

**INSTITUTO FEDERAL  
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
Bahia

Campus  
Salvador

INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA  
CAMPUS SALVADOR  
DEPARTAMENTO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO TÉCNICO EM EDIFICAÇÕES

ARIEL CARVALHO ARAÚJO

**PROPOSTA DE AVALIAÇÃO QUALITATIVA PARA O MONITORAMENTO DO  
AEROSSOL MARINHO**

SALVADOR

2023

ARIEL CARVALHO ARAÚJO

**PROPOSTA DE AVALIAÇÃO QUALITATIVA PARA O MONITORAMENTO DO  
AEROSSOL MARINHO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Edificações do Campus Salvador do Instituto Federal da Bahia como requisito parcial para a obtenção do título de Técnico em Edificações.

Orientador: Prof. Dr. Elvio Antonino Guimarães

SALVADOR

2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS  
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

A174p Araújo, Ariel Carvalho

Proposta de avaliação qualitativa para o monitoramento do aerossol marinho / Ariel Carvalho Araújo; orientador Elvio Antonino Guimarães -- Salvador, 2023.

48 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Edificações) -- Instituto Federal da Bahia, 2023.

1. Patologias. 2. Aerossol marinho. 3. Monitoramento. I. Guimarães, Elvio Antonino, orient.  
II. TÍTULO.

CDU 661.42

## TERMO

ARIEL CARVALHO ARAÚJO

PROPOSTA DE AVALIAÇÃO QUALITATIVA PARA O MONITORAMENTO DO AEROSSOL MARINHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Técnico em Edificações e aprovado em sua forma final pelo Curso de Edificações.

Salvador, 30 de novembro de 2023.

Coordenação do Curso Banca examinadora

Prof. Dr. Elvio Antonino Guimarães, Orientador  
Instituto Federal de Educação ciência e Tecnologia da Bahia

Prof. Dr. Jenner Miranda de Carvalho, Instituto Federal da Bahia  
Instituto Federal de Educação ciência e Tecnologia da Bahia

Prof. Dr. Adriano Silva Fortes, Instituto Federal da Bahia  
Instituto Federal de Educação ciência e Tecnologia da Bahia



Documento assinado eletronicamente por **ELVIO ANTONINO GUIMARAES, Professor Efetivo**, em 14/12/2023, às 16:40, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **JENNER MIRANDA DE CARVALHO, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Câmpus Salvador**, em 14/12/2023, às 21:31, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO SILVA FORTES, Coordenador(a) do Curso de Edificações**, em 25/01/2024, às 16:45, conforme decreto nº 8.539/2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site [http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&acao\\_origem=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&acao_origem=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) informando o código verificador **3306646** e o código CRC **10221456**.

Aos meus pais, José e Luciene, pelo amor, ensinamentos e apoio incondicionais, em toda a minha trajetória de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Elvio Antonino Guimarães, que me ajudou no último minuto e me incentivou para a continuidade deste trabalho.

Aos meus pais, Prof. Dr. José Mário Araújo e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciene Santos Carvalho, que me auxiliaram durante a fase experimental do trabalho.

À Profa. Me. Michele dos Anjos Santana, pelos ensinamentos e assistência durante a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso.

À Carina Soares do Nascimento, do LCM/IFBA, pelas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

À Elias Silva dos Santos, do LAMUME/IF-UFBA, pelos experimentos de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS).

Ao Prof. Carlos Henrique Carvalho, do Departamento Acadêmico de Eletrônica do IFBA/SSA, pelo apoio com a confecção dos sensores.

À Profa. Dra. Rita Maria Weste Nano, do Departamento Acadêmico de Química do IFBA/SSA, pelas análises de condutividade elétrica.

À minha família, colegas, docentes e todas as pessoas que me apoiaram e contribuíram ao longo do Curso Técnico de Edificações.

Assim como a planta é o projeto de uma construção civil,  
o sonho é um projeto de construção da vida.

Wendel Henrique Ferreira

## RESUMO

O ataque químico a superfícies de fachadas e ao aço do concreto armado por cloretos é uma das causas de patologias em construções mais frequentes em regiões litorâneas, nas quais é elevada a concentração de sais nos depósitos produzidos por *spray* marinho. Como uma forma de auxiliar na prevenção dessas patologias, esse trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de sensor e sistema de monitoramento de acúmulo de depósitos salinos em superfícies de paredes de fachadas de construção. Baseando-se nas propriedades de moderada condutividade elétrica destes depósitos, sob a influência da umidade atmosférica, um sensor com substrato de fenolite e trilhas condutoras de cobre foi fabricado e testado em ambiente externo, exposto à atmosfera, para verificação de sua viabilidade de aplicação no monitoramento proposto. Além disso, amostras de depósitos salinos, coletadas da cortina de vidro e da janela de um apartamento próximo à orla marítima de Salvador, foram analisadas por técnicas de determinação de condutividade elétrica, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva de raios-X. De acordo com os resultados obtidos, as amostras coletadas apresentaram valores de condutividade elétrica e salinidade dentro da faixa esperada para exposições a aerossóis marinhos, bem como a presença de cloreto de sódio, como principal componente, de acordo com o observado pelas micrografias e dados de composição elementar encontrados. Os valores de resistência normalizada, aliados aos dados de medição obtidos durante a exposição do sensor ao ambiente externo, possibilitaram a validação do potencial de utilização do sistema desenvolvido para o monitoramento de ambientes com alta salinidade, baseado na estimativa qualitativa da concentração de íons cloreto na atmosfera marinha. Em contraposição aos métodos analíticos clássicos, como o método da vela úmida, que necessitam de um tempo de exposição ao ambiente em estudo razoavelmente elevado, podendo chegar a um mês de exposição para uma avaliação precisa, o método estudado neste trabalho possui a vantagem de proporcionar a obtenção de uma avaliação qualitativa em tempo de resposta praticamente imediato.

**Palavras-chave:** Patologias, Aerossol Marinho, Monitoramento.

## ABSTRACT

Chemical attack on facade surfaces and reinforced concrete steel by chlorides is one of the most common causes of pathologies in buildings in coastal regions, where the concentration of salts in deposits produced by sea spray is high. As a way of helping to prevent these pathologies, this work aims to develop a prototype sensor and monitoring system for the accumulation of saline deposits on building facade wall surfaces. Based on the properties of moderate electrical conductivity of these deposits, under the influence of atmospheric humidity, a sensor with phenolic substrate and copper conductive tracks was manufactured and tested in an external environment, exposed to the atmosphere, to verify its feasibility of application in the proposed monitoring. Furthermore, samples of saline deposits, collected from the glass curtain and the window of an apartment near the Salvador seafront, were analyzed using electrical conductivity determination techniques, scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy. According to the results obtained, the collected samples presented electrical conductivity and salinity values within the expected range for exposure to marine aerosols, as well as the presence of sodium chloride, as the main component, according to as observed by the micrographs and elemental composition data found. The normalized resistance values, combined with measurement data obtained during the exposure of the sensor in an outdoor environment, made it possible to validate the potential for use of the system developed for monitoring environments with high salinity, based on the qualitative estimation of the concentration of chloride ions in the marine atmosphere. In contrast to classical analytical methods, such as the wet candle method, which require a reasonably long exposure time to the environment under study, reaching up to one month of exposure for an accurate assessment, the method studied in this work has the advantage of providing a qualitative assessment in a practically immediate response time.

**Keywords:** Pathologies; Marine spray; Monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado .....	23
Figura 2 – Imagem de satélite da localização estudada.....	25
Figura 3 – Imagem da espátula para vidro usada na coleta da amostra.....	26
Figura 4 – Diagrama esquemático do sensor de fenolite .....	27
Figura 5 – Circuito e sensor para detecção de acúmulo salino.....	28
Figura 6 – Sistema de monitoramento na bancada de testes.....	29
Figura 7 – Relação entre a diferença de potencial e a resistência do sensor.....	30
Figura 8 – Esquema característico para definição de condutividade .....	31
Figura 9 – Condutímetro microprocessado empregado nas análises.....	32
Figura 10 – Imagens da amostra SSW/SSR após evaporação da água (a) e depois da secagem em estufa (b).....	33
Figura 11 – Microscópio eletrônico de varredura (a) e metalizador (b).....	34
Figura 12 – Espectro de EDS e imagem de MEV da amostra SSR.....	36
Figura 13 – Espectro de EDS e imagem de MEV da amostra SSW.....	36
Figura 14 – Espectro de EDS e imagem de MEV da amostra SSW/SSR.....	37
Figura 15 – Curva de calibração do sensor: concentração de íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) em função da resistência normalizada.....	40
Figura 16 – Resistência do sensor em função média das medições diárias.....	41
Figura 17 – “Salinômetro” para visualização da concentração de íons cloreto.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constituição da água do mar.....	17
Tabela 2 – Resumo da correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o revestimento nominal para $\Delta c=10$ mm.....	21
Tabela 3 – Classes de agressividade ambiental (CAA). ....	21
Tabela 4 - Valores de condutividade e salinidade das amostras.....	35
Tabela 5 – Composição estimada das amostras, determinada por EDS .....	38
Tabela 6 – Valores de resistência normalizada do sensor de salinidade para cada solução de íons cloreto usada na calibração .....	39

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X
LAMUME	Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>16</b>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
2.1	AEROSSOL MARINHO (MAREZIA).....	17
2.2	MONITORAMENTO DO AEROSSOL MARINHO.....	18
2.3	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO AEROSSOL MARINHO.....	19
2.4	DURABILIDADE.....	20
2.5	PATOLOGIAS CAUSADAS PELO AEROSSOL MARINHO.....	22
<b>2.5.1</b>	<b>Corrosão das armaduras do concreto</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Manchas e danos à pintura</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Danos ao reboco</b> .....	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE ESTUDADO.....	25
3.2	PROCEDIMENTO DE COLETA DAS AMOSTRAS.....	26
3.3	CONFECÇÃO DO SENSOR.....	26
3.4	CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO.....	27
3.5	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	29
<b>3.5.1</b>	<b>Análise de condutividade elétrica</b> .....	<b>30</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....	<b>33</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS)</b> .....	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>35</b>
4.1	MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	35
4.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	36
4.3	ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDS).....	38
4.4	TESTE EXPERIMENTAL DO SISTEMA.....	39
<b>4.4.1</b>	<b>Calibração do sensor</b> .....	<b>39</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Teste de exposição ao ambiente</b> .....	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>43</b>

5.1	CONCLUSÕES .....	43
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	44
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os efeitos e as formas de acompanhamento e correção de manifestações patológicas em construções, especialmente presentes em regiões costeiras, têm sido o alvo de diversos estudos (Hossain et al., 2009; Moreno et al., 2015; Sangiorgio et al., 2019; Xiang et al., 2023). A análise da saúde estrutural das edificações para a identificação e mitigação de patologias em construções tem se provado uma prática eficiente nas áreas de engenharia civil e arquitetura, promovendo a redução de custos de manutenção, o aumento da segurança em edificações, além de propiciar uma melhor aparência estética. Contudo, ainda existem manifestações patológicas recorrentes e de difícil solução a curto prazo, principalmente quando atuam agentes ambientais, que estão fora do controle humano.

A degradação de superfícies estruturais por agentes naturais nocivos é um fenômeno comum. Contudo, os efeitos causados pelo surgimento desta degradação em fachadas são visualmente desagradáveis, e podem afetar tanto a segurança estrutural e a estética, quanto a qualidade de vida de seus habitantes. Por isto, intensifica-se a necessidade da detecção e quantificação rotineira destes problemas, tornando-se crucial uma manutenção eficiente e oportuna para a correção destas patologias (Fan e Chung, 2022). Diante da realidade apresentada nesta discussão inicial pode-se afirmar que em regiões costeiras, algumas manifestações patológicas têm como contribuição o aerossol marinho.

O aerossol marinho, também conhecido popularmente como maresia, é caracterizado por vapor d'água carregado de substâncias salinas, e é uma das principais causas de patologias em estruturas localizadas em regiões próximas ao oceano, como, por exemplo, manchas, corrosão de armadura, entre outras.

Em uma busca preliminar na literatura disponível sobre o tema, não foram identificadas referências relacionadas à utilização de sensores elétricos, e nem sobre a estimativa do período ótimo para a aplicação de métodos preventivos contra patologias provocadas pelo aerossol marinho. Desse modo, o objetivo deste trabalho é propor um sistema de detecção dos íons cloreto advindos do aerossol marinho. Das contribuições que esta pesquisa traz destacam-se, além da criação de um circuito elétrico original na aplicação de sua metodologia, uma adição à gama de mecanismos preventivos a patologias para uma manutenção periódica e eficiente da superfície de edificações à base de concreto e argamassa. Isso possibilitará a oferta de um meio

de avaliar o acúmulo de sais em superfícies expostas ao aerossol marinho, bem como a atualização da medida do nível de salinidade em regiões costeiras, tais como a cidade de Salvador.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os edifícios próximos ao mar, construídos com diferentes materiais como tijolos, rebocos, calcários e arenitos, são diretamente impactados pelos diferentes processos de degradação, relacionados à maresia. Por ser um sistema quimicamente complexo, formado por sais inorgânicos, como sulfatos, nitratos e principalmente cloretos, matéria orgânica e, inclusive, material particulado transportado pelo vento ao meio ambiente, o aerossol marinho pode sofrer vários tipos de reações químicas, capazes de danificar as estruturas das construções por meio de diferentes patologias (Morillas et al., 2020).

Por ser um material poroso, o concreto permite a penetração das gotículas carregadas de sais da maresia em seu interior. Isso faz com que as estruturas metálicas internas “enferrujem”, aumentando de tamanho e, como consequência, o concreto começa a rachar. Por isso, é necessário prover meios de impedir a penetração da maresia, como por exemplo a lavagem frequente e impermeabilização de paredes e fachadas (Mundo Estranho, 2023).

Como consequência dos efeitos que uma atmosfera marinha agressiva pode causar ao concreto, reduzindo a vida útil de edifícios, a comunidade técnica e científica tem se dedicado à pesquisa de novos parâmetros relacionados à degradação de edifícios, incluindo a exposição a ambientes agressivos, a fim de determinar uma agenda de manutenção e prover sistemas de monitoramento. Foi com esse intuito que Sangiorgio e colaboradores desenvolveram um índice dedicado a quantificar a exposição de estruturas de edifícios de concreto a um ambiente marinho, calibrado por técnicas de última geração (Sangiorgio et al., 2019).

Considerando a importância de desenvolver alternativas para a detecção do acúmulo de sais na superfície das edificações próximas à costa marítima, este trabalho de pesquisa se justifica pela proposição de um sistema com o intuito de monitorar e avaliar de maneira qualitativa a concentração de sais, principalmente dos íons cloreto, presentes no aerossol marinho. Assim, riscos em potencial de danos ocasionados pelos elementos corrosivos poderiam ser previamente detectados,

auxiliando arquitetos e engenheiros no planejamento das diversas fases dos processos construtivos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Construir um sistema de detecção de íon cloreto em atmosferas marinhas, para auxiliar na manutenção preventiva em fachadas de construções litorâneas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Propor um sistema de monitoramento de íons cloreto, advindos do aerossol marinho, a partir de suas características condutivas.
- Caracterizar os depósitos salinos acumulados em superfícies externas de construções, por meio de análises físico-químicas;
- Avaliar qualitativamente o acúmulo salino, em termos de íons cloreto, em fachadas expostas ao aerossol marinho, na região estudada.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia está estruturada da seguinte forma: no Capítulo 2, apresenta-se o referencial teórico, para fornecer embasamento necessário às discussões dos resultados obtidos e conclusões alcançadas, com base nos objetivos e na metodologia proposta; no Capítulo 3, os materiais e métodos empregados no desenvolvimento do sensor e na caracterização das amostras coletadas serão abordados; no Capítulo 4, os resultados das análises físico-químicas das amostras, bem como da aplicação do sensor e do sistema básico de monitoramento de acúmulo de salinidade atmosférica, na determinação da concentração de íons cloreto no aerossol marinho, com base na medida de condutividade elétrica, serão mostrados, interpretados e discutidos, de modo a avaliar a efetividade da proposta, comparando-a qualitativamente com os métodos existentes; por fim, no Capítulo 5, serão apontadas as principais conclusões desta pesquisa, bem como as perspectivas de trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 AEROSSOL MARINHO (MAREZIA)

O aerossol marinho, *spray* marinho, ou como é popularmente conhecido, a maresia ou salitre, consiste em uma pluma de partículas que se espalha na atmosfera, nas regiões próximas à costa. Devido à sua origem, na agitação da superfície do oceano, em locais com muitas ondas, é possível conjecturar que a sua composição química é semelhante à da água do mar. A água do mar tem a composição química típica média mostrada na Tabela 1 (Mackenzie et al., 2023).

Tabela 1 – Constituição da água do mar.

Constituinte iônico	g/kg de água do mar	mol/kg**	Concentração relativa
<b>cloreto</b>	19,162	0,5405	1,0000
<b>sódio</b>	10,679	0,4645	0,8593
<b>magnésio</b>	1,278	0,0526	0,0974
<b>sulfato</b>	2,680	0,0279	0,0517
<b>cálcio</b>	0,4096	0,01022	0,0189
<b>potássio</b>	0,3953	0,01011	0,0187
<b>carbono (inorgânico)</b>	0,0276	0,0023	0,0043
<b>brometo</b>	0,0663	0,00083	0,00154
<b>boro</b>	0,0044	0,00041	0,00075
<b>estrôncio</b>	0,0079	0,00009	0,000165

\*Concentrações na salinidade de 34,7;

\*\*Concentrações iônicas são expressas convencionalmente em unidades moleculares. Um mol por quilograma é equivalente a  $6,023 \cdot 10^{23}$  íons ou moléculas por quilograma de água do mar. As concentrações relativas na coluna 4 fornecem o número de íons de cada constituinte em um quilograma de água do mar quando comparadas ao número de íons de cloreto também em um quilograma de água do mar.

Fonte: Mackenzie et al. (2023).

A concentração de sais na maresia foi estudada em função da distância à costa, como, por exemplo, no trabalho de Yuan et al (2023). O método da vela úmida é utilizado para verificação da presença de sais na atmosfera marinha (cloretos), realizando a análise da concentração no tecido da vela úmida para diversos valores de distância à costa. Os resultados obtidos corroboram o senso de que a concentração salina diminui na medida que se afasta da costa.

Na região litorânea, devido à elevada concentração atmosférica do aerossol marinho, observa-se uma maior incrustação de maresia nas superfícies diversas, incluindo edifícios, monumentos e outras estruturas localizadas nesta região. Trabalhos na literatura recente apresentam um esforço importante no sentido de modelar matematicamente a penetração da maresia em concreto. Exemplos de destaque destes esforços são mostrados nos trabalhos de Wu et al. (2017) e Liu et al. (2019). O ataque químico devido a este acúmulo e outros fenômenos é inevitável nas argamassas, armaduras de concreto armado, madeiras, e outros materiais. As reações químicas, então, contribuem para o surgimento de muitas manifestações patológicas nas construções e estruturas. Algumas das mais prejudiciais são as manchas, eflorescências e corrosão de armaduras de concreto armado. As manchas e eflorescências causam impacto visual e estético, enquanto a corrosão de armaduras pode provocar danos graves à estrutura (Pereira, 2018).

## 2.2 MONITORAMENTO DO AEROSSOL MARINHO

No que se refere ao monitoramento da presença ou avaliação da concentração de maresia na atmosfera, ou da construção de critérios de indexação de exposição de estruturas à agressividade de aerossol marinho, trabalhos e pesquisas têm abordado esta temática nas décadas recentes, tendo em vista a relevância do assunto.

Sangiorgio et al. (2019) propõem um índice de classificação da agressividade da exposição de estruturas de concreto armado à maresia. O índice é avaliado levando em consideração uma série de fatores mensuráveis, tanto geográficos quanto climáticos/atmosféricos, tais como distância à costa, dinâmica de crescimento urbano no local, altitude em relação à superfície do oceano, umidade relativa do ar, temperatura e velocidade do vento.

Morillas et al. (2020) apresentaram um trabalho aprofundado sobre o estudo do estado de deterioração de uma construção secular na região de Biarritz (França), com o intuito de descrever os efeitos nocivos da cristalização do sal contido na maresia depositada nas fachadas ao longo do tempo. Amostras da edificação foram analisadas por técnicas como DRX (difração de raios-X) e espectroscopia Raman.

A cristalização salina não é causada exclusivamente pela maresia. Em regiões costeiras, pode combinar-se de forma sinérgica ao fenômeno de capilaridade, quando a água presente no solo penetra nos poros dos materiais constituintes da edificação

para alturas até maiores que a altura manométrica da água. No trabalho de Bochen et al. (2021), a cristalização devido à elevação por capilaridade é estudada utilizando microporosimetria por intrusão de mercúrio, e a morfologia por microscopia eletrônica de varredura.

Em trabalhos recentes, a modelagem da profundidade de penetração e do pico de concentração de cloretos através de leis de difusão é discutida. Yuan et al. (2023) Apontam que tais modelos podem ser imprecisos na predição da profundidade de penetração e na concentração de cloretos, em função da insuficiência de dados experimentais que validem tais modelos.

### 2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO AEROSSOL MARINHO

Para a avaliação da presença de elementos salinos na atmosfera, destacam-se alguns métodos consagrados e descritos na Norma ISO-9225 (2012), como:

(i) o método da vela úmida, que consiste na captura superficial de cloreto e gotículas por meio de um tubo envolto em tecido, imerso em água inicialmente dessalinizada no interior de um recipiente de material neutro. Este método requer a exposição do tubo por um período, tipicamente entre uma semana e um mês e, após este período de exposição, a quantidade de cloreto é determinada por análise química; é assim que sua taxa de deposição é conhecida. Apesar do reconhecimento da qualidade dos resultados apresentados pelo método, o tempo necessário de exposição é relativamente longo, não permitindo uma avaliação mais imediata do nível de salinidade da atmosfera devido à maresia;

(ii) o método da placa seca, que se refere à exposição de uma placa forrada com tecido de algodão seco de área conhecida que, da mesma forma que a vela úmida, será impregnado com cloreto e gotículas de aerossol marinho ao longo do período de exposição, tipicamente um mês. Novamente, utilizando análise química, a quantidade e a taxa de deposição de cloreto são determinadas. Assim como no método da vela úmida, o tempo de avaliação é longo. Amostras podem ser colhidas diretamente de fragmentos das edificações e encaminhadas para análise, mas essa forma de avaliação só faz sentido para construções que não são novas, e que possivelmente já se encontram em relativo estado de degradação. É mais apropriada para estudos de aprofundamento, como os de Morillas et al. (2020) e Liu et al. (2018).

## 2.4 DURABILIDADE

De maneira geral, a durabilidade é a propriedade dos materiais relacionada à sua exposição a um dado ambiente durante um período, determinada pela habilidade de manter suas características originais diante da intensidade e duração dos agentes agressivos do meio ao qual está inserido, sem a necessidade de medidas reparatórias (Cooper, 1994). Para a estrutura de concreto armado, os fatores que determinam sua durabilidade incluem a qualidade do concreto e sua execução, propriedades mecânicas e ações químicas, físicas e biológicas que afetam a peça (Selinger, 1992, *apud* Guimarães, 1997).

Além da resistência mecânica, a durabilidade é uma das características fundamentais do concreto armado. Sua importância para as edificações está relacionada ao custo-benefício, segurança e qualidade de vida dos usuários, evidenciando que deve ser um dos focos da construção civil garantir esta característica aos projetos. Desse modo, os aspectos relacionados à durabilidade são alvo de preocupação aos engenheiros, projetistas e fornecedores, uma vez que projetos que se baseiam em estruturas com maior durabilidade e vida útil mais longa incorrem em um custo mais baixo. Além disso, são prevenidos custos adicionais relacionados à condução de reparos e ocasionais inconveniências aos usuários da construção (Mumberger, Tutikian e Bolina, 2022).

A durabilidade do concreto está ligada diretamente à vida útil da estrutura, que é definida como o tempo em que o concreto é capaz de manter os requisitos mínimos de resistência e integridade, necessários ao cumprimento de sua função (Andrade, 1992). Segundo a norma de desempenho ABNT NBR 15575/2021, a Vida Útil do Projeto (VUP) mínima para estruturas de concreto deve ser igual ou superior a 50 anos, desde que manutenções adequadas sejam periodicamente realizadas. Há vários fatores que impactam a durabilidade do concreto e, portanto, contribuem para a diminuição da sua vida útil. Alguns deles são apresentados no trabalho de Aguirre e Gutiérrez (2013) como, por exemplo, a carbonatação, ataques por sulfatos e ataques por cloretos, eventos responsáveis pelo fenômeno da corrosão da armadura.

Como dito anteriormente, a agressividade do meio ambiente influencia diretamente no nível de deterioração da durabilidade de um material, sendo que para o concreto há uma especificação apresentada na Tabela 7.2, da norma ABNT NBR 6118/2014, cuja forma resumida é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo da correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para  $\Delta c = 10 \text{ mm}$ .

Tipo de Estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto Protendido	Todos	30	35	45	55

Fonte: Adaptada da Tabela 7.2 da Norma ABNT NBR 6118/2014.

As classes de agressividade de I a IV são descritas detalhadamente na Tabela 6.1 da mesma norma, que está reproduzida na Tabela 3. Edificações em regiões costeiras podem ser enquadradas na classe III, caracterizada por agressividade forte e ambiente marinho e/ou industrial. A norma ABNT NBR 6118/2014 também estabelece uma correlação entre a relação água/cimento do concreto e a classe de agressividade do meio, ou seja, quanto maior é a agressividade, menor deverá ser a relação água/cimento; por exemplo, em regiões litorâneas – classe III – essa relação deve ser menor ou igual a 0,55.

Tabela 3 - Classes de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a,b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a,b</sup>	
IV	Muito Forte	Industrial <sup>a,c</sup>	Elevado
		Respingos de Maré	

<sup>a</sup>Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>b</sup>Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

<sup>c</sup>Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Tabela 6.1 da Norma ABNT NBR 6118/2014.

## 2.5 PATOLOGIAS CAUSADAS PELO AEROSSOL MARINHO

O aerossol marinho é uma das principais causas de patologias em concreto armado e em superfícies de fachadas em construções. Devido à sua composição química, que contém predominantemente cloretos, o aerossol marinho é um agente nocivo para construções próximas do oceano, onde sua ocorrência é abundante e fatores atmosféricos contribuem para seu espalhamento. Dentre as patologias destacam-se a corrosão da armadura e danos à revestimentos como pinturas, rebocos e cerâmicas.

### 2.5.1 Corrosão das armaduras do concreto

A corrosão é uma das manifestações patológicas que prejudica a vida útil das edificações, sendo a principal causa da deterioração de estruturas de concreto armado. Ela consiste na interação de um material, geralmente metálico, com o meio ambiente, causando alteração de suas propriedades, seja por ação física, química, ou eletroquímica, que cause desgaste e/ou destruição, conseqüentemente acarretando o desuso do material (Mota *et al.*, 2012).

Uma das principais causas do processo de corrosão são os íons cloreto, oriundos, por exemplo, do aerossol marinho. Estes íons tomam diversas formas diante da sua interação com o concreto, sendo elas em ligações com o aluminato tricálcico, adsorvido na superfície dos poros, ou em íons livres, este último sendo a forma que proporciona o risco da iniciação do efeito (Cavalcanti, 2010).

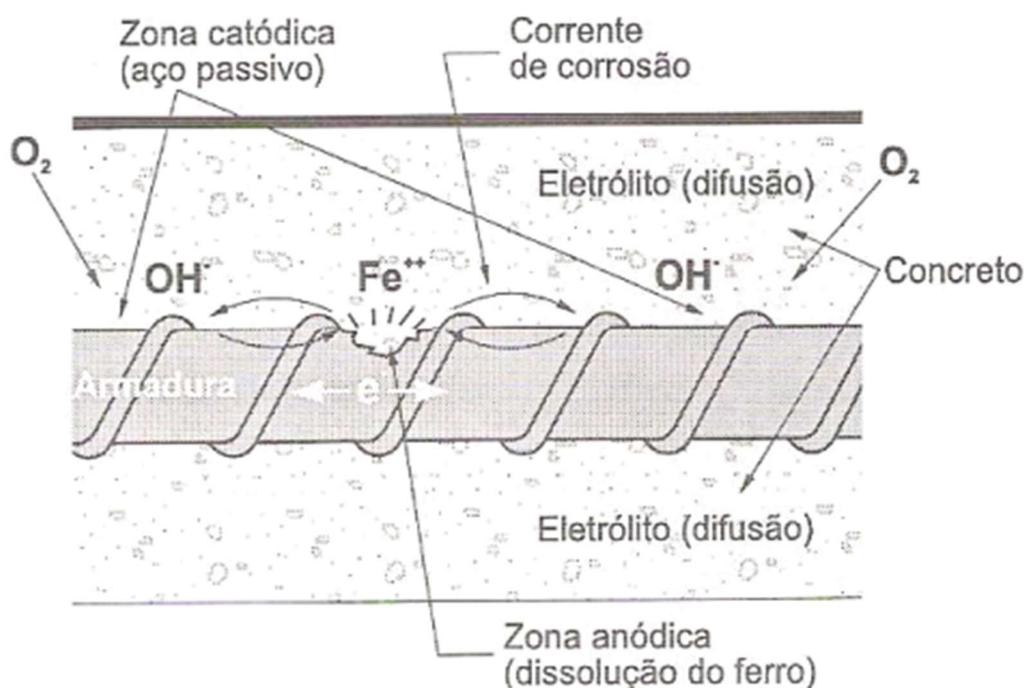
Os íons cloreto livres têm risco intermediário de atacarem a camada passivadora do aço, quando apresentam concentrações maiores que 0,4% da massa de cimento da peça de concreto armado, sendo que este risco se eleva drasticamente com concentrações acima de 1% da massa de cimento (Mota *et al.*, 2012). As reações envolvidas no processo ataque da armadura pelo cloreto, que ocorre para a quebra da camada passivadora, podem ser vistas nas Equações 1 e 2 (Neville, 1995).



A partir da quebra da camada passivadora, é gerada uma célula de corrosão na própria armadura, composta pelos seguintes elementos: (i) uma zona anódica, que

é a região despassivada; (ii) uma zona catódica, que é a região passivada; (iii) o aço da armadura, que age como um condutor; e (iv) um eletrólito formado pela solução aquosa contida nos poros do concreto. A umidade, o oxigênio e agentes agressivos, como sulfetos e dióxido de carbono, presentes no aerossol marinho, intensificam a velocidade do processo (RILEM, 1995). O modelo visual de como a corrosão ocorre é descrito na Figura 1.

Figura 1 - Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado.



Fonte: Cascudo (1997).

## 2.5.2 Manchas e danos à pintura

As manchas nas fachadas de edificações são um fenômeno superficial que possui diversas origens, sendo uma delas o aerossol marinho. Elas afetam, em fase inicial, o nível da qualidade visual da superfície; porém, se permanecerem sem correção, contribuem no agravamento de outros processos de deterioração e consequente perda das propriedades do material de revestimento (Flores-Colen *et al.*, 2008).

Manchas se manifestam de diferentes maneiras, dependendo de suas causas e, no caso da maresia, elas aparecem na forma de eflorescências, que são oriundas da cristalização de sais solúveis aderidos na superfície das fachadas na forma de um

pó esbranquiçado, e de ferrugem nos concretos armados, em que a água carrega os óxidos resultantes do processo de corrosão à superfície da peça ocasionando em uma coloração alaranjada. (Flores-Colen *et al.*, 2008).

Além das manchas, a umidade junto aos cloretos do aerossol marinho ataca física e quimicamente as pinturas, causando desgaste e descascamento por evaporação da água contida nestas (Souza, 2008).

### **2.5.3 Danos ao reboco**

Os danos causados pelos sais da maresia podem ocorrer tanto de maneira superficial, quanto de maneira interna no reboco. O primeiro se manifesta em um ciclo gradual de cristalização e dissolução, resultando em lixiviação, escamação e esfrelamento do revestimento e, em casos mais sérios (quando ocorre internamente), lascamento e descolamento da camada (Groot e Van-Hees, 2009).

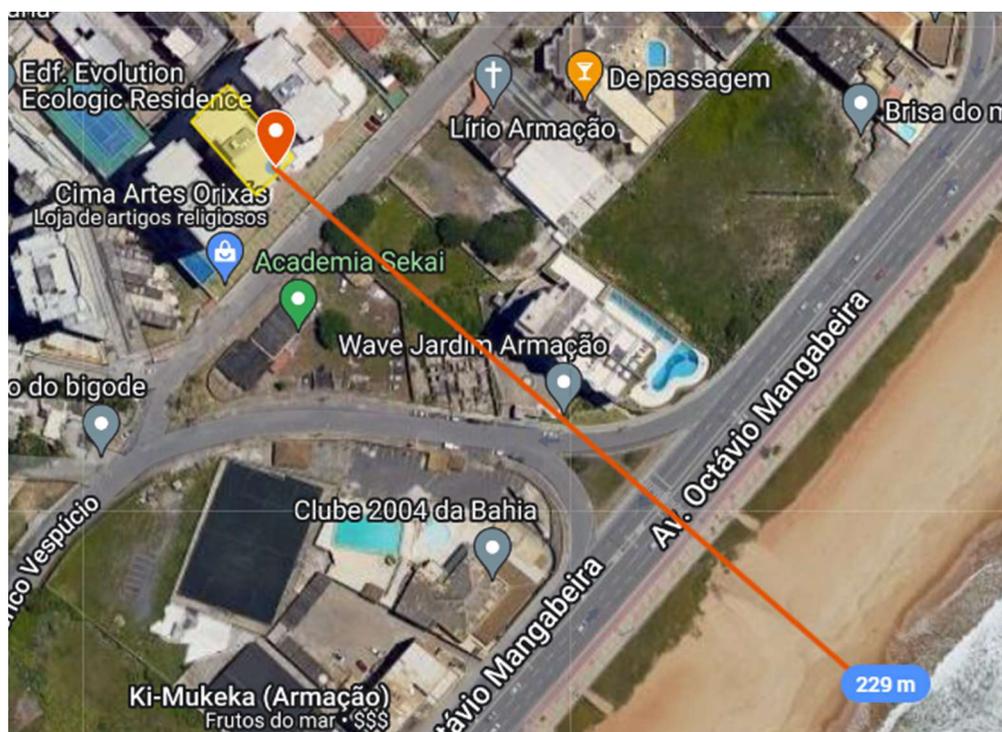
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo a descrição dos materiais e métodos utilizados durante a investigação. Apresenta-se, nas subseções seguintes, o procedimento de coleta de material incrustado em superfícies de janelas e varandas e a denominação das amostras; os equipamentos utilizados na confecção do sensor e do sistema montado para a coleta de dados de medição da resistência; e uma breve descrição das técnicas e metodologia usada na caracterização físico-química das amostras.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE ESTUDADO

O local escolhido para estudo foi um edifício residencial no bairro de Jardim de Armação, nas coordenadas  $12^{\circ}59'25.2''S$  e  $38^{\circ}26'21.0''O$ , situada à uma distância da linha do mar de aproximadamente 229 metros e uma altitude de 15 metros, mostrada na Figura 2. De acordo com a Tabela 3, a localização está inserida em um ambiente de classe III a IV de agressividade.

Figura 2 - Imagem de satélite da localização estudada.



Fonte: Adaptado de *My Maps* (2023).

### 3.2 PROCEDIMENTO DE COLETA DAS AMOSTRAS

Considerando que o material em estudo se acumula na superfície de construções, decidiu-se pela coleta por raspagem de superfície de vidro, especificamente de uma janela e de uma cortina de vidro (*reiki*). O material foi raspado das superfícies com o uso de uma espátula própria para vidro, mostrada na Figura 3, e armazenado em tubos *ependorf* de 1 mL.

Figura 3 – Imagem da espátula para vidro usada na coleta da amostra.



Fonte: Do autor (2023).

O material foi correspondente ao acúmulo de, aproximadamente, 6 meses de exposição, sendo a data da coleta 28/07/2023. A amostra coletada na superfície da janela foi denominada SSW, enquanto a amostra coletada da cortina de vidro foi denominada SSR. Uma segunda coleta foi realizada no dia 01/09/2023, gerando uma amostra contendo o material das ambas as superfícies (janela e cortina de vidro), que foi nomeada como SSW/SSR. Após a coleta, as amostras SSW, SSR e SSW/SSR foram secas em estufa durante 24 h, à temperatura de 60°C, para eliminar a umidade.

### 3.3 CONFECÇÃO DO SENSOR

Este subtópico tratará da fabricação do sensor concebido para captar o acúmulo de aerossol marinho nas superfícies.

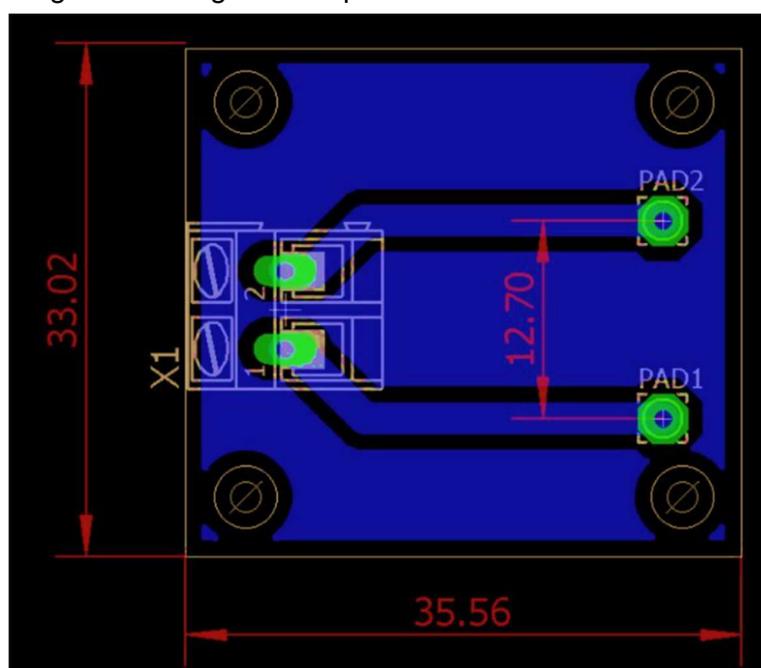
Um arranjo retangular em fenolite, com face de cobre de espessura igual a 0,0348 mm, foi idealizado conforme a Figura 4, de forma a representar um sensor

distribuído, cuja resistência é dependente da quantidade de material acumulada na superfície sem cobre e, obviamente, de condições atmosféricas, como umidade relativa do ar e temperatura, que afetam a distribuição iônica de cloretos, sódio e espécies presentes no aerossol marinho. O sensor então age como uma resistência variável, com maior dependência da quantidade acumulada nas ranhuras sem cobre, cuja resistência ideal, na ausência de material, tende a infinito. O arranjo foi elaborado no software Eagle® (versão gratuita)<sup>1</sup> e foi então confeccionado numa fresadora de precisão modelo LPKF S43, no Departamento de Eletrônica, Campus Salvador.

### 3.4 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Um esquema do circuito utilizado na detecção do acúmulo salino é mostrado na Figura 5. O circuito foi montado em um *proto-board*, utilizando quatro resistores de  $1\text{ M}\Omega$  da série E24 ( $\pm 5\%$  de tolerância) -  $R$ , um potenciômetro para ajuste de zero – equilíbrio da ponte,  $R_A$  – fios de cobre, e um arranjo com 4 pilhas de  $1,5\text{ V}$  ( $E = 6\text{ V}$ ). Tal sistema é constituído por uma Ponte de Wheatstone (Ekelof, 2001).

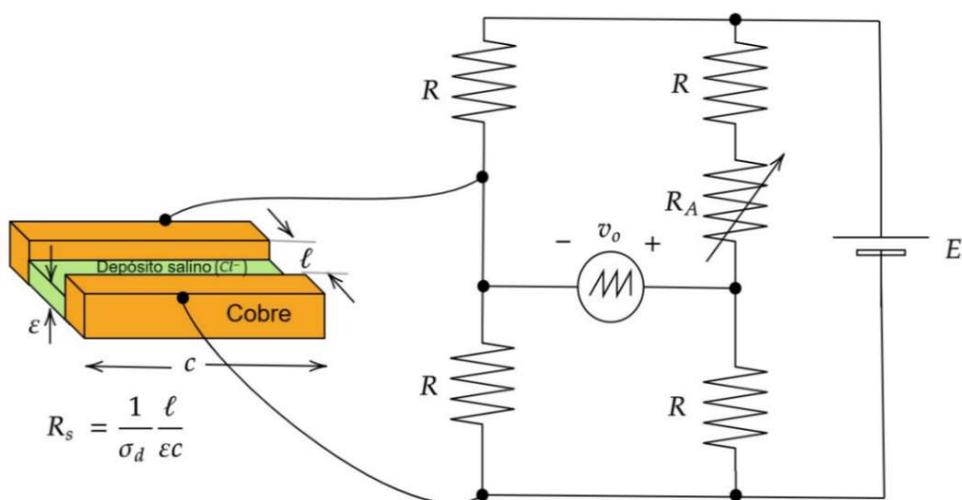
Figura 4 – Diagrama esquemático do sensor de fenolite.



Fonte: Do autor (2023)

<sup>1</sup> Software de automação de projeto eletrônico que permite aos projetistas de placas de circuito impresso conectar diagramas esquemáticos, posicionamento de componentes, roteamento de PCB e conteúdo de biblioteca. Maiores detalhes em: [www.autodesk.com/products/eagle/overview](http://www.autodesk.com/products/eagle/overview).

Figura 5 – Circuito e sensor para detecção de acúmulo salino.



Fonte: Do autor (2023).

Na Figura 5,  $\epsilon$  representa a espessura do depósito salino que recobre o sensor, e induz à modificação na sua resistência elétrica, oferecendo um caminho condutor para a corrente elétrica. Quanto maior for a espessura da camada de sais marinhos, maior será a área atravessada pela corrente e, conseqüentemente, menor será a resistência do sensor.

O circuito foi conectado a um osciloscópio da marca Agilent Technologies DSO1072B, no qual eram feitas a exibição e a aquisição dos dados de tensão, ao longo do período de exposição do sensor. O intervalo máximo de exibição e aquisição do osciloscópio é de 600 segundos. O sistema é mostrado na Figura 6.

A equação da diferença de potencial normalizada é mostrada na Equação 3:

$$\frac{v_0}{E} = \frac{1}{2} \frac{1}{1 + 2 \frac{R_s}{R}} \quad (3)$$

Em que:

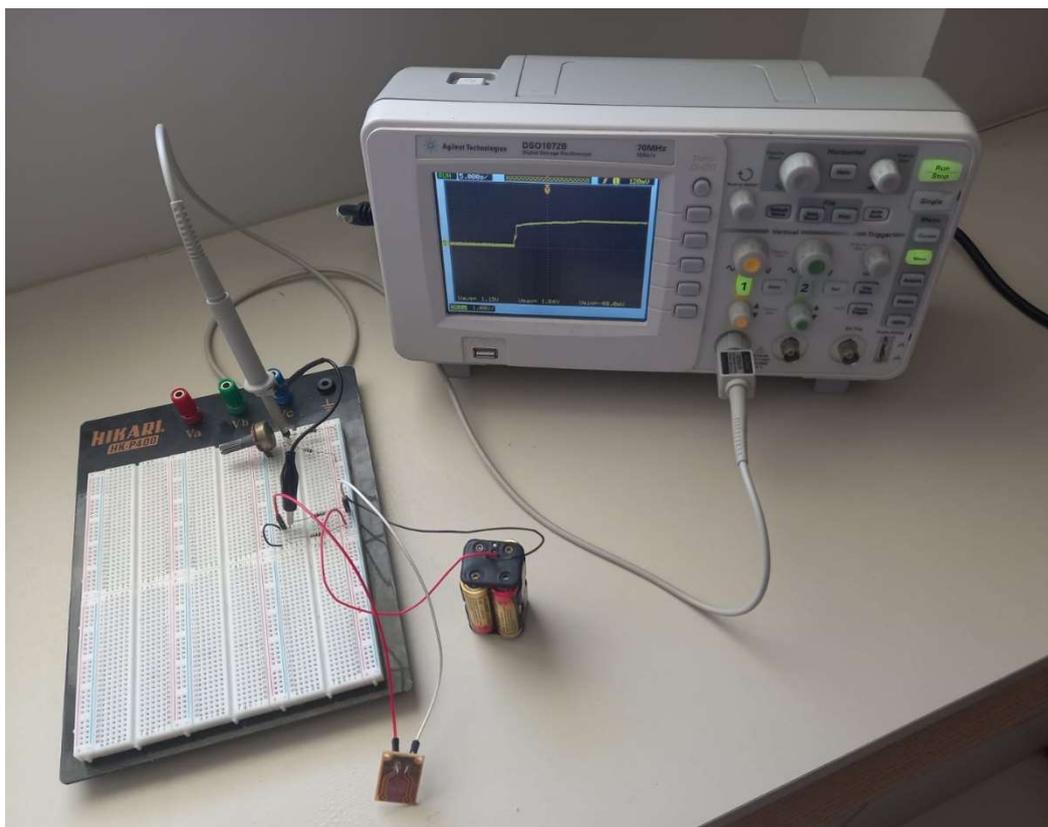
$v_0$ : diferença de potencial na saída da ponte;

$E$ : tensão de alimentação;

$R_s$ : resistência do sensor de fenolite;

$R$ : resistência fixa (parâmetro) da ponte.

Figura 6 – Sistema de monitoramento na bancada de testes.



Fonte: Do autor (2023).

Claramente, a medição da diferença de potencial da ponte pode ser utilizada para calcular a resistência, que está diretamente relacionada com o acúmulo de salitre na superfície do sensor. A função inversa da Equação 3 é dada pela Equação 4.

$$\frac{R_S}{R} = \frac{1}{2} \left( \frac{E}{2v_0} - 1 \right) \quad (4)$$

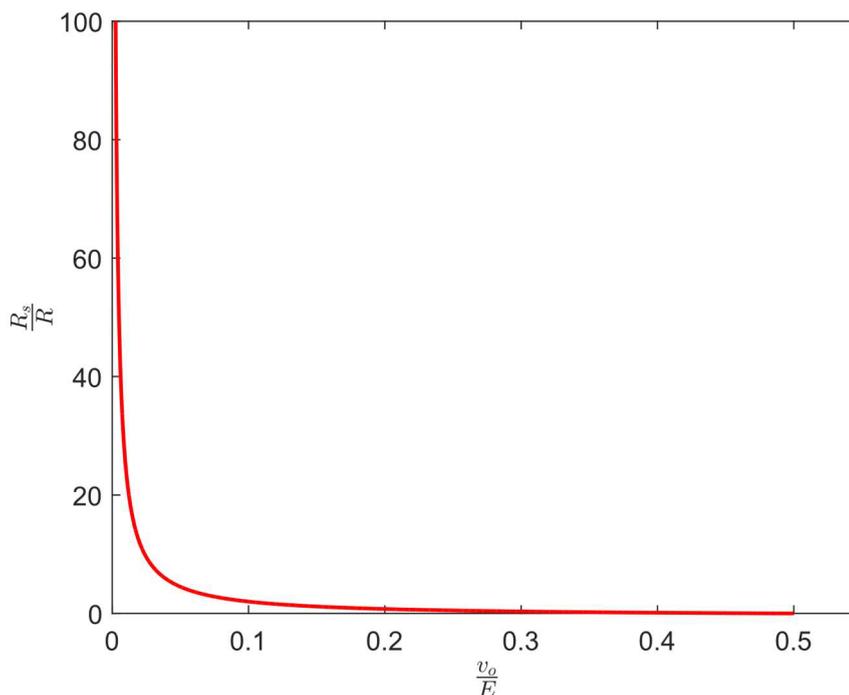
Na Figura 7, é mostrado o gráfico dessa função, onde pode ser estabelecido o valor da resistência do sensor de forma unívoca com a diferença de potencial da ponte, a partir da Equação 4.

### 3.5 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Com o intuito de embasar as discussões a respeito dos resultados obtidos com o sistema proposto, algumas análises físico-químicas das amostras coletadas, de acordo com a seção 3.1, foram realizadas. Para isso, contou-se com o apoio de infraestrutura laboratorial do IFBA, Campus Salvador, e do LAMUME, situado no

Laboratório de Física Nuclear da UFBA. Essas análises tiveram como objetivo identificar as propriedades físicas, aspectos morfológicos e a composição químicas das amostras coletadas, o que se supõe terem impacto direto na resistência elétrica do protótipo de sensor.

Figura 7 – Relação entre a diferença de potencial e a resistência do sensor.



Fonte: Do autor (2023).

### 3.5.1 Análise de condutividade elétrica

Condutividade ou condutância específica é a propriedade da matéria que caracteriza a habilidade de um meio material em conduzir corrente elétrica. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a condutividade é medida em Siemens por metro ( $S/m$ ). A condutividade em materiais sólidos está ligada à mobilidade dos elétrons como portadores de cargas, ao passo que, em soluções, é a mobilidade dos íons que têm impacto sobre a condutividade (Bockris *et al.*, 2002).

A condutividade de soluções aquosas é dependente da temperatura e da concentração de espécimes salinas, a exemplo de íons cloreto, sulfetos e outros (Gray, 2004). A condutividade foi estudada por Georg Simon Ohm, que enunciou uma

lei relacionando a resistência de um elemento à passagem de corrente elétrica com a sua geometria e com a condutividade, de acordo com a Equação 5:

$$R = \frac{\ell}{\sigma A}, \quad (5)$$

em que  $R$  é a resistência do elemento em ohms,  $\sigma$  é a condutividade em Siemens por metro,  $\ell$  é o comprimento ao longo do percurso da corrente elétrica em metros, e  $A$  é a área da seção transversal do elemento em metros quadrados.

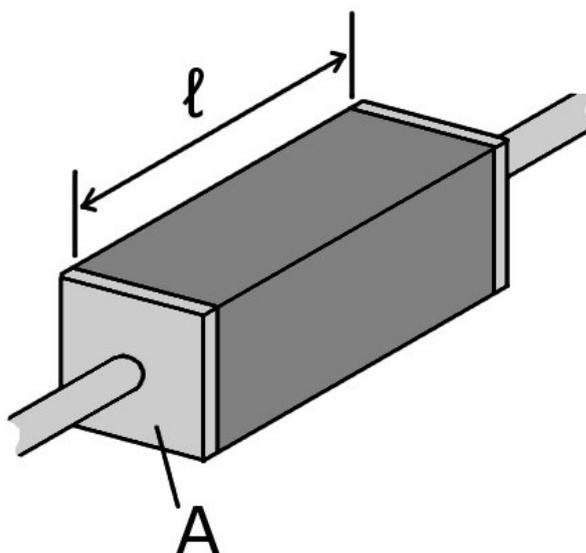
Outra propriedade diretamente relacionada à capacidade de condução é o recíproco da condutividade, ou resistividade (Equação 6):

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \quad (6)$$

em que  $\rho$  é a resistividade medida em ohms por metro ( $\Omega/m$ ). A Figura 8 ilustra um elemento característico para a medida de condutividade.

A análise de condutividade elétrica é um ensaio utilizado para avaliar a capacidade de condução elétrica de um material. No contexto desta pesquisa, utilizou-se este método, a fim de investigar o caráter condutor das amostras para conferir a viabilidade do sensor proposto, assim como oferecer dados de base para a realização dos cálculos de estimativa qualitativa do teor de cloreto.

Figura 8 – Esquema característico para definição de condutividade.

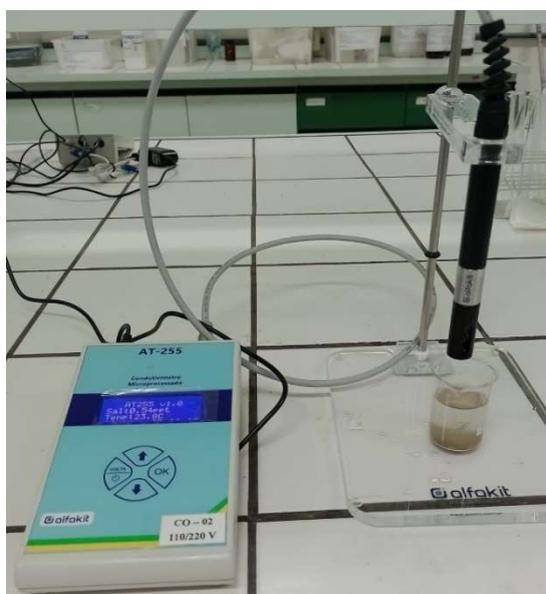


Os ensaios de condutividade elétrica foram realizados com uso de um condutivímetro microprocessado, modelo AT-255, da marca Alfakit. Antes dos experimentos, efetuou-se a calibração do equipamento com 25 mL de uma solução padrão de 1413  $\mu\text{S}$ . A Figura 9 ilustra o equipamento sendo utilizado na realização do experimento. Durante as análises, cerca de 0,5 g de amostra foi pesada em um béquer de 50 mL, e dissolvida em 25 mL de água deionizada. Em seguida mergulhou-se o eletrodo e realizou-se a medida de  $S$  e  $\sigma$ , em que  $S$  é a salinidade e  $\sigma$  é a condutividade. Após as leituras, evaporou-se a água dos béqueres, lentamente, em uma placa de aquecimento mantida a 70°C. Depois, transferiu-se as amostras para uma cápsula de aquecimento, e concluiu-se o processo de secagem em estufa, a 60°C, por 24 h.

Na Figura 10 são mostradas imagens da amostra SSW/SSR após a evaporação da água (a) e depois da secagem em estufa (b). É possível perceber visualmente, em ambos os casos, a existência de cristais brancos, característicos do cloreto de sódio. Isso indica a presença desse sal na amostra, que é oriundo do aerossol marinho.

Os sólidos assim obtidos foram, posteriormente, analisados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS), a fim de conhecer sobre a morfologia e a composição elementar semiquantitativa da superfície das amostras.

Figura 9 – Condutivímetro microprocessado empregado nas análises.



Fonte: Do Autor (2023).

Figura 10 – Imagens da amostra SSW/SSR após evaporação da água (a) e depois da secagem em estufa (b).



(a)

(b)

Fonte: Do autor (2023)

### 3.5.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

É uma técnica que emprega o microscópio eletrônico de varredura, um equipamento que possibilita a obtenção de imagens, com aspecto tridimensional e com elevada resolução e amplificação, quando se incide um feixe de elétrons de alta energia na superfície da amostra. Esse feixe de elétrons permite explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, provocando emissões de radiação, cujos sinais são captados pelo detector e transformados em imagem de elétrons retroespalhados (backscattered electrons – BSE), que são aqueles que sofreram espalhamento elástico, e provêm de camadas mais superficiais da amostra, ou em imagem de elétrons secundários (secondary electrons – SE), os quais são de baixa energia (<50eV) e formam imagens com alta resolução (3-5 nm). As imagens obtidas por BSE permitem determinar a composição química do material, enquanto as de SE, além de apresentarem alta resolução, fornecem informações sobre a topografia de superfície (Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

Desse modo, os experimentos de microscopia eletrônica de varredura (MEV), em inglês *scanning electron microscopy* (SEM), foram realizados para saber sobre a morfologia e a topografia da superfície das amostras, observando-se suas características microestruturais. Os ensaios foram efetuados em um equipamento da Oxford Instruments, modelo X-Max (Figura 11(a)), com uma tensão de aceleração de 15 kV, e magnificações que variaram de 1000 a 3000 vezes. Antes das análises, as

amostras foram metalizadas com ouro, à vácuo, a fim de melhorar sua condutividade. O metalizador empregado pode ser visto na Figura 11(b).

Figura 9 – Microscópio eletrônico de varredura (a) e metalizador (b).



Fonte: Do autor (2023).

### 3.5.3 Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS)

A fim de determinar a composição química das amostras, foram efetuadas microanálises da superfície por espectroscopia de raios-X de energia dispersiva ou, em inglês, *energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDS), utilizando-se um módulo acoplado ao microscópio eletrônico de varredura.

A EDS é uma técnica analítica que permite a caracterização química/análise elementar de materiais, e seu princípio de funcionamento se baseia na detecção de raios-X emitidos pela amostra, durante as transições eletrônicas geradas por um feixe de elétrons. Desse modo, são registrados espectros, cuja posição dos picos permite identificar o elemento químico presente, enquanto a intensidade do sinal corresponde à concentração desse elemento.

É importante salientar que, por meio de EDS, pode-se efetuar uma avaliação química qualitativa e semiquantitativa, uma vez que a análise não tem precisão, visto que restringe apenas à superfície da amostra; logo, o que se obtém é uma estimativa da concentração dos elementos constituintes (Dedavid; Gomes; Machado, 2007; Vieira et al., 2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos por meio das análises físico-químicas e das medições realizadas pelo sistema proposto, além de interpretá-los de modo a verificar a usabilidade do método na avaliação do teor de cloretos em incrustações.

### 4.1 MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Na Tabela 4 são mostrados os valores de condutividade elétrica das amostras, determinados conforme descrito no Capítulo 3. Foram calculadas as médias aritméticas dos valores de duas medidas para cada amostra.

Tabela 4 – Valores de condutividade e salinidade das amostras.

SSW		SSR		SSW/SSR	
$\sigma$ (mS/cm)	S (ppt)	$\sigma$ (mS/cm)	S (ppt)	$\sigma$ (mS/cm)	S (ppt)
12,40	7,82	9,73	3,56	23,50	24,70

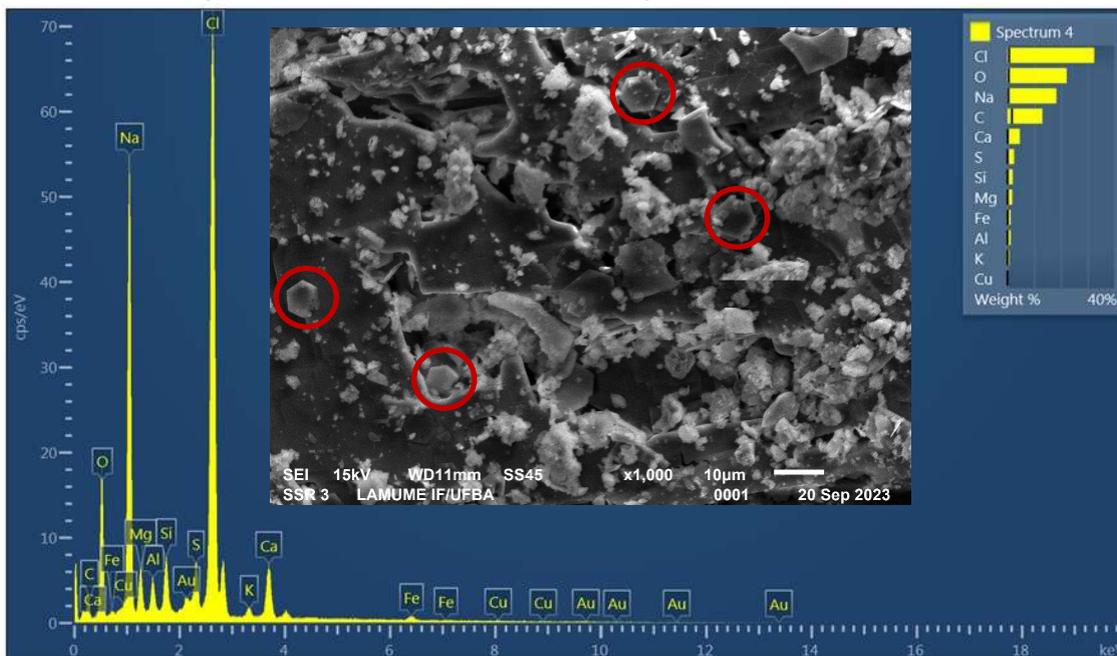
Fonte: Do autor (2023).

Observou-se que os valores de condutividade se situaram na faixa de 9,73 a 23,50 mS/cm, mais baixos que a condutividade típica da água oceânica, que em condições padrão de 15°C, pressão atmosférica e salinidade de 35 ppt, é de 43,00 mS/cm (Tyler *et al.*, 2017). Por outro lado, a concentração de sal na água do mar é de 33 a 37 ppt (Mackenzie *et al.*, 2023), e as amostras analisadas apresentaram salinidade inferior a esta referência, corroborando, assim, os resultados de condutividade obtidos. Visto que, *in situ*, o material depositado na superfície do vidro se apresentou sob a forma de respingos e umidade, combinados com poeira, material orgânico e outras impurezas atmosféricas, era esperado que isso causasse um impacto nas determinações de salinidade e condutividade efetuadas, quando comparadas às medidas desses parâmetros para a água do oceano. Dentre as amostras avaliadas, a que apresentou os valores de condutividade e salinidade mais próximos aos da água do mar foi a SSW/SSR.

## 4.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

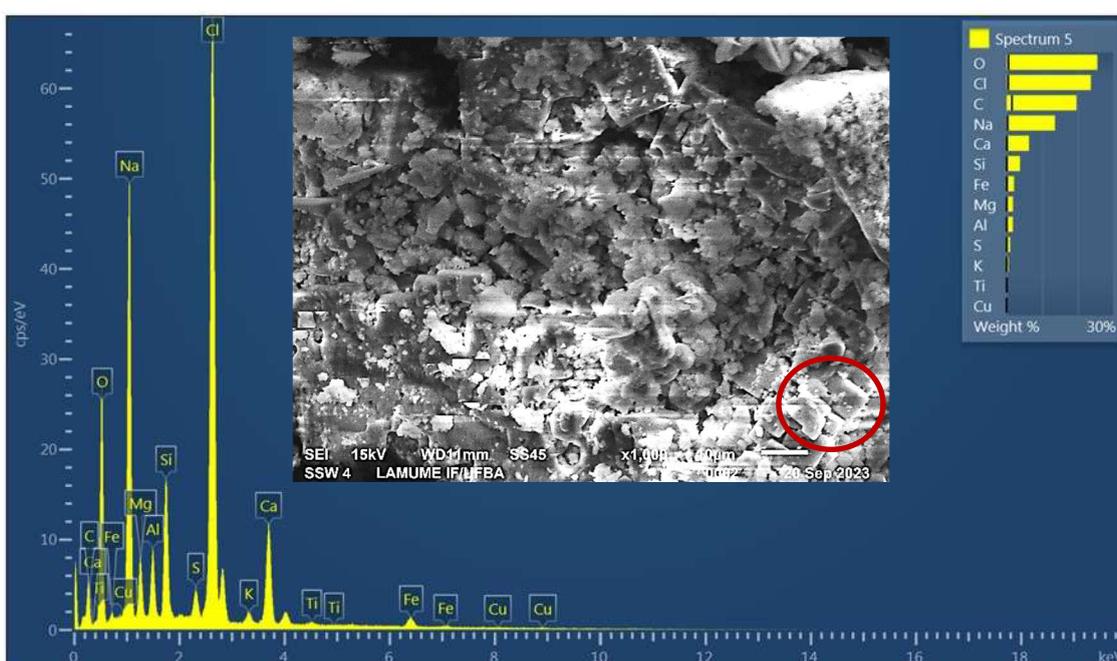
As micrografias eletrônicas de varredura das amostras coletadas dos vidros da cortina de vidro, *Reiki* (SSR), de uma das janelas (SSW), e de uma mistura de ambas (SSW/SSR), bem como as imagens dos seus respectivos espectros de EDS, são mostradas nas Figuras 12 a 14.

Figura 12 – Espectro de EDS e imagem de MEV da amostra SSR.



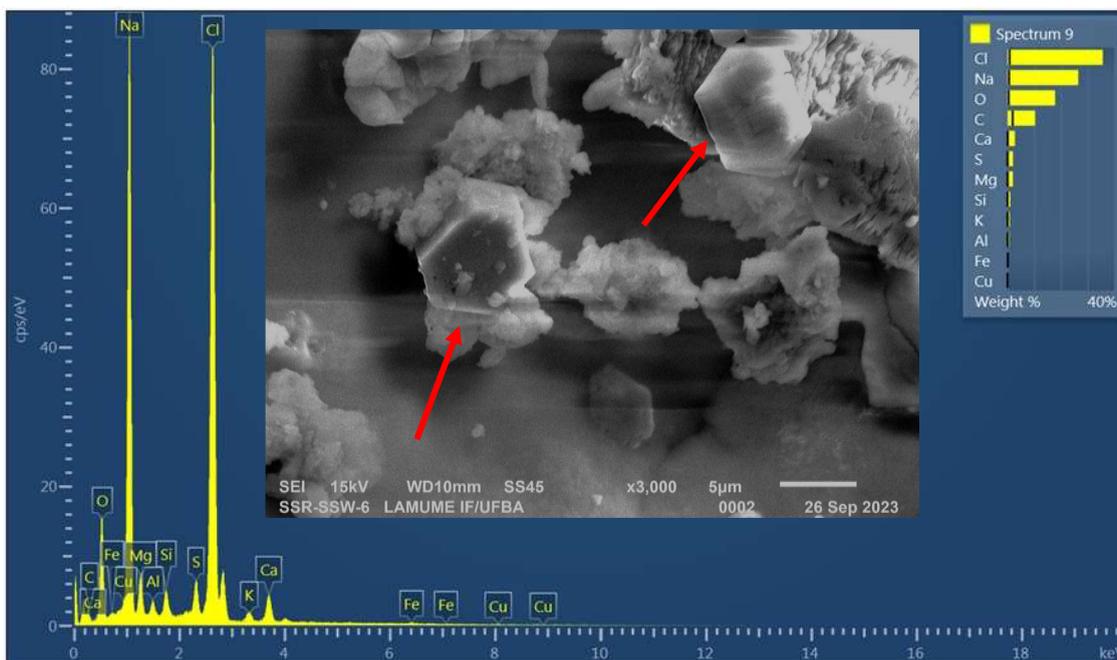
Fonte: Do autor (2023).

Figura 13 – Espectro de EDS e imagem de MEV da amostra SSW.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 14 – Espectro de EDS e imagem de MEV da amostra SSW/SSR.



Fonte: Do autor (2023).

Na imagem da amostra SSR (Figura 12) notou-se que as partículas têm tamanhos e formatos variados, e em sua maioria são irregulares. Entretanto, foi possível identificar a existência de cristais prismáticos, com base hexagonal, que estão destacados na imagem da Figura 12, com círculos vermelhos. Esses cristais, com geometria definida, também foram detectados na amostra SSW/SSR, e podem ser vistos na ampliação de 3000 vezes, mostrada na Figura 14.

Provavelmente, os cristais correspondem a óxido de magnésio, pois partículas com morfologia similar foram encontradas em imagens de MEV de MgO-hex, publicadas por Shi et al. (2017), e em micrografias de MgO/Mg(OH)<sub>2</sub>, obtidas por Kumare et al. (2009). A presença de óxido de magnésio nas amostras pode estar relacionada ao fato de que, no período da coleta, havia diversas construções e reformas sendo executadas nas proximidades do local; desse modo, material finamente particulado, transportado pelo vento, pode ter se depositado junto com o aerossol marinho nos vidros de onde foram coletadas as amostras. É conhecido que o MgO em altas quantidades na composição do concreto torna-se um agente prejudicial, no entanto, sua eliminação da mistura não é possível, dado que está presente na matéria-prima do cimento. Em contato com a umidade do ar, esse óxido passa por processo de expansão volumétrica, que acompanha a sua hidratação à Mg(OH)<sub>2</sub>, que forma camadas de estrutura hexagonal (Salomão e Pandolfelli, 2008).

Por outro lado, na imagem da amostra SSW (Figura 13) observou-se cristais simples de *NaCl* (cloreto de sódio), com geometria cúbica típica (em destaque). Outros autores (Park et al., 2015; Wang et al., 2015) também obtiveram imagens de MEV similares para cristais de *NaCl*.

#### 4.3 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDS)

Na Tabela 5 são apresentados os valores das concentrações estimadas dos elementos contidos nas amostras estudadas, em acordo com os espectros de EDS.

É possível notar, em todas as amostras, a presença de carbono, oxigênio, enxofre e silício, o que pode ser devido à existência de carbonatos, sílica, sulfatos e matéria orgânica, provenientes dos materiais particulados arrastados pelo vento, e emissão de gases que causam poluição atmosférica. Além disso, foram detectados diversos elementos inorgânicos, provavelmente oriundos dos sais minerais que constituem a água do mar, como sódio, magnésio, alumínio, cloro, potássio, cálcio e ferro; alguns deles coincidem com os elementos relacionados na Tabela 1.

Em concordância com os dados encontrados por Mackenzie et al. (2023), e dispostos na Tabela 1, todas as amostras apresentaram um elevado teor de cloro, em relação aos outros componentes presentes, bem como a presença do sódio (Tabela 5), indicando que o cloreto de sódio é o principal componente salino encontrado na água do mar.

Comparando-se as três amostras, a SSW/SSR foi a que mostrou a maior quantidade de cloreto de sódio impregnado em sua superfície, o que está de acordo com as imagens de MEV (Figuras 12 a 14), onde foi possível identificar os cristais de *NaCl* depositados. É importante salientar que esse teor mais elevado de cloreto de sódio também explica os mais altos valores de condutividade e de salinidade encontrados para a amostra SSW/SSR, comparada às demais amostras.

Tabela 5 – Composição estimada das amostras, determinada por EDS.

Amostra	Composição (%m/m)										
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
SSW	19,66	25,53	13,61	1,81	1,76	3,75	1,03	23,69	0,6	6,29	2,09
SSR	13,08	22,19	18,31	1,79	1,19	1,92	2,45	35,52	0,74	4,59	1,21
SSW/SSR	10,32	17,82	26,47	2,00	0,64	1,05	2,04	35,72	0,85	2,76	0,33

Fonte: Do autor (2023).

## 4.4 TESTE EXPERIMENTAL DO SISTEMA

### 4.4.1 Calibração do sensor

Um teste simples de calibração, para a verificação da resposta do sensor, foi realizado com o uso de soluções aquosas de  $NaCl$  com concentrações de  $Cl^-$  iguais a 5, 10, 20 e 25 g/kg. Essas soluções foram preparadas a partir da dissolução de massas conhecidas de cloreto de sódio,  $NaCl$  P.A. ACS (teor mínimo de 99%), de procedência da Êxodo Científica, em 25 mL de água ultrapura. Além disso, foi obtida uma linha de base, utilizando a água ultrapura empregada no preparo das soluções.

A calibração foi conduzida em temperatura ambiente, de aproximadamente  $27^{\circ}C$ , efetuando-se a aplicação de aerossol (*spray*) das soluções sobre o sensor, e observando-se os valores médios da tensão  $v_o$ . A linha de base obtida correspondeu a uma resistência normalizada do sensor  $\frac{R_s}{R} \approx 36$ , indicando a baixíssima salinidade da água ultrapura. Após cada medida da tensão com uma solução de sal de concentração de cloreto diferente, efetuava-se a limpeza do sensor com álcool isopropílico, seguida de secagem, antes de realizar uma nova medição. Os resultados obtidos neste ensaio são mostrados na Tabela 6. Um ajuste de curva para uma função potência:

$$Cl^- = a \left( \frac{R_s}{R} \right)^b \quad (7)$$

foi obtido a partir dos dados tabelados, com  $a = 0,0736$ ,  $b = -3,075$  e um coeficiente de correlação de ajuste  $R^2 = 0,981$ .

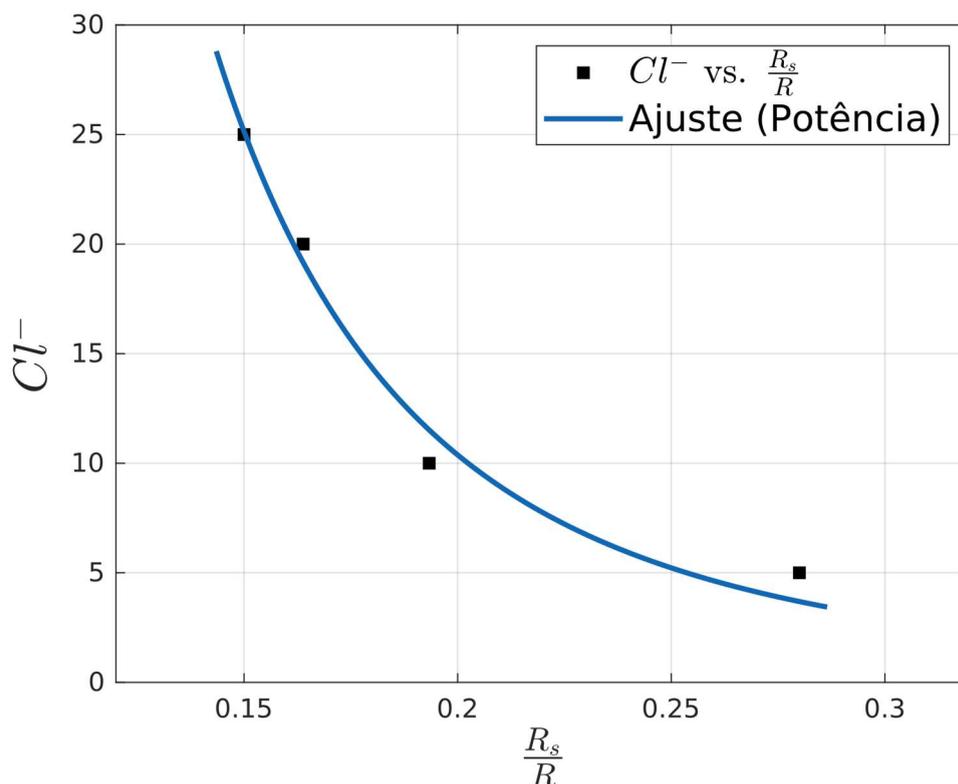
Tabela 6 – Valores de resistência normalizada do sensor de salinidade para cada solução de íons cloreto usada na calibração.

Resistência normalizada do sensor	Concentração de íons cloreto (g/kg)
0,2800	5
0,1933	10
0,1638	20
0,1500	25

Fonte: Do autor (2023).

Com este ajuste, especula-se que é possível estimar, com precisão de 98%, a concentração de cloretos no *spray* marinho, em função da resistência medida do sensor. Na Figura 15, são ilustrados os dados obtidos e a curva de calibração do sensor nas condições descritas.

Figura 15 – Curva de calibração do sensor: concentração de íons cloreto ( $Cl^-$ ) em função da resistência normalizada.



Fonte: Do autor (2023).

#### 4.4.2 Teste de exposição ao ambiente

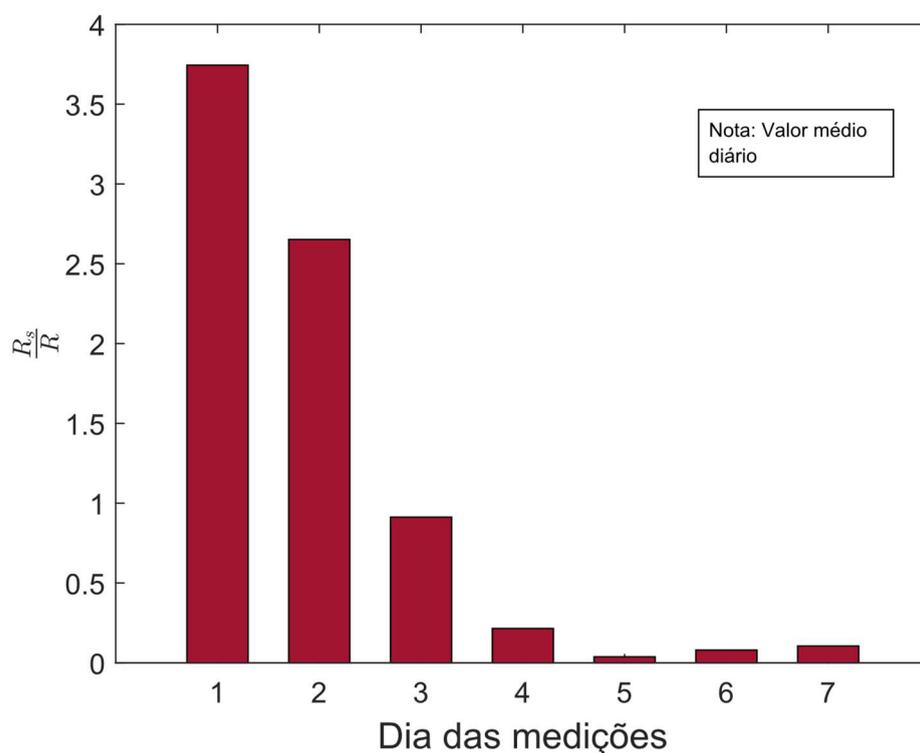
O sistema para detecção de acúmulo do salitre proposto neste trabalho ficou exposto à atmosfera marinha pelo período de uma semana, e os dados obtidos, a partir das medições de diferença de potencial registradas por um osciloscópio, acoplado ao sensor, foram usados na construção de gráficos.

A capacidade de aquisição de dados do modelo utilizado é restrita a intervalos de 600 segundos, com uma amostragem de 1 medição por segundo. A cada salvamento de dados, uma planilha é gerada contendo 600 valores da tensão  $v_o$  com a amostragem mencionada. Com auxílio da Equação 2, e um filtro de eliminação de ruído por média móvel com janela de 30 amostras, a resistência relativa do sensor é

exibida para cada conjunto de medições salvo. É importante destacar que no processo de filtragem 30 amostras são eliminadas, o que corresponde ao comprimento da janela móvel.

Os resultados medidos pelo osciloscópio exibem uma redução progressiva da resistência do sensor ao longo do tempo, algo totalmente esperado devido ao acúmulo de sais marinhos nas ranhuras do sensor. Os dados de resistência foram agregados utilizando a média diária das medições realizadas. O resultado é exibido na Figura 16.

Figura 16 – Resistência do sensor em função da média das medições diárias.



Fonte: Do autor (2023).

Ainda na Figura 16, nota-se que entre o primeiro e o quinto dia de medições, a resistência do sensor decresce de forma acentuada, e isso pode ser atribuído ao aumento da camada salina depositada ao longo destes dias, indicando que o sensor é fortemente impactado por esta variável nos primeiros dias de exposição. O leve incremento observado nos dias subsequentes ao quinto, possivelmente, é devido a condições ambientais, como a umidade relativa do ar e a temperatura ambiente média, que também impactam sobre a condutividade da camada salina depositada.

Como exemplo, para fazer uma estimativa simples da espessura do depósito salino acumulado, considera-se o valor da resistência média do sensor, observado no quinto dia de medição, aquele expresso pela Equação 8,

$$\frac{R_s}{R} = 0,03711 \therefore R_s = 37.110 \text{ k}\Omega \quad (8)$$

Considerando que a resistência do sensor é dada pela Equação 9:

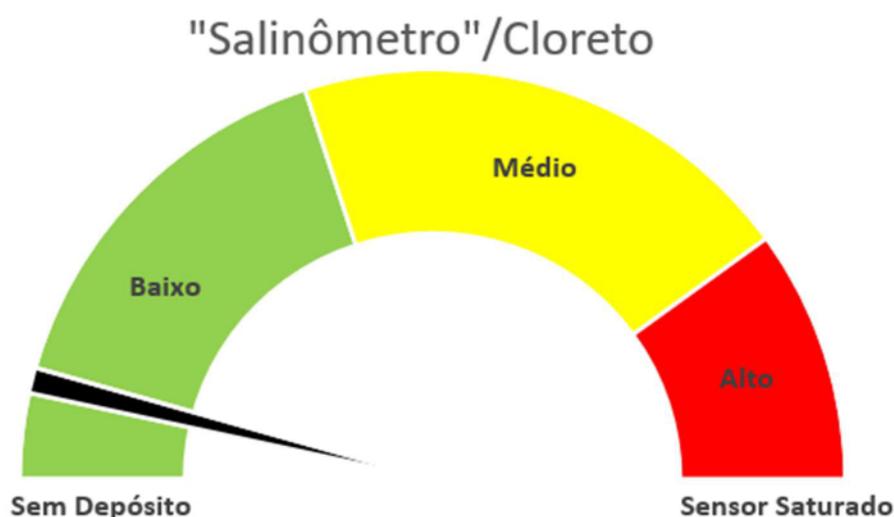
$$R_s = \frac{1}{\sigma_d} \frac{\ell}{\varepsilon c} , \quad (9)$$

e que, a partir dos dados de análise de condutividade, tem-se que a condutividade média é  $\sigma_d = 15,21 \text{ mS/cm}$ , a geometria do sensor  $\ell = 2 \text{ mm}$ , e  $c = 1,3 \text{ cm}$ , obtém-se uma espessura estimada de camada salina igual a:

$$\varepsilon = 2,73 \text{ }\mu\text{m}$$

A ideia de uma escala qualitativa para a avaliação do nível de cloreto depositado no sensor, em função da tensão medida, foi elaborada na forma de um “Salinômetro” com um indicador do nível de resistência do sensor, apresentado na Figura 17. Considerando uma escala de 0 a 1 para a tensão normalizada  $2v_o/E$ , estabeleceu-se a faixa de 0 até 0,4 como baixa quantidade de depósito; de 0,4 a 0,8 como média quantidade de depósito; e de 0,8 até 1 como alta quantidade de depósito. Os extremos da escala são classificados como “sem depósito” e “sensor saturado”. O presente arquivo eletrônico incorpora o arquivo Excel contendo os dados e o indicador do salinômetro. Para acesso, utilize no Acrobat Reader a barra de acesso aos conteúdos anexos – *attachments*, ou a mesma ferramenta no navegador Firefox.

Figura 17 – “Salinômetro” para visualização da concentração de íons cloreto.



Fonte: Do autor (2023).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, um sensor para monitoramento simples do depósito de camadas salinas na superfície de construções foi proposto, tendo como princípio a condutividade dos íons sob umidade atmosférica. Os resultados obtidos neste trabalho permitiram as seguintes conclusões:

- Os depósitos salinos coletados nas superfícies dos vidros apresentaram valores de condutividade elétrica e salinidade mais baixos que os encontrados nos aerossóis marinhos, o que foi relacionado a fatores como a presença de matéria orgânica, poeira, resíduos sólidos e condições atmosféricas.
- As superfícies das amostras estudadas mostraram partículas de tamanho irregular e contendo, principalmente, cloreto de sódio em sua composição química, com cristais que apresentaram a geometria cúbica típica para este sal. Além disso, identificou-se cristais com morfologia hexagonal, que poderiam ser devido à presença de óxidos de magnésio.
- Os resultados apontam na direção da viabilidade do sistema e sensor propostos, que poderá ser utilizado como método complementar aos métodos de análise clássica baseado na coleta por velas úmidas, ou outras similares.
- Dentre as vantagens observadas do método estabelecido estão, além do tempo reduzido para estimação da concentração de íons cloreto, o baixo custo do sensor, que pode ser confeccionado com material facilmente acessível e em escala de manufatura, e a possibilidade de integração à um sistema portátil de aquisição de dados.
- As desvantagens do sensor incluem uma tendência à oxidação em ambientes agressivos, o que diminui sua durabilidade, e sensibilidade da medida devido à umidade do ar, afetando sua calibração. No entanto este parâmetro pode ser compensado caso seu valor seja conhecido.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas para a continuidade desta pesquisa propõem-se:

- A avaliação do efeito da umidade do ar e da temperatura ambiente na resistência do protótipo de sensor de salinidade estudado;
- Realização de teste com o sensor em tempos de exposição mais longos;
- Efetuar as medições de salinidade ou concentração de íons cloreto, pelo método proposto, em outros locais da orla de Salvador, e em diferentes distâncias do oceano;
- Comparar os métodos de determinação da salinidade por vela úmida e com a técnica proposta utilizando o sensor, realizando medições nas mesmas condições de exposição ao aerossol marinho.
- Construção de um sistema de aquisição de dados *in situ*, para levantamento da salinidade e condutividade.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992. 104p.
- BOCHEN, J., SŁOMKA-SŁUPIK, B. e ŚLUSAREK, J., **Experimental study on salt crystallization in plasters subjected to simulate groundwater capillary rise**, Construction and Building Materials v. 308, 125039, 2021.
- BOCKRIS, J. O., REDDY, A. K. N. AND GAMBOA-ALDECO, M., **Modern Electrochemistry 2A**, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BROCKEN, H. e NIJLAND, T. G., **White efflorescence on brick masonry and concrete masonry blocks, with special emphasis on sulfate efflorescence on concrete blocks**, Construction and Building Materials v. 18(5), p. 315-323, 2004.
- CASCUDO, O., **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**, São Paulo: Pini, 1997. 237p.
- CATELLI, E., BANICA, F.-G. e BANICA, A., **Salt efflorescence in historic wooden buildings**, Heritage Science v. 4(31), p. 1 – 13, 2016.
- COOPER, T., **Beyond Recycling: The longer life option**, The New Economics Foundation, 1994.
- DEDAVID, A. B.; GOMES, I. C.; MACHADO., **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparo de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60p.
- DE GUTIÉRREZ, M. R. e AGUIRRE, A. M., **Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas**, Materiales de Construcción v. 63(309), p. 7 – 38, 2013.
- DE SOUZA, M. F., **Patologias ocasionadas pela umidade nas edificações**, Monografia (Especialização em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. 54p.
- EKELOF, S. **The genesis of the Wheatstone bridge**, Engineering Science & Education Journal, v. 10, n. 1, p. 37-40, 2001.
- FAN, C.-L. e CHUNG, Y.-J., **Supervised Machine Learning Based Detection of Concrete Efflorescence**, Symmetry v. 14(11), 2022.
- FLORES-COLEN, I., DE BRITO, J. e DE FREITAS, V. P., **Stains in facades' rendering Diagnosis and maintenance techniques' classification**, Construction and Building Materials, v.22(3), 211—221, 2008.
- GRAY, J. R., **Conductivity Analyzers and Their Application**, Wiley, p. 491—510, 2004.

GROOT, C., VAN HEES, R. AND WIJFFELS, T., **Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates**, *Construction and Building Materials* 23(5), 1743—1750, 2009.

GUIMARÃES, E.A., **Avaliação da Capacidade Protetora da Resina de Óleo de Mamona Contra a Penetração de Agentes Agressivos no Concreto**, Dissertação (Mestrado em Estruturas), Universidade de Brasília, 1997. 150p.

HOSSAIN, K. M. A., EASA, S. M. e LACHEMI, M., **Evaluation of the effect of marine salts on urban built infrastructure**, *Building and Environment* v. 44(4), p. 713—722, 2009.

KACZMAREK, A., **Evolution of Salt Efflorescence on Clinker Face Walls**, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering v. 471, 032036, 2019.

KUMARE, L., LI, W.Z., VANNOY, C.H., LEBLANC, R.M. e WANG, D.Z. **Synthesis, characterization and optical properties of magnesium hydroxide micro-nanostructures**, *Ceramics International* v. 35, p. 3355—3364, 2009.

LIU, J., OU, G., QIU, Q., XING, F., TANG, K. AND ZENG, J., **Atmospheric chloride deposition in field concrete at coastal region**, *Construction and Building Materials* v. 190, p. 1015—1022, 2018.

LIU, R., YIN, H., ZHANG, L., LI, B. AND MAO, X., **Model for the Patterns of Salt-Spray-Induced Chloride Corrosion in Concretes under Coupling Action of Cyclic Loading and Salt Spray Corrosion**, *Processes* 7(2), 84, 2019.

MACKENZIE, F. T., DUXBURY, A.C., BYRNE, R. H., **Seawater**. *Encyclopedia Britannica*, publicado em 01 de junho de 2023, disponível em <http://bit.ly/3GshKP6>, acessado em 12 de agosto de 2023.

MASCARENHAS, F. **O lado bom do salitre**. *A TARDE*, 2008, Disponível em: <https://bit.ly/3QxSdJb>, Acesso em 14 ago 2023.

MEIRA, G. R. AND PADARATZ, I. J., **Efeito do Distanciamento em Relação ao Mar na Agressividade por Cloretos**, *Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto*, p. 1 – 8, 2002.

MENEZES, R. R., FERREIRA, H. S., NEVES, G. A. e FERREIRA, H. C., **Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção - revisão**, *Cerâmica* v. 52(321), p. 37—49, 2006.

MORENO, J. D., BONILLA, M., ADAM, J. M., BORRACHERO, M. V. e SORIANO, L., **Determining corrosion levels in the reinforcement rebars of buildings in coastal areas. A case study in the Mediterranean coastline**, *Construction and Building Materials* v. 100, p. 11—21, 2015.

MORILLAS, H., DE MENDONÇA FILHO, F. F., DERLUYN, H., MAGUREGUI, M., GRÉGOIRE, D. e MADARIAGA, J. M., **Decay processes in buildings close to the sea induced by marine aerosol: Salt depositions inside construction materials**,

Science of The Total Environment v. 721, 137687, 2020.

MOTA, J., BARBOSA, F., COSTA E SILVA, A., FRANCO, A. AND CARVALHO, J., **Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado devido ao Ataque de Íons Cloreto**, in Anais do 54° Congresso Brasileiro do Concreto, Maceió, Alagoas, 2012.

MUMBERGER, F. B., TUTIKIAN, B. F. e BOLINA, F. L., **Proposed durability parameters for reinforced concrete structures with design service life between 50 years and 100 years in Brazil**, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais v. 15(6), 2022.

MUNDO ESTRANHO. **O que é maresia**. Superinteressante. ABRIL, 2011. Disponível em: <https://bit.ly/40zwW6u>, Acesso em: 14 ago 2023.

NEVILLE, A., **Chloride attack on reinforced concrete: an overview**, Materials and structures, v. 28, p. 63 – 70, 1995.

PARK, H., LEE, J., HAN, J., PARK, S., PARK, J. AND MIN, B., **CO<sub>2</sub> Fixation by Membrane Separated NaCl Electrolysis**, Energies 8(8), p. 8704-8715, 2015.

PEREIRA, C., DE BRITO, J. e SILVESTRE, J. D., **Contribution of humidity to the degradation of facade claddings in current buildings**, Engineering Failure Analysis v. 90, p. 103—115, 2018.

RUDNOV, V. S. and BELYAKOV, V. A., **Effective ways to reduce leaching and formation of efflorescence on structures**, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering v. 687(2), 022025, 2019.

SALOMÃO, R., PANDOLFELLI, V. C., **Hidratação e desidratação de óxido de magnésio em concretos refratários**, Cerâmica v. 54, p. 145—51, 2008.

SANGIORGIO, V., UVA, G., FATIGUSO, F., ADAM, J. M., **A new index to evaluate exposure and potential damage to RC building structures in coastal areas**, Engineering Failure Analysis v. 100, p. 439—455, 2019.

SHI, X.-H., BAN, J.-J., ZHANG, L., SUN, Z.-P., JIA, D.-Z., XU, G.-C., **Preparation and exceptional adsorption performance of porous MgO derived from a metal-organic framework**, Royal Society of Chemistry Advances v. 7, p. 16189–16195, 2017.

SUTAN, N. M. e SININ, H., **Efflorescence Phenomenon on Concrete Structures**, Advanced Materials Research v. 626, p. 747—750, 2012.

TYLER, R.H., BOYER, T.P., MINAMI, T., ZWENG, M. N., REAGAN, J. R., **Electrical conductivity of the global ocean**. Earth Planets Space v. 69 (156), doi: 10.1186/s40623-017-0739-7, 2017.

VIEIRA, M. E., SILVA, M. L. S., DE OLIVEIRA, L. F. C., PERRONE, H. T., STEPHANI, R., **Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplada ao**

**microscópio eletrônico de varredura (MEV): fundamentos e aplicações em produtos lácteos**, Research, Society and Development 10(10), e262101018622., 2021.

VINICHENKO, V., RYAZANOVA, V. A., GABITOV, A. I., UDALOVA, Y. A. and SALOV, A. S., **Efflorescence Processes in Exterior Wall Surface of Buildings**, Materials Science Forum v. 968, p. 115—121, 2019.

WANG, B., JIN, P., YUE, Y., JI, S., LI, Y. AND LUO, H. (2015), **Synthesis of NaCl single crystals with defined morphologies as templates for fabricating hollow nano/micro-structures**, RSC Advances 5(7), p. 5072-5076, 2015.

WU, L., LI, W. e YU, X., **Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments**, Construction and Building Materials, Vol. 152, Elsevier BV, p. 406-413, 2017.

XIANG, L., MENG, Q. e REN, P., **Effects of environmental and architectural factors on chloride-salt deposition on coastal building surfaces in the Zhujiang River Estuary**, Building and Environment v. 242, 110554, 2023.

YUAN, Q., ZHANG, J., HUANG, Z., ZHANG, Z., WANG, X. AND LI, B., **Deposition and accumulation of marine aerosol and its penetration into concretes exposed to the marine atmospheric zone: an overview**, Archives of Civil and Mechanical Engineering 23(1), 2023.