



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**GREYLSON NUNES AGUIAR**

**AVALIAÇÃO DO TEOR DO ÍON CLORO NO AR ATMOSFÉRICO DA PRAIA DO  
FUTURO, EM FORTALEZA, EM FUNÇÃO DA ALTITUDE.**

**FORTALEZA**  
**2021**

GREYLSO NUNES AGUIAR

AVALIAÇÃO DO TEOR DO ÍON CLORO NO AR ATMOSFÉRICO DA PRAIA DO  
FUTURO, EM FORTALEZA, EM FUNÇÃO DA ALTITUDE.

Monografia submetida à Coordenação do  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo  
Bezerra Cabral

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

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

---

A229a Aguiar, Greylson Nunes.  
Avaliação do teor do íon cloro no ar atmosférico da Praia do Futuro, em Fortaleza, em função da altitude /  
Greylson Nunes Aguiar. – 2021.  
75 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

1. Íons cloro. 2. Praia do Futuro. 3. Agressividade ambiental. I. Título.

CDD 620

---

GREYLSO NUNES AGUIAR

AVALIAÇÃO DO TEOR DO ÍON CLORO NO AR ATMOSFÉRICO DA PRAIA DO  
FUTURO, EM FORTALEZA, EM FUNÇÃO DA ALTITUDE.

Monografia submetida à Coordenação do  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 08/04/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral  
Universidade Federal do Ceará – UFC (Orientador)

---

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita  
Universidade Federal do Ceará – UFC/ Campus de Russas (Examinador)

---

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos - UFC  
Universidade Federal do Ceará – UFC (Examinador)

FORTALEZA

2021

À Deus.

Aos meus pais, Antônio e Lúcia.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pelas graças alcançadas e por dai-me forças para superar os obstáculos e dificuldades apresentadas durante a elaboração deste trabalho, assim como durante minha jornada acadêmica.

À minha família, pelo apoio e companheirismo incondicional, prestados desde sempre. Em especial aos meus pais, Antônio e Lúcia, meu irmão, Gleyson, e minha avó, Francisca (*in memoriam*), gratidão por serem o alicerce da minha vida.

Aos meus estimados amigos do curso de Engenharia Civil pelo companheirismo, apoio e troca de conhecimentos nesta jornada acadêmica, este período tornou-se mais divertido e especial graças a vocês.

À Isis Rocha, obrigado pelo companheirismo, apoio, amor e carinho dispensados a mim.

Ao professor Dr. Eduardo Cabral pelo apoio, orientação e conhecimentos repassados durante elaboração desta pesquisa.

Aos professores, Dr. Esequiel e Dr. Lucas Feitosa, por aceitarem participar desta banca e por suas valorosas críticas e sugestões apresentadas.

À professora Dra. Marisete pela orientação e revisão na elaboração deste texto.

À minha amiga, Eris Sabino, pelo auxílio na elaboração do Abstract.

À professora Dra. Elisane pela orientação e disponibilização do Laboratório de Química Analítica para realização deste trabalho.

Ao Matheus, seu pai Ástelio e demais condôminos por permitirem a realização desta pesquisa em seus apartamentos.

Ao INMET, por disponibilizar os dados meteorológicos da cidade.

A todos, mesmo que não estejam mencionados, que de certa forma contribuíram ou estiveram presentes na realização desta pesquisa, minha gratidão. Muito obrigado!

“O que sabemos é uma gota,  
o que ignoramos é um oceano”.

Isaac Newton

## RESUMO

As estruturas de concreto armado, quando expostas em ambientes de atmosfera marinha, estão mais suscetíveis a se degradarem, pois esta sofre os efeitos deletérios da névoa salina, composta por íons cloro. Estes íons, em conjunto com as condições ambientais, são responsáveis, em boa parte, pela corrosão das armaduras, manifestação patológica mais recorrente nas estruturas de concreto armado. A Praia do Futuro, em Fortaleza, é apresentada como local com maresia mais forte do Brasil (Torres, 2018), fato este que desestimula a construção e desvaloriza diversos empreendimentos imobiliários no local. Este trabalho tem como objetivo avaliar o teor de íons cloro em função da altitude nesta região, visto que os estudos envolvendo estas variáveis são escassos e tal conhecimento permitirá o desenvolvimento de projetos de estruturas de concreto armado mais econômicos e viáveis tecnicamente, em razão de seu melhor desempenho face à agressividade do meio. Para quantificação do teor de íons cloro no ar atmosférico adotou-se o procedimento descrito na NBR 6211 (ABNT, 2001). Escolheu-se um edifício à 850 metros de distância do mar e colocou-se quatro velas úmidas, localizadas no deck (pé-direito duplo), 6 metros de altitude, 4º andar, 12 metros de altitude, 10º andar, 30 metros de altitude, e 16º andar, 48 metros de altitude, onde ficaram expostas durante um período de 90 dias, sendo repostas a cada 30 dias. A partir dos resultados obtidos, permitiu-se concluir que existe uma elevada agressividade ambiental nas regiões de baixa altitude e livres de obstáculos. Entretanto, não foi possível estabelecer uma correlação clara entre estas variáveis, uma vez que fatores intervenientes, como direção do vento, prejudicaram a realização de uma análise mais precisa.

**Palavras-chave:** Íons cloro. Praia do Futuro. Agressividade ambiental.

## ABSTRACT

Reinforced concrete structures, when exposed in marine atmosphere environments, are more susceptible to degradation, as it suffers the deleterious effects of salt spray, composed of chloride ions. These ions, together with the environmental conditions, are responsible, for the most part, for the corrosion of the reinforcement, the most recurrent pathological manifestation in reinforced concrete structures. Praia do Futuro, in Fortaleza, is presented as the place with the strongest salt air in Brazil (Torres, 2018), a fact that discourages construction and devalues several real estate projects on site. This work aims to evaluate the content of chlorine ions as a function of altitude in this region, since studies involving these variables are scarce and such knowledge will allow the development of more economical and technically feasible reinforced concrete structures projects, due to its better performance in the face of the aggressiveness of the environment. To quantify the content of chloride ions in the atmospheric air, the procedure described in NBR 6211 (ABNT, 2001) was adopted. A building was chosen 850 meters away from the sea and four wet sails were placed, required on the deck (double height), 6 meters high, 4th floor, 12 meters high, 10th floor, 30 meters high, and 16th floor, 48 meters high, where it was exposed for a period of 90 days, being replaced every 30 days. From the results obtained, it was possible to conclude that there is a high environmental aggressiveness in the low-altitude and obstacle-free regions. However, it was not possible to establish a clear correlation between these variables, since intervening factors, such as wind direction, hindered a more accurate analysis.

**Keywords:** Chlorine ions. Praia do Futuro. Environmental aggressiveness.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Representação da pilha de corrosão. ....   | 22 |
| Figura 2 - Representação dos tipos de corrosão. ....  | 23 |
| Figura 3 – Diagrama de equilíbrio termodinâmico do material ferro em meio aquoso a 25°C.<br>.....     | 24 |
| Figura 4 – Fatores intervenientes na durabilidade e desempenho de uma estrutura de concreto.<br>..... | 29 |
| Figura 5 – Modelo de vida útil. ....  | 30 |
| Figura 6 – Zonas de agressividade às estruturas de concreto. ....                                     | 35 |
| Figura 7 – Relação entre concentração salina e velocidade do vento nas diferentes zonas. ....         | 38 |
| Figura 8 – Velas úmidas preparadas no LMCC. ....  | 42 |
| Figura 9 – Localização do edifício. ....  | 43 |
| Figura 10 – Disposição das torres com indicações dos locais das velas úmidas. ....                    | 44 |
| Figura 11 – Torre Morano com indicações da localização das velas úmidas. ....                         | 44 |
| Figura 12 – Vela úmida no deck da área de lazer. ....   | 45 |
| Figura 13 – Vela úmida na sacada do 10º andar. ....   | 45 |
| Figura 14 – Vela úmida no LMCC – UFC. ....  | 46 |
| Figura 15 – Distância local do ensaio em branco à orla. ....  | 46 |
| Figura 16 – Vista superior do deck com as velas úmidas. ....  | 47 |
| Figura 17 – Direção característica do vento. ....   | 54 |
| Figura 18 – Verificação da direção do vento através da biruta. ....                                   | 54 |
| Figura 19 – Locação das velas/ direção característica do vento. ....                                  | 55 |
| Figura 20 - Perfil de cloretos a diferentes profundidades. ....                                       | 60 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1– Classes de agressividade ambiental.....  | 16 |
| Quadro 2 – Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto.....  | 31 |
| Quadro 3 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.....   | 32 |
| Quadro 4 – Requisitos para o concreto em condições especiais.....  | 32 |
| Quadro 5 – Correspondência entre a localização da estrutura de concreto e o tipo de deterioração observado (Mehta, 1980; CEB, 1992; Barbudo, 1992; Helene, 1993; Mehta e Monteiro, 1994; Guimarães, 2000)..... | 36 |
| Quadro 6 – Estudos que abordam a influência da distância em relação ao mar na concentração salina.....   | 39 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1 – Teor de íons cloro (10/nov a 10/dez).....  | 51 |
| Gráfico 2 – Teor de íons cloro (10/dez a 15/jan).....  | 51 |
| Gráfico 3 – Teor de íons cloro (15/jan a 12/fev). ....   | 52 |
| Gráfico 4 – Teor médio de íons cloro.....  | 52 |
| Gráfico 5 – Precipitação pluviométrica no período.....   | 56 |
| Gráfico 6 – Umidade relativa no período. ....  | 57 |
| Gráfico 7 – Temperatura no período. ....   | 57 |
| Gráfico 8 – Teor de cloreto em % da massa de cimento do concreto versus cota dos andares.<br>..... | 59 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Gastos em países desenvolvidos com manutenção.....                    | 15 |
| Tabela 2 – Composição da água do mar (FORSCHHAMMER, s.d. apud BICZÓK, 1972). ... | 34 |
| Tabela 3 – Resumo do teor de íons cloro no período de análise. ....              | 50 |
| Tabela 4 – Resumo dos parâmetros atmosféricos. ....                              | 53 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                       | 14 |
| <b>1.1</b> Formulação do tema de pesquisa .....                 | 14 |
| <b>1.2</b> Objetivos.....                                       | 17 |
| <i>1.2.1</i> <i>Objetivo geral</i> .....                        | 17 |
| <i>1.2.2</i> <i>Objetivos específicos</i> .....                 | 17 |
| <b>1.3</b> Estrutura do trabalho .....                          | 17 |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                            | 19 |
| <b>2.1</b> O concreto como material estrutural.....             | 19 |
| <b>2.2</b> Corrosão .....                                       | 20 |
| <i>2.2.1</i> <i>Conceito</i> .....                              | 20 |
| <i>2.2.2</i> <i>Análise química</i> .....                       | 21 |
| <i>2.2.3</i> <i>Tipos de corrosão das armaduras</i> .....       | 22 |
| <i>2.2.4</i> <i>Camada de passivação</i> .....                  | 23 |
| <b>2.3</b> Íons cloro .....                                     | 25 |
| <i>2.3.1</i> <i>Despassivação da armadura</i> .....             | 25 |
| <i>2.3.2</i> <i>Mecanismos de transporte</i> .....              | 26 |
| <b>2.4</b> Durabilidade e vida útil .....                       | 27 |
| <b>2.5</b> Agressividade ambiental .....                        | 30 |
| <i>2.5.1</i> <i>Ambiente marinho</i> .....                      | 33 |
| <i>2.5.1.1</i> <i>Zonas de atmosfera marinha</i> .....          | 34 |
| <i>2.5.2</i> <i>Formação e transporte da névoa salina</i> ..... | 36 |
| <i>2.5.2.1</i> <i>Velocidade e direção do vento</i> .....       | 37 |
| <i>2.5.2.2</i> <i>Distância em relação ao mar</i> .....         | 38 |
| <i>2.5.2.3</i> <i>Altitude</i> .....                            | 40 |
| <b>3 METODOLOGIA</b> .....                                      | 41 |
| <b>3.1</b> Preparação das velas .....                           | 41 |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>3.2</b>   | <b>Localização das velas úmidas .....</b>  | <b>42</b> |
| <b>3.3</b>   | <b>Procedimentos de amostragem.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>3.4</b>   | <b>Determinação do teor de cloro no ar atmosférico .....</b>                       | <b>48</b> |
| <b>3.5</b>   | <b>Caracterização dos parâmetros atmosféricos .....</b>                            | <b>48</b> |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>Deposição de cloretos .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>Parâmetros atmosféricos .....</b>   | <b>53</b> |
| <b>4.2.1</b> | <b><i>Vento</i> .....</b>  | <b>53</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b><i>Precipitação</i> .....</b>   | <b>56</b> |
| <b>4.2.3</b> | <b><i>Umidade relativa</i> .....</b>   | <b>56</b> |
| <b>4.2.4</b> | <b><i>Temperatura</i> .....</b>  | <b>57</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>Comparação com outros estudos .....</b>   | <b>58</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>  | <b>61</b> |
| <b>5.1</b>   | <b>Conclusão .....</b>   | <b>61</b> |
| <b>5.2</b>   | <b>Sugestões de trabalhos futuros.....</b>   | <b>62</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>63</b> |
|              | <b>APÊNDICE A – RESULTADOS DA TITULAÇÃO DA VELA ÚMIDA .....</b>                    | <b>66</b> |
|              | <b>ANEXO A – SOLUÇÕES PARA O PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DA VELA ÚMIDA .....</b>       | <b>68</b> |
|              | <b>ANEXO B – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS .....</b> | <b>69</b> |
|              | <b>ANEXO C – ACOMPANHAMENTO DOS PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS.....</b>                   | <b>73</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do tema de pesquisa

A preocupação da humanidade com a concepção de estruturas adaptadas às suas necessidades vem desde os primórdios da civilização, podendo estas serem habitacionais (casas, edifícios), assim como laborais (pontes, barragens, aquedutos, dentre outros). Desse modo, houve ao longo dos séculos um grande acúmulo de acervo científico permitindo o desenvolvimento de tecnologias na construção civil, seja referente à concepção, cálculo, análise, detalhamento ou tecnologia dos materiais (SOUZA; RIPPER, 1998).

Entretanto, apesar deste avanço tecnológico, algumas estruturas e materiais apresentam desempenho insatisfatório, face às finalidades pelas quais foram desenvolvidas, ocorrendo, assim, um processo de deterioração estrutural (CAMPOS, 2016).

Neste aspecto, a corrosão das armaduras do concreto armado e protendido é uma das principais causas da degradação estrutural, vide o grande volume de casos constatados, a qual gera uma elevada demanda de recursos. Para exemplificar este fato, Meira (2017) apresentou diversos autores no cenário nacional, dentre estes: Aranha (1994), que analisou diversos casos de manifestações patológicas na região Norte, destes 46% referem-se à corrosão de armaduras; na região Nordeste, Andrade (1997) constatou que 64% das manifestações patológicas analisadas ocorriam devido a corrosão; na região Centro-Oeste, Nince e Clímico (1996) averiguou que esta problemática ocorria em 30% dos casos; porcentagem semelhante a encontrada por Carmona e Marega (1988) na região Sudeste; por fim, Dal Molin (1988) apresentou que a corrosão acometia 40% das manifestações patológicas estudadas. Silva (2011) constatou que no Ceará cerca de 97% das manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado são oriundas da corrosão de armaduras. Desse modo, certifica-se que esta problemática ocorre em todo país, se intensificando nas regiões litorâneas.

Como relatado anteriormente, o elevado número de casos de estruturas degradadas devido à corrosão provoca um oneroso dispêndio financeiro. Os gastos com manutenções e reparos de edificações em países desenvolvidos equivalem aos gastos referentes a novas construções, como demonstra a Tabela 1 a seguir, em pesquisa com dados de 2004, exceto os dados referentes à Itália obtidos em 2002.

Tabela 1 – Gastos em países desenvolvidos com manutenção.

| País        | Gastos com construções novas    | Gastos com manutenção e reparo  | Gastos totais com construção      |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| França      | 85,6 Bilhões de Euros<br>(52%)  | 79,6 Bilhões de Euros<br>(48%)  | 165,2 Bilhões de Euros<br>(100%)  |
| Alemanha    | 99,7 Bilhões de Euros<br>(50%)  | 99,0 Bilhões de Euros<br>(50%)  | 198,7 Bilhões de Euros<br>(100%)  |
| Itália      | 58,6 Bilhões de Euros<br>(43%)  | 76,8 Bilhões de Euros<br>(57%)  | 135,4 Bilhões de Euros<br>(100%)  |
| Reino Unido | 60,7 Bilhões de Pounds<br>(50%) | 61,2 Bilhões de libras<br>(50%) | 121,9 Bilhões de Pounds<br>(100%) |

Fonte: Ueda. Takewaka, 2007 *apud* MEDEIROS; ANDRADE, HELENE, 2011.

À vista disso, diversos estudos foram realizados com objetivo de compreender como ocorre o processo corrosivo nas armaduras, observando-se, assim, que o cloreto é o agente agressivo mais comum nas estruturas de concreto.

Pode-se encontrar na literatura diversas pesquisas nas quais correlacionam o teor de cloretos à distância em relação ao mar. Tais estudos são imprescindíveis dado os danos que estes elementos podem causar nas estruturas de concreto armado. Entretanto, estudos que correlacionam estes teores à altura em relação ao mar são escassos, sendo estes fundamentais para se compreender o ambiente o quais as estruturas estão inseridas, melhorando, deste modo, os projetos e minimizando os custos com manutenção.

A Norma Brasileira - NBR 6118 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2014) aborda a agressividade ambiental como as ações físicas e químicas que atuam sobre a estrutura de concreto, independente das ações mecânicas, variações volumétricas, de retração, dentre outras previstas no dimensionamento da estrutura. Dessa maneira, a referida norma apresenta a classificação quanto a agressividade ambiental conforme o Quadro 1.

Quadro 1– Classes de agressividade ambiental.

| 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>1), 2)</sup>                                       | Pequeno                            |
| III                               | Forte         | Marinha <sup>1)</sup>  | Grande                             |
|                                   |               | Industrial <sup>1), 2)</sup>                                   |                                    |
| IV                                | Muito forte   | Industrial <sup>1), 3)</sup>                                   | Elevado                            |
|                                   |               | Respingos de maré  |                                    |

<sup>1)</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível 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>2)</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

<sup>3)</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT 2014).

Segundo Pontes (2006, *apud* CAMPOS, 2016), a agressividade ambiental, em decorrência da quantidade de cloretos, pode desencadear e acelerar o processo de corrosão nas armaduras. Em função disto, novas exigências são feitas às estruturas de concreto, sendo, desse modo, necessário realizar a caracterização do nível de agressividade ambiental do local onde será construída a obra.

De acordo com Leal e Pamplona (1982, *apud* SILVA, 2011), na Praia do Futuro (litoral de Fortaleza) o mar aberto provoca maior pulverização e a névoa salina é transportada a diversos quilômetros do litoral devido aos ventos alísios normais à costa.

Dado exposto acima, é importante que se defina corretamente o nível de agressividade ambiental dessa região, visto ser um local que apresenta elevada maresia com abundante deposição de sais nas estruturas de concreto. Ademais, a costa do litoral leste de Fortaleza possui diversos empreendimentos imobiliários que, com a deterioração das estruturas de concreto por conta da maresia, acabam perdendo valor de mercado. Assim, faz-se necessário apresentar projetos estruturais que estejam de acordo com o ambiente nas quais estarão inseridos, melhorando a experiência do usuário com o imóvel e diminuindo os custos com manutenção.

Por ser uma região marinha, a medição mais adequada para definição do nível de agressividade trata-se do teor de íons cloro. Para isto, pode-se utilizar o procedimento experimental descrito na NBR 6211 (ABNT, 2001), com a utilização da vela úmida.

Há na literatura trabalhos nas quais buscam avaliar o teor de íons cloro em relação à altitude, como Cipriano e Blanchard (1984 *apud* SANTOS, 2013); Rincón *et al.* (2006); Medeiros *et al.* (2010). Entretanto, estes avaliam o teor de cloretos no concreto, nesta pesquisa será avaliado o teor de íons cloro no ar atmosférico. Ademais, compreender como ocorre a deposição dos sais em função da altura da edificação podem ser de grande valia para elaboração de projetos mais acurados, técnicos e viáveis economicamente.

## **1.2 Objetivos**

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

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o teor de íons cloro na região da Praia do Futuro, localizada em Fortaleza, quando se varia a altitude em relação ao nível do mar, por meio do método da vela úmida estabelecido na NBR 6211 (ABNT, 2001).

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

- a) Caracterizar os dados referentes à temperatura, umidade relativa, vento e precipitação da região em análise, durante o tempo de pesquisa;
- b) Comparar os diversos parâmetros atmosféricos, como vento, temperatura, umidade relativa e precipitação, em relação aos teores de cloretos;
- c) Analisar se os teores de íon cloro em relação à altura do nível do mar segue alguma função matemática;
- d) Comparar os resultados obtidos com estudos semelhantes realizados.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

Esta monografia divide-se em cinco capítulos.

O primeiro capítulo consiste na explanação geral do tema, onde é apresentado a formulação do tema de pesquisa com sua justificativa, além dos objetivos gerais e específicos da pesquisa.

No segundo capítulo é realizado uma ampla revisão bibliográfica na qual irá servir de apoio ao leitor para uma melhor compreensão do assunto abordado. Neste capítulo é apresentado, primeiramente, o concreto como material estrutural. Logo após, é explanado a definição da corrosão, como ela ocorre, quais são suas classificações, assim como o conceito de camada de passivação. Ademais, tem-se uma formulação bibliográfica do agente agressivo foco desta pesquisa, o íon cloro, com a explanação dos diversos mecanismos de transportes deste, além de como este provoca a despassivação da armadura. Apresenta-se o conceito de durabilidade e vida útil. Por fim, aborda-se a agressividade ambiental, descrevendo o ambiente marinho, como ocorre a formação da névoa salina, quais são os fatores intervenientes e, por fim, as zonas de atmosfera marinha, conforme classificação de Duracrete (1999).

No terceiro capítulo tem-se toda metodologia de pesquisa, caracterizou-se os dados ambientais da região, descreveu-se a locação das velas úmidas, como estas foram preparadas, como ocorreu o procedimento de amostragem, assim como se determinou o teor de íons cloro.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Primeiramente é apresentado um resumo do teor de cloretos em cada local, assim como o resumo dos parâmetros climatológicos da região. Em sequência é estabelecido como cada um destes parâmetros afetam os teores de íons cloro calculados em cada local. Por fim, analisa-se a deposição de cloretos em cada ciclo e sua média, assim como se compara estes resultados aos obtidos em pesquisas de natureza semelhante.

Por fim, no quinto capítulo tem-se a apresentação da conclusão e sugestão de temas para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O concreto como material estrutural

Empregado em casas de alvenaria, rodovias, pontes, torres de resfriamento, usinas hidrelétricas e nucleares, saneamento, dentre outras, estima-se que no mundo são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, anualmente. Este consumo equivale a 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano, inferior somente ao consumo de água, conforme a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (PEDROSO, 2009).

Neville e Brooks (2013) argumenta que atualmente os dois materiais estruturais mais utilizados são o concreto e o aço, sendo por vezes empregados de maneira complementares.

Dado a larga utilização deste material, conforme exposto acima, é necessário compreender seu comportamento, assim como suas propriedades físicas e químicas. Não obstante, deve-se entender seu desempenho nos ambientes agressivos, de modo a projetar e executar estruturas mais duráveis (SANTOS, 2013).

Dessa maneira, define-se o concreto, segundo Mehta e Monteiro (1994), como um material composto em que se apresenta um meio contínuo aglomerante, com partículas ou fragmentos de agregados inseridos. No caso do concreto hidráulico, a diferença consiste no meio aglomerante, composto por cimento hidráulico e água.

O concreto, diferente do aço, em que é produzido sob condições rigidamente controladas, é elaborado *in loco*, ou seja, sua qualidade, por mais que seus componentes sejam adequados, depende de quem produz. O concreto pré-fabricado, mesmo que feito de maneira controlada, possui variantes como transporte, lançamento e adensamento que afetam sua qualidade final (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Pedroso (2009) afirma que o motivo para este material ser amplamente utilizado deve-se a duas propriedades: resistência à água, diferente da madeira o concreto é menos suscetível a deterioração quando exposto à água; e sua plasticidade que permite elaborar diversas formas construtivas, contribuindo para criatividade arquitetônica. É válido ressaltar, além destes aspectos, a farta disponibilidade de seus componentes constituintes e seu baixo custo.

Souza e Ripper (1998) argumenta que o concreto é instável no decorrer do tempo, modificando suas propriedades físicas e químicas devido às características dos elementos

constituintes e de suas respostas às condicionantes do meio. As consequências destas alterações, nas quais comprometem a estrutura, chama-se deterioração.

## **2.2 Corrosão**

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), após ser realizado um levantamento, ocorrido de 1974 a 1978, dos edifícios que ruíram na Inglaterra foi constatado que a causa imediata do colapso de ao menos oito estruturas de concreto foi a corrosão da armadura passiva ou protendida. Tais estruturas apresentavam uma idade de 12 a 40 anos no momento do colapso.

O mesmo autor afirma que o dano ao concreto, resultante da corrosão da armadura, manifesta-se por meio da expansão, fissuração e do lascamento do cobrimento. Além disso, a estrutura pode sofrer danos em razão da perda de aderência entre o aço e o concreto e a diminuição da área da seção transversal da armadura, de sobremaneira, em alguns casos, que o colapso da estrutura se torna inevitável.

Desse modo, compreender o fenômeno da corrosão, bem como adotar medidas para mitigar seus efeitos, torna-se imprescindível, visto os danos econômicos e sociais nas quais podem resultar.

### **2.2.1 Conceito**

É necessário, antes de tudo, definir o conceito de corrosão. Segundo Ramanathan (1995), a corrosão tem como característica a conversão do metal a um estado não metálico ocorrido durante a reação do metal com os elementos do seu meio na qual está envolvido. Quando tal fenômeno ocorre, o material perde suas qualidades primordiais, como resistência mecânica, elasticidade, ductilidade, formando um produto agudamente desprovido em termos destas propriedades. Helene (1986), por sua vez, afirma que por corrosão entende-se a agressão que transcorre em meio aquoso de natureza predominantemente eletroquímica.

Gentil (1996) reitera que, em alguns casos, a corrosão pode ser analisada como oposto do processo metalúrgico, na qual o produto da corrosão de um metal se assemelha ao minério de origem. Devido o metal resultante possuir um estado energético mais elevado, em relação ao seu composto de origem, há tendência de o metal retornar ao seu estado natural, processo inverso ao metalúrgico, durante este fenômeno ocorre à liberação de energia ao meio ambiente (MEIRA, 2017).

### 2.2.2 Análise química

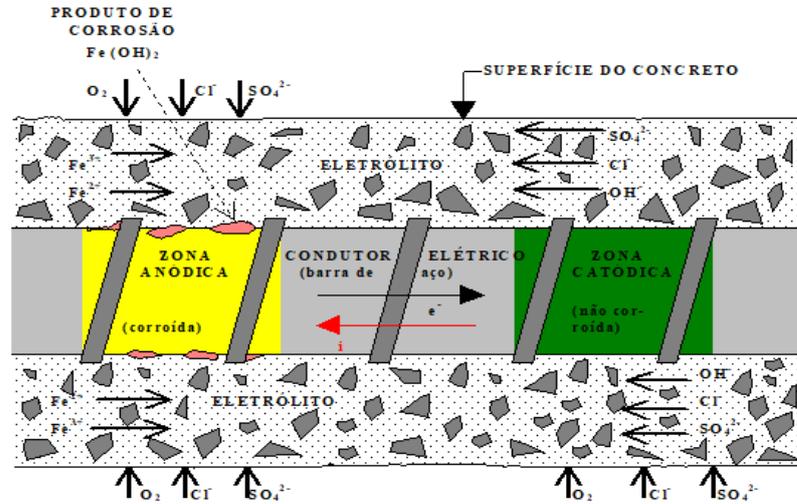
Cascudo (1997) classifica a corrosão segundo a natureza do processo em duas categorias: química e eletroquímica. A primeira, conhecida como corrosão seca ou oxidação, caracteriza-se por sua ação ser lenta e não causar deterioração considerável das superfícies metálicas, exceto em circunstância de gases altamente agressivos, sendo por este motivo que esse tipo de corrosão tem pouca importância em obras civis. Seu fenômeno decorre da reação gás metal, em que ocorre a formação de uma película de óxido. Tal película resultante é compacta, uniforme e pouco permeável (HELENE, 1986).

A corrosão eletroquímica, por sua vez, é o mecanismo de corrosão ocorrida no aço do concreto armado. Nesta, acontece a formação de óxidos/hidróxidos de ferro, resultantes de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, intitulado ferrugem, sendo as seguintes condições necessárias para sua ocorrência (RÜSCH, 1975 *apud* HELENE, 1986):

- a) Deve haver um eletrólito;
- b) Deve haver uma diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo;
- c) Deve haver oxigênio;
- d) Podem existir agentes agressivos.

Na corrosão eletroquímica é formada uma pilha eletroquímica, nas quais existem: região anódica, que é o eletrodo caracterizado pela passagem do material do estado metálico para o estado iônico (oxidação); região catódica, que é o eletrodo onde os elétrons gerados na região anódica são consumidos (redução); uma diferença de potencial, entre o ânodo e o cátodo, sendo o ânodo o eletrodo com potencial mais eletronegativo; uma ligação metálica entre ânodo e cátodo, podendo esta ocorrer por serem do mesmo material; e uma ligação externa particularizada pela condução iônica através do eletrólito (MEIRA, 2017). A representação de uma pilha eletroquímica está exposta na Figura 1.

Figura 1 – Representação da pilha de corrosão.



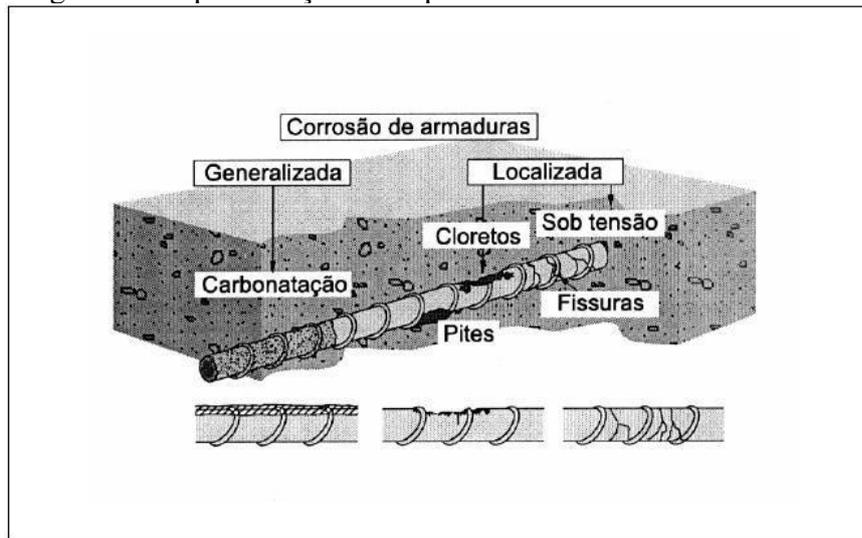
Fonte: Cabral, A. E. B.

Os produtos da corrosão ocupam um volume de 3 a 10 vezes superior ao volume ocupado anteriormente pela armadura, causando tensões internas de tração que podem atingir valores de até 15 MPa (Fernandez Canovas, 1977 *apud* HELENE, 1986). Desse modo, com o aumento da tensão, o concreto começa a apresentar fissuras que facilitam a penetração de oxigênio e agentes externos agressivos, como os cloretos, intensificando, assim, o processo de corrosão. Em um estado mais avançado, a estrutura perde seu cobrimento, conseqüentemente sua barreira física, ficando completamente exposto às intempéries do meio.

### 2.2.3 Tipos de corrosão das armaduras

Segundo a morfologia, a corrosão das armaduras pode ocorrer de três maneiras: corrosão generalizada, corrosão por pite e corrosão sob tensão. A corrosão generalizada, como o próprio nome sugere, acontece de uma maneira generalizada sobre toda superfície do metal, podendo ser uniforme, com superfície lisa e regular, ou não uniforme, com superfície rugosa e irregular. A corrosão puntiforme, por sua vez, é uma corrosão localizada na qual se formam pontos de desgaste na superfície do metal, podendo esta se aprofundar de sobremaneira a causar uma ruptura pontual na barra. Por fim, a corrosão sob tensão também se caracteriza por ser uma corrosão localizada, esta, entretanto, ocorre concomitantemente a tensão de tração sofrida pela armadura, podendo causar à propagação de fissuras na estrutura do aço (CASCUDO, 1997). A Figura 2 apresenta esses tipos de corrosão descritos.

Figura 2 - Representação dos tipos de corrosão.



Fonte: Cascudo (1997).

De acordo com Meira (2017), nas estruturas de concreto armado as formas de corrosão mais comuns são a corrosão generalizada irregular e a corrosão puntiforme ou por pites. O primeiro tem relação com a corrosão devido à carbonatação no concreto, na qual tem como característica atuar na forma de frente e sob uma extensa superfície do metal. Já a corrosão por pites caracteriza-se pela atuação dos íons cloro, na qual provoca uma ruptura localizada na camada passiva do metal. Nas estruturas de concreto protendido, por sua vez, a forma de desgaste preponderante trata-se da corrosão sob tensão, na qual ocorre a ação simultânea das reações eletroquímicas com aquelas de natureza mecânica, desencadeando a formação de fissuras no material.

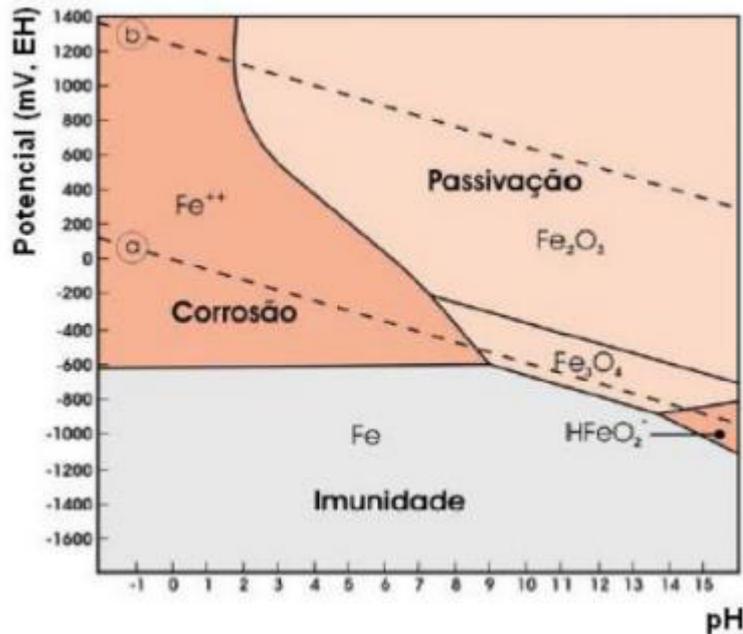
#### 2.2.4 Camada de passivação

Para compreender adequadamente o fenômeno da corrosão é necessário estudar como acontece a formação da camada de passivação, assim como a sua perda ou ruptura. Uma das definições de passividade aceitas, segundo Ramanathan (1995), é que para o metal ou liga ser passivo, este deve resistir consideravelmente à corrosão no meio onde, de maneira termodinâmica, ocorre uma elevada redução da energia livre fruto da passagem do estado metálico para os produtos de corrosão adequados.

Para assimilar melhor este fenômeno é preciso analisar o comportamento do metal no ambiente. Dessa maneira, Pourbaix (1974 *apud* CARMONA, 2005) constatou que o potencial de corrosão de um material depende do pH do meio, visto que ocorre a interação

entre os íons resultantes das reações de corrosão com os íons do eletrólito. Desse modo, é possível estabelecer uma correlação entre diferença de potencial e o pH do meio aquoso, conforme Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de equilíbrio termodinâmico do material ferro em meio aquoso a 25°C.



Fonte: Pourbaix (1974 *apud* SILVA, 2010).

A partir do diagrama acima é possível distinguir três zonas: imunidade, passivação e corrosão. De acordo com Carmona (2005), na zona de imunidade o metal não se corrói, permanecendo assim para qualquer valor de pH que o ambiente apresentar. Na zona de passivação, o metal apresenta uma camada delgada de óxidos e hidróxidos que atuam como uma barreira protetora impedindo, assim, o progresso da corrosão. Na zona de corrosão, por sua vez, o metal apresenta as condições, com pH e potencial eletroquímico adequados, para a instabilidade dos produtos da corrosão, favorecendo, desse modo, a ocorrência da corrosão.

Assim, nas regiões com elevada alcalinidade, a armadura presente no concreto armado está protegida do fenômeno da corrosão devido à capa protetora proporcionada pela camada de passivação. Este ambiente, altamente alcalino, segundo Helene (1986), advém das reações de hidratação dos silicatos de cálcio ( $C_3S$  e  $C_2S$ ) que liberam certa quantidade de  $Ca(OH)_2$ , podendo chegar a 25% da massa total de compostos hidratados existente na pasta.

## 2.3 Íons cloro

O cloreto (íon  $\text{Cl}^-$ ) é o agente agressivo mais comum, sendo que este pode ser incorporado ao concreto de maneira involuntária, a partir de aditivos aceleradores de pega e endurecimento, agregados ou águas de amassamento contaminadas, ou até por meio de tratamentos de limpeza, como ácido muriático (Helene, 1986). Além do mais, podem advir do meio externo por meio da maresia ou névoa salina de ambiente marinho, situação a ser explorada mais adiante.

Segundo o mesmo autor, os cloretos são um dos maiores causadores de corrosão nas armaduras de concreto armado e protendido, podendo a estrutura apresentar uma série de problemas patológicos.

### 2.3.1 *Despassivação da armadura*

Como mencionado anteriormente, a passivação protege o aço contra a corrosão, entretanto, esta pode perder sua estabilidade quando agentes externos penetram no concreto e modificam as condições existentes no metal.

A ruptura da película passiva pode se dar por meio do ingresso de íons cloro, advindos do meio externo ou incorporados ao concreto, ou por meio da redução da alcalinidade do concreto, podendo esta ocorrer devido às reações de carbonatação ou devido à penetração de substâncias ácidas (CASCUDO, 1997).

Segundo Cabral (2000), existem três teorias que tentam explicar os efeitos advindos do ingresso de cloretos na corrosão do aço empregado no concreto armado:

- a) Teoria do filme óxido: esta teoria postula que os cloretos conseguem penetrar por meio dos poros e das falhas existentes no filme passivo mais facilmente que outras substâncias, devido ao seu raio atômico reduzido, além de dispersar o filme coloidalmente, facilitando, assim, a penetração de outros íons;
- b) Teoria da adsorção: segundo esta teoria, os cloretos são adsorvidos na superfície da armadura, competindo com o oxigênio dissolvido e os íons hidroxilas. A dissolução dos cloretos ocorre devido à hidratação do metal;
- c) Teoria do complexo transitório: nesta teoria os cloretos competem com as hidroxilas pelos íons ferro, resultantes do processo de corrosão, formando compostos de corrosão solúveis, estes nominados de complexos transitórios. Durante a corrosão ocorre a queda do pH no ânodo, formando um complexo

solúvel de ferro e cloretos, e distante do eletrodo este complexo quebra, liberando íons cloreto para reagir posteriormente com outros íons ferro (Rosenberg *et al*, 1989 *apud* CABRAL, 2000). As equações que resumem o processo descrito estão representadas a seguir:



A corrosão por cloretos é mais preocupante, que a da carbonatação, por exemplo, devido os íons  $\text{Cl}^-$  não serem consumidos após as reações, estando livres para reagirem novamente (THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998 *apud* CABRAL, 2000).

### 2.3.2 Mecanismos de transporte

O mecanismo de penetração afeta significativamente no processo de corrosão da armadura. Com a penetração dos cloretos no concreto, ocorre um aumento da condutividade elétrica no eletrólito, facilitando, assim, a corrosão da armadura (MEDEIROS; HELENE, 2003 *apud* MOTA; BARBOSA; COSTA E SILVA, 2012).

Os mecanismos de transporte responsáveis pelo movimento e concentração iônica dos cloretos no concreto são: absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade sob pressão e migração iônica (Cascudo, 1997). A seguir será detalhado cada um destes mecanismos de transporte segundo o autor citado:

- a) Absorção: a absorção de soluções líquidas ricas em íons cloro geralmente trata-se do primeiro passo para a contaminação por impregnação externa nas peças de concreto. Este fenômeno ocorre logo após o contato na superfície do substrato, devido às tensões capilares existentes. A absorção está interligada a porosidade do material, poros estes que interconectados permitem o transporte das substâncias líquidas para o interior do concreto, assim como o diâmetro destes. Quanto menor mais eficiente o transporte devido à força capilar de sucção. Ademais, a absorção também depende das características intrínsecas do líquido, tais como viscosidade e tensão superficial. Este mecanismo de transporte permite a penetração, por alguns milímetros, da solução salina em poucas horas;

- b) Difusão iônica: diferente da absorção capilar que ocorre na camada superficial, no interior do concreto tem-se o movimento dos cloretos ocorrendo, predominantemente, por difusão iônica. Este fenômeno decorre do gradiente de concentração iônica, seja entre o meio externo e interno, seja no interior do concreto. As diferenças de concentração iônica são as responsáveis, portanto, pelo movimento dos cloretos até que haja equilíbrio entre as regiões;
- c) Permeabilidade: é um dos principais indicadores de qualidade do concreto, representa a facilidade ou dificuldade que uma determinada substância tem de atravessar dado volume de concreto. Constitui um dos fatores fundamentais para que ocorra o transporte iônico via penetração de substâncias líquidas, sendo a difusão a mais recorrente desta. Este parâmetro deriva da qualidade e do diâmetro dos poros capilares, dependendo diretamente da relação água/cimento, quanto menor este fator mais impermeável será o concreto;
- d) Migração iônica: como os cloretos possuem carga elétrica negativa, quando estes estão presentes em campos elétricos sofrem migração iônica. Esta migração pode acontecer tanto pelo próprio campo elétrico gerado no processo eletroquímico, como devido à ação de campos elétricos externos.

Basicamente, os mecanismos de transporte de cloretos no concreto são a absorção capilar e a difusão iônica. Sendo a absorção capilar presente na camada superficial do concreto, onde ocorre o processo de molhagem e secagem devido às intempéries do meio, e a difusão iônica presente no interior do concreto, devido à presença constante do eletrólito.

## 2.4 Durabilidade e vida útil

As estruturas de concreto devem ser projetadas e executadas de maneira que, sob as condições ambientais preconizadas em projeto e quando utilizadas conforme recomendações especificadas, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período de vida útil estabelecido (ABNT, 2014).

Por vida útil de projeto, entende-se o período de tempo em que as estruturas de concreto mantem suas características, desde que sejam realizadas as manutenções e as condições de uso prescritas em projeto sejam atendidas (PONTES, 2006).

De acordo com o comitê 201 do *American Concrete Institute - ACI* (1991 apud MEHTA; MONTEIRO, 1994), a durabilidade pode ser definida como a capacidade que o

concreto tem de resistir às intempéries, ataques químicos, abrasão ou outro processo de deterioração.

No entanto, é possível acompanhar, atualmente, diversos casos de estruturas de concreto armado que apresentam uma deterioração precoce, fruto de erros cometidos durante a fase de projeto e execução, na escolha de materiais inapropriados, no uso indevido da obra e na falta de manutenção preventiva.

Desse modo, é necessário compreender que para a concepção de uma estrutura durável é preciso adotar uma série de procedimentos e decisões que, em conjunto, garantem uma atuação adequada da estrutura e dos materiais ao longo de toda vida útil da edificação (SOUZA; RIPPER, 1998).

O autor citado acima também afirma que a qualidade do concreto é um dos primeiros indícios para classificação da durabilidade de uma obra, esta, por sua vez, está intimamente ligada com a relação água/cimento adotada, visto que este fator é responsável por reger as principais características do material. Ademais, a agressividade ambiental é um parâmetro preponderante que deve ser analisado, visto que o transporte de líquidos e gases presentes no ambiente para o interior do material podem, conforme discutido anteriormente, causar diversas manifestações patológicas na estrutura.

Dessa maneira, Isaia (2005 *apud* ALVES, 2007) ressalta a necessidade de os projetistas estruturais, além dos conhecimentos de concepção, dimensionamento e análise estrutural, compreenda a durabilidade do concreto, de modo a elaborar projetos estruturais mais duráveis.

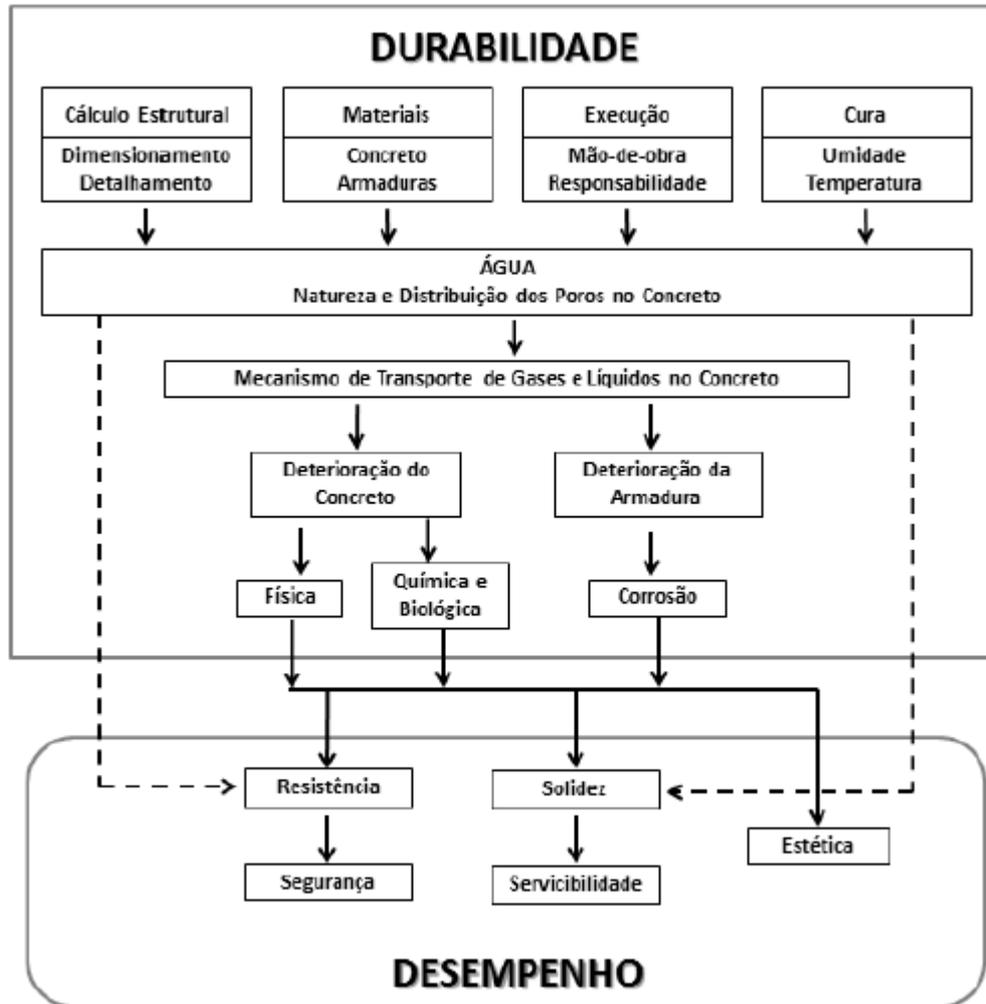
Segundo Helene (1995 *apud* CAMPOS, 2016), os seguintes aspectos devem ser observados ao analisar-se a durabilidade das estruturas de concreto:

- a) A agressividade ambiental do local;
- b) A resistência do concreto à degradação;
- c) Os modelos de degradação e desgaste das estruturas de concreto;
- d) A relação entre agressividade ambiental e a resistência à degradação e ao envelhecimento do concreto;
- e) E, por fim, a vida útil projetada, isto é, período no qual a estrutura atende às exigências funcionais realizando as manutenções previstas em projeto.

Concomitantemente, o Guia para Projeto de Estruturas de Concreto Duráveis (Comité Euro-International du Béton - CEB, 1989 *apud* SOUZA; RIPPER, 1998) apresenta

um quadro com as diversas interpelações entre os parâmetros que afetam a durabilidade e o desempenho da estrutura, os quais estão na Figura 4.

Figura 4 – Fatores intervenientes na durabilidade e desempenho de uma estrutura de concreto.

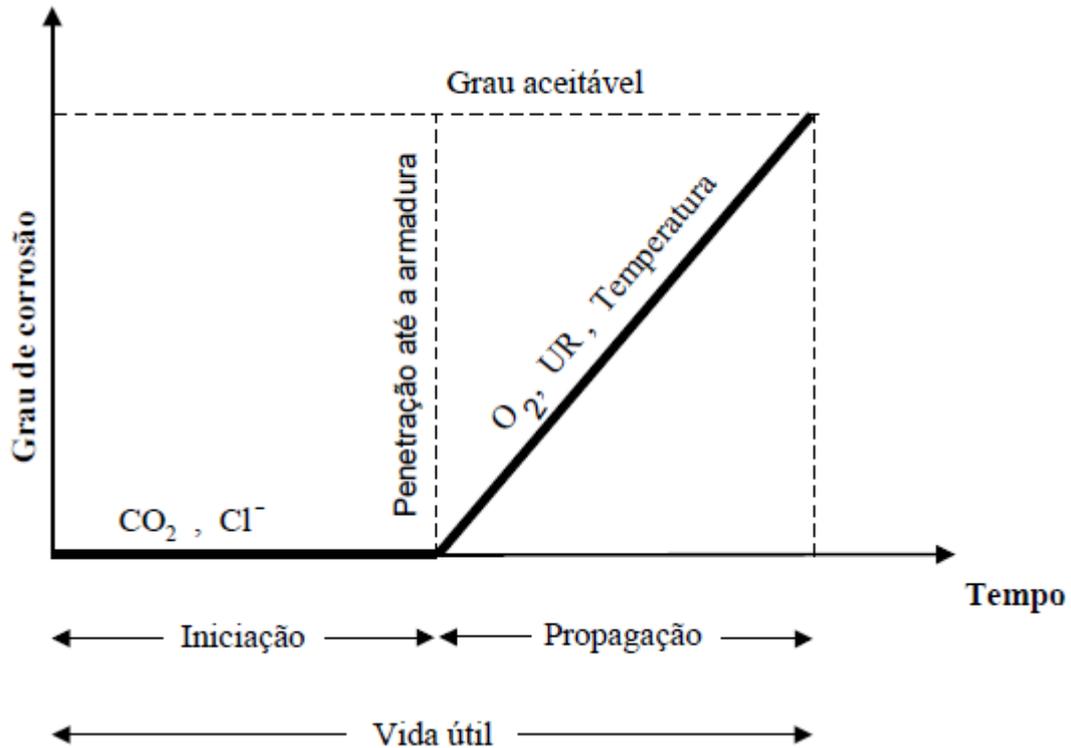


Fonte: C.E.B – Boletim nº 183 (1989 *apud* SOUZA; RIPPER, 1998).

Dentre os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto tem-se a corrosão da armadura, problemática presente principalmente nas regiões litorâneas, devido à grande concentração de cloretos no ar atmosférico.

Em vista disso, compreender o fenômeno da vida útil em função do grau de corrosão torna-se importante. Dessa maneira, Tuutti (1980 *apud* PONTES, 2006) propôs o modelo representado na Figura 5.

Figura 5 – Modelo de vida útil.



Fonte: Tuutti (1980 *apud* PONTES, 2006).

Conforme figura acima, a fase de iniciação compreende o momento da execução da estrutura à penetração dos agentes agressivos no concreto até a armadura, despassivando a mesma. A fase de propagação, por sua vez, corresponde ao período em que os agentes agressivos que penetraram até a armadura provocam uma corrosão aceitável. A velocidade de propagação da corrosão é afetada por diversos fatores, como disponibilidade de oxigênio, umidade relativa e temperatura ambiental. Por fim, a vida útil da estrutura corresponde a soma destas duas fases, sendo elas consecutivas.

Ademais, como discutido anteriormente, outro aspecto da durabilidade é a agressividade ambiental, a ser discorrido no próximo item.

## 2.5 Agressividade ambiental

A durabilidade da estrutura tem forte relação com o meio em que se está inserida. Dessa maneira, um dos critérios de projeto a ser adotado refere-se à agressividade ambiental da região. Assim, é necessário classificar de maneira adequada este parâmetro a fim de reduzir as manifestações patológicas precoces, assim como os custos de manutenção.

Em busca de amenizar esta problemática, a norma referência das estruturas de concreto, NBR 6118 (ABNT, 2014), além de classificar a agressividade ambiental apresenta critérios de projeto em função da classe de agressividade, como da relação água/cimento, da classe do concreto e do cobrimento mínimo necessário. Estes parâmetros são essenciais para amenizar a deterioração da estrutura, garantindo a durabilidade da mesma.

O Quadro 2, extraído da NBR 6118 (ABNT, 2014), mostra a correlação entre a classe de agressividade ambiental e a relação água/cimento, assim como sua correlação a classe do concreto. Pode-se constatar, a partir deste, que quanto maior a agressividade ambiental, maior a classe do concreto e menor a relação água/cimento.

Quadro 2 – Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto.

| Concreto <sup>a</sup>              | Tipo <sup>b, c</sup> | Classe de agressividade (Tabela 6.1) |        |        |        |
|------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|
|                                    |                      | I                                    | II     | III    | IV     |
| Relação água/cimento em massa      | CA                   | ≤ 0,65                               | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,45 |
|                                    | CP                   | ≤ 0,60                               | ≤ 0,55 | ≤ 0,50 | ≤ 0,45 |
| Classe de concreto (ABNT NBR 8953) | CA                   | ≥ C20                                | ≥ C25  | ≥ C30  | ≥ C40  |
|                                    | CP                   | ≥ C25                                | ≥ C30  | ≥ C35  | ≥ C40  |

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.  
<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

O Quadro 3, por sua vez, correlaciona à classe de agressividade ambiental com o cobrimento nominal mínimo a ser adotado no concreto armado. É válido ressaltar que o cobrimento proporciona ao concreto uma barreira física que dificulta a iniciação do processo de corrosão. Desse modo, adotar um cobrimento nominal adequado em projeto é imprescindível para que a estrutura possa suportar os agentes agressivos presentes no meio.

A NBR 12655 (ABNT, 2015), que estabelece os critérios de preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto em cimento Portland, por sua vez, apresenta os requisitos necessários para o concreto em condições especiais, em termos da máxima relação água/cimento e do mínimo valor de resistência característica do concreto. Informações, estas, resumidas no Quadro 4.

É possível, a partir das informações citadas, observar que uma elevada agressividade ambiental causa uma maior exigência de qualidade da estrutura, de maneira que, para elaborar um projeto adequado que atenda aos requisitos de durabilidade sem uma

oneração excessiva, é imprescindível classificar adequadamente o meio ambiente em que a estrutura está envolvida.

Quadro 3 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.

| Tipo de estrutura                | Componente ou elemento                                   | Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1) |    |     |                 |
|----------------------------------|--|--|----|-----|-----------------|
|                                  |  | I  | II | III | IV <sup>c</sup> |
|                                  |  | Cobrimento nominal<br>mm                       |    |     |                 |
| Concreto armado                  | Laje <sup>b</sup>  | 20   | 25 | 35  | 45              |
|                                  | Viga/pilar   | 25   | 30 | 40  | 50              |
|                                  | Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup> | 30   |    | 40  | 50              |
| Concreto protendido <sup>a</sup> | Laje   | 25   | 30 | 40  | 50              |
|                                  | Viga/pilar   | 30   | 35 | 45  | 55              |

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Quadro 4 – Requisitos para o concreto em condições especiais.

| Condições de exposição  | Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal | Mínimo valor de $f_{ck}$ (para concreto com agregado normal ou leve) MPa |
|---|--|--|
| Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixas d'água                                     | 0,50   | 35   |
| Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo                             | 0,45   | 40   |
| Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes | 0,45   | 40   |

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2015).

Como visto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica a agressividade ambiental de acordo com as seguintes classes: I – Fraca; II – Moderada; III – Forte; IV – Muito forte, em função do tipo de ambiente: rural, urbano, marinho, industrial e respingos de maré; caracterizando quanto ao risco de degradação como insignificante, pequeno, grande ou elevado. No entanto, esta classificação não se dar de maneira determinística, mas sim de acordo com as informações meteorológicas e ambientais, além do domínio técnico do projetista em relação à norma e do seu bom senso (PORTELLA, 2013).

Vilasboas (2010) conceitua a agressividade ambiental como o termo utilizado para relatar o potencial aporte de substâncias oxidativas, principalmente oxigênio e cloretos, em estruturas de concreto.

Com o exposto acima, será discutido a seguir o ambiente marinho, suas zonas de atmosfera, além dos fatores intervenientes que contribuem para a degradação das estruturas de concreto quanto aos íons cloro.

### **2.5.1 Ambiente marinho**

Os primeiros estudos sobre durabilidade do concreto foram realizados em ambientes marinhos, pois estes ambientes apresentam inúmeros agentes agressivos, além de serem encontrados diversos casos de corrosão (PONTES, 2006).

Mehta e Monteiro (1994) argumentam que quando uma estrutura, em estado avançado de deterioração, está exposta à água do mar, uma rede composta por diversas causas químicas e físicas estão agindo. Dentre estas, pode-se citar:

efeitos combinados da ação química dos constituintes da água do mar sobre os produtos de hidratação do cimento, da expansão álcali agregado (quando agregados reativos estão presentes), da pressão de cristalização dos sais dentro do concreto se uma face da estrutura está sujeita a condições de molhagem e outras, a condições de secagem, da ação do congelamento em climas frios, da corrosão da armadura em elementos armados ou protendidos e da erosão física devida à ação das ondas e objetos flutuantes (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 175-176).

A água do mar é composta por quase todos os elementos, desde o hidrogênio ao urânio, sendo 96,7% de água e 3,3% de sais dissolvidos (Jones, 1999 *apud* ALVES, 2006). Dos sais dissolvidos, apenas sete elementos respondem por quase 93,5%, todos em forma iônica (MATSUURA; VISSER, 2001 *apud* ALVES, 2006).

Conforme Forschhammer (s.d. *apud* Biczók, 1972 *apud* PONTES, 2006), dos sais dissolvidos cerca de 78,32 % correspondem ao cloreto de sódio. Um dos principais responsáveis, conforme discutido anteriormente, do processo corrosivo nas armaduras.

Tabela 2 – Composição da água do mar (FORSCHHAMMER, s.d. *apud* BICZÓK, 1972).

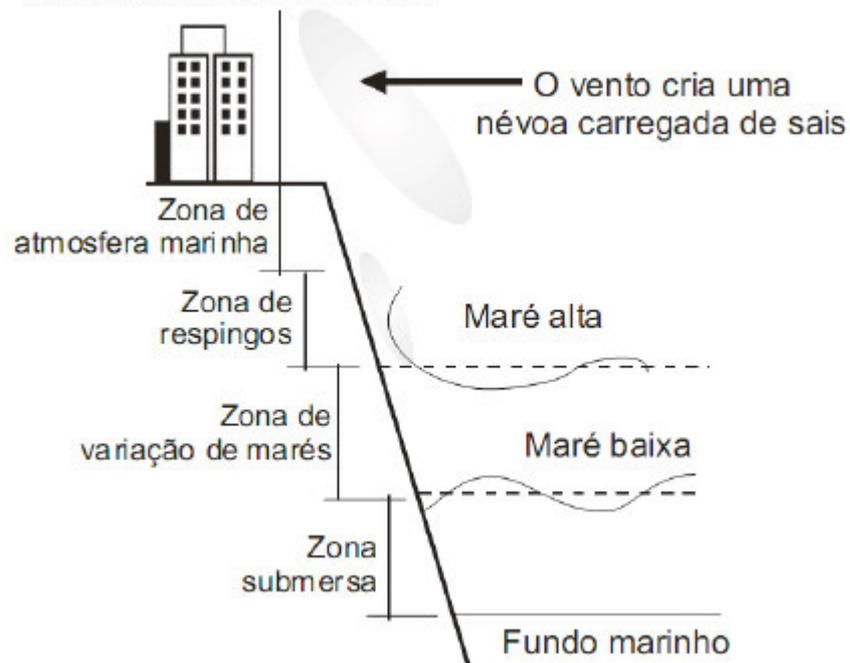
| Sal   | g/1000 mL de água | % em relação ao sal total |
|---|-------------------|---------------------------|
| Cloreto de sódio  | 26,9              | 78,32                     |
| Cloreto de magnésio   | 3,2               | 9,44                      |
| Sulfato de magnésio   | 2,2               | 6,40                      |
| Sulfato de cálcio   | 1,3               | 3,94                      |
| Cloreto de cálcio   | 0,6               | 1,69                      |
| Outros (sulfato de potássio, bicarbonato de cálcio, entre outros) | -                 | 0,21                      |
| <b>Total</b>  | <b>34,3</b>       | <b>100,00</b>             |

Fonte: Pontes (2006)

#### 2.5.1.1 Zonas de atmosfera marinha

Diversos estudos sobre a degradação das estruturas de concreto em ambientes marinhos foram realizados, alguns subdividiram estes em zonas de acordo com o acesso a oxigênio, água e umidade. Tais zonas foram classificadas conforme classificação de Duracrete (1999 *apud* SILVA, 2011), e estão ilustradas na Figura

Figura 6 – Zonas de agressividade às estruturas de concreto.  
Estruturas distantes do mar



Fonte: Duracrete (1999 *apud* SILVA, 2011).

As descrições destas zonas estão a seguir.

- Zona de atmosfera marinha: esta zona caracteriza-se pela presença elevada de sais na estrutura de concreto, apesar desta não estar em contato com o mar. O vento tem efeito preponderante nestas zonas, pois transportam as partículas sólidas ou gotículas da solução salina. Além do mais, as quantidades de sais depositados nas estruturas diminuem conforme se aumenta a distância em relação ao mar;
- Zonas de respingos: esta zona caracteriza-se pelo contato direto com o mar, seja devido às ondas ou aos respingos do mar. Os maiores danos causados nas estruturas nestas zonas ocorrem devido ao cloreto;
- Zona de variação de marés: região limitada pelos máximos e mínimos das marés. A degradação ocorre em razão da ação de sais agressivos, ação das ondas, microrganismos e corrosão;
- Zonas submersas: região nas quais as estruturas de concreto estão submersas. Os efeitos da degradação ocorrem em razão dos microrganismos, que podem causar corrosão biológica nas armaduras, e pela ação de sais agressivos, como sulfatos e magnésio.

Com a subdivisão apresentada acima, diversos autores estabeleceram uma correspondência entre os mecanismos de degradação na estrutura e a condição de exposição da mesma no ambiente marítimo, apresentadas no Quadro 5 (Andrade, 2001). Pode-se constatar que na zona de atmosfera marinha, apesar do concreto não está em contato com a água do mar, sofre com os cloretos advindos deste, causando a corrosão das armaduras empregadas nas estruturas de concreto armado.

Quadro 5 – Correspondência entre a localização da estrutura de concreto e o tipo de deterioração observado (Mehta, 1980; CEB, 1992; Barbudo, 1992; Helene, 1993; Mehta e Monteiro, 1994; Guimarães, 2000).

| Área                                     | Características  | Tipos de deterioração   |
|--|--|---|
| Zona de atmosfera marinha (névoa salina) | o concreto nunca está diretamente em contato com a água do mar, porém é atingido pela névoa salina que vem do oceano. O nível de cloretos pode cair à medida que as construções se afastam do mar, mas, em alguns casos, dependendo do tipo da costa e da direção preferencial dos ventos, a névoa salina pode penetrar até muitos quilômetros do litoral.                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• corrosão da armadura induzida por cloretos</li> <li>• danos causados pelo efeito do frio</li> </ul>  |
| Zona de respingo de marés                | Localiza-se acima do nível da maré alta, estando sujeita a ação direta da água do mar, através da molhagem do concreto pelas ondas. Essa área é uma das mais sujeitas à deterioração através da penetração de agentes agressivos pelo revestimento de concreto. O teor de umidade, juntamente com a presença de oxigênio, são fatores que contribuem para a deterioração das estruturas. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• corrosão da armadura induzida por cloretos</li> <li>• abrasão pela ação do impacto das ondas</li> <li>• danos causados pelo efeito do frio</li> </ul>  |
| Zona da variação das marés               | O concreto está submetido à ação dos ciclos de molhagem/secagem, onde há uma combinação dos mecanismos de absorção e difusão de íons no concreto, retendo uma grande quantidade de cloretos no interior do material. Além disso, existe o efeito físico do choque das ondas e partículas em suspensão, que podem causar lascamentos das camadas superficiais do material;                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• corrosão da armadura induzida por cloretos</li> <li>• abrasão pela ação das ondas, gelo ou outros objetos</li> <li>• ataque biológico causado por microorganismos</li> <li>• ataque químico ao concreto</li> </ul> |
| Zona submersa                            | o processo de difusão de cloretos é o único mecanismo de transporte atuante. Contudo, o concreto pode estar sujeito à ação de ataques químicos, principalmente por íons magnésio ou sulfato  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ataque químico ao concreto</li> <li>• ataque biológico causado por microorganismos</li> </ul>  |

Fonte: Andrade (2001).

### 2.5.2 Formação e transporte da névoa salina

Os cloretos são transportados na atmosfera por meio da névoa salina, também conhecida como aerossol ou spray marinho. Estas são formadas com a movimentação e agitação da água do mar, sendo a arrebentação das ondas em decorrência da ação dos ventos a principal causa, gerando bolhas de ar que posteriormente explodem formando gotículas em

forma de jorro, película e espuma que possuem água rica em cloreto de sódio (NaCl). Outra maneira de formação da nevoa salina seria através da pressão do vento sobre a superfície agitada do mar, no entanto, esta ocorre em menor proporção (FITZGERALD, 1991 *apud* PORTELLA, 2013).

Após a geração das gotículas, estas entram em equilíbrio com meio ambiente e podem adquirir a forma de partículas salinas ou soluções salinas, a depender das condições de temperatura e umidade relativa. Além do mais, quando a umidade relativa se situa abaixo de 70-74% as gotículas supersaturadas são transformadas em partículas de sal (ZEZZA; MACRI, 1995 *apud* PONTES, 2006).

Alves (2007) ressalta que os cloretos oriundos das ondas se mantêm ao longo da linha de costa, por possuírem maior granulometria, já os que advêm do oceano penetram mais o continente, sendo carregados pelo vento.

O aerossol, quanto ao tamanho de suas partículas, é dividido em dois grupos: o primeiro corresponde às partículas depositáveis ( $\varnothing \geq 10 \mu\text{m}$ ), já o segundo corresponde às partículas flutuantes ( $\varnothing < 10 \mu\text{m}$ ) (AMBLER; BAIN, 1955 *apud* ROMANO, 2009). Pontes (2006), citando Taylor e Wu (1992), afirma que estas partículas são classificadas em três faixas:

- a)  $\varnothing > 20 \mu\text{m}$  – jorro/gotículas em forma de espuma;
- b)  $10 \mu\text{m} < \varnothing < 20 \mu\text{m}$  – jorro/gotículas em forma de película;
- c)  $2 \mu\text{m} < \varnothing < 10 \mu\text{m}$  – gotículas em forma de película.

Independente da classificação, é necessário ressaltar que partículas de maior tamanho e massa se depositam mais rápido, enquanto as partículas menores e de menor massa permanecem mais tempo em suspensão.

Após formado o aerossol marinho, o mesmo caminha em direção ao continente, tendo sua relação com a salinidade atmosférica influenciada por fatores como direção e velocidade do vento, distância da costa, topografia da zona, altitude e etc. (Morcillo, 1998 *apud* PONTES, 2006). Algumas destas variáveis serão descritas a seguir.

#### 2.5.2.1 Velocidade e direção do vento

O processo de formação do aerossol marinho está ligado à relação existente entre a velocidade do vento e a concentração de sais (Campos, 2016). Borba Junior (2011), citando diversos autores como Woodcock (1953), Lovett (1978), Taylor e Wu (1992) e Gustafsson e

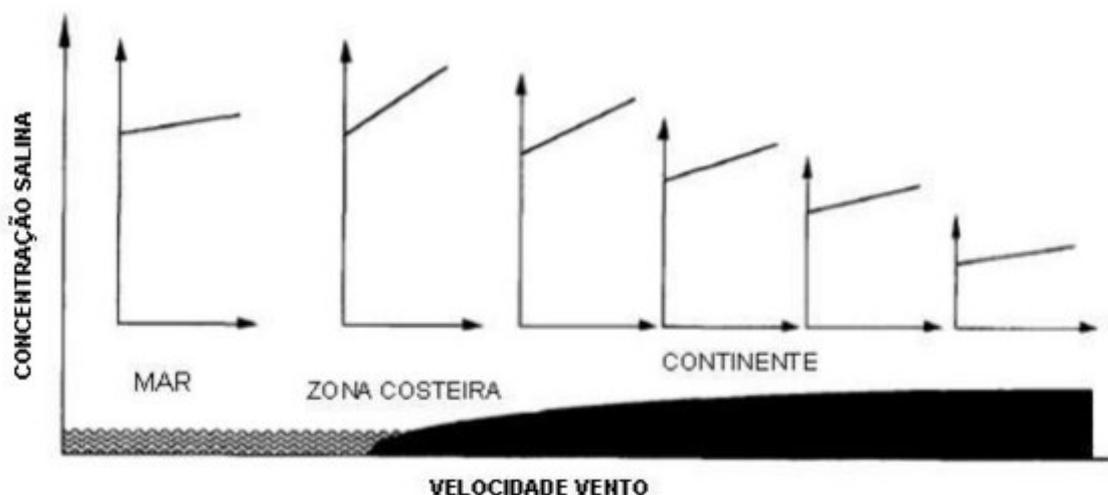
Franzén (1996), argumenta que a concentração salina cresce exponencialmente com a velocidade dos ventos. Lovett (1978 *apud* PONTES, 2006) afirma que este comportamento se deve ao fato que o aumento da velocidade do vento acresce a quantidade de partículas no aerossol e facilita a formação de partículas de maior tamanho e massa.

O vento tem forte relação no transporte do aerossol marinho em direção ao continente. Com sua amplitude, maiores partículas tendem a alcançarem uma maior distância antes de se depositarem, aliando-se ao efeito de formação de um aerossol com maior concentração salina (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996; MORCILLO, 1999 *apud* PONTES, 2006).

#### 2.5.2.2 Distância em relação ao mar

Um importante aspecto relatado por Gustafsson e Franzén (1996 *apud* BORBA JUNIOR, 2011) é que a influência do vento na concentração salina diminui na medida em que se afasta do mar. No mar, as partículas são formadas e se depositam continuamente. Esse ciclo contínuo não permite que haja uma redução da concentração salina na atmosfera. Na costa, no entanto, apesar da grande concentração salina, com a ação da gravidade as partículas logo se depositam. Com o aumento da velocidade do vento estas partículas alcançam uma maior distância, mas o efeito gravimétrico é dominante. A Figura 7 exemplifica a combinação destes fenômenos, na zona costeira a inclinação da reta da função velocidade *versus* concentração é maior, enquanto que no continente essa inclinação é menor.

Figura 7 – Relação entre concentração salina e velocidade do vento nas diferentes zonas.



Fonte: Gustafsson e Franzén (1996).

Costa (2011 *apud* ROMANO, 2009) realizando ensaios em corpos de prova argamassados expostos de 72 m a 4705 m em relação ao mar, na região metropolitana de Salvador, observou que o potencial de agressão aos materiais é oito vezes maior para distâncias de até 500 m do mar.

Vários estudos, realizados no Brasil e em outros países, citados no Quadro 6, comprovam a influência da distância em relação ao mar. Em todos, pode-se constatar um decréscimo exponencial a partir dos primeiros metros de distância do mar (CAMPOS, 2016).

Quadro 6 – Estudos que abordam a influência da distância em relação ao mar na concentração salina.

| Pais          | Referência                           |
|---------------|--------------------------------------|
| Brasil        | Sica (2006)                          |
|               | Albuquerque e Otoch (2005)           |
|               | Portella (2013)                      |
|               | Meira e Padaratz (2002)              |
|               | Pontes (2006)                        |
|               | Alves (2007)                         |
|               | Costa (2001)                         |
|               | VilasBoas (2013)                     |
|               | Borba Jr (2011)                      |
|               | Vitalle (2013)                       |
| Nigéria       | Garcia, Padaratz e Szpoganicz (2007) |
| Espanha       | Ambler and Bain (1955)               |
| Holanda       | Morcillo et al (2000)                |
| França        | Ten Harkell (1997)                   |
| Malásia       | Despiau at al (1991)                 |
| Bangladesh    | Mustafa and Yosof (1994)             |
| Coréia do Sul | Khandaker, Hossain and Easa (2011)   |
| Haváí         | Lee and Moon (2005)                  |
| Cuba          | Suzuki (2011)                        |
| México        | Castañeda et al (2012)               |
|               | Castañeda et al (2012)               |

Fonte: Campos (2016).

Campos (2016) apresentou um estudo acerca da agressividade ambiental do atmosférico em Fortaleza, onde instalou velas úmidas em diversos pontos da cidade. A autora constatou que o teor de íons cloro decai em função da distância do mar, entretanto, esse comportamento se dá de forma diferente no município, pois a Praia do Futuro apresentou resultados muito superiores a Praia de Iracema.

### 2.5.2.3 *Altitude*

O aerossol marinho tem sua distribuição vertical. Cipriano e Blanchard (1984 *apud* SANTOS, 2013) estudou nos meses de outubro e novembro de 1981 a influência da altitude na concentração do aerossol marinho em uma edificação localizada na praia de Oahu, Hawaii. Constatou-se que existe uma redução gradual da concentração de íons cloro na medida em que se aumenta de altitude, em virtude de as partículas voltarem ao solo do continente devido a gravidade ser um fator atuante nas partículas.

Rincón *et al.* (2006) realizaram um estudo na Ponte General Rafael Urdaneta (PGRU), sobre o Lago de Maracaibo na Venezuela. Os autores elaboraram um perfil do teor de cloretos a diferentes alturas e profundidades, em que constataram que a 6 metros do nível do lago os efeitos do ingresso de cloretos são muito baixos.

Medeiros *et al.* (2010), em estudo de caso realizado em um edifício localizado no Rio de Janeiro, realizou inferências sobre a influência da altura da edificação na contaminação por cloretos, mostrando que quanto maior a altura menor o teor de cloretos.

### 3 METODOLOGIA

Inicialmente, realizou-se uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema. Pesquisou-se sobre experimentos realizados com vela úmida em outros locais, para que seja utilizada como base de comparação, além de trabalhos que avaliam o teor de cloretos em função da altitude.

Para quantificar o teor de íons cloro em relação ao nível do mar, o procedimento experimental descrito na NBR 6211 (ABNT, 2001) - Corrosão atmosférica: Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida - foi adotado.

Em paralelo foi realizada uma caracterização climatológica do local, por meio da utilização de parâmetros como velocidade e direção do vento, umidade, precipitação, temperatura, determinados semanalmente através do auxílio de dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Em campo foram coletados dados sobre a direção do vento, por meio da biruta.

#### 3.1 Preparação das velas

Realizou-se a preparação das velas conforme prescreve a NBR 6211 (ABNT, 2001) com utilização de um tubo cilíndrico envolvido com gaze cirúrgica e fixado a um frasco coletor por meio de uma rolha. O frasco utilizado trata-se de um Erlenmeyer com capacidade de 1000 mL, o tubo será de PVC, que possui cloro em sua composição, no entanto não está em forma livre.

Utilizou-se uma solução, conforme estabelece a norma supracitada, de 200 mL de água glicerinada. Podendo esta ser preparada através da diluição de 200 mL de glicerol –  $\text{CHOH}(\text{CH}_2\text{OH})_2$  a 1000 mL de água com adição de 20 gotas de ácido octanóico como fungicida, procedimento adotado neste trabalho. A Figura 8 ilustra as velas úmidas preparadas.

Figura 8 – Velas úmidas preparadas no LMCC.



Fonte: Autoral.

Uma vela adicional, utilizada como ensaio em branco, foi preparada e instalada em um local isento de cloretos, sendo este local o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

### 3.2 Localização das velas úmidas

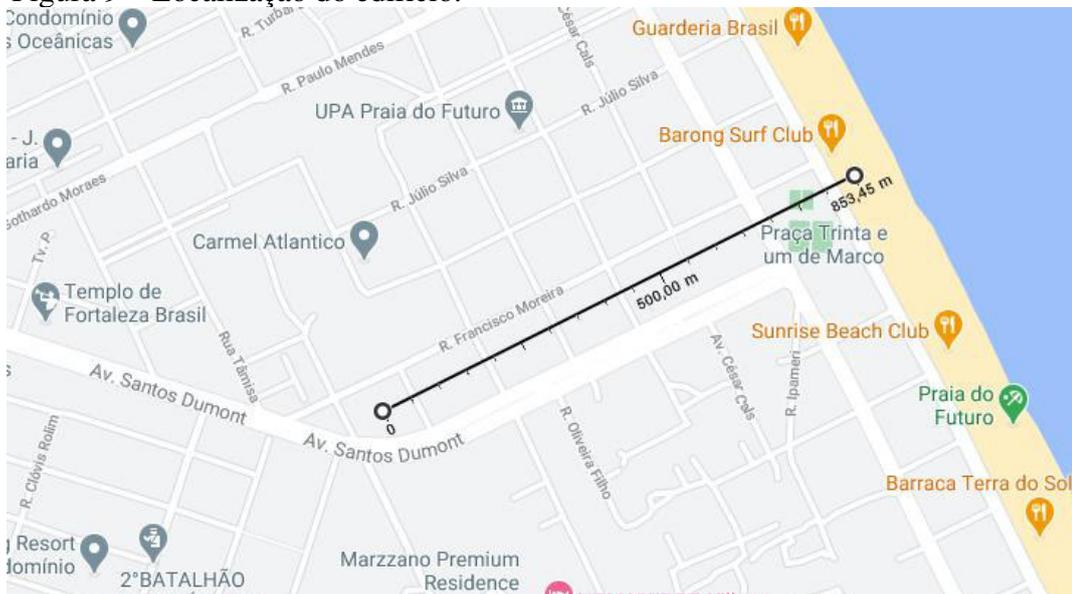
A pesquisa foi realizada na região da Praia do Futuro, município de Fortaleza. Esta região foi escolhida devido ao alto índice de teor de cloro no ar atmosférico, fazendo com que esta seja classificada como o local de maresia mais forte do Brasil (TORRES, 2018).

O local escolhido trata-se de um edifício residencial com duas torres de 16 pavimentos, a uma distância aproximada de 850 metros da orla, como pode-se visualizar nas Figuras 09, 10 e 11. As velas úmidas foram instaladas na laje do deck da área de lazer, altitude aproximada de 6 metros, nas sacadas dos apartamentos do 16º andar, altitude aproximada de 48 metros, Torre Capri, e no 10º andar, altitude aproximada de 30 metros, e 4º andar, altitude aproximada de 12 metros, Torre Morano. Nas Figuras 12 e 13 estão ilustradas as velas úmidas instaladas no deck e na sacada do 10º andar, respectivamente. Estes apartamentos foram escolhidos com objetivo de obter uma melhor representação do teor de íons cloro em alturas distintas. Uma vela úmida foi instalada no Laboratório de Materiais de Construção Civil

(LMCC) da Universidade Federal do Ceará (UFC), apresentada na Figura 14, sendo utilizada como ensaio branco para efeitos de comparação àquelas expostas a situação ambiente. Esta vela úmida está localizada a uma distância de 4,7 km da costa, conforme ilustra a Figura 15.

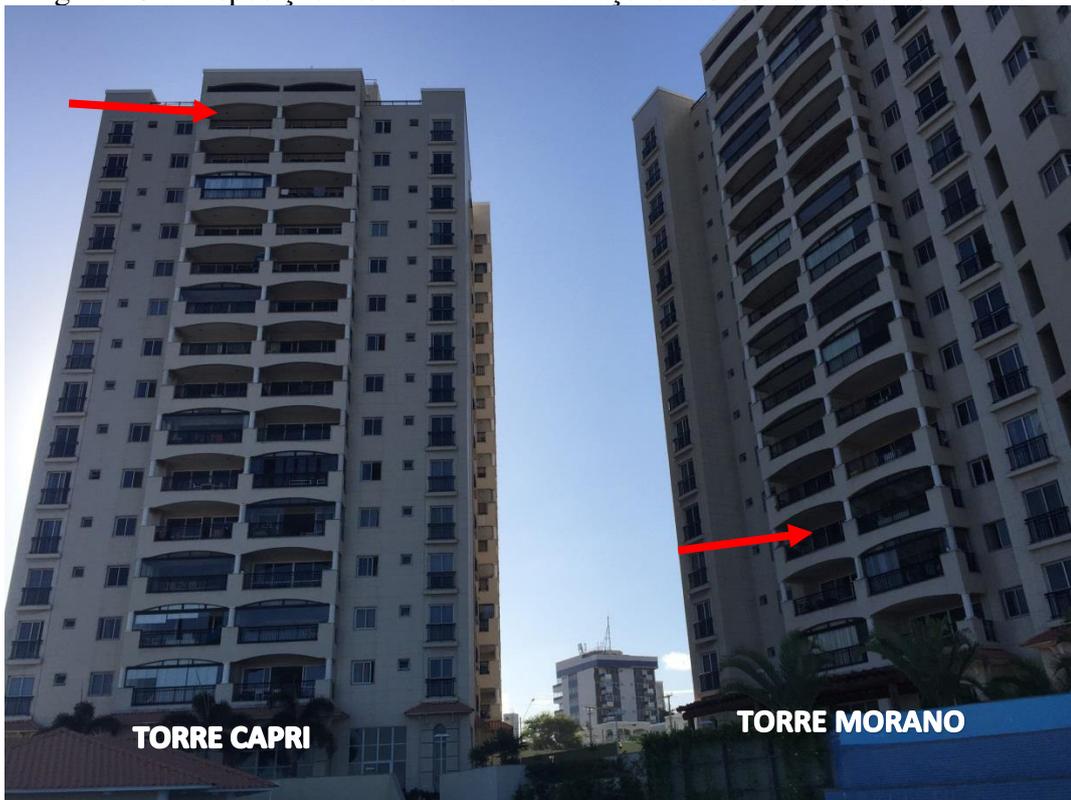
As velas foram expostas durante um período de três meses, de novembro de 2020 a fevereiro de 2021, totalizando três amostras por local instalado. Ao final de cada mês todas elas foram recolhidas para determinação do teor de íons cloro, conforme procede a NBR 6211 (ABNT, 2001), sendo preparadas as novas velas úmidas para repor nos locais pré-fixados.

Figura 9 – Localização do edifício.



Fonte: Google Maps.

Figura 10 – Disposição das torres com indicações dos locais das velas úmidas.



Fonte: Autoral.

Figura 11 – Torre Morano com indicações da localização das velas úmidas.



Fonte: Autoral.

Figura 12 – Vela úmida no deck da área de lazer.



Fonte: Autoral.

Figura 13 – Vela úmida na sacada do 10º andar.



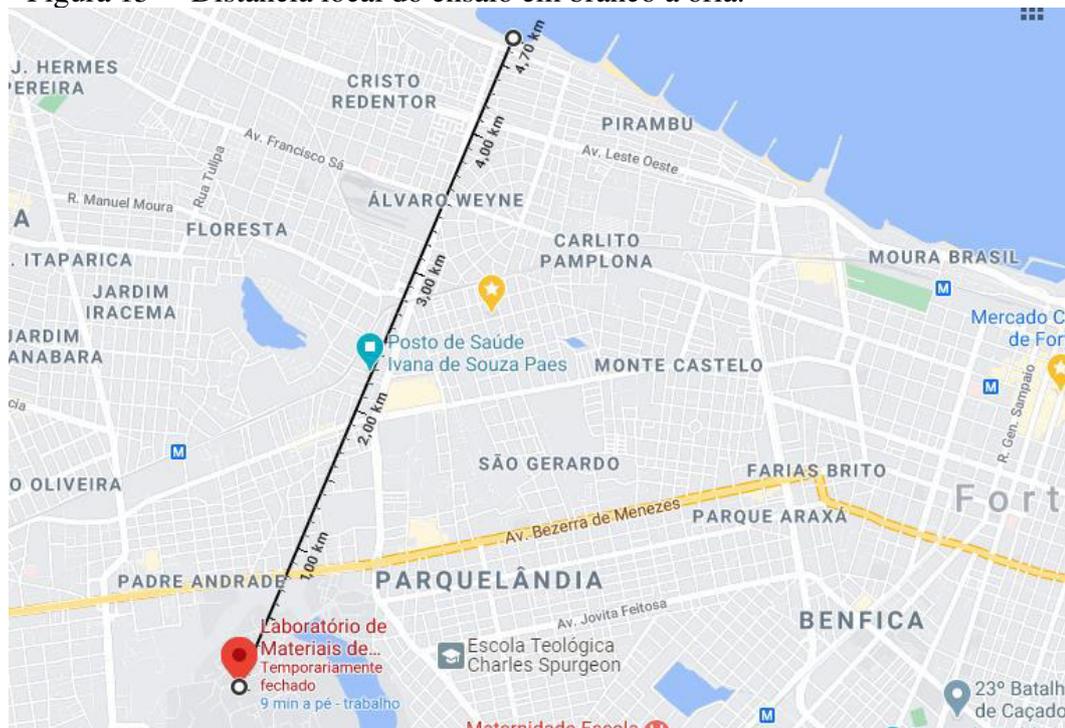
Fonte: Autoral.

Figura 14 – Vela úmida no LMCC – UFC.



Fonte: Autoral.

Figura 15 – Distância local do ensaio em branco à orla.



Fonte: Google Maps.

Figura 16 – Vista superior do deck com as velas úmidas.



Fonte: Autoral.

Nos dois últimos meses de amostragem foi adicionada uma vela extra no deck da área de lazer, para verificação da eficiência da amostragem, conforme apresentado na Figura 16.

### 3.3 Procedimentos de amostragem

Conforme recomendações da NBR 6211 (ABNT, 2001), o procedimento de amostragem será adotado de acordo com os itens abaixo, para as velas instaladas nos locais pré-fixados:

- a) Instalar a vela úmida em posição central e a uma distância de 20 cm do topo da cobertura, deixando-a exposta durante um período de 30 dias;
- b) Ao fim do período de exposição, desenrolar a gaze por meio de uma pinça e coloca-la em recipiente adequado, contendo cerca de 200 mL de água;
- c) Para que todos os íons se dissolvam, deve-se agitar a solução;
- d) Retirar a gaze, utilizando pinça, lavando-a com água. As águas de lavagem devem ser conservadas;
- e) Misturar a solução do frasco coletor às águas de lavagem, do mesmo modo a água de lavagem do frasco, e completar a um volume conhecido, denominando-o de  $V_T$ ;

- f) A amostra deve ser identificada, anotando-se a área de superfície exposta, em metros quadrados (S), além do volume total da amostra, em mililitros, do local e do tempo de exposição, em dias.

O procedimento acima também se aplica ao ensaio da vela em branco.

### 3.4 Determinação do teor de cloro no ar atmosférico

De acordo com a NBR 6211 (ABNT, 2001), o íon cloro resultante da absorção em água contendo glicerol é titulado com solução diluída de nitrato mercúrio na presença do indicador misto difenilcarbazona e azul-de-bromofenol. Sendo o ponto de titulação indicado pela formação do complexo mercúrio-difenilcarbazona, de cor azul-violeta, em uma faixa de valores de pH de 2,3 a 2,8.

A NBR 6211 (ABNT, 2001) expressa os resultados em massa de cloreto por unidade de área e por unidade de tempo. Sendo esta determinada pela equação (3):

$$\text{Cloreto (mg/(m}^2\cdot\text{d))} = \frac{2 (A-B) \times M \times 35,5 \times V_T}{V_a \times S \times t} \quad (3)$$

Onde:

A é o volume gasto de solução-padrão de nitrato mercúrio com a alíquota, em mililitros;

B é o volume gasto de solução-padrão de nitrato de mercúrio com o branco, em mililitros;

M é a concentração de solução-padrão de nitrato mercúrio, em molaridade;

$V_T$  é o volume total da amostra após a diluição, em mililitros;

$V_a$  é o volume de alíquota, em mililitros;

S é a área de gaze exposta, em metros quadrados;

t é o tempo de exposição, em dias.

As etapas para o preparo das soluções utilizadas durante análise das velas úmidas estão descritas no ANEXO A. No ANEXO B está detalhado cada fase do procedimento realizado em laboratório para determinação do teor de íons cloretos. Tanto o preparo das soluções, quanto o procedimento de análise, foram realizados conforme a NBR 6211 (ABNT, 2001) no Laboratório de Química Analítica do Centro de Ciências da UFC.

### 3.5 Caracterização dos parâmetros atmosféricos

As características dos parâmetros atmosféricos do ambiente foram obtidas por meio dos dados semanais disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os parâmetros pesquisados durante o período de pesquisa foram: velocidade e direção do vento, umidade, precipitação e temperatura.

No ANEXO C está detalhado o acompanhamento semanal de todos os dados climatológicos da região durante o tempo de análise. Em campo, pode-se determinar a direção do vento por meio da biruta.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Deposição de cloretos

O resumo dos resultados do teor íons cloro, obtidos através do método da vela úmida, durante os três meses de análise, está explicitado na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Resumo do teor de íons cloro no período de análise.

| Concentração de cloretos (mg/(m <sup>2</sup> .dia)) |            |                 |                 |                 |        |
|---|------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| Local   | Altura (m) | 10/nov a 10/dez | 10/dez a 15/jan | 15/jan a 12/fev | Média  |
| <b>Deck</b>   | 6,00       | 128,44          | 124,84          | 91,98           | 115,09 |
| <b>4° andar</b>                                     | 12,00      | 20,47           | 9,14            | 18,23           | 15,95  |
| <b>10° andar</b>                                    | 30,00      | 28,00           | 18,00           | 23,04           | 23,02  |
| <b>16° andar</b>                                    | 48,00      | 45,90           | 21,90           | 53,61           | 40,47  |

Fonte: Autoral.

A descrição dos volumes resultantes da titulação das amostras, assim como outros parâmetros intermediários de cálculo, está detalhada no APÊNDICE A.

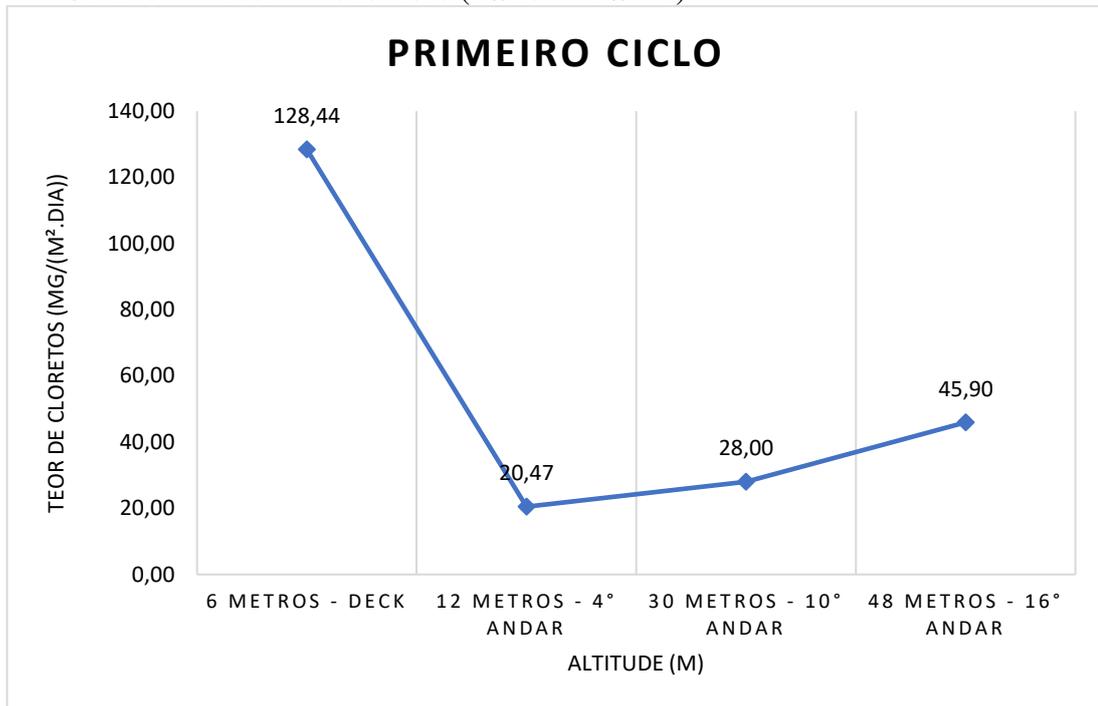
Ressalta-se que, nos dois últimos meses de análise, foram instaladas duas velas úmidas no deck para averiguar a eficiência da amostragem. No segundo mês percebeu-se uma diferença de aproximadamente 19 mg/(m<sup>2</sup>.dia), devido a uma trinca existente no frasco; no último mês, no entanto, a diferença foi menos de 1 mg/(m<sup>2</sup>.dia). No resumo, disposto na tabela acima, foi apresentado no segundo período o valor obtido na vela úmida íntegra e no último período a média das duas velas instaladas no local.

Os resultados obtidos acima serão correlacionados aos parâmetros atmosféricos obtidos através dos dados disponibilizados pelo INMET e em campo por meio da biruta.

É válido ressaltar que a vela úmida UFC, ensaio em branco, está localizada a 4700 metros da faixa litorânea mais próxima, a praia da Barra do Ceará, ou seja, acima dos 200 metros nas quais os estudos comprovam haver forte influência da maresia (CAMPOS, 2016).

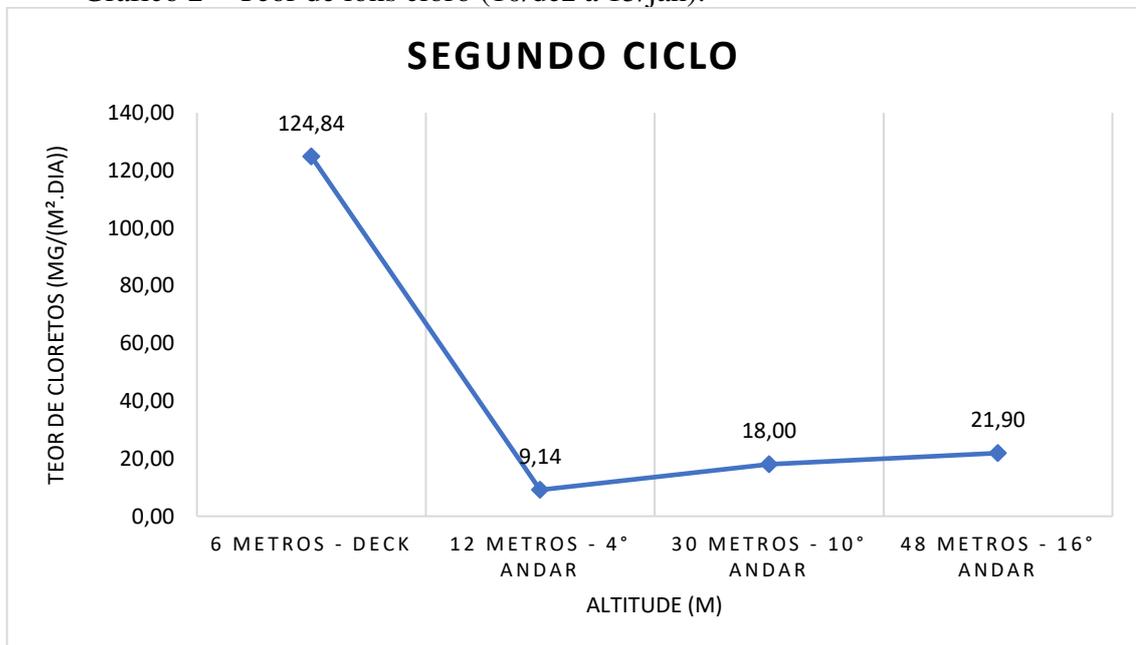
Os resultados referentes a deposição de cloretos estão resumidos na Tabela 3. Nos Gráficos 1, 2 e 3 estão explicitados tais valores em função da altitude das velas em cada ciclo de amostragem, assim como em seus valores médio, Gráfico 4, de maneira a tentar correlacionar tais variáveis por meio de uma função matemática.

Gráfico 1 – Teor de íons cloro (10/nov a 10/dez).



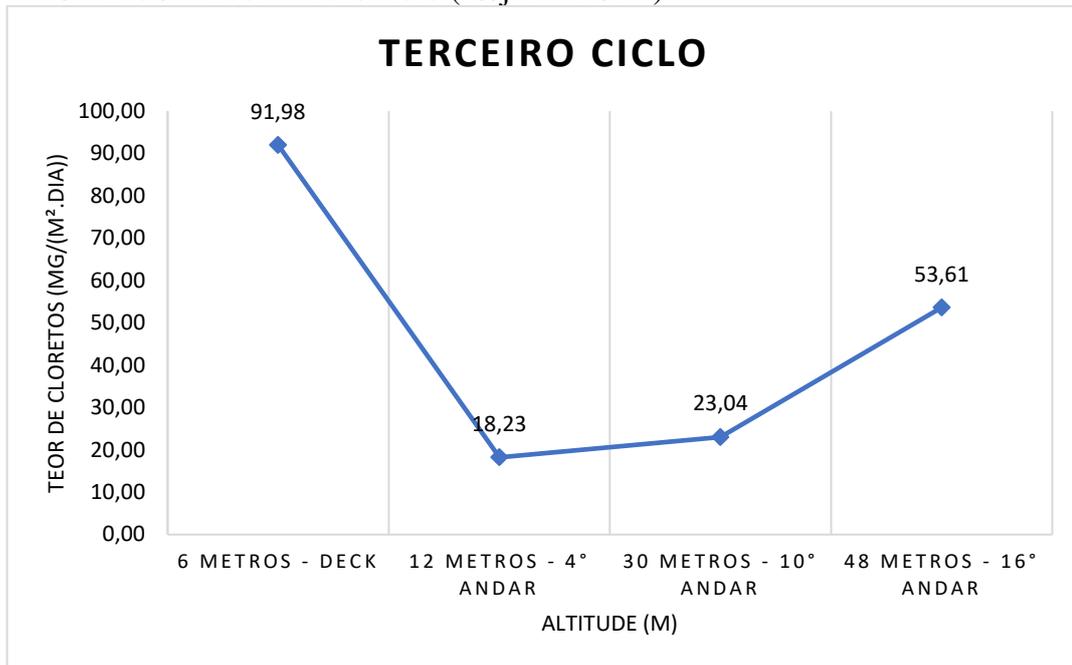
Fonte: Autoral.

Gráfico 2 – Teor de íons cloro (10/dez a 15/jan).



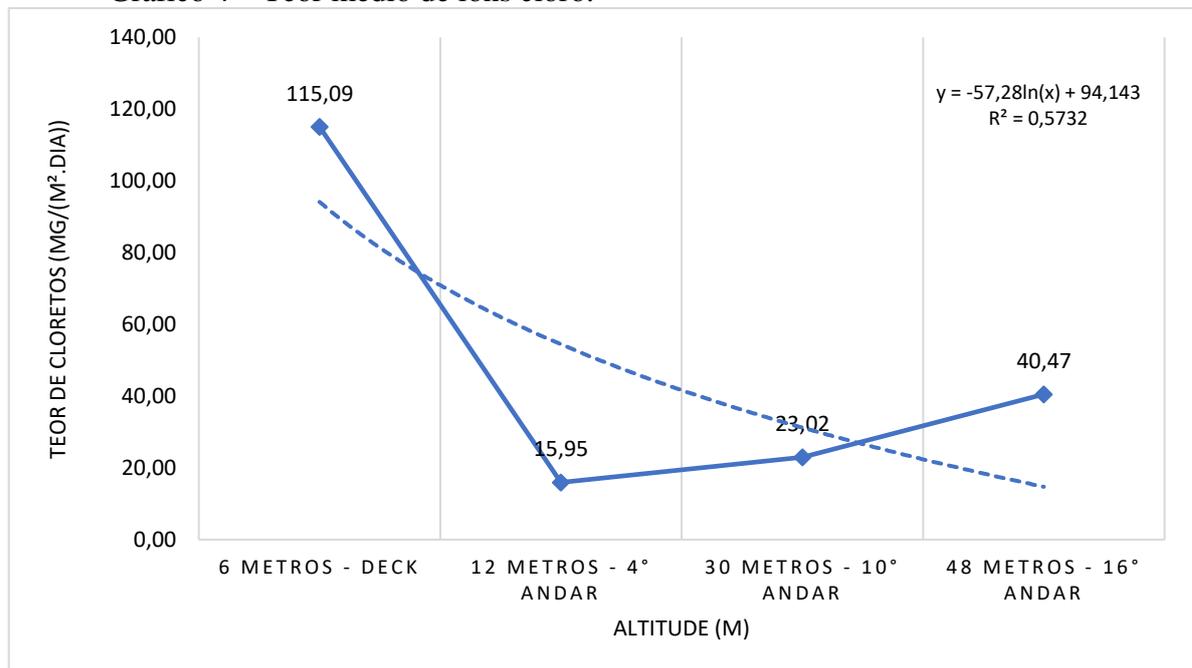
Fonte: Autoral.

Gráfico 3 – Teor de íons cloro (15/jan a 12/fev).



Fonte: Autoral.

Gráfico 4 – Teor médio de íons cloro.



Fonte: Autoral.

Não foi possível estabelecer uma correlação matemática de tais variáveis por uma função logarítmica,  $R^2$  inferior a 0,9, uma vez que foi apresentado um comportamento discrepante entre os valores obtidos das velas instaladas no deck das demais velas instaladas. Uma das explicações para tal fenômeno refere-se à posição sobre as quais cada vela foi

instalada; no deck esta foi instalada em local livre, exposto a névoa salina, já as demais foram instaladas nas sacadas dos apartamentos, nas quais cada fachada da edificação estava exposta de uma maneira diferente ao aerossol marinho.

Na análise dos gráficos em cada ciclo é possível constatar que as curvas apresentaram comportamentos similares, dessa maneira a discrepância de valores entre as velas de um mesmo período não ocorreu por erro de amostragem, mas sim devido as suas condições de exposição. Entretanto a discrepância de valores em um local de amostragem em períodos distintos é natural que ocorra, uma vez que estão expostos a condições ambientais diversas.

## 4.2 Parâmetros atmosféricos

O resumo dos principais parâmetros atmosféricos analisados, obtidos por meio do INMET, está representado na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Resumo dos parâmetros atmosféricos.

| <b>Resumo</b>  |                              |                                  |                          |                             |                         |
|--|------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| <b>Período: 10 de novembro de 2020 a 12 de fevereiro de 2021</b> |                              |                                  |                          |                             |                         |
| <b>Período</b>   | <b>Direção do vento ( °)</b> | <b>Velocidade do vento (m/s)</b> | <b>Precipitação (mm)</b> | <b>Umidade relativa (%)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> |
| <b>10/nov a 10/dez</b>   | 106,68                       | 3,21                             | 17,80                    | 67,07                       | 28,30                   |
| <b>10/dez a 15/jan</b>   | 102,86                       | 3,09                             | 45,40                    | 67,15                       | 28,25                   |
| <b>15/jan a 12/fev</b>   | 108,90                       | 2,73                             | 128,20                   | 71,94                       | 27,77                   |

Fonte: INMET, 2021.

### 4.2.1 Vento

Pode-se averiguar que durante o período de análise as características do vento apresentaram uma leve variação. A direção do vento oscilou 6,04° (102,86° a 108,90°), com direção predominante entre E (Leste) e SE (Sudeste), conforme Figura 17. A velocidade do vento, por sua vez, sofreu um pequeno decréscimo de 0,48 m/s.

Figura 17 – Direção característica do vento.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

Em campo, ao fim do segundo ciclo (10/dez), com o auxílio da biruta, foi constatado que o vento se direciona no sentido leste/sudeste, em conformidade aos dados obtidos do INMET, conforme Figura 18.

Figura 18 – Verificação da direção do vento através da biruta.



Fonte: Autoral.

É possível constatar, por meio das observações acima, que a direção característica do vento atua de maneira perpendicular na fachada da Torre Capri, na qual se encontra localizada a vela do 16° andar; o que explica, desse modo, seu maior teor de cloretos em relação as velas instaladas na Torre Morano, já que deve receber uma maior concentração do

aerossol marinho. Nesta, por sua vez, a vela instalada na sacada do 10° andar está frontal em relação ao vento, diferente da vela instalada no 4° andar que se encontra paralela, o que explica a diferença de íons cloretos entre ambas por aquela está mais exposta à nevoa salina. No Deck, entretanto, a vela está localizada em uma região livre, sem obstáculos à sua volta - com exceção dos prédios circunvizinhos, fazendo, dessa maneira, com que este local apresente uma elevada concentração salina face às demais. A Figura 19 sintetiza tais observações descritas.

Figura 19 – Locação das velas/ direção característica do vento.



Fonte: Adaptado do Google Earth

Outro parâmetro que deve ser analisado refere-se à velocidade do vento. De acordo com os dados fornecidos pelo INMET, houve uma variação na velocidade do vento entre 3,21 m/s e 2,73 m/s. É possível que, caso seja feita uma medição em campo, tenhamos um valor superior; conforme demonstrou Campos (2016) que observou rajadas de vento com velocidade de até 12,49 m/s na região da Praia do Futuro.

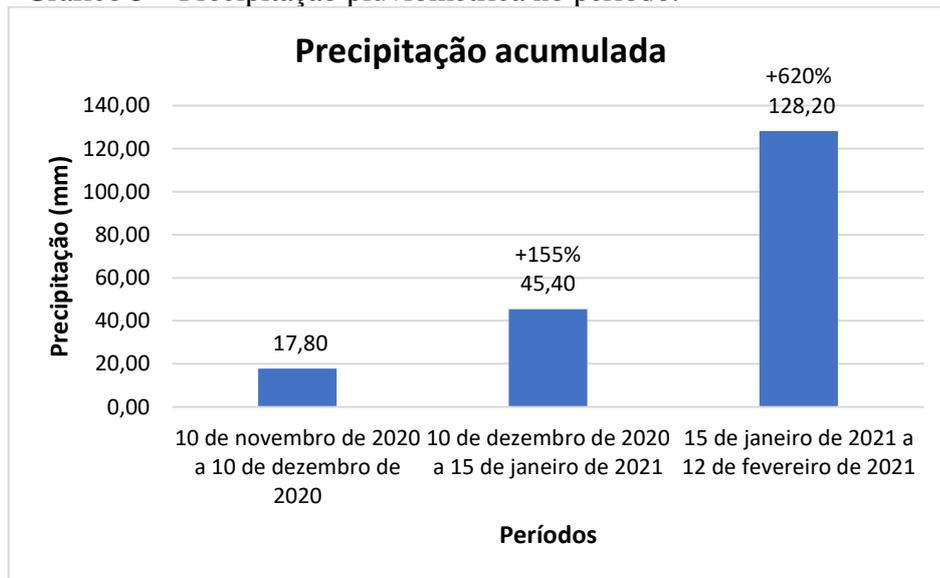
Este parâmetro é imprescindível para compreensão do fenômeno, pois um acréscimo na velocidade do vento contribui para formação do aerossol marinho e sua disseminação na atmosfera, como discutido anteriormente. Tais locais, com velocidade do vento superior a 4 m/s, estão mais suscetíveis ao spray marinho, obtendo, assim, maiores concentrações de cloretos. Isto pode ser verificado na vela localizada no Deck, instalada em

um ambiente livre, que apresentou um decréscimo no teor de cloretos ao longo dos meses, em conformidade ao decréscimo na velocidade do vento.

#### 4.2.2 Precipitação

Quanto à precipitação total, a pesquisa foi iniciada em um período de baixa pluviometria, entretanto os últimos meses de análise apresentaram uma elevada concentração pluviométrica. Observou-se um acréscimo, principalmente do segundo para o terceiro ciclo, chegando à precipitação total de 128,20 mm no último período, o Gráfico 5 sintetiza tais informações. Dessa forma, pode-se correlacionar esta elevada precipitação ao baixo teor de cloretos obtidos nas últimas amostras do Deck, pois uma maior lavagem nas fachadas das edificações ocasiona um menor acúmulo de íons cloro.

Gráfico 5 – Precipitação pluviométrica no período.



Fonte: Adaptado do INMET (2021).

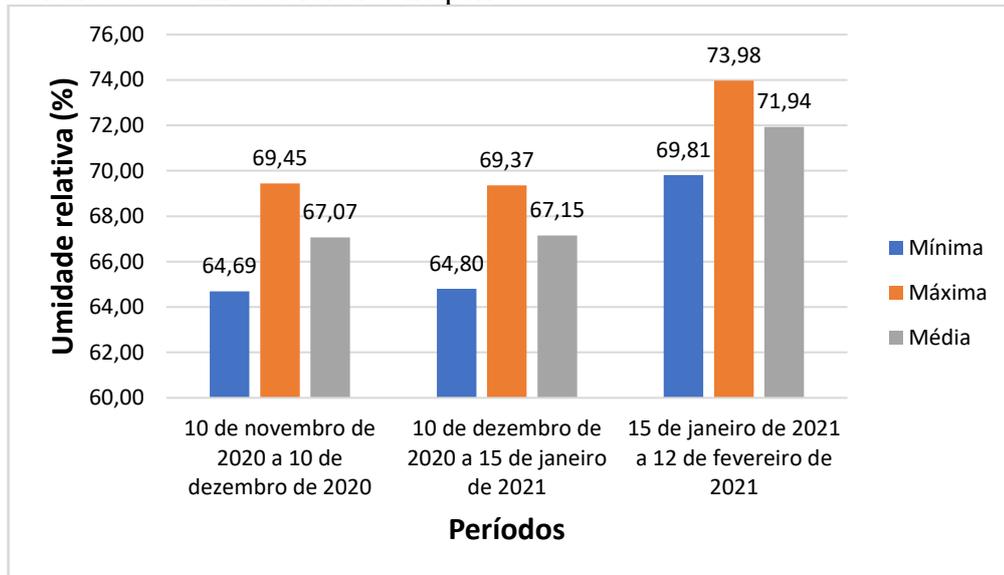
#### 4.2.3 Umidade relativa

A umidade relativa durante período de pesquisa apresentou uma pequena variação. Seu comportamento deu-se conforme o esperado, pois os períodos de maiores índices pluviométricos foram aqueles que apresentam maiores índices de umidade relativa.

Durante os três meses de análise a umidade relativa ficou entre 67,07% a 71,94%, variação esta pequena, conforme verificar-se na Gráfico 6. É válido ressaltar que a umidade

do ar está diretamente relacionada ao processo de transportes de cloretos no concreto, pois este material tem como característica absorver a umidade do meio com facilidade e perdê-la com certa dificuldade. Além do mais, quanto mais água os cloretos absorvem, mais pesados estas partículas ficam, sendo, assim, transportados em menores distância em relação ao mar.

Gráfico 6 – Umidade relativa no período.

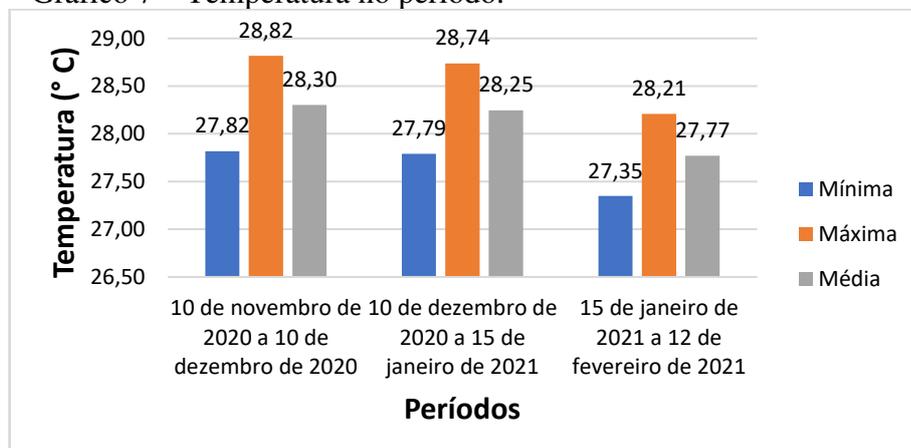


Fonte: Adaptado do INMET (2021).

#### 4.2.4 Temperatura

A temperatura mínima, máxima e média do meio, de acordo com INMET (2021), está explicitada no Gráfico 7. É possível constatar que a temperatura no meio apresentou uma pequena variação durante o período de estudo.

Gráfico 7 – Temperatura no período.



Fonte: Adaptado do INMET (2021).

Essa diminuta variação durante os meses de estudo permite indicar que este parâmetro apresentou pouca influência na deposição de cloretos. A grande variabilidade térmica é o motivo pela qual o concreto sofre retração, permitindo, assim, o surgimento de fissuras nas quais o deixa exposto aos ataques por cloretos.

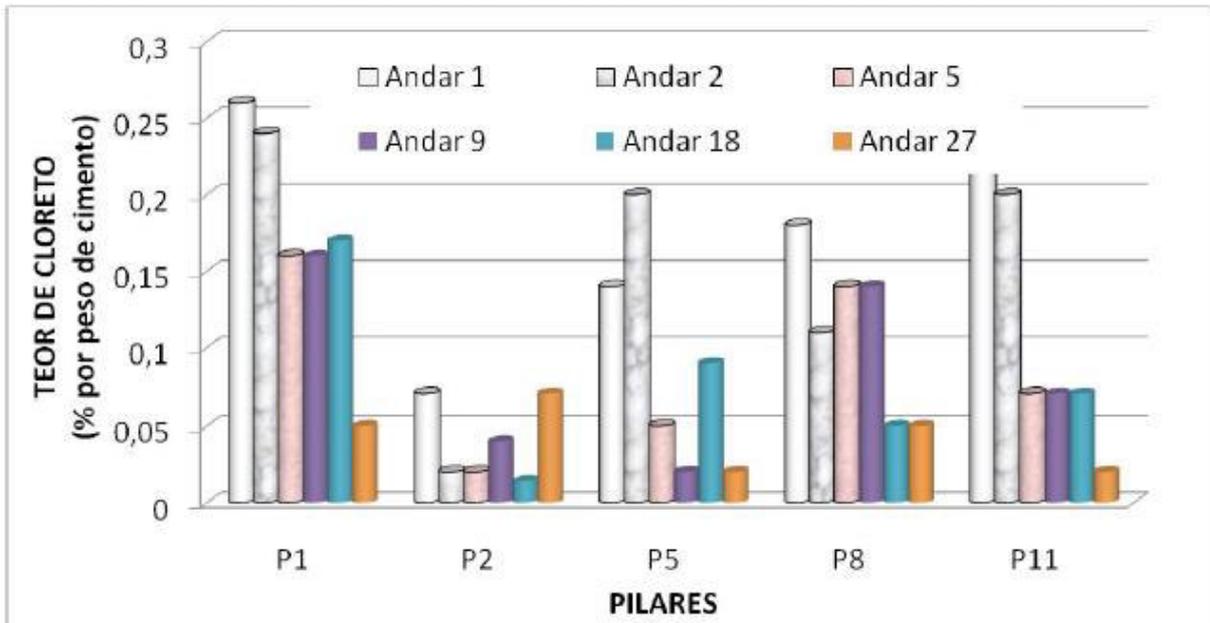
### **4.3 Comparação com outros estudos**

Conforme explanado no item 2.5.3.3, o aerossol marinho tem sua distribuição vertical. Medeiros *et al.* (2010) realizou um estudo quanto a contaminação por íons cloretos em uma edificação contendo 36 pavimentos tipo no Rio de Janeiro. Seus estudos tiveram como objetivo realizar inferências sobre a influência da altura da edificação, assim como a orientação dos seus elementos estruturais, em relação a contaminação do concreto por íons cloretos.

É válido ressaltar que o procedimento, utilizado na pesquisa supracitada, para determinação do teor de cloretos foi o estabelecido na American Society for Testing and Materials (ASTM) C 1152, teor de íons cloro no concreto, portanto diferente do adotado neste trabalho, teor de cloretos no ar atmosférico, descrito na NBR 6211.

Analisando os resultados do estudo realizado por Medeiros *et al.* (2010), apresentado no Gráfico 8, é possível constatar que quanto maior a altura, menor o teor de cloretos em relação a massa de cimento no concreto, convergente com o obtido nesta pesquisa, com exceção de algumas velas que estiverem em posição menos exposta à névoa. Concomitantemente, o autor observou que a orientação do pilar em relação ao mar não foi um fator de alta influência na contaminação do concreto por cloretos, diferente do obtido nesta pesquisa.

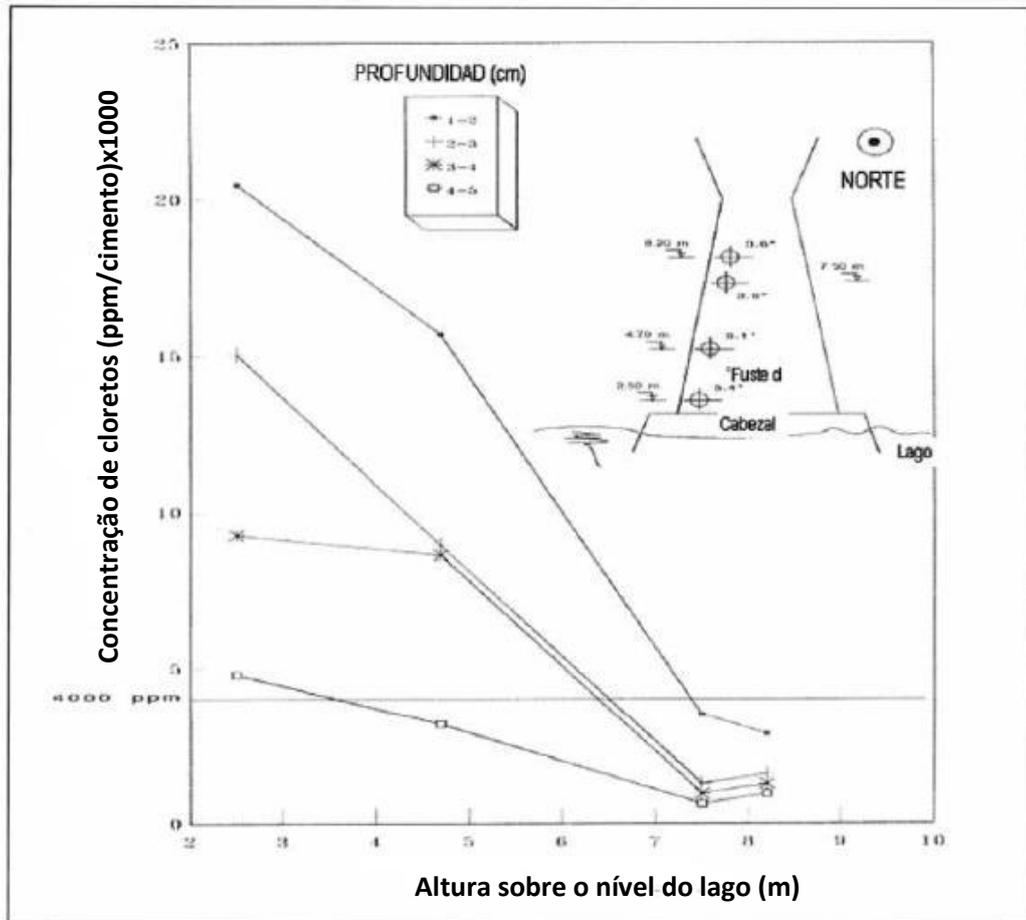
Gráfico 8 – Teor de cloreto em % da massa de cimento do concreto versus cota dos andares.



Fonte: Medeiros *et al.* (2010).

No estudo apresentado por Rincón *et al.* (2006) na Ponte General Rafael Urdaneta (PGRU), o autor obteve os seguintes resultados apresentados na Figura 20. É válido ressaltar que a análise se deu também por meio do teor de cloretos no concreto. Os autores constataram que a 6 metros do nível do lago os efeitos do ingresso de cloretos são muito baixos. Resultados estes que corroboraram com os obtidos por Medeiros *et al.* (2010), assim como neste estudo.

Figura 20 - Perfil de cloretos a diferentes profundidades.



Fonte: Adaptado Rincón *et al.* (2006).

Por fim, com as informações apresentadas, pode-se constatar que para uma análise acurada da influência do teor de cloretos em função da altitude é necessário tentar isolar as demais variáveis, como direção do vento, exposição a águas de lavagem e secagem, dentre outros fatores.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusão

Os resultados obtidos demonstram haver uma elevada agressividade ambiental na região advindos da névoa marinha, principalmente em regiões de baixa altitude e livre de obstáculos.

O estudo dos parâmetros climatológicos demonstrou que estes podem afetar de sobremaneira a deposição de sais. A temperatura, por apresentar uma pequena variação, teve pouca influência nos resultados obtidos. O mesmo pode-se afirmar da umidade relativa que apresentou faixa de valores entre 67% e 71%. A precipitação, entretanto, apresentou uma elevação dos seus índices considerável nos últimos meses, diminuindo, assim, o teor de cloretos nas velas úmidas, devido a lavagem e a consequente redução do acúmulo de cloretos. O fator mais preponderante, no entanto, foi a direção dos ventos; pode-se constatar que mesmo aqueles apartamentos localizados em maiores altitudes apresentaram elevados teores de sais, pois estavam localizados em região livre de obstáculos e frontal à direção de transporte da névoa salina, favorecendo, assim, a deposição de íons cloro.

Quanto a correlação entre a deposição de íons cloro e altitude, não foi possível correlacionar estas variáveis por meio de uma função logarítmica, uma vez que se observou uma discrepância entre os valores obtidos na vela úmida instalada no deck em relação as demais. Como discutido anteriormente, acredita-se que esse comportamento ocorreu devido a localização em que as velas úmidas foram instaladas, estando, por exemplo, a vela úmida do deck mais exposta à névoa salina que a vela úmida do 4º andar.

Comparando os resultados obtidos com àqueles expostos por Medeiros *et al.* (2010) e Rincón *et al.* (2006), ressaltando os métodos de análise adotados serem distintos, foi possível observar a semelhança entre os comportamentos resultantes. Os autores citados constataram que altitudes maiores resultam em menores teores de cloreto. Entretanto, para Medeiros *et al.* (2010) a posição do ponto de análise não apresentou forte influência na contaminação por cloretos, diferente do observado nesta pesquisa.

Desse modo, a partir das observações apresentadas acima, pode-se concluir que para uma análise mais acurada da relação entre as variáveis, altitude e teor de cloretos, é necessário que se tente isolar ao máximo estas dos fatores intervenientes, como a direção do vento.

## 5.2 Sugestões de trabalhos futuros

Por meio dos resultados obtidos nesta pesquisa, assim como devido a importância na qual o tema requiere, sugere-se melhorias que podem ser adotadas, bem como temas semelhantes que podem ser abordados.

- a) Estender esta pesquisa para uma maior quantidade de meses, assim como instalar as velas úmidas em locais abertos, alinhados em uma mesma fachada. Desse modo, seria possível observar a influência do clima na concentração de cloretos, durante o período seco e chuvoso, além de isolar os fatores intervenientes como direção do vento.
- b) Realizar esta pesquisa em outras áreas de atmosfera marinha, de maneira que se possa mapear a agressividade ambiental em diversos pontos da cidade, bem como analisar se há similaridade no comportamento de cada uma delas.
- c) Replicar esta pesquisa, com as correções mencionadas acima, em diferentes distâncias do mar. Desse modo, pode-se analisar a influência da altitude e distância do mar em relação ao teor de íons cloretos de maneira simultânea.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, A. M. C. **Contribuição à análise da perspectiva de vida útil de estruturas em concreto face ao teor de cloreto registrados em Maceió** – AL. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.
- ALVES, T. L. **Estudo da formação de incrustações inorgânicas em membranas de nanofiltração utilizadas em processos de dessulfatação**. 2006. Tese (Doutorado) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6211: Corrosão atmosférica - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida**. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- BORBA JUNIOR, J. C. **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória, 2011.
- CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- CAMPOS, A. M. R. **Estudo da agressividade do ar atmosférico de Fortaleza - CE**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2016.
- CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2005.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, GO: UFG, 1997.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GUSTAFSSON, M. E. R.; FRANZÉN, L. G. Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW SWEDEN. Goteborg University, Earth Sciences Centre, Department of Physical Geography. **Atmospheric Environment**. v. 30, n. 6, p. 977-989, Sweden, 1996.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos**. Brasília, DF, 2021.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Influência da altura e posição da edificação na penetração de cloretos: Estudo de caso em obra no Rio de Janeiro – Brasil. *In: VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS*, 2010, Córdoba. **Anais...** Córdoba: Cinpar, 2010.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. *In: Geraldo Isaia. (Org.). Concreto: ciência e tecnologia*. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 1.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: IFPB, 2017.

MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R.; COSTA E SILVA, A. J. Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto. *In: Congresso Brasileiro de Concreto*, 54, 2012, Maceió. **Anais...** Maceió: IBRACON, 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & Construções**, São Paulo, ano 37, n. 53, p. 14-19, 2009.

PONTES, R. B. **Disseminação de íons cloretos na orla marítima do bairro de boa viagem, Recife – PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2006.

PORTELLA, C. S. A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos segundo a ABNT NBR 6118:2007 e expostos aos cloretos disseminados em névoa salina na praia do futuro, em Fortaleza – CE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e seu controle**. São Paulo: Hemus, 1995.

RINCÓN, O. T.; *et al.* Avaliação/ reabilitação de estruturas em ambientes marítimos. Caso histórico: Ponte de Maracaibo. **Corros. Prof. Mater**. v. 25, n. 3, 2006.

ROMANO, F. S. **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, D. V. **Avaliação do teor de íons cloro no ar atmosférico da praia do porto das dunas, em Aquiraz/CE**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

SILVA, L. S. N. **Avaliação de concretos estruturais produzidos segundo as prescrições da NBR 6118, quando submetidos a ensaio de penetração de cloretos**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

SILVA, F. A. S. **Avaliação do teor de íons cloreto no ar atmosférico da Praia do Futuro em Fortaleza/CE**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SILVA, L. K. **Levantamento de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado no estado do Ceará**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TORRES, A. **Praia do futuro é dona do título de lugar com maresia mais forte do Brasil**. Fantástico. Disponível em: <http://g1.globo.com/fantastico/noticia/2018/01/praiado-futuro-e-dona-do-titulo-de-lugar-com-maresia-mais-forte-do-brasil.html>. Acesso em: 12 fev. 2021.

VILASBOAS, J. M. L. **Estudo dos mecanismos de transporte de cloretos no concreto, suas inter-relações e influência na durabilidade de edificações na cidade do Salvador-BA**. Tese (Doutorado em Energia e Ambiente) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DA TITULAÇÃO DA VELA ÚMIDA

Tabela A1 – Resultados do teor de cloretos (10/nov – 10/dez).

| <b>10/NOV a 10/DEZ</b> |           |         |                     |           |        |                |                |                |        |        |          |                                    |
|------------------------|-----------|---------|---------------------|-----------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|----------|------------------------------------|
| Vela                   | Local     | Vt (mL) | S (m <sup>2</sup> ) | Titulação |        |                |                |                |        |        | t (dias) | Cloreto (mg/(m <sup>2</sup> .dia)) |
|                        |           |         |                     | Va (mL)   | M      | 1° Titul. (mL) | 2° Titul. (mL) | 3° Titul. (mL) | A (mL) | B (mL) |          |                                    |
| P17                    | Branco    | 500     |                     |           |        | 0,7            | 0,6            | 0,6            | 0,00   |        |          | -                                  |
| P10                    | Deck      | 555     |                     |           |        | 5,5            | 5,4            | 5,4            | 5,43   |        |          | 128,44                             |
| P45                    | 4° andar  | 455     | 0,01227             | 50        | 0,0125 | 1,5            | 1,6            | 1,6            | 1,57   | 0,63   | 30       | 20,47                              |
| P02                    | 10° andar | 425     |                     |           |        | 2,1            | 2,0            | 1,9            | 2,00   |        |          | 28,00                              |
| P11                    | 16° andar | 510     |                     |           |        | 2,8            | 2,4            | 2,3            | 2,50   |        |          | 45,90                              |

Fonte: Autoral

Tabela A2 – Resultados do teor de cloretos (10/dez – 15/jan).

| <b>10/DEZ a 15/JAN</b> |           |         |                     |           |        |                |                |                |        |        |          |                                    |
|------------------------|-----------|---------|---------------------|-----------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|----------|------------------------------------|
| Vela                   | Local     | Vt (mL) | S (m <sup>2</sup> ) | Titulação |        |                |                |                |        |        | t (dias) | Cloreto (mg/(m <sup>2</sup> .dia)) |
|                        |           |         |                     | Va (mL)   | M      | 1° Titul. (mL) | 2° Titul. (mL) | 3° Titul. (mL) | A (mL) | B (mL) |          |                                    |
| P20                    | Branco    | 500     |                     |           |        | 1,1            | 0,7            | 0,7            | 0,00   |        |          | -                                  |
| P33                    | Deck      | 425     |                     |           |        | 6,8            | 7,1            | 7,2            | 7,03   |        |          | 105,87                             |
| P35                    | Deck      | 515     | 0,01227             | 50        | 0,0125 | 6,6            | 7,0            | 7,0            | 6,87   | 0,83   | 36       | 124,84                             |
| P18                    | 4° andar  | 455     |                     |           |        | 0,9            | 1,6            | 1,5            | 1,33   |        |          | 9,14                               |
| P06                    | 10° andar | 480     |                     |           |        | 1,6            | 1,8            | 1,9            | 1,77   |        |          | 18,00                              |
| P10                    | 16° andar | 545     |                     |           |        | 1,9            | 1,8            | 1,8            | 1,83   |        |          | 21,90                              |

Fonte: Autoral

Tabela A3 – Resultados do teor de cloro (15/jan – 12/fev).

| 15/JAN a 12/FEV |           |         |                     |           |        |                |                |                |        |        |          |                                    |
|-----------------|-----------|---------|---------------------|-----------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|----------|------------------------------------|
| Vela            | Local     | Vt (mL) | S (m <sup>2</sup> ) | Titulação |        |                |                |                |        |        | t (dias) | Cloreto (mg/(m <sup>2</sup> .dia)) |
|                 |           |         |                     | Va (mL)   | M      | 1° Titul. (mL) | 2° Titul. (mL) | 3° Titul. (mL) | A (mL) | B (mL) |          |                                    |
| P44             | Branco    | 535     |                     |           |        | 0,5            | 0,6            | 0,6            | 0,00   |        |          | -                                  |
| P19             | Deck      | 820     |                     |           |        | 2,7            | 2,8            | 2,3            | 2,60   |        |          | 92,13                              |
| P42             | Deck      | 805     |                     |           |        | 2,6            | 2,6            | 2,7            | 2,63   |        |          | 91,83                              |
| P04             | 4° andar  | 350     | 0,01227             | 50        | 0,0125 | 1,5            | 1,4            | 1,4            | 1,43   | 0,43   | 28       | 18,23                              |
| P25             | 10° andar | 530     |                     |           |        | 1,3            | 1,3            | 1,2            | 1,27   |        |          | 23,04                              |
| P17             | 16° andar | 425     |                     |           |        | 2,9            | 2,9            | 2,8            | 2,87   |        |          | 53,61                              |

Fonte: Autoral

## ANEXO A – SOLUÇÕES PARA O PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DA VELA ÚMIDA

- a) **Solução 0,05 M (0,05 N) de ácido nítrico:** 3 mL de ácido nítrico diluído com água a 1000 mL;
- b) **Água glicerinada:** 200 mL de glicerol diluído com água a 1000 mL com adição de 20 gotas de ácido octanóico como fungicida;
- c) **Solução-padrão 0,0125 M (0,025 N) de nitrato de mercúrio:** Dissolver 4,2830 g de nitrato de mercúrio hidratado ( $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) em 50 mL de água acidificada com 0,5 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). Diluir com água destilada a 1000 mL em balão volumétrico. Caso necessário, filtrar e padronizar em relação à solução padrão de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ );
- d) **Solução-padrão 0,00705 M (0,0141 N) de nitrato de mercúrio:** Dissolver 2,4200 g de nitrato de mercúrio hidratado ( $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) em 25 mL de água acidificada com 0,25 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). Diluir com água destilada a 1000 mL em balão volumétrico. Caso necessário, filtrar e padronizar em relação à solução padrão de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ );
- e) **Solução-padrão 0,025 M (0,025 N) de cloreto de sódio:** Dissolver 1,4612 g de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), seco por 1 h a  $600^\circ\text{C}$ , em água destilada a 1000 mL em balão volumétrico;
- f) **Solução de indicador misto:** Dissolver 0,5 g de difenilcarbazona e 0,05 g de azul de bromofenol em 100 mL de etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ). Armazenar solução em frasco escuro e descartar após seis meses;
- g) **Solução 0,25 M (0,25 N) de hidróxido de sódio:** 10 g de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) dissolvidos em água a 1000 mL.

Todas as soluções foram produzidas no Laboratório de Química Analítica da UFC, com controle preciso de pesagem e medições de volumes. A solução de nitrato de mercúrio, por sua vez, foi aproveitada de uma pesquisa anterior sendo produzida pela equipe do Laboratório de Saneamento Ambiental.

## **ANEXO B – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS**

O procedimento abaixo lista todas as etapas para determinação do teor de cloretos, conforme recomenda o método da vela úmida descrito na NBR 6211 (ABNT, 2001).

- a) Tomar uma alíquota que não contenha mais que 20 mg de íon cloretos. Anotar o volume da alíquota ( $V_a$ ). Diluir a alíquota com água a 50 ml, caso seja necessário;
- b) Adicionar de 5 a 10 gotas do indicador misto e agitar o recipiente. Caso, após a adição do indicador, a alíquota fique com coloração azul violeta ou vermelha, deve-se adicionar  $\text{HNO}_3$  (0,05 M), gota a gota, até a mudança de coloração para amarela, e adicionar 1 mL do ácido em excesso. Caso, após a adição do indicador, apareça a coloração amarela ou laranja, adicionar, gota a gota, solução de  $\text{NaOH}$  (0,25 M) até a mudança de coloração para azul violeta. Adicionar, em seguida, solução de  $\text{HNO}_3$  (0,05 M), gota a gota, até a mudança de coloração para amarelo, e adicionar 1 mL do ácido em excesso;
- c) Titular com solução de nitrato mercúrio 0,0125 M até a coloração azul-violeta permanente. Anotar o volume de solução gasto, em mililitros (A);
- d) Efetuar o ensaio em branco, utilizando a mesma solução-padrão de nitrato mercúrio utilizado para titulação da amostra. Anotar o volume de solução gasto, em mililitros (B).

A norma ressalta que se o volume da amostra contiver menos que 2,5 mg de íon cloreto, a titulação da amostra e do ensaio em branco deve ser realizada com solução-padrão de nitrato mercúrio 0,00705 M, utilizando microbureta.

Será ilustrado a seguir o procedimento descrito acima realizado na determinação do teor de cloretos da terceira amostragem (15/01/2021 a 12/02/2021).

Figura B1 – Velas úmidas (da esquerda para direita P10 (UFC), P44 (Branco), P19 (Deck), P42 (Deck), P17 (16º andar), P25 (10º andar), P04 (4º andar)).



Fonte: Autoral.

Figura B2 – Águas de lavagem das amostras coletadas.



Fonte: Autoral.

Figura B3 – Alíquotas com adição do indicador misto (coloração azul-violeta).



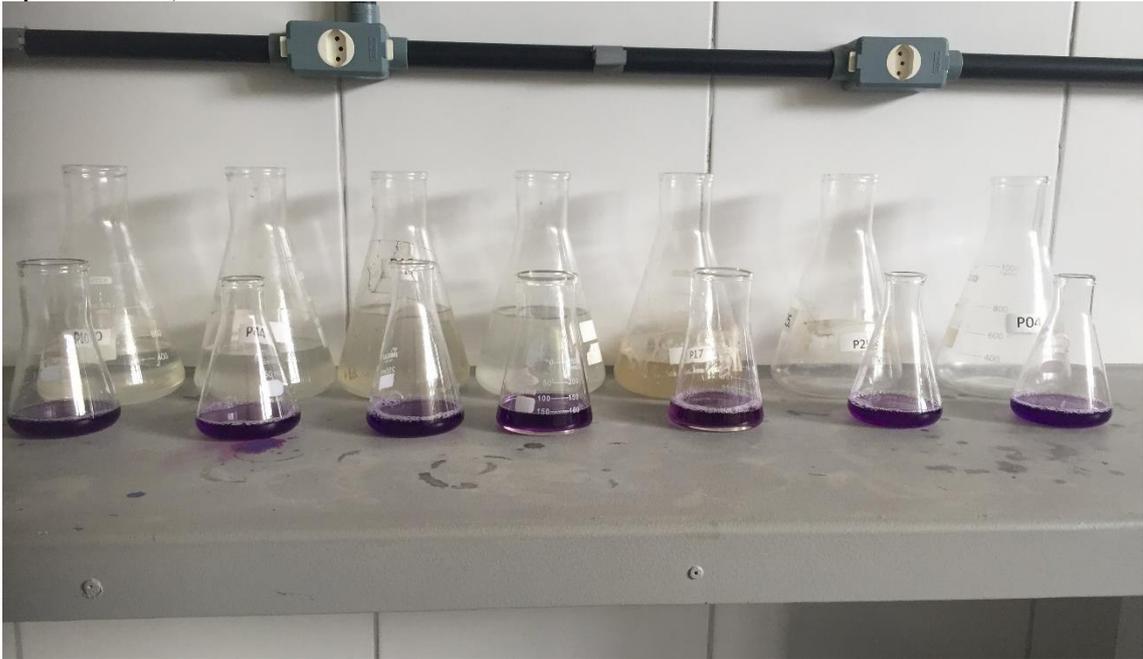
Fonte: Autoral.

Figura B4 – Alíquotas após adição do ácido nítrico, ( $\text{HNO}_3$ ), (coloração amarela).



Fonte: Autoral.

Figura B5 – Alíquotas após titulação com nitrato de mercúrio (coloração azul-violeta permanente).



Fonte: Autoral.

## ANEXO C – ACOMPANHAMENTO DOS PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS

Tabela C1 – Vento.

| <b>Vento - direção predominante e velocidade</b>                |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| <b>Período: 10 de novembro de 2020 a 10 de dezembro de 2020</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>10/nov a<br/>16/nov</b> | <b>17/nov a<br/>23/nov</b> | <b>24/nov a<br/>30/nov</b> | <b>01/dez a<br/>07/dez</b> | <b>08/dez a<br/>10/dez</b> | <b>Média<br/>mensal:</b> |
| <b>Direção ( °)</b>   | 109,30                     | 100,96                     | 113,46                     | 105,04                     | 104,67                     | 106,68                   |
| <b>Velocidade (m/s)</b>   | 3,21                       | 3,00                       | 3,37                       | 3,35                       | 3,15                       | 3,21                     |
| <b>Período: 10 de dezembro de 2020 a 15 de janeiro de 2021</b>  |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>10/dez a<br/>16/dez</b> | <b>17/dez a<br/>23/dez</b> | <b>24/dez a<br/>30/dez</b> | <b>31/dez a<br/>06/jan</b> | <b>07/jan a<br/>15/jan</b> | <b>Média<br/>mensal:</b> |
| <b>Direção ( °)</b>   | 107,63                     | 100,56                     | 107,96                     | 104,21                     | 93,92                      | 102,86                   |
| <b>Velocidade (m/s)</b>   | 3,01                       | 3,23                       | 3,36                       | 2,96                       | 2,86                       | 3,09                     |
| <b>Período: 15 de janeiro de 2021 a 12 de fevereiro de 2021</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>15/jan a<br/>21/jan</b> | <b>22/jan a<br/>28/jan</b> | <b>29/jan a<br/>04/fev</b> | <b>05/fev a<br/>12/fev</b> | <b>—</b>                   | <b>Média<br/>mensal:</b> |
| <b>Direção ( °)</b>   | 110,83                     | 110,81                     | 110,70                     | 103,26                     | —                          | 108,90                   |
| <b>Velocidade (m/s)</b>   | 2,44                       | 2,61                       | 3,04                       | 2,80                       | —                          | 2,73                     |

Fonte: Adaptado do INMET, 2021.

Tabela C2 – Precipitação.

| <b>Precipitação (mm)</b>  |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| <b>Período: 10 de novembro de 2020 a 10 de dezembro de 2020</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>10/nov a<br/>16/nov</b> | <b>17/nov a<br/>23/nov</b> | <b>24/nov a<br/>30/nov</b> | <b>01/dez a<br/>07/dez</b> | <b>08/dez a<br/>10/dez</b> | <b>Total<br/>mensal:</b> |
| <b>Precipitação total<br/>(mm):</b>                             | 10,80                      | 1,40                       | 4,80                       | 0,80                       | 0,00                       | 17,80                    |
| <b>Período: 10 de dezembro de 2020 a 15 de janeiro de 2021</b>  |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>10/dez a<br/>16/dez</b> | <b>17/dez a<br/>23/dez</b> | <b>24/dez a<br/>30/dez</b> | <b>31/dez a<br/>06/jan</b> | <b>07/jan a<br/>15/jan</b> | <b>Total<br/>mensal:</b> |
| <b>Precipitação total<br/>(mm):</b>                             | 10,00                      | 12,60                      | 3,40                       | 17,60                      | 1,80                       | 45,40                    |
| <b>Período: 15 de janeiro de 2021 a 12 de fevereiro de 2021</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>15/jan a<br/>21/jan</b> | <b>22/jan a<br/>28/jan</b> | <b>29/jan a<br/>04/fev</b> | <b>05/fev a<br/>12/fev</b> | <b>—</b>                   | <b>Total<br/>mensal:</b> |
| <b>Precipitação total<br/>(mm):</b>                             | 46,00                      | 37,20                      | 21,00                      | 24,00                      | —                          | 128,20                   |

Fonte: Adaptado do INMET, 2021.

Tabela C3 – Umidade relativa.

| <b>Umidade relativa (%)</b>                                     |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| <b>Período: 10 de novembro de 2020 a 10 de dezembro de 2020</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>10/nov a<br/>16/nov</b> | <b>17/nov a<br/>23/nov</b> | <b>24/nov a<br/>30/nov</b> | <b>01/dez a<br/>07/dez</b> | <b>08/dez a<br/>10/dez</b> | <b>Média<br/>mensal:</b> |
| <b>Mínima</b>   | 65,62                      | 65,99                      | 63,43                      | 65,21                      | 63,18                      | 64,69                    |
| <b>Máxima</b>   | 70,61                      | 70,58                      | 68,26                      | 69,88                      | 67,90                      | 69,45                    |
| <b>Média</b>  | 68,23                      | 68,27                      | 65,86                      | 67,47                      | 65,53                      | 67,07                    |
| <b>Período: 10 de dezembro de 2020 a 15 de janeiro de 2021</b>  |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>10/dez a<br/>16/dez</b> | <b>17/dez a<br/>23/dez</b> | <b>24/dez a<br/>30/dez</b> | <b>31/dez a<br/>06/jan</b> | <b>07/jan a<br/>15/jan</b> | <b>Média<br/>mensal:</b> |
| <b>Mínima</b>   | 64,45                      | 65,36                      | 63,42                      | 66,33                      | 64,44                      | 64,80                    |
| <b>Máxima</b>   | 69,42                      | 69,82                      | 67,73                      | 70,77                      | 69,09                      | 69,37                    |
| <b>Média</b>  | 67,00                      | 67,63                      | 65,68                      | 68,54                      | 66,91                      | 67,15                    |
| <b>Período: 15 de janeiro de 2021 a 12 de fevereiro de 2021</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>15/jan a<br/>21/jan</b> | <b>22/jan a<br/>28/jan</b> | <b>29/jan a<br/>04/fev</b> | <b>05/fev a<br/>12/fev</b> | <b>—</b>                   | <b>Média<br/>mensal:</b> |
| <b>Mínima</b>   | 71,46                      | 70,31                      | 68,17                      | 69,30                      | —                          | 69,81                    |
| <b>Máxima</b>   | 75,52                      | 74,47                      | 72,47                      | 73,45                      | —                          | 73,98                    |
| <b>Média</b>  | 73,52                      | 72,44                      | 70,39                      | 71,40                      | —                          | 71,94                    |

Fonte: Adaptado do INMET, 2021.

Tabela C4 – Temperatura.

| <b>Temperatura (° C)</b>  |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| <b>Período: 10 de novembro de 2020 a 10 de dezembro de 2020</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>10/nov a<br/>16/nov</b> | <b>17/nov a<br/>23/nov</b> | <b>24/nov a<br/>30/nov</b> | <b>01/dez a<br/>07/dez</b> | <b>08/dez a<br/>10/dez</b> | <b>Média<br/>mensal:</b> |
| <b>Mínima</b>   | 27,69                      | 27,87                      | 27,75                      | 27,96                      | 27,82                      | 27,82                    |
| <b>Máxima</b>   | 28,71                      | 28,86                      | 28,72                      | 28,95                      | 28,85                      | 28,82                    |
| <b>Média</b>  | 28,17                      | 28,35                      | 28,21                      | 28,43                      | 28,34                      | 28,30                    |
| <b>Período: 10 de dezembro de 2020 a 15 de janeiro de 2021</b>  |                            |                            |                            |                            |                            |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>10/dez a<br/>16/dez</b> | <b>17/dez a<br/>23/dez</b> | <b>24/dez a<br/>30/dez</b> | <b>31/dez a<br/>06/jan</b> | <b>07/jan a<br/>15/jan</b> | <b>Média<br/>mensal:</b> |
| <b>Mínima</b>   | 27,76                      | 27,77                      | 27,70                      | 27,89                      | 27,84                      | 27,79                    |
| <b>Máxima</b>   | 28,79                      | 28,69                      | 28,58                      | 28,83                      | 28,79                      | 28,74                    |
| <b>Média</b>  | 28,26                      | 28,22                      | 28,13                      | 28,34                      | 28,29                      | 28,25                    |

Tabela C4 – Temperatura.

(conclusão)

| <b>Temperatura (° C)</b>  |                            |                            |                            |                            |          |                          |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|--------------------------|
| <b>Período: 15 de janeiro de 2021 a 12 de fevereiro de 2021</b> |                            |                            |                            |                            |          |                          |
| <b>Semana:</b>  | <b>15/jan a<br/>21/jan</b> | <b>22/jan a<br/>28/jan</b> | <b>29/jan a<br/>04/fev</b> | <b>05/fev a<br/>12/fev</b> | <b>—</b> | <b>Média<br/>mensal:</b> |
| <b>Mínima</b>   | 26,80                      | 27,29                      | 27,46                      | 27,83                      | —        | 27,35                    |
| <b>Máxima</b>   | 27,71                      | 28,13                      | 28,29                      | 28,70                      | —        | 28,21                    |
| <b>Média</b>  | 27,25                      | 27,70                      | 27,86                      | 28,27                      | —        | 27,77                    |

Fonte: Adaptado do INMET, 2021.