turbinas Eólicas Offshore</i>	26
<i>2.1.4 Corrosão no ambiente marinho</i>	28
2.2 Corrosão	30
<i>2.2.1 Conceitos</i>	30
<i>2.2.2 Técnicas para o estudo da corrosão</i>	32
<i>2.2.2.1 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)</i>	32
<i>2.2.2.2 Polarização Linear</i>	34
<i>2.2.2.3 Espectroscopia Mössbauer e Difração de Raios-X</i>	34
3 MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 Material	36
3.2 Preparação dos Corpos de Prova	36
3.3 Solução de trabalho	37
3.4 Ensaio de Perda de Massa	38
3.5 Técnicas Microscópicas	40
3.6 Medições Eletroquímicas	40
3.7 Técnica Espectroscópica	40
3.8 Difração de Raios-X	41
3.9 Fluxograma	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Perda de Massa/Taxa de Corrosão	43
4.2 Técnicas Microscópicas	44
4.3 Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto	47
4.4 Monitoramento de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica	48
4.5 Polarização Potenciodinâmica	53

4.6 Difração de Raios-X	54
4.7 Espectroscopia Mössbauer.....	55
5 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e motivação

Nas últimas décadas, a exploração demasiada dos recursos naturais está causando graves problemas ambientais e de sustentabilidade, gerando preocupações em todo o mundo. Políticas encorajadoras propõem metas para redução de emissões de gases de efeito estufa e o desenvolvimento de fontes de energia limpas e renováveis (Liu *et al.*, 2021).

Como fonte de energia sustentável, a energia eólica desempenha um papel vital nas transformações globais de energia, desenvolvendo-se rapidamente nos últimos anos. Com o foco na energia eólica *offshore*, espera-se que mais de 10% da capacidade total instalada seja provinda de geração *offshore* até 2025, ano em que será atingida a marca de 100 GW (Global Wind Report, 2020).

Apesar do recurso eólico *offshore* ainda não estar sendo aproveitado no Brasil, pesquisas foram desenvolvidas e mostram um grande potencial energético no país. Segundo os três últimos boletins anuais publicados pela ABEEólica, a capacidade eólica *onshore* instalada até o ano de 2020 foi de 17,75 GW, em 2021 foi de 21,57 GW e em 2022 aumentou para 25,63 GW, o que correspondia a uma participação de 13,4% na matriz elétrica brasileira em 2022. Comparando com o estudo de Pimenta *et al.* (2019), foi identificado um potencial eólico *offshore* mais significativo, com valor de até 1,3 TW na costa brasileira com limite batimétrico de até 100 m.

Adicionalmente, Reis *et al.* (2021) apresentaram uma análise de viabilidade econômica para projetos eólicos *offshore* na costa brasileira, considerando um limite batimétrico de até 50 m. Os resultados indicaram que a região do Nordeste Brasileiro possui o maior potencial de geração de energia, ressaltando a área litorânea entre o Maranhão e o Rio Grande do Norte, na qual para um parque eólico de 300 MW de capacidade instalada, a produção anual de energia pode chegar a 1.500 GWh.

O Estado do Ceará possui características que o colocam em posição de destaque, de acordo com o Atlas Eólico e Solar (2019). O Atlas apresenta o mapeamento eólico *offshore* para a costa cearense, no qual pode-se observar uma extensa plataforma continental de baixa profundidade, entre 5 e 50 metros. Outra vantagem natural abordada no Atlas é a velocidade do vento com valores elevados ao longo da costa, com médias anuais que ultrapassam 9 m/s (ADECE, 2019).

Os investimentos e o interesse em projetos eólicos *offshore* no Brasil vêm aumentando nos últimos anos. O que pode ser verificado junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA), que recebeu para análise, entre o ano de 2016 a 2023, um total de 78 processos de licenciamento ambiental para projetos de parques eólicos *offshore* de grande porte, localizados no Nordeste, no Sul e no Sudeste do litoral brasileiro. Para embasamento e padronização dessa análise, o IBAMA divulgou um Termo de Referência em 2019 que orienta o licenciamento ambiental e auxilia no desenvolvimento deste tipo de projeto (EPE, 2020 e IBAMA, 2019).

Os projetos eólicos localizados no mar apresentam muitas vantagens em comparação com os projetos *onshore*, pois possuem menores restrições ao uso do solo, ao impacto visual e sonoro, além da baixa rugosidade da superfície oceânica, proporcionando ventos de maior velocidade e uniformidade. Entretanto, o ambiente marinho é extremamente agressivo aos materiais metálicos e além disto gera grandes desafios em relação ao transporte, instalação e operação.

A vida útil para uma turbina eólica *offshore* é cerca de 20 anos, e os custos de operação e manutenção podem representar cerca de 30% do custo total de geração de energia. (ADECE, 2019). Os custos de manutenção podem ser difíceis de estimar, mas são muito onerosos, pois requerem um serviço em embarcação com tripulação e técnicos de manutenção, ou o uso de helicópteros (Kang *et al.*, 2019).

A ação corrosiva da água do mar é um processo complexo, especialmente para estas estruturas de aço. Ocorrem várias interações entre o ambiente marinho e a matriz metálica, que influenciam na corrosão e que podem ser afetadas por fatores, como temperatura, oxigênio dissolvido, pH e salinidade. Os fatores que influenciam a corrosão na água do mar são divididos em químicos, físicos e biológicos. Com relação aos fatores químicos tem-se: os gases dissolvidos, como o gás carbônico e oxigênio; o pH, mesmo não sendo o fator de maior influência na ação corrosiva pela água do mar; e a elevada salinidade, que torna a água do mar um eletrólito forte (Gentil, 2011).

Logo, os danos causados por corrosão são um dos maiores desafios no projeto e na estimativa da vida útil das estruturas de suporte para turbinas eólicas. Atualmente, a maioria dominante das estruturas eólicas *offshore* em uso são suportadas por estruturas de monopilhas, que apresentam mais vantagens comerciais e técnicas.

A monopilha é uma estrutura de aço lançada no fundo do mar, na qual é encaixada uma peça de transição (PT) no seu topo. O aço mais utilizado na fabricação destas estruturas de suporte é o aço carbono S355 (Igwemezie *et al.*, 2018), o qual é um aço estrutural que

apresenta propriedades vantajosas, como alta resistência e plasticidade, encontrando-se então em uma posição de destaque durante a seleção de materiais para aplicação em estruturas marinhas.

Portanto, o estudo da corrosão do aço em ambientes marinhos desempenha um papel fundamental na durabilidade e integridade de estruturas *offshore*. A compreensão do processo influencia na escolha adequada de sistemas de proteção contra corrosão, e essa mitigação da corrosão é crucial para reduzir custos de manutenção e prolongar a vida útil das estruturas. Investir em pesquisas para controlar a corrosão está aliado tanto a economia de recursos, como também para a segurança de operações que dependem dessas estruturas, mantendo a funcionalidade e confiabilidade para geração de energia eólica em alto mar.

Para a estruturação da dissertação, o presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo contempla a introdução, o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo. O segundo capítulo apresenta uma revisão sobre energia eólica *offshore*, abrangendo um panorama de implantação com ênfase para o Estado do Ceará, assim como os materiais mais indicados para aplicação em estruturas das turbinas, os conceitos de corrosão e as técnicas para o estudo de corrosão nesse meio. O terceiro capítulo descreve os procedimentos metodológicos realizados. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no quarto capítulo. Por fim, o quinto capítulo apresenta a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros.

1.2. Objetivo geral

Investigar a resistência à corrosão do aço carbono S355 em água do mar, contemplando técnicas para determinação da agressividade do processo corrosivo neste aço que pode ser utilizado como material de construção em estruturas eólicas offshore.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar a taxa de corrosão do aço ASTM S355 em água do mar por meio de ensaios de perda de massa;
- Simular o ambiente marinho utilizando autoclave com temperatura e pressão controladas para determinar a taxa de corrosão do aço ASTM S355 exposto a água do mar;

- Avaliar a morfologia do processo de corrosão usando a técnica de microscopia óptica;
- Caracterizar o produto de corrosão por Difração de Raios-X e espectroscopia Mössbauer;
- Monitorar o potencial de corrosão e a evolução dos diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Energia Eólica *Offshore*

2.1.1 Panorama eólico *offshore*

A implantação de um parque eólico *offshore* possui vantagens significativas em relação ao *onshore*, devido à velocidade do vento ser mais alta e constante nas áreas *offshore*, possibilitando um maior aproveitamento das turbinas eólicas. Embora a energia eólica *offshore* exija investimentos mais elevados para o planejamento, projeto, construção, operação e manutenção, as suas vantagens a tornam mais atrativa (Esteban *et al.*, 2011). Outro ponto de destaque dos parques eólicos *offshore* é a possibilidade de implantação em áreas distantes de regiões povoadas, o que reduz as emissões de ruído e os impactos visuais para a população.

Schaffarczyk (2014) enfatiza alguns pontos no estudo de viabilidade para construção de parques eólicos em ambiente marinhos, destacando o ambiente altamente salino, que causa rápida degradação da estrutura da torre, além das correntes marinhas e os movimentos das ondas e marés que exercem esforços mecânicos sobre essas estruturas.

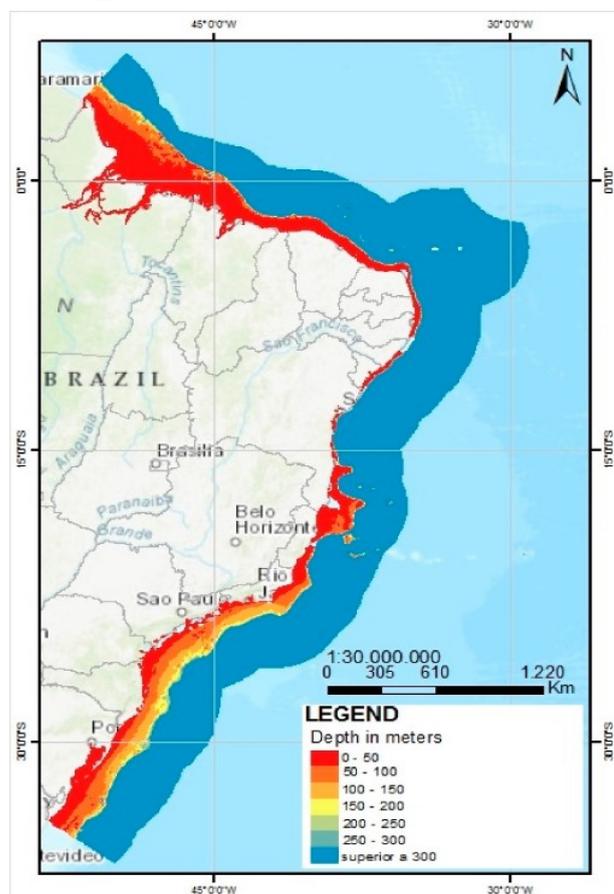
A profundidade da fundação e a distância da costa são tão decisivos quanto à qualidade do vento, pois quanto mais distante maiores os custos de fiação para transmissão de eletricidade (Villacreses *et al.*, 2017).

Na Europa, a maioria dos parques são construídos em águas rasas, com profundidades entre 10 e 50 m e a uma distância de até 100 km da costa, nos quais para os projetos de fundação a utilização de monopilhas representam cerca de 87% das implantações (Kirchgeorg *et al.*, WindEurope, 2018).

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado em 2017, apresenta mapas temáticos obtidos por modelagem numérica, com estimativas de dados de velocidade do vento em alturas de 30 até 200 m, para o ano de 2013. Nestes mapas já podiam ser observadas algumas informações para o potencial eólico *offshore*. Ressalta-se que, esses dados ainda não possuíam ajustes, pois eram apenas valores de simulações e não haviam medições de referência nas estações anemométricas (CEPEL, 2017). Com o avanço da tecnologia e de incentivos para a exploração de novas formas de implantação e expansão de parques eólicos é esperado que estes dados sejam continuamente atualizados e cada vez mais essa temática seja interesse de estudo.

Azevedo *et al.* (2020), apresentaram uma análise batimétrica obtida a partir de dados disponíveis na Administração Nacional Oceânica e Atmosférica do Departamento de Comércio dos Estados Unidos, revelando que a faixa costeira brasileira é formada por profundidades de até 60 m (águas rasas) em até 50 km da costa. Enfocando no litoral nordestino, que a faixa de águas rasas são mais estreitas, sempre a menos de 50 km da costa, como pode ser observado na Figura 1.

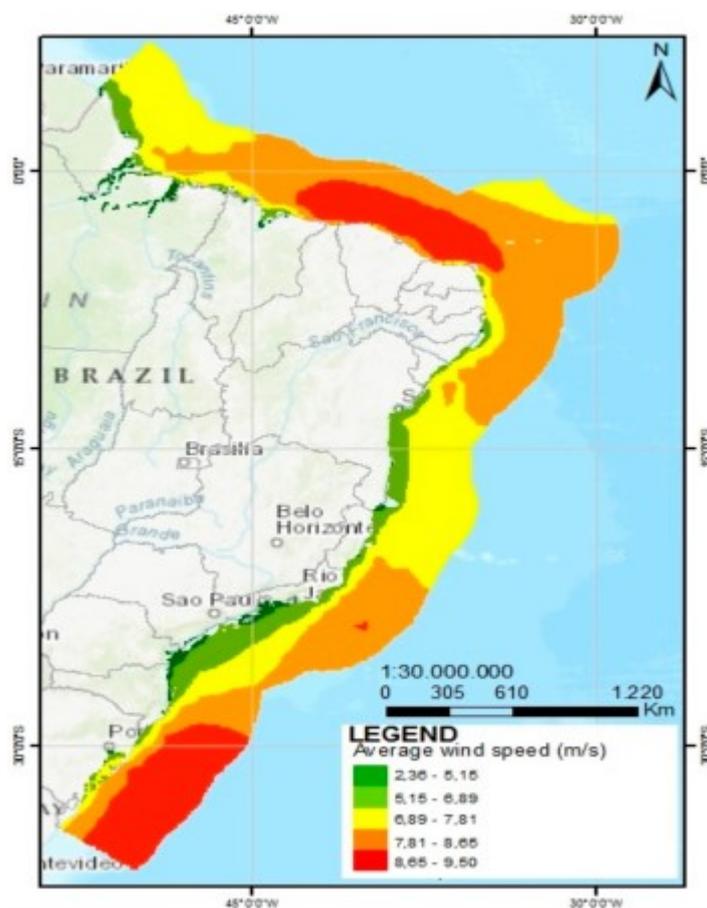
Figura 1 – Batimetria: Faixas de profundidade ao longo da costa brasileira



Fonte: Azevedo *et al.* (2020).

O estudo de Azevedo *et al.* (2020), também traz um mapeamento, no qual é possível obter dados de velocidade do vento. De acordo com a Figura 2, em quase todo o litoral brasileiro, as velocidades são superiores a 7 m/s, sendo escassas as zonas com ventos inferiores a 5 m/s.

Figura 2 – Velocidade do vento a 100 m de altura



Fonte: Azevedo *et al.* (2020).

2.1.2 Atlas Eólico e Solar - Ceará

Em 2019, foi publicado o novo Atlas Eólico e Solar do Ceará, que tem como principal objetivo explorar o potencial de geração de energia eólica e solar, apresentando informações técnicas e estimulando novos investimentos no estado. O documento é o resultado de uma parceria entre o Governo, a Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE), a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) e o Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Estado do Ceará (SEBRAE/CE).

O Atlas Eólico e Solar (2019) indica um cenário promissor para implantação de parques eólicos *offshore* no Ceará, trazendo um mapeamento com as regiões que apresentam as melhores condições para geração eólica no mar.

Os mapas mostram o potencial eólico *offshore* nas alturas de 100 m e 150 m, enquanto as tabelas, como a mostrada na Tabela 1, detalham o potencial por faixas de

profundidade e distância da costa. Mesmo a uma distância de mais de 20 km da costa, o potencial eólico ainda é significativo, com mais de 60 GW de capacidade instalável e estimativa de geração de energia superior a 270 TWh por ano. Isso representa mais de 5 vezes a geração eólica total do Brasil em 2018 (ADECE, 2019).

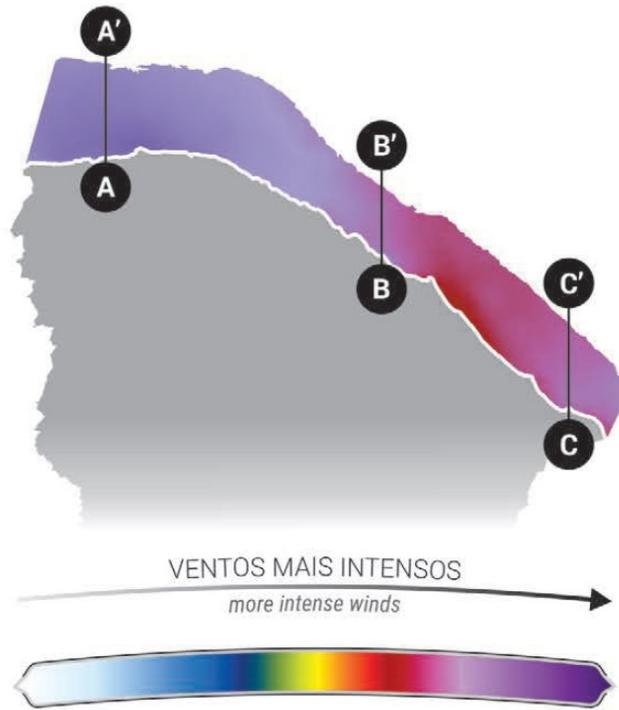
Tabela 1 – Potencial Eólico *Offshore* do Ceará

Potencial Eólico <i>Offshore</i> por Profundidade – Integração de 24 milhas náuticas a partir da linha da costa					
Profundidade (m)	Capacidade instalável (GW)	Altura de 100 m		Altura de 150 m	
		Fator de capacidade anual bruto (%)	Produção de energia líquida (TWh/ano)	Fator de capacidade anual bruto (%)	Produção de energia líquida (TWh/ano)
5 a 10	19	62	84,7	63	87,1
10 a 20	61	60	262,4	62	269,5
20 a 35	33	59	141,0	60	144,8
35 a 50	4	58	18,1	60	18,6
5 a 50	117	60	506,2	62	520,0

Fonte: Adaptado de ADECE (2019).

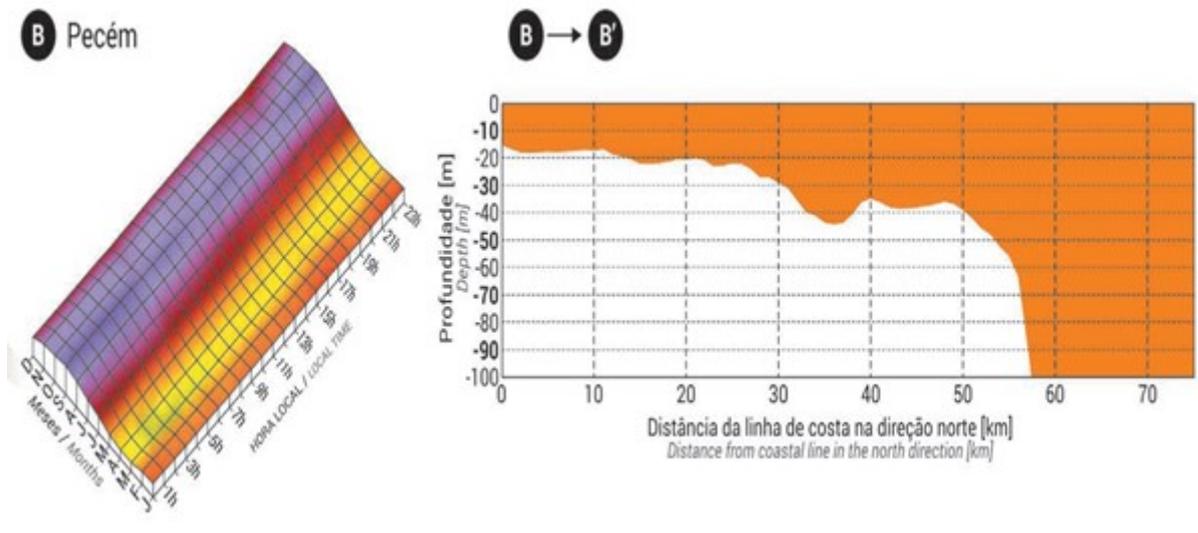
Os perfis batimétricos de três regiões (Camocim - AA'; Pecém - BB' e Icapuí - CC') ao longo da costa cearense revelaram que em algumas áreas a profundidade é menor que 50 metros por mais de 60 km a partir da costa. Considerando o mar territorial e a zona contígua, cerca de 44 km da linha da costa, estima-se um potencial de 117 GW de energia eólica *offshore* instalável (ADECE, 2019). A Figura 3 mostra a intensidade dos ventos para as regiões estudadas e a Figura 4 apresenta os perfis batimétricos da região do Pecém/Ce.

Figura 3 – Intensidade dos ventos do litoral cearense



Fonte: ADECE (2019).

Figura 4 – Perfil batimétrico de Pecém/Ce



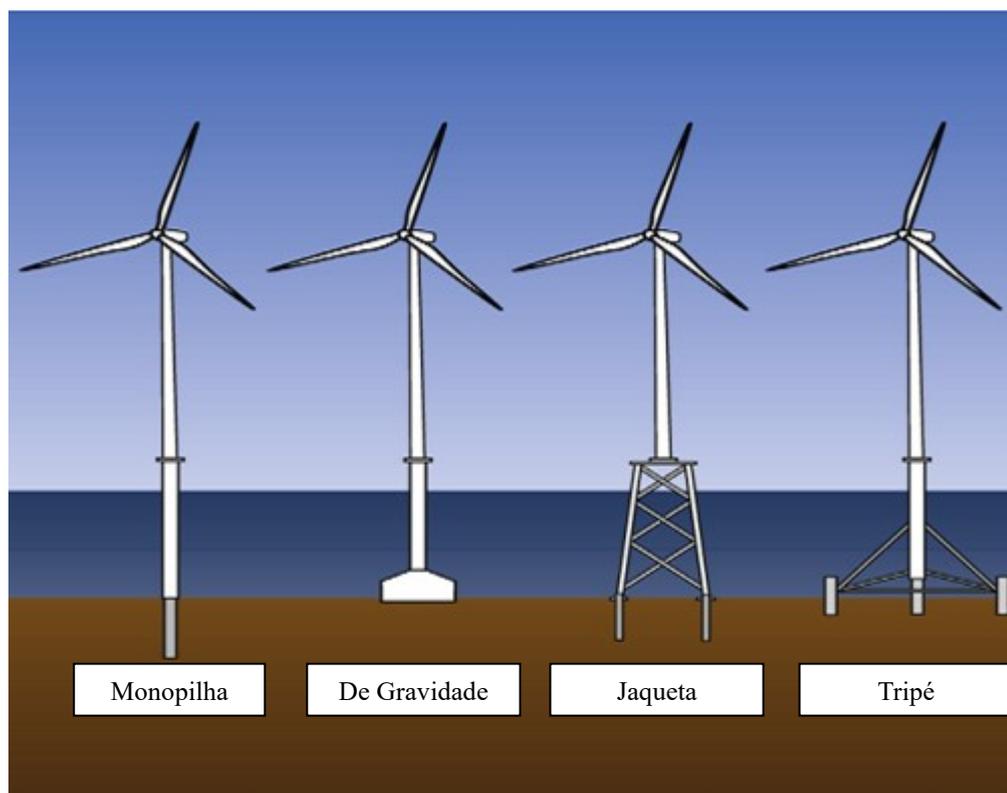
Fonte: ADECE (2019).

A implantação de parques eólicos *offshore* no Ceará requer investimentos na infraestrutura portuária e na conexão com o sistema elétrico. Com isso, o Complexo Industrial Portuário do Pecém tem a possibilidade de se tornar um polo eólico com a instalação de fábricas e bases para suporte logístico. Também é necessário garantir a capacidade de escoamento da energia gerada, o que pode impulsionar o desenvolvimento de novas linhas de transmissão e subestações.

2.1.3 Componentes e Materiais para Turbinas Eólicas Offshore

Em profundidades menores que 50 m, que são consideradas águas rasas, podem ser utilizadas as estruturas de suporte mostradas na Figura 5. A monopilha é o tipo de fundação mais utilizado para profundidades de 0 a 25 m em projetos eólicos *offshore*. Já uma fundação de gravidade é confeccionada em concreto armado e a ancoragem no fundo do mar é a partir do peso próprio, sendo que a mesma também é indicada para profundidades de 0 e 25 m. As fundações dos tipos Jaqueta e Tripé são geralmente usadas em profundidades de 20 a 50 m e são similares àquelas utilizadas em plataformas *offshore* de petróleo (Koh e Ng, 2016).

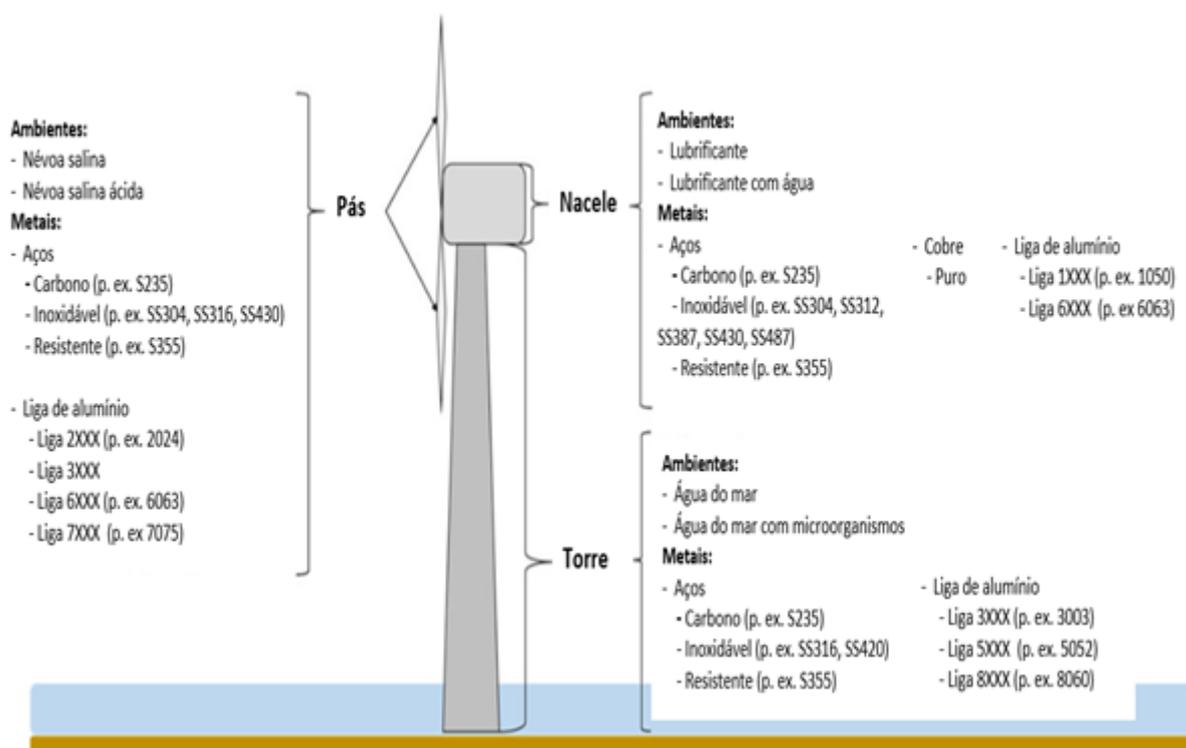
Figura 5 – Principais tipos de fundações de turbinas eólicas *offshore*



Fonte: Adaptado de Koh e NG (2016).

Uma turbina eólica *offshore* pode ser composta por diversos materiais, incluindo ligas metálicas, compósitos, polímeros e concreto. No entanto, como pode ser observado na Figura 6, a maior parte da estrutura é constituída por componentes metálicos, que são selecionados de acordo com o tamanho e a função turbina (Ahuir *et al.*, 2019).

Figura 6 – Ambientes, componentes e materiais metálicos indicados para uma turbina eólica *offshore*



Fonte: Adaptado de Ahuir (2019).

Os tipos de aço comumente utilizados para a fundação e torre das turbinas eólicas *offshore* são os aços estruturais, mais especificamente os aços mais resistentes a intempéries. A norma BS EN10025 (2019) classifica diferentes tipos de aço, como S235, S275, S355, S420, S690 e S890, de acordo com sua resistência ao escoamento. Enfocando para o aço S355, com tensão de escoamento mínima de 355 Mpa, como o aço estrutural mais utilizado para projetos de estruturas de turbinas eólicas *offshore* (Igwemezie *et al.*, 2018).

O aço S355 apresenta propriedades que o tornam o material de destaque durante a seleção para aplicação em estruturas em alto mar, como alta resistência, plasticidade, resistência ao impacto, entre outras (Dejun e Jing, 2017).

2.1.4 Corrosão no ambiente marinho

A exposição ao ambiente marinho representa um grande desafio para a construção e durabilidade das estruturas *offshore*. As plataformas são projetadas para uma vida útil de pelo menos 25 anos, no entanto, as propriedades químicas do meio de imersão, ou seja, a água do mar, exercem uma influência significativa nos processos de corrosão dos metais (Kirchgeorg *et al.*, 2018).

A água do mar é altamente corrosiva em comparação com a água potável. Parâmetros como a salinidade, a concentração de oxigênio, o pH (que varia de 7,8 a 8,3 na água do mar) e a temperatura afetam os processos de corrosão (Price e Figueira, 2017).

Para Momber (2010), existem diferentes tipos de corrosão que podem ocorrer em estruturas *offshore*. A corrosão uniforme, também conhecida como corrosão generalizada, é o tipo mais comum, onde a superfície metálica é corroída de forma uniforme. A corrosão por pite ocorre quando pequenas áreas da superfície metálica são atacadas, formando pequenos orifícios. A corrosão em frestas ocorre em áreas confinadas, como juntas e fendas, onde a água pode ficar estagnada. A corrosão galvânica acontece quando dois metais diferentes estão em contato com um eletrólito, como a água do mar, resultando em corrosão acelerada de um dos metais. E a corrosão por erosão ocorre devido ao impacto de partículas sólidas transportadas pela água do mar, especialmente em áreas expostas a fortes correntes.

Além disso, as ondas e o vento também podem desempenhar um papel na deterioração das estruturas *offshore*. Eles podem iniciar rachaduras por corrosão sob tensão, onde a combinação de tensão mecânica e corrosão leva à formação de trincas. A fadiga por corrosão ocorre quando a estrutura é submetida a ciclos repetitivos de carga e descarga, combinados com a ação corrosiva do ambiente marinho (Adedipe *et al.*, 2016).

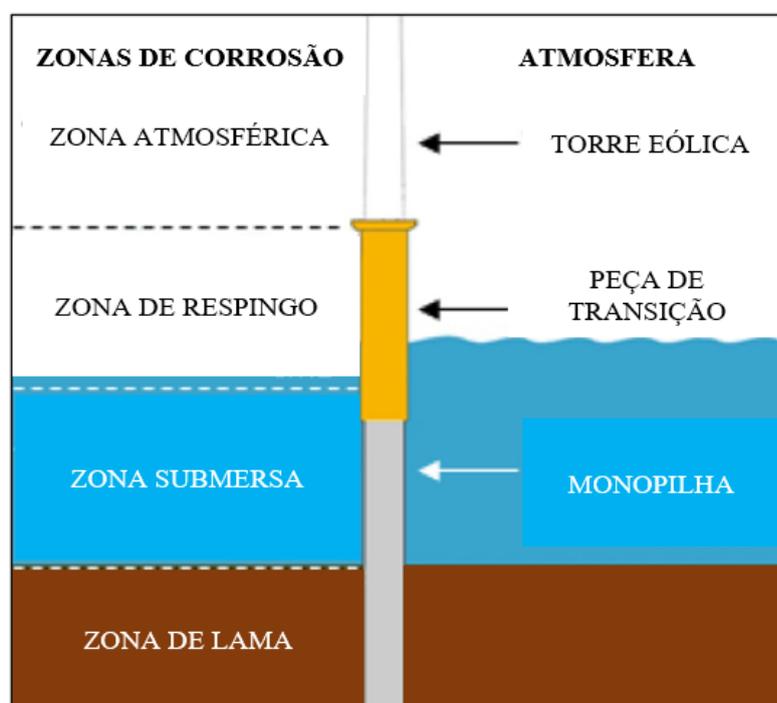
Devido a esses diferentes tipos de corrosão e às condições ambientais adversas, é essencial adotar medidas adequadas de proteção contra a corrosão ao projetar e construir estruturas *offshore*. Isso pode incluir o uso de revestimentos protetores, como tintas anticorrosivas, e proteção catódica, como ânodos de sacrifício. A seleção dos materiais adequados também é crucial, optando por ligas de aço resistentes à corrosão ou outras alternativas, como compósitos de fibra de carbono (Momber e Marquardt, 2018).

Ademais, a inspeção regular e a manutenção das estruturas ao longo de sua vida útil são fundamentais para garantir sua integridade e segurança. O monitoramento da

corrosão e a implementação de ações corretivas oportunas são essenciais para prolongar a vida útil das estruturas *offshore*.

Conforme a Figura 7, a corrosão nas estruturas *offshore* pode ocorrer em diferentes zonas: zona atmosférica; área de respingo; zona submersa; e zona de lama (em contato com o solo).

Figura 7 – Zonas de corrosão em ambiente marinho



Fonte: Adaptado de Kirchgeorg (2018)

A manutenção das estruturas é um desafio devido às restrições de acesso e à complexidade da evolução da corrosão (Dong *et al.*, 2017). Para Khodabux *et al.* (2020), um dos principais problemas relacionados à corrosão nas estruturas é a corrosão na seção interna das monopilhas. A falta de compartimentos totalmente selados e vedações herméticas adequadas nas plataformas permite a entrada de oxigênio, promovendo a corrosão no interior das estruturas. A troca de água dentro da coluna das monopilhas, devido às marés, cria áreas molhadas e imersas que agravam o processo corrosivo.

Vários autores estudaram o comportamento do aço carbono S355 exposto em água do mar natural e sintética. Zhu *et al.* (2022) investigaram a taxa de corrosão, a

morfologia, os produtos de corrosão e as propriedades eletroquímicas através de simulações da atmosfera marinha. O estudo de Khodabux *et al.* (2020) consistiu em um experimento de campo com a imersão de corpos de prova do aço S355 em ambiente marinho durante 111 dias para posterior análise dos efeitos da corrosão, através da determinação da taxa de corrosão e caracterização dos produtos de corrosão. Gkatzogiannis *et al.* (2019) fizeram uma correlação entre métodos desenvolvidos em laboratório e condições marinhas reais para análise da corrosão, enfocando na influência da corrosão em relação a resistência à fadiga.

2.2 Corrosão

2.2.1 Conceitos

O processo de corrosão refere-se à deterioração de um material, comumente metálico, devido à ação química ou eletroquímica do ambiente em que está inserido. Embora o termo corrosão possa ser usado de forma mais ampla para descrever a degradação de outros materiais, como plásticos, concreto e madeira, é mais frequentemente associado à degradação de materiais metálicos (Gentil, 2011).

A corrosão metálica ocorre quando o metal reage com o meio ambiente, resultando em perda de massa, fragilização e mudanças nas propriedades físicas e mecânicas do material. Geralmente, a corrosão envolve uma reação eletroquímica entre o metal, o eletrólito (como a água) e outros fatores ambientais, como oxigênio, temperatura, pH e concentração de íons (Nunes, 2007).

A compreensão e o controle da corrosão são de grande importância em diversos setores, como engenharia, indústria, construção naval, petróleo e gás, garantindo a durabilidade, a segurança e a integridade dos materiais e estruturas em ambientes desafiadores.

De acordo com Nunes (2007) o processo de corrosão pode ocorrer por meio de dois mecanismos principais. O primeiro mecanismo é através da corrosão química, na qual ocorre devido a reações químicas diretas entre o metal e o ambiente corrosivo, acontecendo geralmente de maneira uniforme. Já o segundo mecanismo é o de corrosão eletroquímica, no qual o metal atua como um eletrodo em um circuito eletroquímico.

Gentil (2011) reforça que a corrosão em ambientes marinhos, especialmente em estruturas de aço, é um processo complexo influenciado por várias interações entre o ambiente marinho e a matriz metálica. Além dos fatores físicos e biológicos, os fatores

químicos também desempenham um papel importante na corrosão em água do mar. Os fatores químicos que afetam a corrosão em água do mar, de acordo com Rérolle *et al.* (2012) e Zakowski *et al.* (2014), incluem:

- Gases Dissolvidos: A presença de gases dissolvidos, como dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio (O_2), podem acelerar a corrosão em ambientes marinhos. O CO_2 dissolvido na água forma ácido carbônico, que pode aumentar a acidez e a agressividade do ambiente corrosivo. O oxigênio dissolvido desempenha um papel crucial na corrosão eletroquímica, atuando como o oxidante na reação anódica.
- pH: Embora o pH da água do mar não seja o fator de maior influência na ação corrosiva, ele ainda pode desempenhar um papel na corrosão. A água do mar geralmente possui um pH ligeiramente alcalino, na faixa de 7,8 a 8,3. Variações significativas no pH podem afetar a taxa de corrosão e a forma como os produtos de corrosão se formam e se aderem à superfície metálica.
- Temperatura: O aumento da temperatura da água do mar não apenas acelera a difusão dos íons corrosivos, mas também pode aumentar a quantidade de sais dissolvidos, tornando o eletrólito mais agressivo e intensificando o processo de corrosão nas estruturas metálicas expostas.
- Salinidade: A alta salinidade da água do mar a torna um eletrólito forte, o que significa que possui uma alta condutividade elétrica. Isso facilita os processos eletroquímicos envolvidos na corrosão. A presença de íons na água do mar, como cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}), também pode acelerar a corrosão e influenciar o tipo e a taxa de corrosão que ocorrem.
- Incrustação: O acúmulo de depósitos na superfície de um material, como microrganismos, algas, moluscos, sedimentos e outros organismos marinhos, podem conter sais, minerais e outras substâncias que retêm água e criam um ambiente propício para a corrosão, devido a diferença de concentração de oxigênio entre os microambientes e a água circundante. Com o tempo, a corrosão compromete a integridade estrutural do material, podendo levar a falhas e danos significativos.

É importante ressaltar que a salinidade da água do mar é geralmente constante nos oceanos, mas pode variar devido a fatores como evaporação, influência de rios e correntes

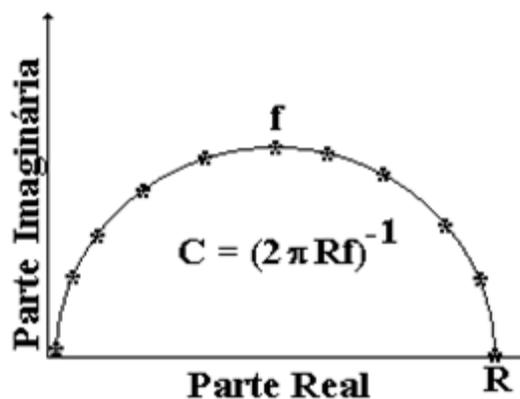
oceânicas (Zhang e Yan, 2012; Da-Allada *et al.*, 2013). Essas variações locais na salinidade podem afetar a agressividade do ambiente corrosivo e a taxa de corrosão em estruturas *offshore* (Laque, 1975). Se a salinidade aumenta, a corrosividade da água diminui, devido a diminuição da solubilidade do oxigênio (Zakowski *et al.*, 2014). Ressaltando que, a dissolução de oxigênio também é influenciada pela temperatura, pela pressão atmosférica e pela presença de atividade biológica, como deposição de produtos de corrosão, incrustações e contaminação da água (Liu *et al.* 2013).

2.2.2 Técnicas para o estudo da corrosão

2.2.2.1 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

Através da análise dos dados obtidos por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) é possível obter informações sobre o processo de corrosão de um material (Wolyneec, 2003). Um parâmetro importante obtido a partir da análise da impedância é a resistência (R), que é usada para avaliar o processo de deterioração do metal. Uma das formas de representação gráfica da impedância é pelo diagrama de Nyquist, que é composto por um eixo imaginário (parte imaginária da impedância) representado no eixo vertical e um eixo real (parte resistiva da impedância) representado no eixo horizontal, como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama de Nyquist



Fonte: WOLYNEC (2003).

A resistência medida no diagrama de Nyquist está relacionada à resistência à polarização (R_p) da interface metal/solução, que pode ser interpretada em termos da taxa de

transferência de elétrons na interface e fornece informações sobre a velocidade da corrosão e a resposta do sistema ao estímulo eletroquímico. Essa resistência é obtida a partir da interseção da extrapolação do semiarco capacitivo com o eixo das abscissas. A magnitude dessa resistência está relacionada ao diâmetro do semiarco. Quanto maior o diâmetro do semiarco, maior é a resistência à transferência de carga, indicando uma melhor capacidade do filme de passivação em proteger a superfície metálica contra a corrosão. Ou seja, o valor de R_p é inversamente proporcional à velocidade de corrosão do material. Isso significa que um valor maior de R_p indica uma menor velocidade de corrosão, enquanto um valor menor de R_p está associado a uma maior velocidade de corrosão (Kelly *et al.*, 2002).

O filme de passivação é uma camada fina e aderente que se forma na superfície do aço, atuando como uma barreira protetora e impedindo a corrosão do aço subjacente pela solução corrosiva. A resistência à transferência de carga está diretamente relacionada à integridade e eficiência desse filme de passivação (Gentil, 2011).

Gamassa *et al.* (2015) investigaram o comportamento de três aços S235, S275 e S355 em condições atmosféricas simuladas em uma câmara de exposição utilizando água destilada e solução de NaCl, comparando a proporção de área enferrujada e não enferrujada. Os resultados indicam que os aços S355 e S235 têm resistência à corrosão aproximadas, enquanto a do aço S275 apresentou uma resistência muito maior, quando comparados. Esta resistência mais alta do aço S275 está associada a maior presença de cromo na sua composição.

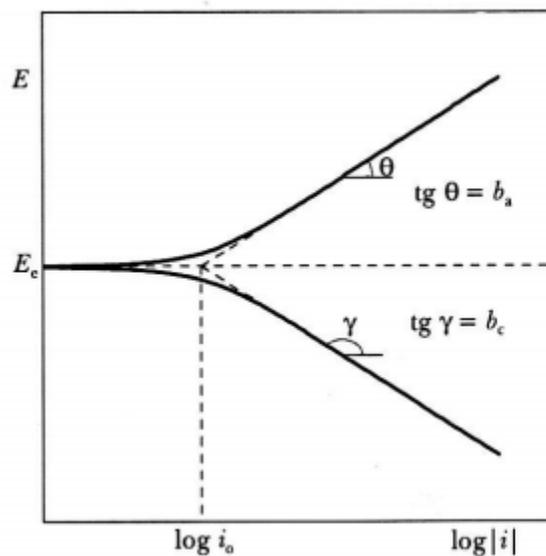
Dejun e Haixiang (2020) avaliaram o aço estrutural S355, considerando a superfície com e sem revestimento e seus desempenhos de corrosão eletroquímica em soluções de 3,5% NaCl, H_2SO_4 0,1 M e NaOH 0,1 M. A resistência à polarização R_p do revestimento por pulverização térmica a laser em solução de NaOH 0,1 M foi a mais alta entre os três tipos de soluções, apresentando a maior resistência à corrosão eletroquímica.

HE *et al.* (2019) estudaram a microestrutura, a corrosão por imersão e o desgaste corrosivo do aço S355 imerso por 192h em solução 3,5% NaCl, realizando testes com o substrato natural e com revestimentos. A interação entre a corrosão e o desgaste ocorreu através de abrasão acelerada e decorrente corrosão no substrato.

2.2.2.2 Polarização Linear

No processo de polarização eletroquímica, para cada potencial aplicado a um eletrodo, está associada uma densidade de corrente resultante. Essa relação entre potencial e densidade de corrente é representada pelas curvas de polarização, nas quais a representação mais comum é a curva de Tafel, que mostra a relação entre o potencial (E) e o logaritmo da densidade de corrente (i) (Wolyneec, 2003). Na curva de polarização da Figura 9, são observados dois ramos principais: o ramo anódico e o ramo catódico. O ramo anódico é associado a densidades de corrente positivas, enquanto o ramo catódico é associado a densidades de corrente negativas. No potencial de equilíbrio, a densidade de corrente é nula, indicando que não há transferência de elétrons entre o eletrodo e a solução. Nesse ponto, as reações anódicas e catódicas estão balanceadas e não ocorre corrosão significativa (Gentil, 2011).

Figura 9 – Curvas de polarização



Fonte: WOLYNEC (2003)

2.2.2.3 Espectroscopia Mössbauer e Difração de Raios-X

A espectroscopia Mössbauer é uma técnica não destrutiva utilizada para identificar e medir a fração de cada óxido presente na ferrugem. Essa técnica requer a obtenção de espectros a fim de analisar as propriedades magnéticas dos óxidos de ferro

(Dickson e Berry, 1986). A presença de um ordenamento magnético nos óxidos de ferro resulta em um sexteto nos espectros Mössbauer, enquanto a ausência de ordenamento magnético leva à forma de um dubleto. Para diferenciar estas situações, torna-se necessário obter espectros Mössbauer aplicando um campo magnético ou em temperaturas mais amenas (Cook, 1986).

Através da técnica da Difração de Raios-X é feita a análise de uma estrutura cristalina a longa distância, possibilitando a determinação de parâmetros de rede, tamanho de grão, análise quantitativa de fases e avaliação do grau de cristalinidade (Azaroff, 1968). Os produtos de corrosão podem ser identificados utilizando uma faixa de 20 a 120°, mas geralmente a faixa de 10 a 60° já é suficiente (Carmona, 2005).

Em suas pesquisas, Jaén *et al.* (2012), Antunes *et al.* (2014), Morcillo (2015) e Zuh *et al.* (2022) indicam e utilizam as técnicas de Difração de Raios-X e espectroscopia Mössbauer para caracterização de produtos de corrosão de amostras de aço.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Para a realização dos ensaios foram utilizadas amostras de aço carbono S355. A composição química deste material (% massa) foi caracterizada por espectrômetro de emissão óptica, conforme está mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química (% massa) do aço S355

Aço	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	N
S355	0,16	0,18	1,40	0,022	0,007	0,043	0,02	0,003	0,035	0,003	0,02	0,01	0,005

Fonte: Autoria própria.

3.2 Preparação dos Corpos de Prova

Para os ensaios de perda de massa conduzidos em temperatura ambiente ($\approx 27\text{ }^{\circ}\text{C}$), os corpos de prova foram cortados em formato retangular com dimensões de 25 x 50 x 6 mm. Como pode ser observado na Figura 10.a), um furo com 6 mm de diâmetro foi feito próximo a uma das bordas para passagem de um fio de nylon, com o intuito de deixar a amostra suspensa na solução de trabalho. Antes dos experimentos, cada corpo de prova foi lixado em uma politriz até a lixa de 600, seguida de uma limpeza por imersão do corpo de prova com acetona em banho ultrassônico por 1 minuto.

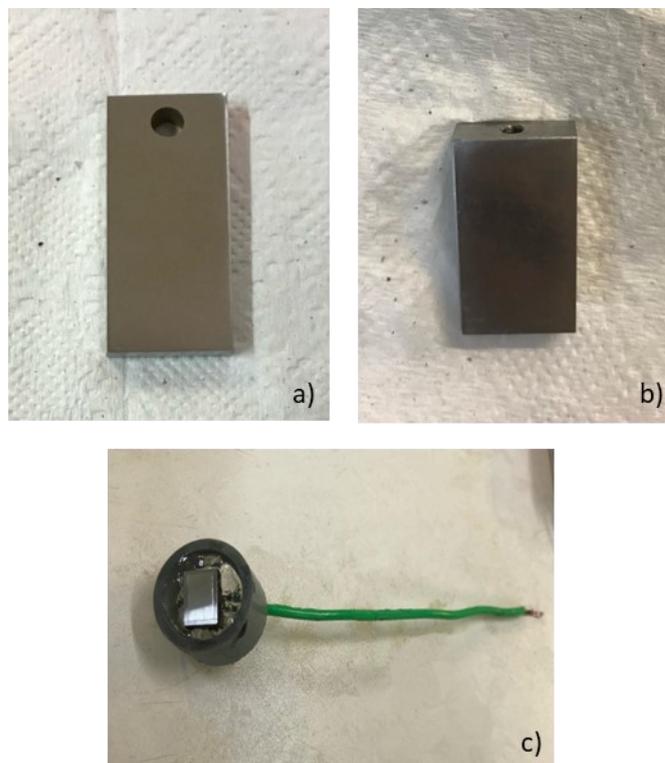
Para o ensaio de perda de massa em autoclave, os corpos de prova foram cortados em formato retangular com dimensões de 15 x 25 x 6 mm. Para conectar-se a haste suporte do equipamento, um furo rosqueado foi feito em uma das faces, como mostra a Figura 10.b). Os corpos de prova foram lixados em uma politriz até a lixa de 600, e limpos por imersão com acetona em banho ultrassônico por 1 minuto.

Os corpos de prova, para os ensaios eletroquímicos, foram confeccionados em formato retangular com área exposta de aproximadamente 1cm^2 e foram embutidos em resina epóxi, conforme a Figura 10.c). O contato elétrico com o eletrodo foi feito por um fio de cobre conectado na amostra. Apenas uma das faces da amostra ficou exposta ao eletrólito durante o ensaio.

Após a etapa de embutimento e antes de cada experimento, os corpos de prova foram lixados com lixas d'água de 120, 220, 320, 400 e 600. Em seguida foram lavados com

água destilada e álcool, e secados com jato de ar quente. Por fim, foi passado esmalte na interface eletrodo/resina para minimizar o efeito de corrosão por frestas nas bordas do corpo de prova.

Figura 10 – Formato dos corpos de prova do aço S355 para os seus respectivos ensaios: a) Ensaio conduzido em temperatura ambiente do laboratório; b) Ensaio em autoclave; c) Testes eletroquímicos



Fonte: Autoria própria.

3.3 Solução de trabalho

Os testes de corrosão foram feitos em água do mar natural. As amostras de água do mar foram coletadas na costa litorânea na região da Prainha no município de Aquiraz/CE (região metropolitana de Fortaleza/CE). A coleta das amostras de água foi sempre na mesma localidade. E para evitar contaminações, as amostras foram coletadas e armazenadas em recipientes de plástico fechados, sendo encaminhadas imediatamente para realização dos experimentos. Foi realizada a caracterização físico-química da água por meio da determinação do pH e da condutividade elétrica, com valores de 8,08 e 54,92 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente.

3.4 Ensaios de Perda de Massa

Antes do teste de imersão, as amostras foram pesadas numa balança analítica com precisão de 0,0001 g. Os ensaios foram realizados em triplicata e a perda de massa foi obtida pela média desses três valores. O volume da solução de teste foi considerado de acordo com a norma ASTM G31-72 (2004) e a taxa de corrosão foi avaliada segundo a norma ASTM G1 (2004).

Para o primeiro ensaio gravimétrico foram montados dois sistemas em recipientes com volume útil de 4 litros. Os ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente do laboratório e as amostras foram retiradas após 24 horas e 45 dias de exposição.

A escolha temporal para o ensaio de 45 dias de imersão foi baseada na obtenção de resultados que contemplariam tanto a determinação da taxa de corrosão por um período de tempo mais longo, como resultariam em uma maior formação de produto na superfície para as caracterizações que seriam conduzidas em outras técnicas. Alguns autores como, por exemplo, Kumar *et al.* (2023) e Vieira (2013) utilizam essa faixa de tempo de imersão nos seus estudos.

Para o ensaio em autoclave, foi usado um volume de 2,5 litros e os parâmetros estabelecidos para o ensaio estão presentes na Tabela 3. Os ensaios foram conduzidos em 24 horas com o intuito de avaliar a taxa de corrosão nesse período mais agressivo, que é o primeiro dia de imersão, na qual o corpo de prova está totalmente exposto ao eletrólito e em algumas condições que simulam o ambiente marinho. Em paralelo, como relatado nos parágrafos anteriores, também foi realizado um ensaio em sistema com água do mar em condição ambiente, para verificar se a taxa de corrosão diferiu muito em comparação com as condições controladas do autoclave.

Tabela 3 – Parâmetros do ensaio de imersão em autoclave

Parâmetros do Ensaio de Imersão em Autoclave	
Temperatura (°C)	29
Pressão (bar)	3
Oxigênio Dissolvido (ppm)	7

Fonte: Autoria própria.

Em relação a escolha dos parâmetros de temperatura, oxigênio dissolvido e pressão, foi considerada uma profundidade de 20 m, condizendo com a aplicação de fundações do tipo monopilha, que podem ser de 0 a 25 m conforme Igwemezie *et al.* (2018).

Em acordo com a Lei de Pascal, para lagos e oceanos, a pressão do fluido pode ser calculada através da soma da pressão atmosférica e do peso da coluna d'água (White, 2018). Logo, para uma profundidade de 20 m a pressão aproximada é de 3 bar (Tabela 3).

Os parâmetros de temperatura e oxigênio dissolvido da Tabela 3 foram baseados em dados coletados em janeiro de 2020 para "Elaboração de Estudos de uma Planta de Dessalinização de Água Marinha para a Região Metropolitana de Fortaleza" (CAGECE, 2020). Foram realizadas análises tanto na superfície como no fundo (aproximadamente 20 m) e os resultados das análises mostraram um padrão homogêneo dos parâmetros ao longo da profundidade.

Após o período de imersão, os corpos de prova foram submetidos a um processo de limpeza e decapagem para retirada dos produtos de corrosão que estavam depositados na superfície do aço. Inicialmente os produtos de corrosão não aderentes foram retirados com estilete, enquanto a remoção dos produtos aderentes foi feita usando a solução de Clark (1L de HCl + 20g de Sb₂O₃ + 50g de SnCl₂) por 30 segundos. Em seguida, as amostras foram limpas com água destilada e álcool, e por fim pesadas em balança analítica. Este procedimento foi repetido até não ser mais observado a variação da massa do corpo de prova.

A Equação 1 representa a determinação da taxa de corrosão (TC) segundo a norma ASTM G1 (2004), em que TC é a taxa de corrosão, k é uma constante que equivale a $8,76 \times 10^4$ mm/ano, w é perda de massa em g, A é a área geométrica do corpo de prova em cm², t é o tempo de exposição em h, e μ é a massa específica do metal em g/cm³ (aço carbono = 7,86 g/cm³).

$$TC = \frac{kw}{At\mu} \quad (1)$$

A categoria de corrosividade do processo de corrosão do aço carbono S355 em água do mar foi classificada de acordo com a norma NACE RP0775 (2005). A Tabela 4 lista a classificação da categoria de corrosividade em relação à da taxa de corrosão média de um material metálico.

Tabela 4 – Classificação do processo corrosivo

Taxa de corrosão (mm/ano)	Categoria
< 0,025	Baixa
0,025 - 0,12	Moderada
0,13 - 0,25	Alta
> 0,25	Severa

Fonte: Adaptado de NACE RP0775 (2005).

3.5 Técnicas Microscópicas

Para a análise da morfologia da superfície após os ensaios de corrosão foi usado um Microscópio Óptico Leica DMI 3000 M, obtendo-se imagens com aumentos de 10x através do software de edição *Leica Applications Suite V4.9*.

3.6 Medições Eletroquímicas

Os testes eletroquímicos de corrosão em água do mar foram realizados com uma célula convencional de três eletrodos: prata/cloreto de prata ($\text{Ag(s)}|\text{AgCl(s)}|\text{Cl}^-(\text{aq.}, \text{KCl saturado})$) foi usado como eletrodo da referência, o aço S355 foi o eletrodo de trabalho (amostras de análise) e uma folha platina de 2 cm^2 foi usada como contra eletrodo. Foi utilizado para aquisição e análise dos dados eletroquímicos um potenciostato (AUTOLAB PGSTAT302N) controlado por um computador, utilizando o software Nova 11.1.

Os testes eletroquímicos de corrosão foram feitos usando as seguintes técnicas: monitoramento do potencial de circuito aberto (PCA), polarização potenciodinâmica (PP) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). As medidas de PCA e EIE foram realizadas nos seguintes tempos de imersão: 2h, 4h, 6h, 8h, 24h, 36h, 72h, 96h de imersão no eletrólito.

Os testes de espectroscopia de impedância eletroquímica foram realizados em potencial de circuito aberto, em uma faixa de frequência de 10 kHz a 10 mHz com uma amplitude de 10 mV rms. As curvas de polarização foram obtidas após 1 hora do tempo de imersão, na faixa de potencial de -200 a +200 mV em relação ao potencial de circuito aberto a uma taxa de varredura de 1 mV/s.

3.7 Técnica Espectroscópica

Para a identificação dos produtos de corrosão foi utilizada a técnica de espectroscopia de Mössbauer. As amostras utilizadas para esta análise são os produtos de corrosão retirados com estilete dos corpos de prova após ensaio de imersão.

As medidas de espectroscopia Mössbauer foram obtidas no modo de transmissão à temperatura ambiente em um espectrômetro Mössbauer da marca SEE Co, modelo W302 e uma fonte radioativa de ^{57}Co difundida em uma matriz de Ródio, que possibilita o estudo de

materiais a base de ferro. As amostras em pó foram colocadas em um porta amostras de acrílico. A calibração foi feita com a utilização de ferro metálico (α -Fe) e os dados foram ajustados no programa NORMOS-90 pelo método dos mínimos quadrados.

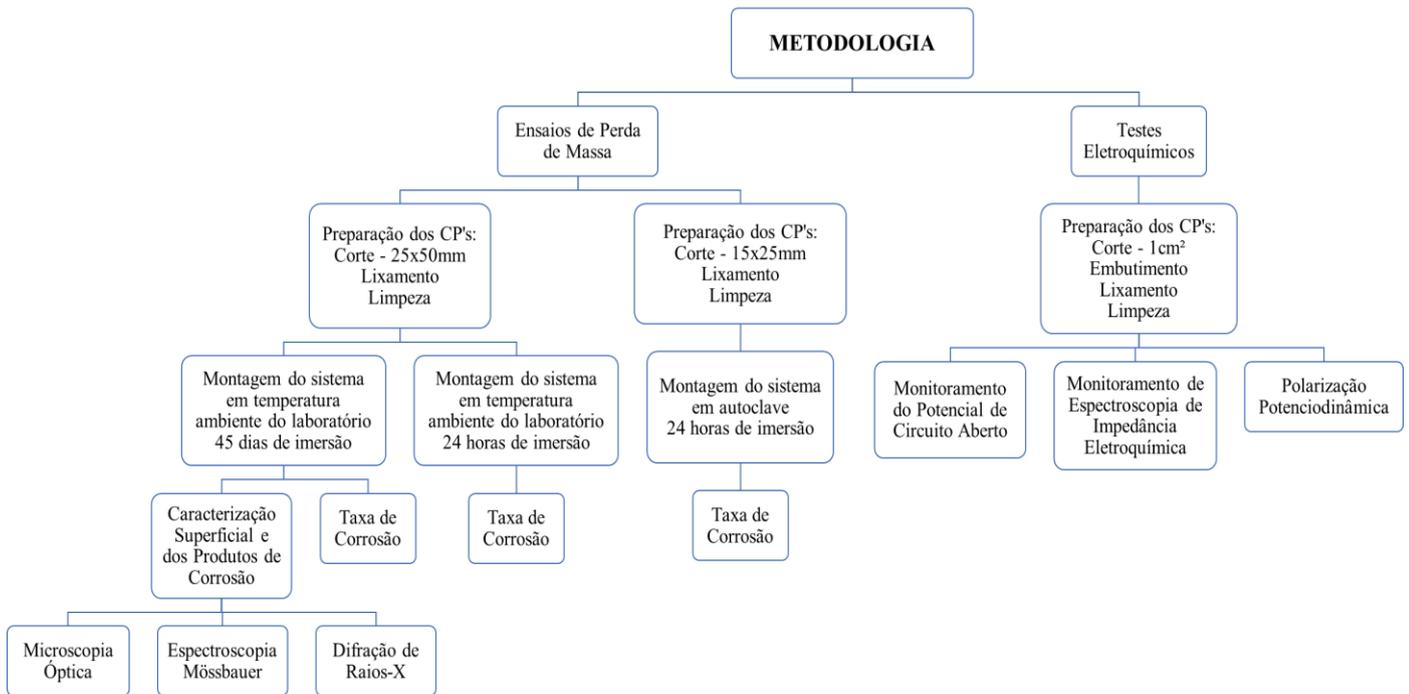
3.8 Difração de Raios-X

As medidas de Difração de Raios-X das amostras foram obtidas usando um difratômetro da marca Panalytical modelo X-Pert, utilizando uma fonte de radiação de cobalto $\text{CoK}\alpha$ ($\lambda = 0,179$ nm), com ângulo variando de 10 a 100° (2θ), realizadas à temperatura ambiente. Para a identificação das fases utilizou-se o programa X-Pert HighScore Plus.

3.9 Fluxograma

Um fluxograma, que compõe a metodologia, foi elaborado para auxiliar no entendimento dos processos experimentais realizados neste trabalho. O mesmo pode ser verificado na Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perda de Massa/Taxa de Corrosão

A partir do ensaio de perda de massa, a TC para o aço S355 foi determinada usando a Equação 1. Os valores obtidos nos ensaios e a classificação da corrosividade, de acordo com a NACE RP0775 (2005), podem ser observados na Tabela 5:

Tabela 5 – Classificação da agressividade do processo corrosivo do aço S355 de acordo com o tempo e as condições de imersão

Sistema	Tempo de Imersão	Taxa de corrosão (mm/ano)	Desvio Padrão (mm/ano)	Categoria
Ensaio conduzido em temperatura ambiente do laboratório	24h	0,274	0,00146	Severa
	45 dias	0,057	0,00094	Moderada
Ensaio em Autoclave	24h	0,385	0,00101	Severa

Fonte: Autoria própria.

A água do mar apresenta alta salinidade, o que a torna um eletrólito forte e um meio muito agressivo. O aço estudado, no primeiro dia de imersão, tanto em condição ambiente como em autoclave apresentou uma corrosividade severa. Nesse contato inicial do eletrólito com o substrato a troca de elétrons é facilitada e a perda de massa é maior. Com o decorrer do tempo de imersão, a corrosividade pôde ser classificada como moderada, pois o produto de corrosão se deposita na superfície da amostra, que passa a atuar como uma barreira que leva à redução da cinética do processo (Gemelli, 2001).

Fazendo um comparativo entre os dois ensaios realizados em 24 horas, pôde-se constatar uma diferença no resultado da TC, no qual o teste realizado em autoclave apresentou um valor mais alto, refletindo uma maior agressividade do sistema, devido à pressão, a temperatura e oxigênio dissolvido.

Muitos pesquisadores já obtiveram dados de taxa de corrosão em ambientes marinhos, em diferentes períodos de imersão, com valores que variam de 0,03 a 0,55 mm/ano (Kirk e Pikul, 2009; Valdez-Salas *et al.*, 2016; Melchers e Jeffrey, 2014; Khodabux *et al.* 2020). Comparando então os resultados obtidos, os valores estão numa faixa condizente com os encontrados na literatura.

A DNV J101 (2014), apresenta requisitos e orientações para o controle de corrosão de fundações de turbinas eólicas *offshore* de acordo com as zonas de corrosão. Na zona submersa, a utilização de revestimento na superfície da monopilha é opcional, mas é necessário possuir uma proteção catódica (PC) ou tolerância à corrosão. Esta tolerância à corrosão é um acréscimo na espessura da parede, considerado durante o projeto, para compensar qualquer redução na espessura ocasionada por corrosão durante a vida útil do projeto.

Para a zona submersa, a tolerância de corrosão para peças estruturais deverá ser de no mínimo 1,0 mm e essa especificação em projeto será baseada na taxa de corrosão mínima de 0,10 mm/ano (DNV J101, 2014). Para o presente estudo, observa-se uma taxa de corrosão em 45 dias de imersão com valor de 0,057 mm/ano. Esse resultado pode influenciar na escolha do sistema de proteção da fundação, pois é um valor inferior a 0,10 mm/ano, podendo ser então desconsiderada a tolerância à corrosão e o aumento da espessura do aço. Logo, a indicação é optar por projetos que utilizem o sistema de PC.

Na maior parte dos projetos, a PC de estruturas *offshore* é realizada por ânodos galvânicos (PCAG) (NACE, 2015). A DNV-RP-B401 (2021) fornece requisitos e diretrizes para projeto de PC, fabricação e instalação de ânodos galvânicos. Algumas das indicações são que a PCAG deve utilizar materiais à base de alumínio ou zinco e que o sistema de PC tenha uma vida útil de projeto no mínimo igual à vida útil de projeto da estrutura, incluindo o período desde a instalação.

Em muitos projetos atuais, alguns proprietários de parques eólicos estão optando por soluções mais seguras para a proteção contra corrosão de novas fundações, incluindo tanto a tolerância à corrosão e a PC, como os revestimentos protetores. É notória a importância de mais pesquisas e análises sobre as soluções que otimizem o custo de novos projetos, reduzindo a quantidade de sistemas de proteção utilizados (NACE 2015).

4.2 Técnicas Microscópicas

Para avaliação da morfologia na superfície das amostras após o ensaio de imersão, foram obtidas imagens usando um microscópio óptico. A imagem micrográfica da superfície do aço S355, antes da exposição ao meio corrosivo, pode ser observada na Figura 12. Esta Figura mostra uma superfície não corroída e com riscos superficiais que estão relacionados ao lixamento da superfície que é feito previamente à imersão.

Figura 12 – Microscopia óptica do corpo de prova antes da exposição ao meio corrosivo



Fonte: Autoria própria.

Fotos dos corpos de prova antes e depois da decapagem, no qual foram removidos os produtos de corrosão após 45 dias de exposição em água do mar, estão mostrados na Figura 13, enquanto na Figura 14, é mostrada uma imagem, obtida pelo microscópio óptico, da superfície do corpo de prova após limpeza e decapagem.

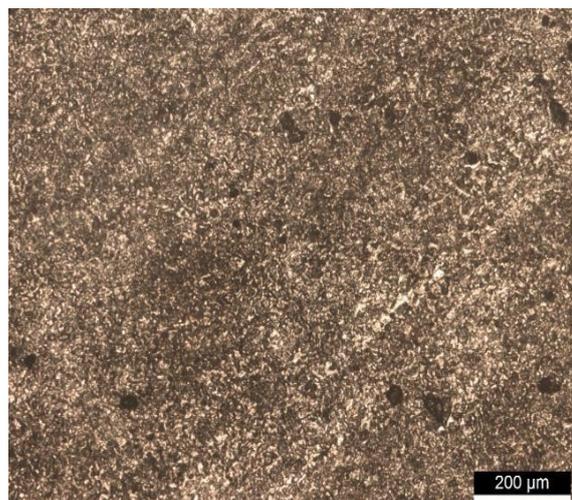
Na Figura 13.a), pode ser observado o produto de corrosão na superfície da amostra. Nesse período de exposição de 45 dias, o ataque avançou de forma generalizada. Para a determinação da TC o produto foi removido, como mostra a Figura 13.b). A Figura 14 mostra a imagem da morfologia superficial do corpo de prova através de microscopia, podendo ser identificada a presença de corrosão uniforme em toda a superfície e corrosão localizada distribuída em alguns pontos (Gentil, 2011).

Figura 13 – Corpo de prova do Aço S355 após 45 dias de imersão em água do mar: a) Antes da limpeza e decapagem; b) Após limpeza e decapagem



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 – Microscopia óptica do corpo de prova após remoção do produto de corrosão



Fonte: Autoria própria.

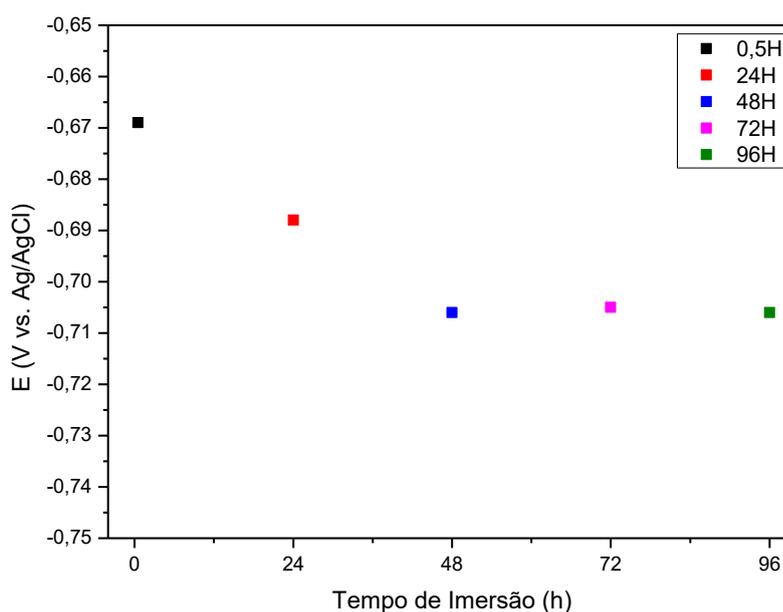
4.3 Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto

A Figura 15 mostra um gráfico de potencial de circuito aberto em função do tempo de imersão para aço carbono S355 exposto em água do mar por 96 horas.

No tempo inicial de ensaio foi observado um potencial de $-0,669$ V. No decorrer do tempo de imersão, os valores dos potenciais tornaram-se mais negativos, o que indica que o material está sofrendo corrosão, pois de acordo com Wolynec (2003) durante o processo corrosivo, ocorre alteração na dupla camada elétrica e no valor do potencial.

Após 48h de imersão em água do mar, nota-se uma estabilização do potencial de circuito aberto, o que é relacionado à deposição de produtos de corrosão na superfície do aço, que leva a formação de um filme que atua como barreira protetora do aço contra a corrosão. Isto acontece porque a formação de um filme de óxidos ou hidróxidos na superfície metálica leva o bloqueio dos sítios ativos na superfície que estava exposta ao meio corrosivo e, conseqüentemente, levando a diminuição da cinética da corrosão.

Figura 15 – Potencial de circuito aberto para o aço S355 imerso em água do mar por 96 horas

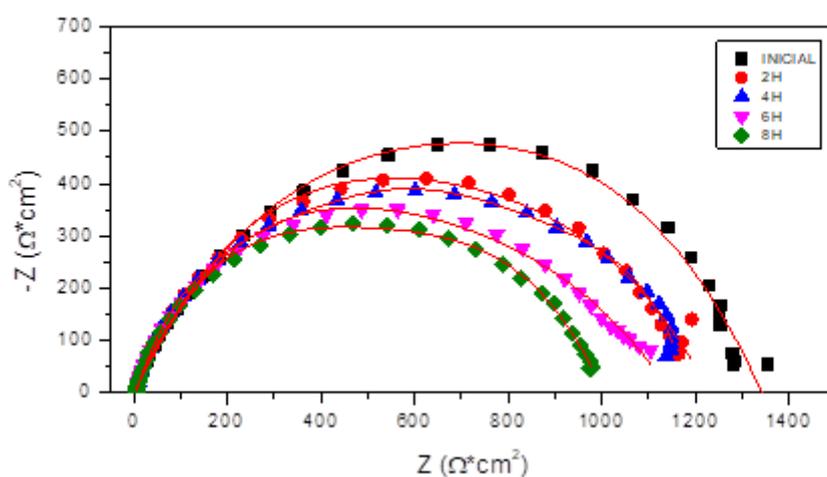


Fonte: Autoria própria.

4.4 Monitoramento de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

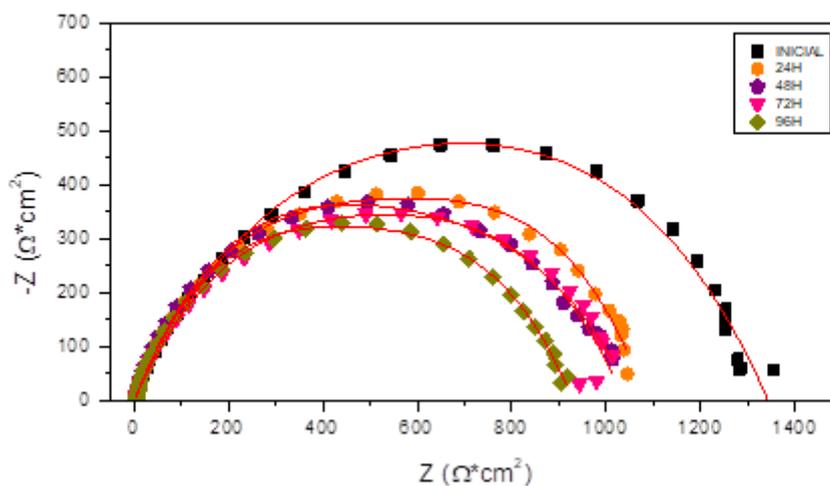
Na Figura 16 os diagramas de Nyquist são apresentados para o primeiro dia de monitoramento, com medições a cada 2 horas num período de 8 horas, e a Figura 17 mostra os diagramas de Nyquist após os tempos de imersão de 24h, 48h, 72h e 96h. Os diagramas mostram a evolução do comportamento do processo de corrosão para o aço S355 exposto a água do mar.

Figura 16 – Diagrama de Nyquist para o aço S355 imerso em água do mar por 8 horas



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 – Diagrama de Nyquist para o aço S355 imerso em água do mar por 96 horas



Fonte: Autoria própria.

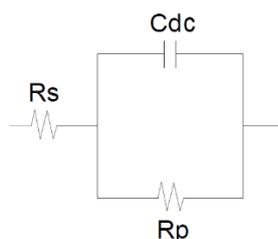
Como mostrado nas Figuras 16 e 17, foram obtidos arcos que possuem comportamento tipicamente capacitivo ao longo de praticamente toda a faixa de frequência. Comparando as curvas de EIE da Figura 16 obtidas no primeiro dia de monitoramento, há uma diminuição do diâmetro dos arcos capacitivos ao longo do tempo de exposição em meio corrosivo. Esta diminuição está associada a ocorrência de um processo corrosivo na superfície do metal e, conseqüentemente, uma redução da resistência à polarização, indicando que a transferência de elétrons para a camada elétrica na interface metal-eletrólito foi facilitada.

Comparando a curva de EIE para 8h na Figura 16 com as curvas de EIE para 24h, 48h e 72h na Figura 17, pode-se observar um aumento do diâmetro dos arcos capacitivos após 8h de imersão. O que pode estar associado à formação de uma camada de produto de corrosão na superfície do metal, funcionando como uma barreira e dificultando o acesso do eletrólito ao substrato. Observa-se também, que a curva de EIE para 96h, volta a reduzir o diâmetro do arco capacitivo, pois o filme formado na superfície não é compacto, logo sua porosidade favorece novamente a permeação do eletrólito e continuação do ataque corrosivo.

De acordo com Luo (2014), com o aumento do tempo de exposição, os depósitos formados na superfície tendem a reduzir o efeito do oxigênio dissolvido na corrosão. Essa camada, por não ser totalmente aderente, pode se deslocar, expondo áreas pequenas a um maior contato com o eletrólito, conseqüentemente com maior presença de oxigênio e/ou alteração do pH, resultando em corrosão localizada.

Os diagramas de EIE podem ser representados por meio de circuitos equivalentes. As linhas sólidas vermelhas constantes nos diagramas das Figuras 16 e 17 representam o ajuste das curvas obtidas pelo circuito equivalente. Dentro desses circuitos, a resistência R_s denota a resistência da solução, a R_p representa a resistência à polarização e a C_{dc} a capacitância da dupla camada elétrica entre a solução e a interface do substrato. A representação esquemática dos elementos de circuito que compõem o sistema em estudo está apresentada na Figura 18. Para uma análise quantitativa dos dados obtidos pela EIE, a Tabela 6 apresenta os parâmetros de circuito equivalente ajustados.

Figura 18 – Desenho ilustrativo do circuito equivalente utilizado para modelar a interface



Fonte: Autoria própria.

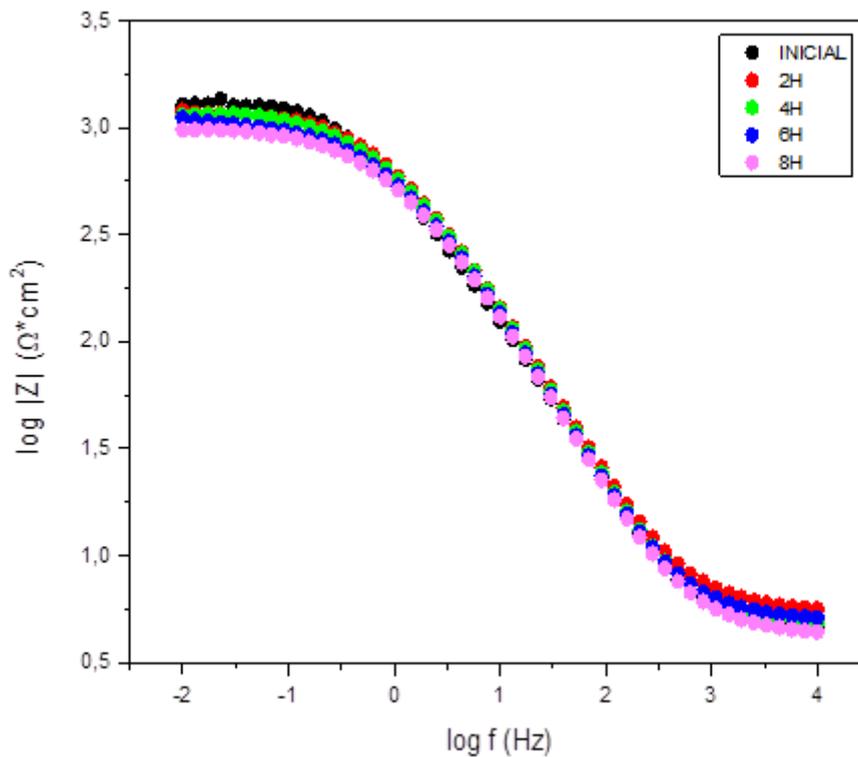
Tabela 6 – Parâmetros do circuito equivalente para o processo de corrosão do aço S355 imerso em água do mar

Tempo de imersão	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	C_{dl} ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2$)
Inicial	4,52	1346,78	304,64
2h	4,30	1194,09	343,59
4h	4,63	1145,39	358,20
6h	4,86	1104,36	371,51
8h	4,21	999,134	410,64
24h	4,05	1044,77	392,70
48h	4,72	1013,74	533,53
72h	4,34	1012,93	533,96
96h	4,76	917,29	589,63

Fonte: Autoria própria.

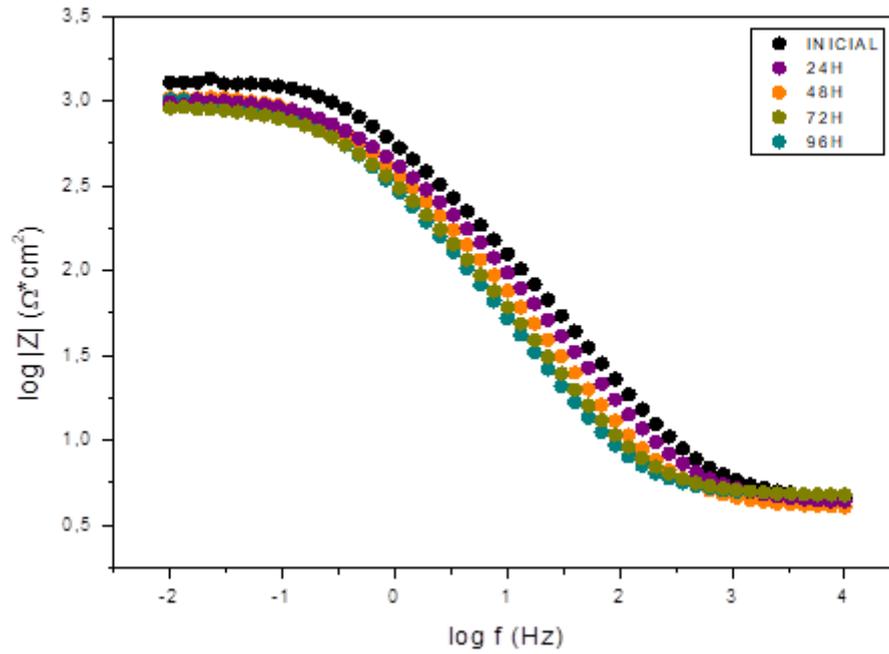
Os diagramas de Bode também foram obtidos para complementar o entendimento dos processos obtidos pelos diagramas de Nyquist.

Figura 19 – Gráfico de Bode ($\log f$ versus $\log |Z|$) para o aço S355 imerso em água do mar por 8 horas



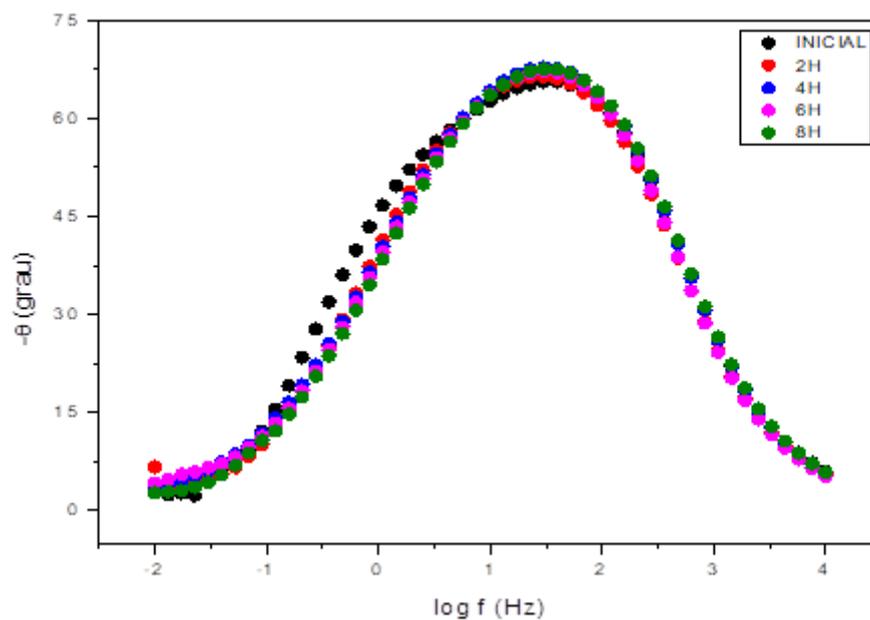
Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Gráfico de Bode (log f versus log |Z|) para o aço S355 imerso em água do mar por 96 horas



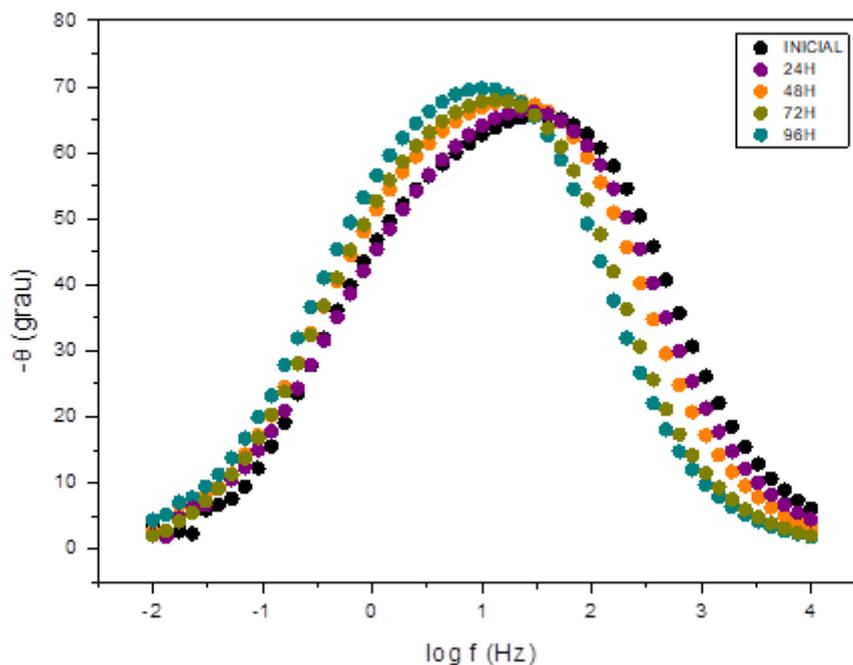
Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Gráfico de Bode (log f versus defasagem) para o aço S355 imerso em água do mar por 8 horas



Fonte: Autoria própria.

Figura 22 – Gráfico de Bode (log f versus defasagem) para o aço S355 imerso em água do mar por 96 horas



Fonte: Autoria própria.

Analisando os diagramas de Bode (Figuras 19 e 20) pode ser observado que nas regiões de maior frequência os valores de impedância são muito baixos e próximos, indicando que houve pouca mudança no valor da resistência da solução em função do tempo de imersão. Este comportamento pode estar associado à alta condutividade do meio, o que não significa uma alta ação corrosiva, pois em regiões de alta frequência não é possível fazer associações com a formação de depósitos na superfície do metal, que podem ser solúveis ou insolúveis no meio.

Em baixas frequências ocorreu uma diminuição no módulo de impedância com o aumento do tempo de exposição ao eletrólito, podendo ser mais notório essa variação na Figura 20. A formação de produtos na superfície do metal dificulta o alcance do eletrólito. Com o tempo, houve o descolamento desses depósitos, expondo novamente partes da superfície ao eletrólito. E é essa formação contínua de camadas porosas que contribui para redução do módulo de impedância do sistema.

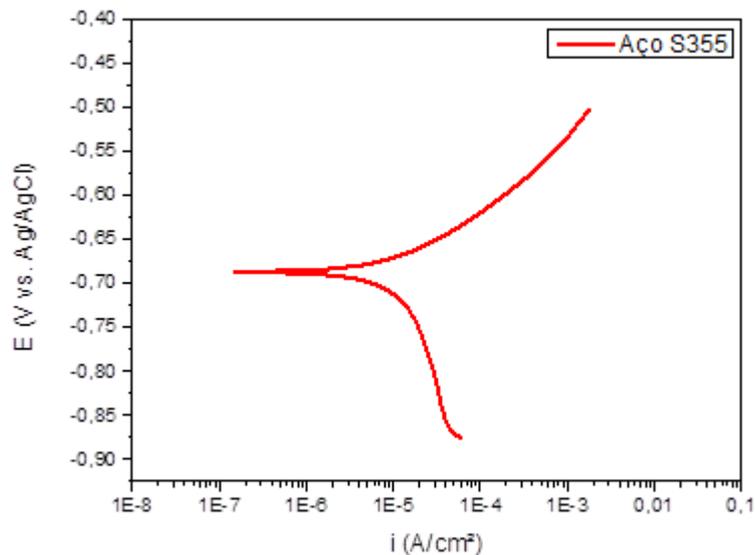
As figuras 21 e 22 mostram que em região de médias frequências há aumento no valor do ângulo de fase, o que reflete a troca de elétrons e intensificação do desempenho dos

componentes capacitivos do sistema. De acordo com o aumento do tempo de exposição, a permeação pela camada porosa é mais acentuada.

4.5 Polarização Potenciodinâmica

A Figura 23 mostra o resultado da polarização potenciodinâmica para o aço S355 em água do mar, com o intuito de avaliar o mecanismo de corrosão.

Figura 23 – Curvas de polarização anódica e catódica para o aço S355 imerso em água do mar



Fonte: Autoria própria.

O ramo catódico da curva de polarização (valores mais negativos de potenciais) obtida para o aço S355 é caracterizado por uma curva que tende a um patamar de corrente que é atribuída a redução do oxigênio dissolvido no eletrolítico, sendo esta a reação catódica do processo de corrosão do aço S355. Já o ramo anódico (potenciais menos negativos) apresenta uma relação linear entre o potencial e o logaritmo da densidade de corrente, indicando que o aço S355 sofre corrosão ativa em água do mar, sem formação de um filme de passivação. A partir da extrapolação da linha reta do ramo anódico para o potencial de corrosão, foi possível calcular a densidade de corrente de corrosão (J_{corr}), que foi igual a $1,15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ e com o potencial de corrosão igual a $-0,688 \text{ V}$. Ahuir *et al.* (2019) apresentaram valores de limiar de corrosão para diferentes condições ambientais e materiais metálicos comumente usados na

estrutura de uma turbina eólica *offshore*. Para o aço S355 o valor limiar para o potencial é de $E \leq -0,68V$. De acordo com o resultado observado, o valor atende o parâmetro.

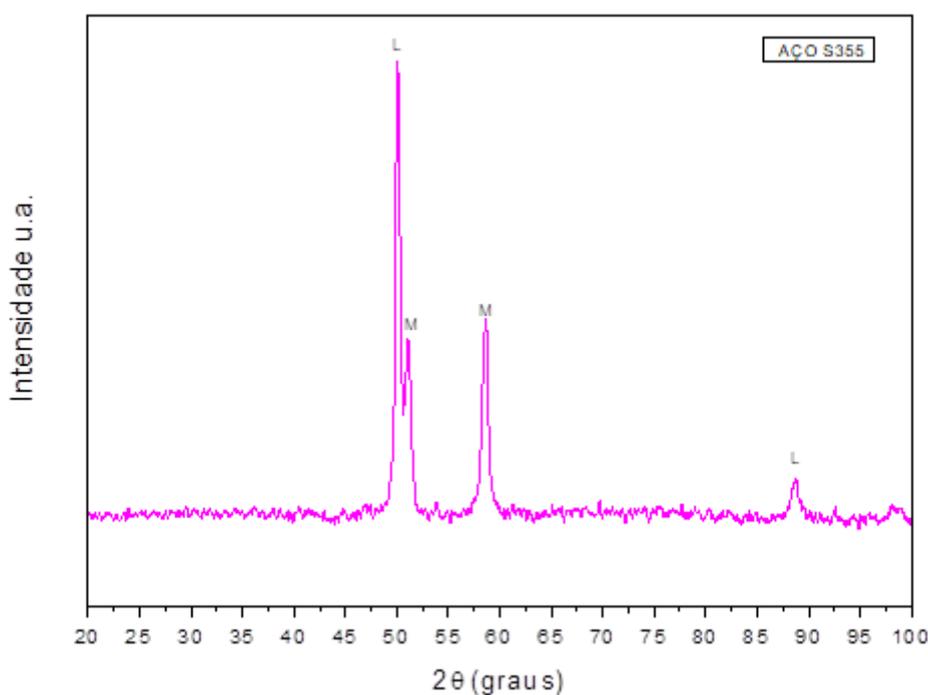
O aço estudado apresenta uma dissolução ativa, no qual pode ser observado que de acordo com o aumento do valor do potencial ocorre um aumento da densidade de corrente anódica.

4.6 Difração de Raios-X

Os produtos de corrosão do aço estudado foram determinados pela técnica de DRX. Os resultados indicaram a formação de óxidos e oxi-hidróxido de ferro. Essas fases consistem em lepidocrocita (γ -FeOOH) e magnetita (Fe_3O_4), e podem ser observados na Figura 24. Lembrando que, para o sistema Fe-H₂O o diagrama de Pourbaix compõe várias camadas de óxido, como a Lepidocrocita (γ -FeOOH), Magnetita (Fe_3O_4), Feroxita (δ -FeOOH), Goethita (α -FeOOH), Akaganeita (β -FeOOH) e Maghemita (γ -Fe₂O₃) (Pourbaix, 1974).

As amostras imersas em água do mar por 45 dias possuíam uma camada de corrosão alaranjada homogênea (lepidocrocita) que cobria a maior parte da superfície. Esta camada se desprendia facilmente revelando uma camada preta (magnetita).

Figura 24 – Difratoograma do produto de corrosão formado no aço S355 imerso em água do mar por 45 dias. M - Magnetita (Fe_3O_4); L - Lepidocrocita (γ -FeOOH)



Fonte: Autoria própria.

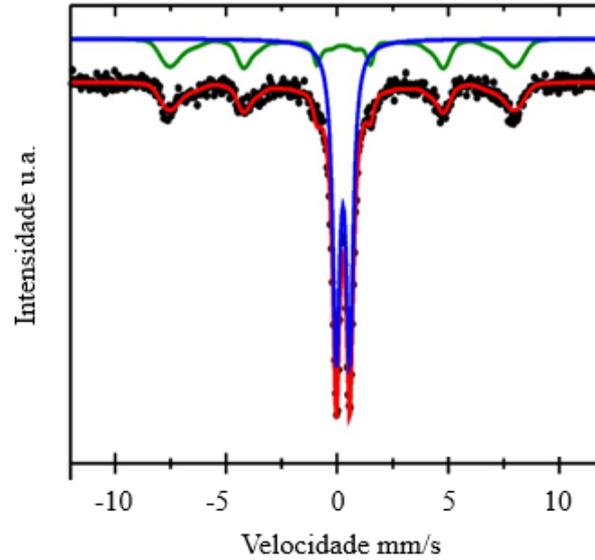
4.7 Espectroscopia Mössbauer

Para complementar a caracterização dos produtos de corrosão do aço S355 também foi utilizada a técnica de espectroscopia de Mössbauer. Os espectros Mössbauer das amostras (Figura 25) foram ajustados como um sexteto ferromagnético (linha verde) e um dubleto paramagnético (linha azul), que foi atribuído a lepidocrocita (γ -FeOOH). A análise dos produtos de corrosão em pó raspados da superfície da amostra apresenta um resultado que envolve tanto os produtos mais externos (lepidocrocita), como os mais internos (magnetita).

Adicionalmente, para um melhor entendimento e diferenciação das fases ferromagnética e paramagnética é apresentado na Figura 26 os espectros Mössbauer para as amostras coletadas no fundo do recipiente, ou seja, o produto de corrosão que se despreendeu da superfície do aço e decantou para o fundo do recipiente. Na figura 26, os espectros foram ajustados como um dubleto paramagnético, refletindo apenas a presença da lepidocrocita.

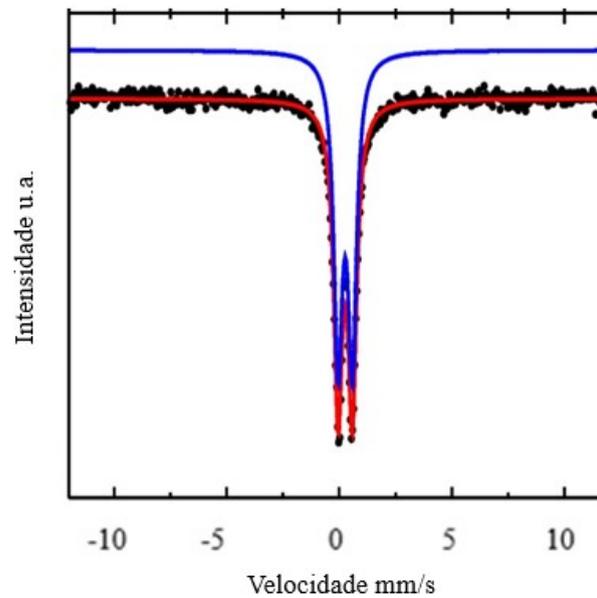
Na literatura, muitos autores, Oh *et al.* (2000), Cook *et al.* (1986), Marco *et al.* (2000), Carmona (2005), Jaén *et al.* (2012), Antunes *et al.* (2014) e Morcillo (2015), constataram que a lepidocrocita (γ -FeOOH) é a principal formação no estágio inicial de corrosão. Furet *et al.* (1990) caracterizaram produtos de corrosão do aço em diferentes períodos de exposição através de técnicas de difração de raios-X e espectroscopia Mössbauer. Os autores observaram na fase inicial que a lepidocrocita (γ -FeOOH) prevalece, e em maiores períodos de tempo ocorre uma redução da mesma e um aumento de goetita. Já a magnetita é geralmente detectada na parte interna da camada de ferrugem, na qual a concentração de oxigênio é pequena, sendo frequentemente encontradas em estudos em ambientes costeiros (Morcillo, 2015).

Figura 25 – Espectros Mössbauer para caracterização do produto de corrosão aço S355 imerso em água do mar por 45 dias: Produto formado na superfície do aço



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Espectros Mössbauer para caracterização do produto de corrosão aço S355 imerso em água do mar por 45 dias: Produto decantado no fundo do recipiente



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

A corrosividade do primeiro dia de imersão foi classificada como severa. Entretanto, com o decorrer do período de 45 dias de imersão a taxa de corrosão foi determinada e classificada como moderada. As imagens MO mostraram a presença de corrosão uniforme e localizada.

Durante a caracterização dos produtos de corrosão foram identificadas a lepidocrocita e a magnetita. Os produtos de corrosão na superfície dos materiais estão relacionados aos mecanismos de corrosão, indicando a presença de oxigênio no processo. A formação de espécies eletroquimicamente ativas, como a lepidocrocita, no depósito de ferrugem, contribui para as taxas de corrosão mais altas, principalmente no início da imersão.

A análise de espectroscopia de impedância eletroquímica do aço carbono em água do mar mostrou que houve uma redução dos arcos capacitivos em função do tempo de exposição, devido à ocorrência de corrosão e aderência de produto na superfície do metal.

As medidas eletroquímicas indicaram que os produtos de corrosão exibem características de proteção, pois quando o aço fica exposto por um maior período de tempo ocorre uma redução na cinética reacional de corrosão, mas isso não significa que o material corrói menos. Nos primeiros dias, ocorre uma corrosão acelerada, pois a superfície do metal encontra-se diretamente exposta ao meio agressivo. Após um período de tempo ocorre a formação de produtos de corrosão, que funcionam como uma barreira na superfície, reduzindo o processo corrosivo. Mas esse filme não é aderente e compacto, e então essa camada não é considerada passivadora.

De acordo com os resultados obtidos, para os projetos de fundações do tipo monopilha pode ser indicado o sistema de proteção catódica (PC). A escolha pela combinação do sistema de PC com o uso de revestimentos vai estar relacionada a intenção de reduzir a capacidade da PC. Da mesma forma que optar pela tolerância à corrosão e aumentar a espessura da parede seria uma solução reserva caso houvesse problemas técnicos nos sistemas de proteção convencionais e os mesmos parassem de funcionar.

A comparação de custos entre os sistemas de proteção depende da aplicação específica, das condições ambientais, da vida útil desejada e do orçamento disponível. A escolha por proteção catódica pode exigir investimentos iniciais significativos em equipamentos e manutenção periódica. No entanto, a proteção catódica pode ser mais econômica a longo prazo, pois ajuda a prolongar a vida útil da estrutura e pode evitar custos substanciais de reparo ou substituição. Em cenários onde o custo inicial é uma preocupação maior, a tolerância à corrosão

pode ser a opção mais viável.

Em muitos projetos de parques eólicos, os investidores estão optando por soluções mais seguras, incluindo tanto a tolerância à corrosão e a PC, como os revestimentos protetores. Mas o ideal é a busca por mais pesquisas e análises sobre as soluções que otimizem esses custos, reduzindo assim a quantidade de sistemas para mitigar a corrosão.

Como sugestões de pesquisas futuras pode ser indicado:

- Análise da resistência à corrosão em materiais que podem ser utilizados em outros componentes da turbina eólica, como a torre e pás;
- Monitoramento do material em maiores períodos de imersão para aumentar a confiança nos resultados;
- Análise da resistência à corrosão do aço com aplicação de revestimentos protetores;
- Investigação detalhada da influência da corrosão localizada.

REFERÊNCIAS

- ADEDIPE, O.; BRENNAN, F.; KOLIOS, A. Review of corrosion fatigue in offshore structures: present status and challenges in the offshore wind sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 61, p. 141–154, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116002252>. Acesso em: 21 jun. 2022.
- AHUIR, J. I. *et al.* Benchmarking parameters for remote electrochemical corrosion detection and monitoring of offshore wind turbine structures. **Wind Energy**, [S.L.], v. 22, p. 857–876, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/we.2324>. Acesso em: 22 jun. 2022.
- AHUIR, J. I. *et al.* Corrosion threshold data of metallic materials in various operating environment of offshore wind turbine parts (tower, foundation, and nacelle/gearbox). **Data in Brief**, [S.L.], v. 25, p. 1–16, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235234091930561X>. Acesso em: 21 jun. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G1-2004**: standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. *In*: ANNUAL Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G31-72-2004**: standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals. *In*: ANNUAL Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2004.
- ANTUNES, E. A. *et al.* Characterization of corrosion products on carbon steel exposed to natural weathering and to accelerated corrosion tests. **International Journal of Corrosion**, [S.L.], v. 2014, p. 1–9, 2014. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijc/2014/419570/>. Acesso em: 30 jun. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2020**. São Paulo, 2020. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/04/PT_Boletim-Anual-de-Geracao_2020.pdf. Acesso em: 01 ago. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2021**. São Paulo, 2021. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/ABEEOLICA_BOLETIMANUAL-2021_PORT.pdf. Acesso em: 03 ago. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2022**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.
- AZAROFF, L. V. **Elements of X-Ray crystallography**. Nova Iorque, McGraw-Hill Book Company, 1968.

AZEVEDO, S. S. P. *et al.* Assessment of offshore wind power potential along the Brazilian coast. **Energies**, [S.L.], v. 13, p. 1–24, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/10/2557>. Acesso em: 06 set. 2022.

BRITISH STANDARD. **BS EN 10025-2:2019**. Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels. Reino Unido: BSI Standards Limited, 2019.

CAMARGO, S.; ADECE; FIEC; SEBRAE; FUNCEME; SEINFRA; SEMACE; SEMA; SINDIENERGIA. **Atlas eólico e solar**: Ceará. Curitiba; Fortaleza, 2019. Disponível em: <https://www.adece.ce.gov.br/atlas-eolico-e-solar/>. Acesso em: 09 nov. 2021.

CARMONA, L. **Influência dos elementos de liga na corrosão de aços patináveis**. 2005. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas do potencial eólico brasileiro**: Simulações 2013. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: http://www.observatoriodaenergiaeolica.ufc.br/wp-content/uploads/2019/07/NovoAtlasdoPotencialEolico_BrasileiroSIM_2013-compressed.pdf/. Acesso em: 11 nov. 2021.

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ. **Projeto referencial**: Planta de dessalinização de Fortaleza. Fortaleza, 2020. Disponível em: https://www.cagece.com.br/wp-content/uploads/PDF/EditaisContratacoes/PPP1/DocumentosdeLicita%C3%A7%C3%A3o/AnexosdoTermodeRefer%C3%Aancia/ANEXO-2B-PROJETO-REFERENCIAL-Ver_Licita%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 06 mai. 2022.

COOK, D.C. Conversion electron and X-ray Mössbauer studies of the corrosion products and surface modifications in stainless and weathering steels. **Hyperfine Interactions**, [S.L.], v. 28, p. 891–894, 1986. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/bf02061587>. Acesso em: 03 mai. 2021.

DA-ALLADA, C. Y. *et al.* Seasonal mixed-layer salinity balance in the tropical Atlantic Ocean: mean state and seasonal cycle. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [S.L.], v. 118, p. 332–345, 2013. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JC008357>. Acesso em: 13 nov. 2022.

DEJUN, K.; HAIXIANG, C. Electrochemical corrosion performances of laser thermal sprayed amorphous Al–Ti–Ni coatings in marine environment. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, [S.L.], v. 24/1, p. 140–149, 2020. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ACMM-09-2019-2184/full/html>. Acesso em: 13 mai. 2022.

DICKSON, D. P. E.; BERRY, F. J. **Mössbauer spectroscopy**. Cambridge University Press, 1986.

DNV-OS-J101. **Design of offshore wind turbine structures**. Oslo, 2014.

DNV-RP-B401. **Cathodic protection design**. Oslo, 2021. Disponível em: <https://www.dnv.com/oilgas/download/dnv-rp-b401-cathodic-protection-design.html>. Acesso em: 15 mar. 2023.

DONG, X.H.; YUAN, T.J.; MA, R.-H. Corrosion Mechanism on Offshore Wind Turbine Blade in Salt Fog Environment. **Applied mechanics and materials**, [S.L.], v. 432, p. 258–262, 2013. Disponível em: <https://www.scientific.net/AMM.432.258>. Acesso em: 02 out. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Roadmap eólica offshore Brasil**: perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima. Distrito Federal, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf. Acesso em: 10 nov. 2022.

ESTEBAN, M.D. *et al.* Why offshore wind energy? **Renew. Energy**, v. 36, p. 444–450, 2011. Disponível em: https://oa.upm.es/6735/2/INVE_MEM_2010_74444.pdf. Acesso em: 15 nov. 2021.

FURET, N. R. *et al.* Corrosion rate determination using Fe Mossbauer spectra of corrosion products of steel. **Hyperfine Interactions**, [S.L.], v. 57, p. 1833–1838, 1990. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02405730>. Acesso em: 12 mai. 2022.

GAMASSA, D. *et al.* Investigations on the corrosion of constructional steels in different aqueous and simulated atmospheric environments. **Chemical Society of Ethiopia**, Makhanda/Grahamstown, [S.L.], v. 29, p. 299–310, 2015. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/bcse/article/view/119310> Acesso em: 22 mai. 2021.

GEMELLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2011.

GKATZOGIANNIS, S. *et al.* Correlation of laboratory and real marine corrosion for the investigation of corrosion fatigue behaviour of steel components. **International Journal of Fatigue**, [S.L.], v. 126, p. 90–102, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014211231930163X>. Acesso em: 18 mai. 2022.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2019**. 2020. Disponível em: https://gwec.net/wp-content/uploads/2020/08/Annual-Wind-Report_2019_digital_final_2r.pdf. Acesso em: 02 jun. 2022.

HE, X. *et al.* Microstructure and corrosion behaviours of composite coatings on S355 offshore steel prepared by laser cladding combined with micro-arc oxidation. **Applied Surface Science**, [S.L.], v. 497, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433219325000>. Acesso em: 19 out. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE. **Termo de referência** - Estudo de impacto ambiental e relatório de impacto ambiental EIA/Rima. Distrito Federal, 2019. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/publicacoes/2020-11-TR_CEM.pdf. Acesso em: 09 jun. 2022.

IGWEMEZIE, V.; MEHMANPARAST, A.; KOLIOS, A. Materials selection for XL wind turbine support structures: A corrosion-fatigue perspective. **Marine Structures**, [S.L.], v. 61, p. 381–397, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833917304859>. Acesso em: 21 jul. 2022.

JAÉN, J. A.; IGLESIAS, J.; HERNÁNDEZ, C. Analysis of short-term steel corrosion products formed in tropical marine environments of Panama. **International Journal of Corrosion**, [S.L.], v. 2012, p. 1–11, 2012. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijc/2012/162729/>. Acesso em: 11 out. 2022.

JING, Z.; DEJUN, K. Microstructures and salt spray corrosion behaviors of cold sprayed al coatings on s355 steel in marine environment. **Surface Review and Letters**, [S.L.], v. 25, p. 1–10, 2018. Disponível em: <https://worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218625X18501159>. Acesso em: 14 ago. 2021.

KANG, J.; SOBRAL, J.; SOARES C. Review of condition-based maintenance strategies for offshore wind energy. **Journal of Marine Science and Application**, [S.L.], v. 18, p. 1–16, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11804-019-00080-y>. Acesso em: 03 jul. 2021.

KELLY, R. G. *et al.* **Electrochemical techniques in corrosion science and engineering**. CRC Press, Nova Iorque, EUA, 438p., 2002. ISBN 9780824799175.

KHODABUX, W.; CAUSON, P.; BRENNAN, F. Profiling corrosion rates for offshore wind turbines with depth in the North Sea. **Energies**, [S.L.], v. 13, p. 1–19, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/10/2518>. Acesso em: 06 mar. 2021.

KIRK, W.; PIKUL, S. Seawater corrosivity around the world: results from three years of testing. **Corrosion in Natural Waters**. In: ANNUAL Book of ASTM Standards. Philadelphia, p. 2–36, 1990.

KOH, J. H.; NG, E. Y. K. Downwind offshore wind turbines: opportunities, trends and technical challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 54, p. 797–808, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115011752>. Acesso em: 16 mai. 2022.

KUMAR, V.; TIWARI, S. K.; SHARMA, N. Mechanical and surface characterization of interstitial-free steel corroded under wet-dry salt spray and immersion conditions: A comparative study. **Materials and Corrosion**, [S.L.], v. 74, n. 9, p. 1289–1300, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/maco.202313792>. Acesso em: 15 jul. 2023.

LAQUE, F.L. **Marine corrosion**. Nova York, 1975.

LIU, H. *et al.* Effects of blending of desalinated and conventionally treated surface water on iron corrosion and its release from corroding surfaces and pre-existing scales. **Water Research**, [S.L.], v. 47, p. 3817–3826, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135413002765>. Acesso em: 12 abr. 2022.

LIU, Q.; SUN, Y; WU, M. Decision-making methodologies in offshore wind power investments: a review. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 295, n. 238., 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262100679X>. Acesso em: 15 abr. 2022.

LUO, J.S. Impact of marine fouling upon corrosion of carbon steel structures. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, [S.L.], v. 49, n. 2, p. 1–8, 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743278213Y.0000000127>. Acesso em: 15 nov. 2021.

MARCO, J. F. *et al.* Characterization of the corrosion products formed on carbon steel after exposure to the open atmosphere in the Antarctic and Easter Island. **Corrosion Science**, [S.L.], v. 42, p. 753–771, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X99000906>. Acesso em: 10 out. 2021.

MELCHERS, R. E.; JEFFREY, R. J., Corrosion of steel piling in seawater harbours. **Maritime Engineering**, [S.L.], v. 167, p. 159–172, 2014. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/maen.13.00011>. Acesso em: 12 out. 2021.

MOMBER, A.W. Corrosion and corrosion protection of support structures for offshore wind energy devices (OWEA). **Materials Corrosion**, [S.L.], v. 62, p. 391–404, 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/maco.201005691>. Acesso em: 08 out. 2021.

MOMBER, A.W.; MARQUARDT, T. Protective coatings for offshore wind energy devices (OWEAs): a review. **Journal of Coatings Technology and Research**, [S.L.], v. 15, p. 13–40, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11998-017-9979-5>. Acesso em: 20 out. 2021.

MORCILLO, M. *et al.* Marine atmospheric corrosion of carbon steels. **Revista de Metalurgia**, [S.L.], v. 51, p. 1–18, 2015. Disponível em: <https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1356/1461>. Acesso em: 13 out. 2021.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **RP0775-2005**: Preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations. *In*: NACE International. Houston, 2005.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **Corrosion protection of offshore wind foundations**. *In*: NACE International. Houston: 2015.

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

OH, S. J.; COOK, D. C; CARPIO, J. J., Characterization of the corrosion products formed on carbon steel in a marine environment. **Journal of the Korean Physical Society**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 106–110, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/yBycrMhgb464DjTps5q4NnR/?lang=en>. Acesso em: 23 mai. 2022.

PIMENTA, F.M. *et al.* Brazil offshore wind resources and atmospheric surface layer stability. **Energies**, [S.L.], v. 12, p. 1–21, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/21/4195>. Acesso em: 25 mar. 2023.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution**. Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1974.

PRICE, S.; FIGUEIRA, R. Corrosion protection systems and fatigue corrosion in offshore wind structures: current status and future perspectives. **Coatings**, [S.L.], v. 7, 1–25, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/7/2/25>. Acesso em: 05 abr. 2022.

REIS, M.L.; MAZETTO, B.M.; SILVA, E.C.M. Economic analysis for implantation of an offshore wind farm in the Brazilian coast. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S.L.], v. 43, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138820313837>. Acesso em: 12 abr. 2023.

RÉROLLE, V. M. C. *et al.* Seawater-pH measurements for ocean-acidification observations. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, [S.L.], v. 40, p. 146–157, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165993612002427>. Acesso em: 02 jun. 2022.

SCHAFFARCZYK, A. **Understanding wind power technology**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2014; ISBN 9781118647516.

VALDEZ-SALAS, B.; RAMIREZ, J.; ELIEZER, A.; SCHORR, M.; RAMOS, R.; SALINAS, R. Corrosion assessment of infrastructure assets in coastal seas. **Journal of Marine Engineering and Technology**, [S.L.], v. 15, p. 1–11, 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20464177.2016.1247635>. Acesso em: 22 jul. 2021.

VIEIRA, M. R. S. **Estudo dos processos de corrosão e biocorrosão causados por fluidos da indústria de petróleo**. 2013. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2013.

VILLACRESES, G. *et al.* Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 109, p. 275–286, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117302331>. Acesso em: 02 ago. 2022.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. Tradução: José Carlos Cesar Amorim, Nelson Manzanares Filho. 8 ed., Porto Alegre: AMGH, 2018.

WINDEUROPE. **Offshore wind in Europe** - Key trends and Statistics, 2018. Disponível em: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2017.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2022.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: EdUSP, 2003.

ZAKOWSKI, K.; NAROZNY, M.; DAROWICKI, K. Influence of water salinity on corrosion risk - The case of the southern Baltic Sea coast. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 186, p. 4871–4879, 2014. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4064120/>. Acesso em: 02 set. 2022.

ZHANG, Y.; YAN, D. Seasonal variability of salinity budget and water exchange in the northern Indian Ocean from HYCOM assimilation. **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, [S.L.], v. 30, p. 1082–1092, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257402865_Seasonal_variability_of_salinity_budget_and_water_exchange_in_the_northern_Indian_Ocean_from_HYCOM_assimilation. Acesso em: 12 jun. 2022.

ZHU, Q. *et al.* Corrosion behaviors of S355 steel under simulated tropical marine atmosphere conditions. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S.L.], v. 31, p. 10054–10062, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-022-07041-7>. Acesso em: 15 mar. 2023.