



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

**DAVI VALENTE SANTOS**

**AVALIAÇÃO DE TEOR DE ÍONS CLORO NO AR ATMOSFÉRICO DA PRAIA DO  
PORTO DAS DUNAS, EM AQUIRAZ/CE**

**FORTALEZA**

**2013**

DAVI VALENTE SANTOS

**AVALIAÇÃO DE TEOR DE ÍONS CLORO NO AR ATMOSFÉRICO DA PRAIA DO  
PORTO DAS DUNAS, EM AQUIRAZ/CE**

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

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

---

S234a

Santos, Davi Valente.

Avaliação de teor de íons cloro no ar atmosférico da praia do Porto das Dunas, em Aquiraz/CE /  
Davi Valente Santos. – 2013.  
76 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de  
Engenharia Estrutural e Construção Civil, Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2013.

Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

1. Concreto-deterioração. 2. Corrosão e anticorrosivos. I. Título.

---

CDD 620

DAVI VALENTE SANTOS

**AVALIAÇÃO DE TEOR DE ÍONS CLORO NO AR ATMOSFÉRICO DA PRAIA DO  
PORTO DAS DUNAS, EM AQUIRAZ/CE**

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

Aprovada em 11 / 12 / 2013.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. MSc. Caio Sander Andrade Portella  
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

---

Prof. Dra. María Josefina Positiere  
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Cordoba (UNT)

À Deus.

Aos meus pais, Dario e Otacilânea.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me ajudado e dado força não só para elaborar este trabalho, mas também para superar os desafios do curso de graduação e da vida profissional.

Agradeço à minha família, por toda a compreensão e apoio irrestrito, em especial aos meus pais, Dario de Oliveira Santos Filho e Otacilânea Valente Santos por tudo que me ensinaram, pela educação pautada na ética e pelo apoio em todas as etapas da minha vida.

Agradeço em especial ao meu tio Otacílio Valente Costa, exemplo de conduta ilibada na vida pessoal e profissional, pela significativa contribuição na minha formação educacional e profissional.

Faço um especial agradecimento ao professor Antônio Eduardo Bezerra Cabral pelo acompanhamento para o desenvolvimento desse trabalho e por todo o conhecimento repassado.

Agradeço aos amigos formados na faculdade, em especial a Diego Duarte, Lucas de Oliveira, Tassiano dos Santos, Jefferson Viana, Manuel Feitosa por todos os momentos vividos na Universidade, momentos de descontração e apoio em todas as dificuldades encontradas.

Agradeço aos meus grandes amigos David Alison, Leandro Eiró, Lucas Novaro, Ramiro Novaro, Rafael Victor e Alana França pelo apoio e momentos de descontração. Em especial ao David Alison pelo suporte na realização desse trabalho.

Agradeço a todos os amigos, colegas e colaboradores da construtora Colmeia por contribuírem significativamente na minha formação. Em especial aos engenheiros Walmir Esmeraldo e Carlos Loureiro, ao mestre Zeca e ao técnico Afonso pelo aprendizado transmitido durante as atividades profissionais.

Agradeço aos amigos da Novaes Engenharia também por contribuírem direta e indiretamente na minha formação. Em especial ao Marcos Novaes e ao Lupércio Gurjão pela oportunidade que me foi dada de trabalhar nessa empresa e de aprender vários conceitos importantes para a vida profissional e pessoal.

## RESUMO

A deterioração das estruturas de concreto armado é uma realidade cada vez mais presente e impactante em termos técnicos, econômicos e sociais nas construções brasileiras. A corrosão de armaduras em concreto armado se insere nesse contexto de sobremaneira, principalmente em razão de grande parte das grandes capitais brasileiras e, conseqüentemente, do elevado número de edificações construídas neste país se localizarem em regiões litorâneas, portanto mais agressivas. Este trabalho visa à avaliação do teor de íons cloro no aerossol marinho na praia do Porto das Dunas, em Aquiraz -CE em relação à distância ao mar por meio do método da vela úmida estabelecido pela NBR 6211 (ABNT, 2001), além de uma análise comparativa dos resultados encontrados com valores obtidos em outros estudos em capitais brasileiras para avaliação de agressividade ambiental. Para isso foram selecionados quatro pontos situados a 76, 500, 650 e 1000 metros da costa e ensaiados mensalmente conforme NBR 6211 (ABNT, 2001). Medidas climatológicas também foram extraídas para avaliação de resultados e caracterização do estudo. Observou-se que o teor de cloretos decai exponencialmente com a distância em relação ao mar. Aquiraz apresentou comportamento semelhante somente ao estudo realizado em Fortaleza, obtendo elevada agressividade mesmo a 800 metros. Portanto essas cidades se apresentam bem mais agressivas do que as outras cidades brasileiras.

**Palavras-chave:** Íons cloro. Corrosão de armadura. Vela úmida. NBR 6211 (ABNT, 2001). Agressividade. Aerossol marinho.

## ABSTRACT

The deterioration of reinforced concrete structures is a reality more and more present and impactful on technical, economic and social terms in Brazilian buildings. Corrosion of reinforcement in reinforced concrete falls within this context of greatly, mainly because of a large part of the great Brazilian capitals and, consequently, the high number of buildings constructed in this country are located in coastal regions, so more aggressive. This work aims to evaluate the content of chlorine ions in the marine aerosol on the beach of Porto das Dunas, Aquiraz-CE in relation to the distance to the sea through the wet candle method established by NBR 6211 (ABNT, 2001), beyond a comparative analysis of the results found with values obtained in other studies in Brazilian cities to evaluate environmental aggressiveness. For it were selected four points to 76, 500, 650 and 1000 meters from the coast and tested monthly as NBR 6211 (ABNT, 2001). Climatological measures were also extracted for results evaluation and characterization of the study. It was observed that the content of chlorides decays exponentially with distance from the sea. Aquiraz presented similar behavior only to study conducted in Fortaleza, obtaining high aggressiveness even 800 meters. Therefore these cities are far more aggressive than the other Brazilian cities.

**Keywords:** Chlorine ions. Reinforcement corrosion. Sailing moists. NBR 6211 (ABNT, 2001). Durability. Aggressiveness. Marine aerosol.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferentes desempenhos de uma estrutura com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos .....	19
Figura 2 – Corrosão generalizada em chapa de aço-carbono. ....	23
Figura 3 – Corrosão em placas em chapa de aço carbono de costado de tanque. ....	24
Figura 4 – Corrosão por pites em tubo de aço inoxidável AISI 304. ....	25
Figura 5 – Corrosão sob tensão intergranular ou intercristalina.....	26
Figura 6 – Corrosão sob tensão transgranular ou transcristalina.....	26
Figura 7 – Corrosão gráfitica em componente de bomba centrífuga de ferro fundido: parte escura, área corroída, devido à grafite. ....	27
Figura 8 – Aparência de um rotor de uma bomba submetido à erosão-corrosão. ....	27
Figura 9 – Tubo de aço carbono com empolamento por hidrogênio, ocasionado por H <sub>2</sub> S e água.....	28
Figura 10 – Representação gráfica da pilha eletroquímica da corrosão em uma armadura no concreto. ....	30
Figura 11 – Representação gráfica da pilha eletroquímica da corrosão em várias armaduras no concreto. ....	30
Figura 12 - Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe-H <sub>2</sub> O a 25°C.....	31
Figura 13 – Modelo de vida útil. ....	32
Figura 14 – Formas de ocorrência de íons cloro no concreto.....	34
Figura 15 – Representação esquemática da corrosão eletroquímica na presença de cloretos...	35
Figura 16 – Zonas de agressividade às estruturas de concreto. ....	37
Figura 17 – Relação entre velocidade do vento e concentração salina em diversos estudos. ..	42
Figura 18 – Modelo de deposição de cloretos. ....	43
Figura 19 – Comportamento da salinidade em relação à distância. ....	46
Figura 20 – Vela úmida. ....	48
Figura 21 – Disposição das velas úmidas.....	50
Figura 22 – Vista da guarita do Aquaville Resort para a praia, local onde foi colocada uma vela úmida a 76 metros do mar.....	51
Figura 23 – Vela úmida 1 a 76 metros do mar. ....	51
Figura 24 – Vela úmida 2 a 500 metros do mar. ....	52
Figura 25 – Vela úmida 3 a 650 metros do mar. ....	52

Figura 26 – Vela úmida 4 a 1000 metros do mar. ....	53
Figura 27 – Vela úmida (branco) 5 no LMCC (UFC).....	53
Figura 28 – Direção predominante do vento. ....	58
Figura 29 – Deposição de íons cloro (05 de agosto a 07 de setembro de 2013) .....	62
Figura 30 – Deposição de íons cloro (10 de setembro a 09 de outubro de 2013) .....	62
Figura 31 – Deposição de íons cloro (09 de outubro a 06 de novembro de 2013).....	63
Figura 32 – Deposição média de íons cloro .....	63
Figura 33 – Modelo linearizado de deposição média de íons cloro .....	64
Figura 34 – Comparação de deposição média de íons cloro em várias cidades brasileiras. ....	66

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental.....	14
Quadro 2 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e qualidade do concreto. .....	20
Quadro 3 – Requisito para o concreto, em condições especiais de exposição.....	20
Quadro 4 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm. ....	21
Quadro 5 – Resumo de concentração de cloreto no período estudado.....	57
Quadro 6 – Acompanhamento semanal de direção, velocidade média e rajada de vento.....	58
Quadro 7 – Acompanhamento semanal da umidade relativa.....	59
Quadro 8 – Acompanhamento semanal de precipitação.....	60
Quadro 9 – Acompanhamento semanal da temperatura.....	61
Quadro 10 – Previsão de modelo linear de deposição de cloretos.....	65
Quadro 11 – Comparação de resultados com outras cidades brasileiras.....	66
Quadro 12 – Comparativo de agressividade.....	67
Quadro 13 – Determinação do teor de íons cloro (05/agosto a 07/setembro de 2013).....	76
Quadro 14 – Determinação do teor de íons cloro (10/setembro a 09/outubro de 2013).....	76
Quadro 15 – Determinação do teor de íons cloro (09/outubro a 06/novembro de 2013).....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correspondência entre a localização da estrutura e o tipo de deterioração (MEHTA; MANMOHAN, 1980; CEB, 1992; BARBUDO, 1992; HELENE, 1993; MEHTA E MONTEIRO, 1994; GUIMARÃES, 2000).....	38
Tabela 2 – Composição da água do mar (FORSCHHAMMER, s.d., <i>apud</i> BICZÓK, 1972) ..	39
Tabela 3 – Localização geodésica das velas úmidas .....	50

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Importância e justificativa do tema .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>16</b>
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivos Gerais.....</i>	<i>16</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>16</i>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do texto .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Qualidade do concreto .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Corrosão em armaduras de concreto armado .....</b>	<b>21</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Definição e tipos de corrosão.....</i>	<i>21</i>
<i>2.2.1.1</i>	<i>Corrosão generalizada.....</i>	<i>23</i>
<i>2.2.1.2</i>	<i>Corrosão em placas.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.1.3</i>	<i>Corrosão por pites ou puntiforme .....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.1.4</i>	<i>Corrosão sob tensão fraturante .....</i>	<i>25</i>
<i>2.2.1.5</i>	<i>Corrosão grafítica .....</i>	<i>26</i>
<i>2.2.1.6</i>	<i>Corrosão por erosão .....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.1.7</i>	<i>Corrosão devido à fragilização por hidrogênio .....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Corrosão eletroquímica do concreto armado .....</i>	<i>28</i>
<b>2.3</b>	<b>Íons cloro .....</b>	<b>33</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Definições e ocorrência.....</i>	<i>33</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Mecanismos de transporte de cloreto.....</i>	<i>35</i>
<b>2.4</b>	<b>Ambiente marinho.....</b>	<b>36</b>
<i>2.4.1</i>	<i>Zona de atmosfera marinha.....</i>	<i>36</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Agentes de degradação do ambiente marinho.....</i>	<i>38</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Aerosol marinho.....</i>	<i>40</i>
<i>2.4.3.1</i>	<i>Vento.....</i>	<i>41</i>
<i>2.4.3.2</i>	<i>Umidade .....</i>	<i>44</i>
<i>2.4.3.3</i>	<i>Temperatura .....</i>	<i>44</i>
<i>2.4.3.4</i>	<i>Altitude .....</i>	<i>45</i>
<i>2.4.3.5</i>	<i>Distância em relação ao mar .....</i>	<i>45</i>
<b>2.5</b>	<b>Determinação do teor de íons cloro no ar atmosférico .....</b>	<b>47</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>49</b>

3.1	Localização de velas .....	49
3.2	Preparação de velas úmidas .....	54
3.3	Amostragem .....	54
3.4	Determinação do teor de íons cloro .....	55
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>57</b>
4.1	Comportamento climatológico .....	57
4.1.1	<i>Vento</i> .....	57
4.1.2	<i>Umidade relativa</i> .....	59
4.1.3	<i>Precipitação</i> .....	59
4.1.4	<i>Temperatura</i> .....	60
4.2	Deposição de cloretos .....	61
4.2.1	<i>Influência da distância em relação ao mar em relação à deposição de cloretos</i> ....	61
4.2.2	<i>Comparação com outros estudos</i> .....	65
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>68</b>
5.1	Conclusões .....	68
5.2	Sugestões.....	68
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>70</b>
	<b>ANEXO A – SOLUÇÕES PARA MONTAGEM DA VELA ÚMIDA E PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÍONS CLORO SEGUNDO NBR 6211 (ABNT, 2001)</b> .....	<b>74</b>
	<b>ANEXO B – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÍONS CLORO SEGUNDO A NBR 6211 (ABNT, 2001)</b> .....	<b>75</b>
	<b>ANEXO C – RESULTADOS MENSIS DE TEOR DE CLORETOS (MÉTODO DA VELA ÚMIDA)</b> .....	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Importância e justificativa do tema

Souza e Ripper (1998) avaliam que a maioria das normas técnicas existentes até 1998, seja do Brasil ou do exterior, que versavam a respeito de projeto e execução de estruturas de concreto armado foi concebida com a preocupação de garantir a resistência mecânica para as diversas peças estruturais frente aos esforços solicitantes, não levando em conta questões de durabilidade.

Todavia, os autores supracitados ressaltam que houve a necessidade, ao final de 1960 e início de 1970, de pesquisas de outros critérios além de esforços solicitantes e capacidade resistente das estruturas para garantir o sucesso da estrutura, em razão de diversos casos de variações de desempenho estruturais, fracassos no comprimento de função da estrutura, reabilitações e reforços estruturais. Com isso, introduziu-se o conceito de durabilidade.

Em estudos realizados no Brasil, Pontes (2006), citando trabalhos de Carmona e Marega (1988) e de Nince e Clímaco (1996), resalta que em São Paulo e Brasília, detectou-se que 30% dos problemas com edifícios estão relacionados à corrosão. Já em Vitória, por exemplo, estudos realizados em edificações na praia do Canto, os problemas relacionado à corrosão equivalem a 23% das patologias estruturais das edificações (GRIJÓ; NOGUEIRA; REGIANI, 2007 *apud* BORBA JUNIOR, 2011). Dal Molin (1988, *apud* PONTES, 2006) observou em seus estudos, na região Sul, que esse valor chegou a 40%. Na região Norte, Aranha (1994) observou 46%. Em Recife, Andrade (1997, *apud* PONTES, 2006) chegou à elevada marca de 64%.

Tendo em vista essa situação, a NBR 6118 (ABNT, 2007) e a NBR 12655 (ABNT, 2006), normas que norteiam o projeto de estruturas de concreto armado e protendido e a dosagem e controle do concreto, respectivamente, ressaltam diversos parâmetros que devem ser observados pelos projetistas e construtores. Tais parâmetros são fundamentais para a segurança quanto ao estado limite último, a correta funcionalidade quanto ao estado limite de serviço durante o período de utilização da estrutura, assim como alguns limitadores quanto a agressividade ambiental, sendo esse fator primordial no tocante à definição de cobrimento nominal mínimo de armaduras, da máxima relação água/cimento e da classe mínima do concreto a ser utilizada no dimensionamento da estrutura.

A NBR 6118 (ABNT, 2007) divide a agressividade ambiental em quatro classes, variando de agressividade fraca até muito forte, classificadas de I a IV. O Quadro 1 apresentado a seguir, extraído dessa norma, mostra os tipos de ambiente e as devidas classificações a serem feitas para fins de projeto de estruturas de concreto armado ou protendido.

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 classe de agressividade um nível mais branda 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 protegida da 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, 2007).

Muito embora essa norma estabeleça classes de agressividade ambiental para o projeto de estrutura, pode-se observar a subjetividade da escolha dessa classe. Em suma, essa opção fica a cargo do projetista e do construtor, não havendo, portanto, atualmente, um método normalizado mais objetivo de classificação dessa agressividade. Conseqüentemente, a eficiência de durabilidade de estrutura pode vir a ser prejudicada, uma vez que o projetista ou o construtor pode enquadrar o ambiente em que um determinado projeto virá a ser executado em uma agressividade de classificação abaixo do que deveria. A título de exemplificação, o ambiente industrial pode ser classificado tanto como agressividade III quanto agressividade IV.



Outros fatores fundamentais na avaliação da dimensão do problema de corrosão são os custos diretos envolvidos na manutenção ou recuperação de estruturas deterioradas. Para Borba Junior (2011):

Esses custos nem sempre são contabilizados no orçamento da obra e aumentam exponencialmente com o tempo. Sitter (1983 *apud* ANDRADE, 2005a) diz que o custo de uma falha de construção aumenta em cinco vezes com o tempo de intervenção – a chamada Lei dos Cinco. Esse autor diz que a cada unidade monetária gasta na fase de projeto e execução (\$ 1,00) equivale a \$5,00 gastos na fase de manutenção, \$ 25,00 com pequenos reparos e um custo de \$125,00 para renovação ou recuperação. Portanto, quanto menor for o tempo de intervenção, menor também será o seu custo.

Para Meira e Padaratz (2002), os custos de manutenção das estruturas são bastante significativos, podendo chegar a ultrapassar o patamar de 40% em relação ao custo de execução de uma obra. As perdas com reabilitações de obras deterioradas, apenas através do fenômeno da corrosão de armaduras, giram em torno de 1,25% a 3,50% do PIB de países em desenvolvimento.

Inúmeros estudos de agressividade ambiental já foram realizados no Brasil e no mundo. Porém, não há avaliações dessa espécie na praia do Porto das Dunas, localizada em Aquiraz. De acordo com dados do IBGE, esse distrito evidenciou um crescimento populacional de 26,31% entre 1991 e 2000. O Porto das Dunas se apresenta como área de grande ocupação com elevada quantidade de segundas residências que motivam a flutuabilidade populacional na área. A maioria dos proprietários de imóveis reside em Fortaleza e somente se dirigem à área nas férias, fins de semanas e feriados, caracterizando o elevado potencial econômico e produtivo no setor turístico (ANDRADE, 2008).

Portanto, com base no exposto, verifica-se a relevância do tema no que concerne ao ciclo produtivo da construção civil, estendendo-se desde a fase de concepção até a fase de utilização da estrutura, além da grande importância do conceito de durabilidade das estruturas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 *Objetivos Gerais***

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o teor de íons cloro da praia do Porto das Dunas, por meio do método da vela úmida estabelecido pela NBR 6211 (ABNT, 2001), observando a variação desses teores com a distância do mar.

### **1.2.2 *Objetivos Específicos***

- a) Caracterizar climatologicamente a região em análise durante os meses de implantação da vela úmida;
- b) Comparar as concentrações de íons cloro obtidos com o método da vela úmida com temperatura, direção e velocidade do vento e umidade;
- c) Verificar a correlação entre concentração de íons cloro no ar atmosférico e a distância do mar;
- d) Fazer uma análise comparativa dos dados obtidos com estudos anteriores realizados em outras cidades brasileiras.

## **1.3 Estrutura do texto**

O texto deste trabalho está dividido em 5 capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, contendo uma explanação inicial da temática abordada, assim como justificativa e objetivos gerais e específicos traçados.

O Capítulo 2 corresponde ao referencial teórica para embasamento do estudo. Abordam-se nesse capítulo os conceitos que norteiam a qualidade do concreto, assim como as prescrições das normas NBR 6118 (ABNT, 2007) no tocante aos parâmetros a serem observados para a qualidade necessária do concreto. Define-se corrosão em um contexto geral e no caso do concreto armado, abordando os fatores que acarretam esse processo, assim como suas consequências. Caracteriza-se o agente agressivo íon cloro, mostrando as formas de ocorrências, os mecanismos de transporte dos íons cloro e de ataque do concreto. Aborda-se também o ambiente marinho no tocante à agressividade, agentes agressivos, fatores que influenciam os transportes dos agentes. Por fim, descreve-se a método da vela úmida para

determinação do teor de íons cloro na atmosfera, conforme NBR 6211 (ABNT, 2001), além de ressaltar os estudos já realizados no Brasil a respeito de agressividade em cidades litorâneas.

No Capítulo 3 estabelece-se a metodologia empregada para a realização do estudo. São discutidos os procedimentos necessários para a obtenção do teor de íons cloro, abordando a localização e montagem das velas úmidas, as premissas estabelecidas pela norma NBR 6211 (ABNT, 2001) em termos do local de obtenção dos dados e da análise laboratorial.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados encontrados no ensaio, observando as influências do clima, da distância em relação ao mar, além da comparação com outros estudos realizados no Brasil.

Por fim, no capítulo 5, faz-se uma conclusão do estudo destacando os pontos mais relevantes em termos de resultados encontrados e nas implicações desses para a avaliação de durabilidade do concreto armado tanto das estruturas vigentes como para outras que virão a ser projetadas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Qualidade do concreto

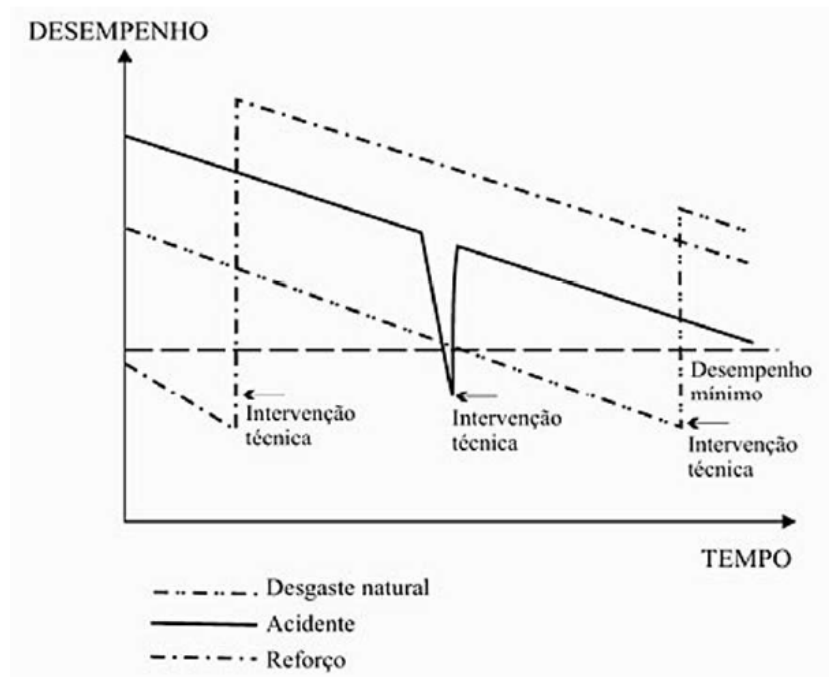
O concreto é um material extensivamente utilizado nas construções que contenham estruturas reticuladas ou em fundações diretas ou indiretas. Portanto, o melhor entendimento desse material e de suas propriedades físicas e químicas, além do seu comportamento em ambientes agressivos possuem fundamental importância para projeto e execução de estruturas mais duráveis.

Esse material começou a ser utilizado por volta de 1850, mas, nessa época, não havia preocupação com a sua durabilidade, existindo certa predisposição a considerá-lo como um material com vida útil praticamente infinita. Todavia, recentemente, a durabilidade do concreto passou a ser considerada como um assunto importante, para os engenheiros e para toda a sociedade (MEDEIROS *et al.*, 2013).

Durabilidade é, segundo Silva Filho (1994), a capacidade de um produto satisfazer, durante um período de tempo previsto em concepção, as exigências a ele impostas, sejam estas de origem técnica ou subjetiva, quando exposto a um ambiente previamente determinado. Por vida útil de um material entende-se o período de tempo durante o qual as suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos especificados sem que haja a necessidade de intervenção ou reparos (SOUZA e RIPPER, 1998). A NBR 6118 (ABNT, 2007) define vida útil de uma maneira mais ampla, ou seja, é um período de tempo durante o qual a estrutura mantém as características originais, desde que sejam atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de eventuais danos acidentais.

Os tempos modernos ditaram a certeza de que o concreto, como material de construção, é instável ao longo do tempo, alterando suas propriedades físicas e químicas em função das características de seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente (SOUZA e RIPPER, 1998). Seja qual for a estrutura, mesmo com etapas de concepção, projeto, execução e manutenção bem executadas, com o passar do tempo ela irá apresentar deterioração. Muitas vezes, mesmo estruturas jovens apresentam falhas que diminuem a sua vida útil, comprometendo a sua utilização. Esse fenômeno está ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Diferentes desempenhos de uma estrutura com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos



Fonte: Souza e Ripper (1998)

Inseridos nesse contexto, a NBR 6118 (ABNT, 2007) além de estabelecer parâmetros de resistências mecânica dos materiais aos esforços solicitantes que as estruturas virão a ter, mostra o moderno conceito de durabilidade através de comportamento das construções em função de agressividade do ambiente em que elas estão inseridas, conforme o Quadro 1 mostrado no item 1.1.

A norma supracitada mostra, em termos de projeto estrutural e de construção, a correlação entre agressividade ambiental e a máxima relação água/cimento, a classe mínima do concreto, para fins de minimização da porosidade, além do cobrimento nominal da armadura, para fins de proteção física e química da armadura.

Souza e Ripper (1998) ressaltam que quanto mais permissivo um concreto for ao transporte interno de água, gases e de outros agentes agressivos, maior será a probabilidade de sua degradação, bem como a do aço nele imerso. Os mesmos concluem que a degradação dependerá diretamente da porosidade do concreto e das condições ambientais da superfície.

O Quadro 2, apresentado a seguir, extraído da NBR 6118 (ABNT, 2007), mostra a relação das classe de agressividade com a relação água/cimento e a classe de concreto.

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

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS:

- 1) O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655.
- 2) CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
- 3) CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2007)

O Quadro 3 revelado a seguir, retirado da NBR 12655 (ABNT, 2006), mostra o requisito para o concreto em condições especiais de exposição em termos de relação água/cimento e valor mínimo de resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ).

Quadro 3 – Requisito para o concreto, em condições especiais de exposição.

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	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	0,40	45

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2006)

Já o Quadro 4 mostrado a seguir, extraído da NBR 6118 (ABNT, 2007), revela a correlação entre a agressividade ambiental e o cobrimento nominal mínimo de armaduras.

Quadro 4 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para  $\Delta c = 10$  mm.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV <sup>3)</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>2)</sup>	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido <sup>1)</sup>	Todos	30	35	45	55

<sup>1)</sup> Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve as bainhas ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

<sup>2)</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 tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências dessa tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5 da NBR 6118 (ABNT, 2007) respeitando o cobrimento nominal  $\geq 15$ mm.

<sup>3)</sup> Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$ mm.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2007).

Como se pode observar nos Quadros 2, 3 e 4, quanto mais agressivo for o ambiente em que a estrutura está inserida, maiores serão as exigências em relação a essa estrutura, tornando a análise e classificação do ambiente em que a construção se insere importante em termos de projeto e de execução.

## 2.2 Corrosão em armaduras de concreto armado

### 2.2.1 Definição e tipos de corrosão

A corrosão é definida, segundo Cascudo (1997) e Gentil (2003), como a interação destrutiva ou a interação que implique inutilização para uso, de um material com o ambiente, seja por reação química, ou por eletroquímica. Gentil (2003) ressalta a associação ou não de esforços mecânicos no processo corrosivo. Para Ramanathan (1988), na corrosão o metal é convertido a um estado não metálico, perdendo assim suas qualidades essenciais, como resistência mecânica, elasticidade e ductilidade.

Gentil (2003) ressalta ainda que em alguns casos, pode-se admitir a corrosão como o inverso do processo metalúrgico, cujo objetivo principal é a extração do metal a partir de seus minérios ou de outros compostos, ao passo que a corrosão tende a oxidar o metal. Assim, muitas vezes o produto da corrosão de um metal é bem semelhante ao minério do qual foi originalmente extraído.

Este último autor mostra ainda que quando o fenômeno de corrosão é eminente, isto é, no início do processo, apenas a composição da atmosfera é significativa para avaliar a velocidade de corrosão. Porém, à medida que o processo se desenrola e se forma a ferrugem, o material passa então a se corroer seguindo uma velocidade que vai depender da composição do material metálico.

A corrosão química também é conhecida por corrosão seca, e, segundo Ramanathan (1988), se dá por uma reação gás-metal, com formação de uma película de óxido. É um processo que não provoca a deterioração substancial das superfícies metálicas, exceto quando se tratar de gases extremamente agressivos (HELENE, 1986).

A corrosão eletroquímica ou aquosa é a que efetivamente traz problemas às obras civis (RAMANATHAN, 1988). Trata-se de um ataque de natureza eletroquímica, que ocorre em meio aquoso, como resultado da formação de uma pilha ou célula de corrosão, com eletrólito e diferença de potencial entre trechos da superfície do aço. O eletrólito forma-se a partir da presença de umidade no concreto. Esse tipo de corrosão suscita um movimento de elétrons ao longo de trechos da armadura e um movimento iônico através do eletrólito (CASCUDO, 1997).

As pilhas eletroquímicas, segundo Cascudo (1997), apresentam os seguintes componentes:

- **Ânodo:** eletrodo no qual se verificam as reações anódicas de oxidação do metal. Estas reações consistem em o átomo metálico deixar o metal para formar íons desse metal no eletrólito. No ânodo há uma perda de elétrons, ou seja, os elétrons oriundos das reações anódicas (reações de oxidação ou também chamadas reações de dissolução do metal), movem-se para o cátodo, onde serão consumidos em outra reação superficial;
- **Cátodo:** eletrodo no qual se verificam as reações catódicas de redução de espécies eletroquímicas ou íons do eletrólito. No cátodo há um ganho de elétrons originários de regiões anódicas, necessário para viabilizar as reações



de redução de cátions em suas proximidades. Ocorre, portanto, a conhecida deposição catódica;

- Eletrólito: condutor (usualmente um líquido) contendo íons que transportam a corrente elétrica do ânodo para o cátodo;
- Circuito metálico (condutor elétrico): ligação metálica entre o ânodo e o cátodo, por onde escoam os elétrons no sentido ânodo-cátodo.

Em termos de morfologia têm-se diversas classificações, tais como corrosão generalizada, em placas, puntiforme ou por pites, sob tensão, gráfitica, por erosão, devido à fragilização por hidrogênio, entre outras. Serão abordados nesse estudo apenas as já citadas, podendo as outras serem vistas em vários estudos contidos na literatura.

#### *2.2.1.1 Corrosão generalizada*

A corrosão generalizada é caracterizada, segundo Cascudo (1997), pela ocorrência em toda a superfície do metal, podendo ser uniforme, com a superfície tendendo a ser lisa e regular, ou não uniforme, apresentando superfície rugosa e irregular. Essa corrosão está ilustrada na Figura 2. Um exemplo clássico dessa corrosão em concreto armado é a ocasionada pelo processo de carbonatação.

Figura 2 – Corrosão generalizada em chapa de aço-carbono.

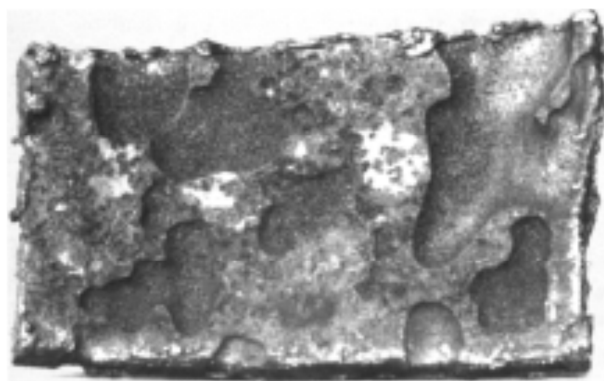


Fonte: Gentil (2003).

### 2.2.1.2 Corrosão em placas

A corrosão em placas é definida por Gentil (2003), como a que apresenta formação de placas com escavações em algumas regiões da peça metálica, não em toda sua extensão. Isso pode ser melhor observado na Figura 3.

Figura 3 – Corrosão em placas em chapa de aço carbono de costado de tanque.



Fonte: Ferreira *et al.* (2002)

### 2.2.1.3 Corrosão por pites ou puntiforme

A corrosão puntiforme é um tipo de corrosão localizada, no qual há desgastes definidos em pontos ou em pequenas áreas da superfície metálica, formando cavidades que apresentam forma angulosa e profundidade geralmente maior que o seu diâmetro (GENTIL, 2003), as quais evoluem aprofundando-se, podendo causar a ruptura pontual da barra (FELLIU e ANDRADE, 1988 *apud* CASCUDO, 1997). Em geral, nos casos práticos da corrosão do aço-carbono no concreto não é registrada a ocorrência do pite clássico, como visto em outros meios e com outros metais. Na maioria dos casos, ao invés de pontos de pequeno diâmetro e pequena profundidade ocorrem depressões mais rasas e de maior diâmetro, assemelhando-se a crateras. Esse tipo de corrosão será tanto mais intensa e perigosa quanto maior for a relação área catódica/área anódica (CASCUDO, 1997). Esta corrosão está mostrada na Figura 4.

Figura 4 – Corrosão por pites em tubo de aço inoxidável AISI 304.



Fonte: Gentil (2003)

Em se tratando de corrosão em concreto armado, um exemplo clássico de corrosão puntiforme é a ocasionada por cloretos.

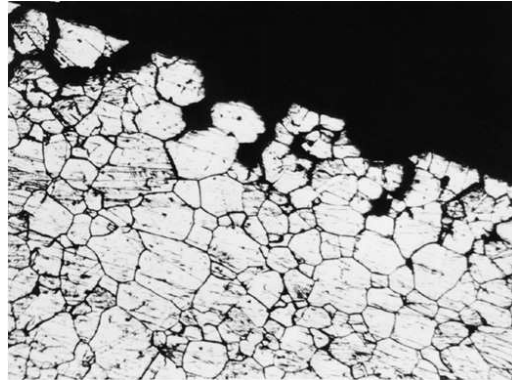
#### 2.2.1.4 Corrosão sob tensão fraturante

Corrosão sob tensão fraturante, se dá concomitantemente com uma tensão de tração na armadura, podendo dar origem à propagação de fissuras (fenômeno de natureza transgranular ou intergranular, ilustrados na Figura 5 e 6, respectivamente) na estrutura do aço (CASCUDO, 1997). A corrosão transgranular se processa nos grãos da rede cristalina do metal enquanto que a corrosão intergranular se estabelece entre os grãos da rede cristalina do metal. Em ambos os casos se perde as propriedades mecânicas do material metálico o qual pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos (GENTIL, 2003).

Esse tipo de corrosão geralmente em estruturas protendidas, todavia pode acontecer em estruturas de concreto armado, já que com pelo menos 10% do limite de resistência à tração do aço é possível a sua ocorrência. Em ambientes ricos em cloretos e com níveis de tensão muito elevados que sua velocidade de ocorrência é maior e a sua incidência passa a ser preocupante (CASCUDO, 1997).

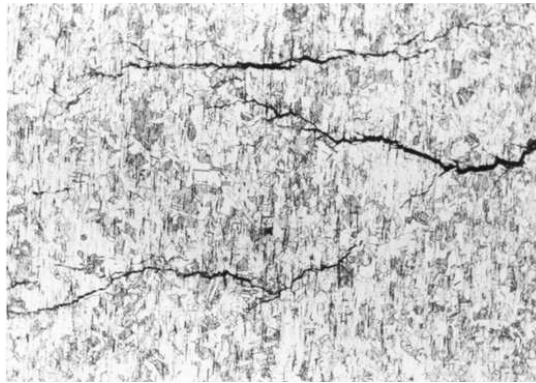
Felliu e Andrade (1988 *apud* Cascudo, 1997) ressaltam que os efeitos dessa corrosão são reconhecidamente perigosos nas estruturas de concreto armado ou protendido, caracterizando-se por rupturas bruscas, sem deformações significativas de elementos estruturais, e praticamente sem sintomas visuais de corrosão.

Figura 5 – Corrosão sob tensão intergranular ou intercristalina.



Fonte: Ferreira *et al.* (2002)

Figura 6 – Corrosão sob tensão transgranular ou transcristalina.



Fonte: Ferreira *et al.* (2002)

#### 2.2.1.5 Corrosão grafítica

A corrosão grafítica, conforme Figura 7, se processa no ferro fundido cinzento em temperatura ambiente. No caso, o ferro metálico é convertido em produtos de corrosão, restando a grafite intacta. Inicialmente em razão de uma heterogeneidade qualquer, o ferro é oxidado e a grafite permanece inalterada, formando-se a pilha. Observa-se que a área corroída fica com aspecto escuro, característico do grafite, e esta pode ser facilmente retirada com espátula (GENTIL, 2003).

Figura 7 – Corrosão gráfrica em componente de bomba centrífuga de ferro fundido: parte escura, área corroída, devido à grafite.



Fonte: Gentil (2003)

#### 2.2.1.6 Corrosão por erosão

A corrosão por erosão é uma corrosão localizada que se desenvolve em razão da erosão de películas protetoras do metal pela passagem de um fluido (PIRES, 2007). Essa corrosão está ilustrada na Figura 8.

Figura 8 – Aparência de um rotor de uma bomba submetido à erosão-corrosão.



Fonte: Corrosion Doctor (2007) *apud* López-Ochoa (2007)

#### 2.2.1.7 Corrosão devido à fragilização por hidrogênio

A corrosão devido à fragilização por hidrogênio, ilustrada na Figura 9, é, segundo Pires (2007), ocasionada pelo hidrogênio atômico que se difunde para o interior do metal e possibilita fragilização com consequente perda de ductilidade e fratura do metal.

Figura 9 – Tubo de aço carbono com empolamento por hidrogênio, ocasionado por H<sub>2</sub>S e água.



Fonte: Ferreira *et al.* (2002)

De acordo com Pires (2007) as corrosões que ocorrem no concreto armado ou protendido são corrosão generalizada, puntiforme, por tensão, por erosão e devido à fragilização por hidrogênio.

Conforme abordado anteriormente, o processo de corrosão é bastante complexo e deletério. No contexto de estruturas de concreto armado e protendido, a corrosão mais importante e prejudicial é a eletroquímica, sendo essa discutida com maior profundidade no próximo item.

### **2.2.2 Corrosão eletroquímica do concreto armado**

No contexto da engenharia civil, a corrosão da armadura se aplica na deterioração do aço imerso no concreto, provocando, com o tempo, perda de aderência aço-concreto e redução da seção transversal da armadura, podendo culminar em colapso da estrutura (CABRAL, 2000).

A corrosão das armaduras do concreto é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, em que o eletrólito apresenta características de resistividade elétrica consideravelmente mais altas do que as dos eletrólitos típicos (meio aquoso comum, não confinado a uma rede de poros, como é o caso do concreto) (CASCUDO, 1997).

Segundo Helene (1986), a corrosão acontece quando é formada uma película de eletrólito sobre a superfície dos fios ou barras de aço, sendo essa película causada pela presença de umidade no concreto, salvo situações especiais como dentro de estufas, sob elevadas temperaturas ou em ambientes em que a umidade relativa esteja abaixo de 50%.

Em termos de eletrólito, a água presente no concreto geralmente se apresenta em quantidade suficiente para atuar como eletrólito, principalmente, nas regiões expostas a intempéries. Além dela, produtos da hidratação do cimento, como a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), também se formam nos poros e capilares, sendo uma solução saturada que constitui um bom eletrólito (HELENE, 1986).

Já no que compete à diferença de potencial, segundo Helene (1986), na presença de agentes agressivos no interior do concreto, parte dos átomos de ferro tende a transformar-se em cátions de ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), com carga elétrica positiva, deixando a armadura com carga negativa, gerando, portanto, um potencial de equilíbrio. Esse fato adicionado à presença de reagentes capazes de sofrer redução, ou seja, capazes de combinar com o elétron liberado na reação de formação do íon ferroso, pode formar-se a pilha eletroquímica. O autor supracitado ressalta ainda que qualquer diferença de potencial que se produza entre dois pontos da barra, por diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão no concreto e no aço é capaz de desencadear pilhas ou cadeias de pilhas conectadas em série.

No tocante à existência de oxigênio, de acordo com Helene (1986), esse elemento é necessário na formação do óxido ferroso, popularmente conhecido como ferrugem, conforme a reação apresentada na Equação 1:



As reações são, na realidade, mais complexas e podem gerar uma gama de óxidos e hidróxidos de ferro conforme as seguintes etapas (CARMONA, 2005):

- Zonas anódicas: O ferro perde elétrons ocasionando a dissolução do metal conforme reação abaixo:



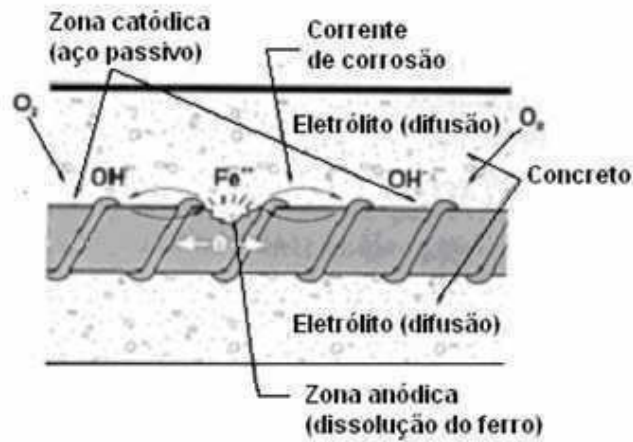
- Zonas catódicas: Em meios neutros e areados ocorre a reação abaixo:



Os óxidos e hidróxidos de ferro gerados nas reações de corrosão do aço possuem volume maior que o aço não oxidado, podendo ser de 3 a 10 vezes superiores ao volume inicial da armadura, podendo causar pressões superiores a 15 MPa (HELENE, 1986).

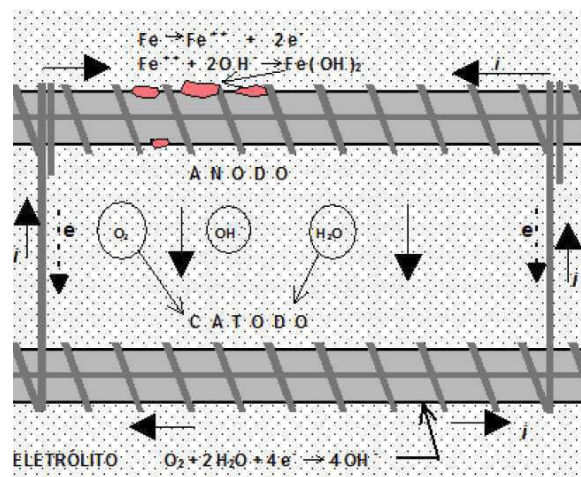
Essas reações caracterizam a pilha eletroquímica, podendo essa ocorrer tanto em uma armadura ou em conjunto de várias armaduras, conforme Figuras 10 e 11, respectivamente. Helene (1986) ressalta a condição típica de não continuidade perfeita do fenômeno em toda a extensão das armaduras onde, geralmente, há trechos pouco deteriorados alternados com trechos fortemente corroídos.

Figura 10 – Representação gráfica da pilha eletroquímica da corrosão em uma armadura no concreto.



Fonte: Santos (2006)

Figura 11 – Representação gráfica da pilha eletroquímica da corrosão em várias armaduras no concreto.



Fonte: Silva (2001)

A corrosão também pode ser acelerada por agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto. Dentre eles citam-se sulfetos, íons cloro, dióxido de carbono, nitritos, gás sulfídrico, cátion amônio, óxidos de enxofre, fuligem, entre outros (HELENE, 1986). Esses agentes, segundo o autor supracitado, não permitem a formação ou quebram a passivação do aço, culminando na corrosão.

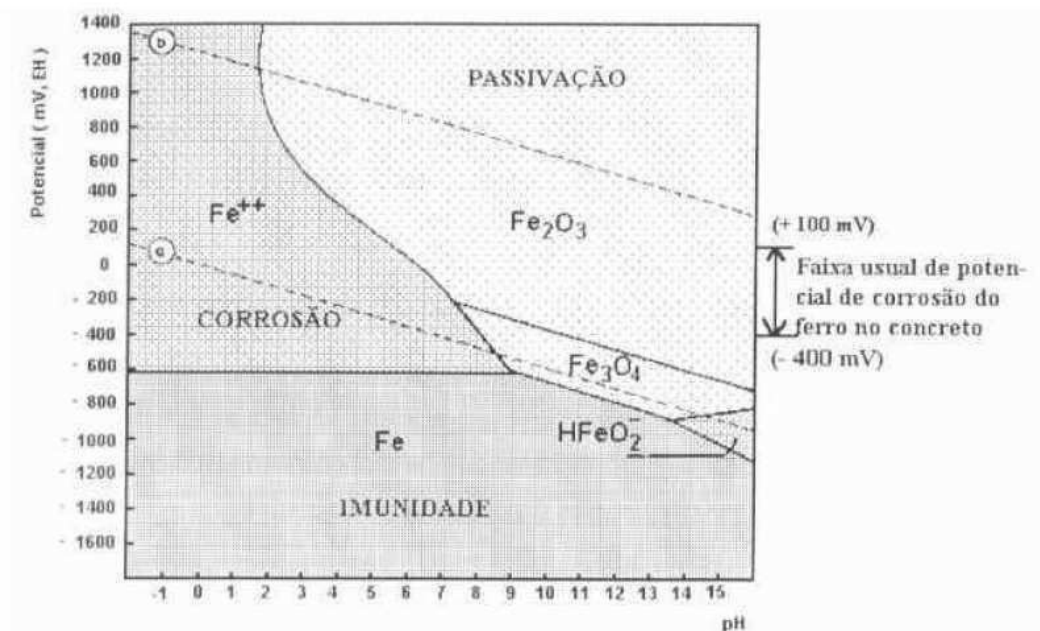
Miranda *et al.* (1990) *apud* Cascudo (1997) aborda em seu estudo que a armadura encontra-se no interior do concreto em meio altamente alcalino (pH em torno de 12,5), em razão da fase líquida constituinte dos poros do concreto, a qual, nas primeiras idades, basicamente é uma solução saturada de hidróxido de cálcio – Ca(OH)<sub>2</sub> (portlandita), sendo esta oriunda das reações de hidratação do cimento. Já em idades avançadas isso se deve a uma



solução composta principalmente por hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) originários dos álcalis do cimento.

Pourbaix (1961) *apud* Helene (1986) demonstrou, conforme o diagrama potencial versus pH do sistema ferro-água a 25°C, que para a ordem de grandeza do pH no concreto e para faixa usual de potencial de corrosão, variando de 100 mV a -400 mV, as reações de eletrodo verificadas no ferro são de passivação. Este tipo de diagrama exposto na Figura 12 indica as condições de potencial e pH em que um processo particular de reação corrosiva é termodinamicamente favorável (ROSENBERG *et al.*, 1989 *apud* CASCUDO, 1997).

Figura 12 - Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe-H<sub>2</sub>O a 25°C.



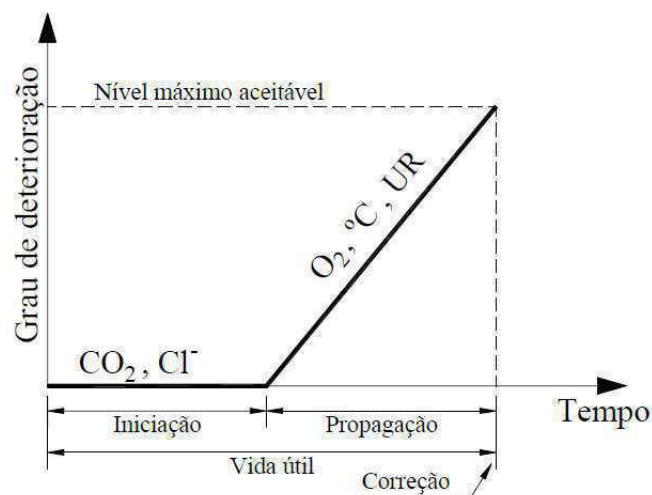
Fonte: Pourbaix (1974) ampliado por Cascudo (1997).

Com base no Diagrama de Pourbaix, podem-se distinguir três zonas: imunidade passivação e corrosão. Na zona de imunidade o concreto permanece estável em qualquer pH. Já na região de passivação, o metal se recobre de uma camada delgada de óxidos e hidróxidos, intitulada camada passivante, atuando como barreira para o início do processo corrosivo. Na zona de corrosão, o pH e o potencial do eletrólito dão condições para o processo de desestabilização da camada de passivação, processando-se a corrosão (CARMONA, 2005). Observa-se também que esse processo deletério somente pode iniciar-se, para a faixa usual de potencial de corrosão do concreto, quando o pH do concreto estiver abaixo de 9.

Cascudo (1997) afirma que enquanto a armadura estiver passivada, não haverá corrosão, posto que a película impede o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço, bem como dificulta a dissolução do ferro.

O modelo de corrosão proposto por Tuutti (1980), bastante difundido no estudo de corrosão, subdivide o processo de corrosão do aço no concreto em iniciação e propagação, conforme Figura 13. A iniciação corresponde ao período de tempo que vai desde a execução da estrutura até a ação de um teor mínimo médio de 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento em atravessar o concreto de cobrimento, alcançar a armadura e despассивá-la; enquanto que a propagação, por sua vez, consiste no desenvolvimento da corrosão até que se alcance um grau inaceitável do processo (CASCUDO, 1997).

Figura 13 – Modelo de vida útil.



Fonte: Tuutti (1980)

O processo de iniciação se dá, segundo Cascudo (1997), por ataque de íons cloro advindos do meio externo, da água de amassamento, de agregados contaminados, de aditivos aceleradores de pega e de endurecimento que contenham  $\text{CaCl}_2$ , da utilização de sais anticongelantes, salmouras industriais e de maresia ou névoa de ambiente marinho em quantidade suficiente para quebra da camada passivante. Esse processo também ocorre por despассивação de armaduras em razão da redução de alcalinidade do concreto ocasionada por carbonatação, seja por dióxido de carbono, dióxido de enxofre ou por ácido sulfídrico ou por lixiviação do concreto em que a solução alcalina intersticial é lavada pelo ataque de águas.

No período de propagação, segundo Cabral (2000), os agentes de degradação atuam de maneira efetiva, degenerando a estrutura no aspecto estrutural e visual. Com o grau

de corrosão crescente, iniciado cumulativamente pela presença de gás carbônico e cloreto, tem-se com o tempo uma propagação da patologia no elemento estrutural que é acelerada pela presença de oxigênio, temperatura e umidade relativa até levar a estrutura ao colapso, comprovando a ação do meio ambiente no qual a estrutura está exposta (ALVES, 2007).

A corrosão se processa, somente quando há eletrólito, diferença de potencial, oxigênio e agentes agressivos (ANDRADE, 1992). Os derivados desse processo são óxidos e hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos denominados ferrugem (HELENE, 1986).

## **2.3 Íons cloro**

### ***2.3.1 Definições e ocorrência***

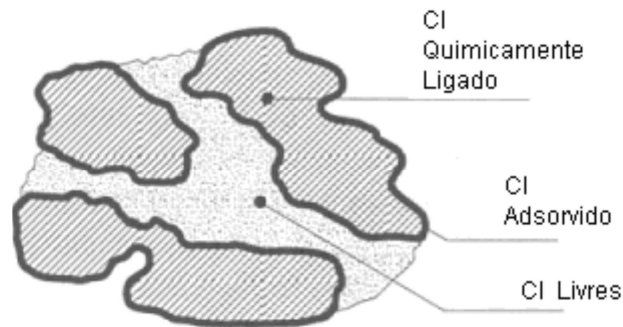
Os íons cloro são, segundo Helene (1986), os maiores causadores de corrosão de armaduras, provocando as mais sérias manifestações patológicas que uma estrutura pode apresentar.

A presença de íons cloro no concreto pode acontecer no momento da produção do mesmo ou por penetração depois da peça estar endurecida. Para o primeiro caso, a incorporação desses íons ocorre em razão de uso de agregados contaminados, aditivos aceleradores de pega, redutores de água ou plastificantes contendo cloretos e de água contaminada. Já no segundo caso, os cloretos são oriundos de água do mar, atmosferas marinhas, névoa salina, lavagem de pisos e fachadas com ácido muriático, utilização de sais de degelo, entre outras fontes (CABRAL, 2000).

Dentro do concreto, segundo Tutti (1980) e Cascudo (1997), os cloretos podem ser encontrados sob três formas que são também ilustradas na figura 14:

- Quimicamente ligados com as fases alumino-ferríticas formando cloroaluminatos;
- Fisicamente adsorvidos nas paredes dos poros através do C-S-H;
- Livres.

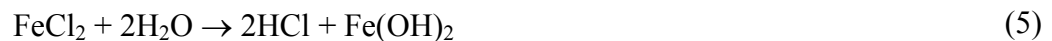
Figura 14 – Formas de ocorrência de íons cloro no concreto.



Fonte: Cascudo (1997)

Varela (2010) ressalta que os cloros livres são os mais perigosos e agressivos às armaduras presentes nas estruturas, porém os cloros combinados podem vir a se tornar livres em razão da carbonatação e de elevação da temperatura, ficando disponíveis para as reações deletérias de corrosão.

Segundo Alves (2007), os íons cloro penetram na camada de revestimento, dependendo da porosidade do concreto, até atingir a armadura, formando o ânodo, iniciando o processo de corrosão, segundo as reações 4 e 5 a seguir:

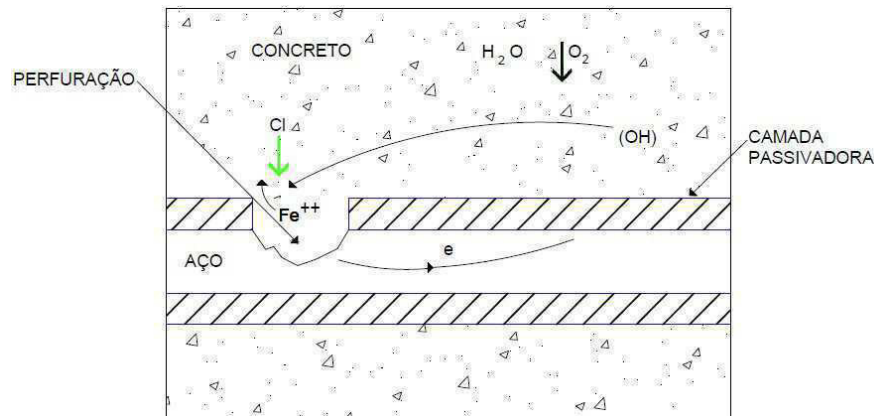


O autor ressalta também que a eletrólise, dada pela ação da água e do íon cloro, ataca a armadura, majoritariamente de maneira cumulativa, pela presença do cloreto oriundo de diversas fontes. Observa-se também que o ânion cloreto não é consumido, podendo este atacar outro cátion de ferro. Com isso, esses íons podem ser responsáveis por corrosões mais significativas nas estruturas.

De acordo com Alves (2007), a ação dos cloretos além de despassivar a armadura, aumenta significativamente a condutividade elétrica, acelerando o processo de corrosão. Com isso esse íon participa ativamente das reações para a formação dos produtos de corrosão, sendo altamente danoso ao concreto armado.

De acordo com Andrade (1992) e conforme ilustrado na Figura 15, os cloretos agridem o aço do concreto armado, atacando a capa passivante pontualmente, caracterizando uma corrosão por pites, podendo essa corrosão avançar e ocasionar ruptura pontual da barra de aço.

Figura 15 – Representação esquemática da corrosão eletroquímica na presença de cloretos.



Fonte: Neville (1997) *apud* Alves (2007)

Esse processo corrosivo e o teor de cloreto necessário para desencadear o processo de corrosão são abordados por Metha e Monteiro (2008):

A corrosão localizada por pites em estruturas de concreto é causada principalmente por cloretos. Na presença destes íons, dependendo da relação  $Cl^-/OH^-$ , relata-se que o filme protetor pode ser destruído pontualmente mesmo para valores de pH consideravelmente acima de 11,5. Quando as relações molares  $Cl^-/OH^-$  são maiores que 0,6, o aço parece não estar mais protegido contra a corrosão, provavelmente porque o filme de óxido de ferro torna-se permeável ou instável sob estas condições. Para dosagens típicas de concreto utilizadas normalmente na prática, o limite de teor de cloreto para iniciar a corrosão é dito estar na faixa de 0,6 kg a 0,9 kg de  $Cl^-$  por metro cúbico de concreto.

### 2.3.2 Mecanismos de transporte de cloreto

Cascudo (1997) dividiu e definiu o mecanismo de penetração de íons cloro no concreto em: absorção, difusão iônica, permeabilidade e migração iônica.

Transporte de cloretos por absorção é o processo migração de soluções salinas externas através dos poros do concreto. A penetração depende da porosidade da superfície, viscosidade da solução e tensão superficial.

Difusão iônica ocorre devido à diferença entre concentrações de cloreto na face externa do concreto (maior) e dentro dos poros (menor). Essa diferença promove o movimento dos íons para dentro do concreto em busca do equilíbrio.

Permeabilidade é o processo caracterizado pelo transporte de cloretos externos para a massa de concreto por meio de pressão hidráulica, ou seja, acontece em situações em que a estrutura está submersa, em contato com as ondas, semienterradas com a presença de lençol freático ou em contenção de solos.

Migração iônica é a movimentação dos íons cloro para o interior do concreto por meio da corrente elétrica do processo eletroquímico, uma vez que os íons possuem carga elétrica negativa.

Em suma, observa-se a complexidade de avaliação da corrosão por íons cloro, devendo essa ser estudada e observada com cautela e minúcia, considerando todo o meio em que a estrutura está envolvida e os materiais constitutivos da mesma.

## **2.4 Ambiente marinho**

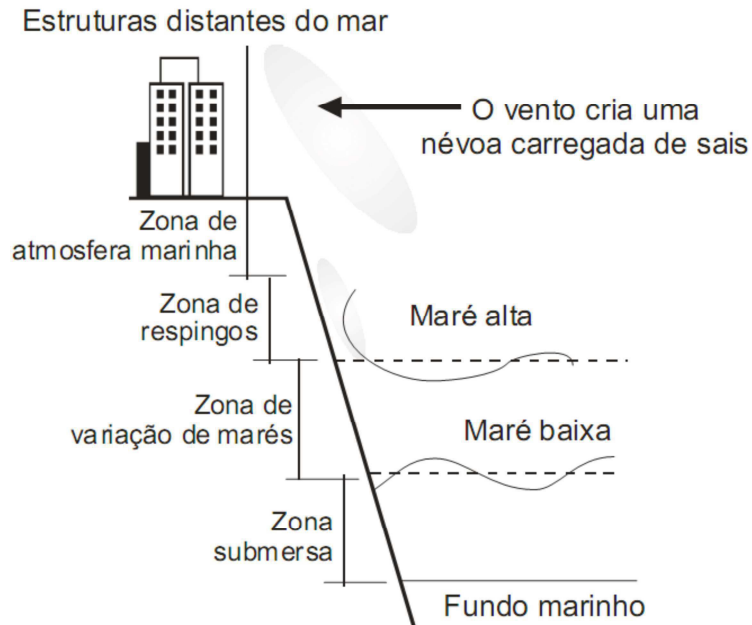
### **2.4.1 Zona de atmosfera marinha**

Em zona de atmosfera marinha são encontrados vários fatores que atuam de forma deletéria nas estruturas de concreto, sejam físicos, químicos ou biológicos, podendo estes atuar isolada ou simultaneamente (RIBEIRO *et al.*, 1999).

A deterioração do concreto em ambientes marinhos pode acontecer, principalmente, pela combinação da ação química dos constituintes da água do mar sobre os produtos de hidratação de cimento, da expansão álcali-agregado, das condições de molhagem e secagem, da corrosão da armadura e da erosão física pela ação das ondas ou dos ventos que carregam a névoa salina consigo. Para concretos sem armadura, os constituintes da água do mar mais danosos são o sulfato e o magnésio (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Diversos estudiosos segmentam o ambiente marinho em zonas de agressividade, visando ao melhor entendimento da penetração de íons cloro em estruturas de concreto expostas a esses locais, assim como as deteriorações que essas podem sofrer. Duracrete (1999), dividiu-o em 4 zonas: zona submersa, de variação de marés, de respingos e de atmosfera marinha. A Figura 16 ilustra essa segmentação.

Figura 16 – Zonas de agressividade às estruturas de concreto.



Fonte: Duracrete (1999)

Mehta; Manmohan (1980); CEB (1992); Barbudo (1992); Helene (1993); Mehta e Monteiro (1994); Guimarães (2000), citados por Romano (2009), fazem correspondência entre a localização da estrutura de concreto e o tipo de deterioração pela exposição em uma área salina, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Correspondência entre a localização da estrutura e o tipo de deterioração (MEHTA; MANMOHAN, 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 em contato com a água do mar, porém é atingido pela névoa salina que vem do oceano. O nível de cloretos pode cair a 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 no 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 à 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 cobrimento do 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 de variação de marés	O concreto está submetido à ação dos ciclos de molhagem e 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)

#### 2.4.2 Agentes de degradação do ambiente marinho

No ambiente marinho são encontrados vários agentes que atuam negativamente sobre as estruturas de concreto, reduzindo seu desempenho, e que podem ser agrupados em agentes químicos, agentes físicos e agentes biológicos (LIMA *et al.*, 2006).

Em termos de elementos químicos, a água do mar apresenta composição química uniforme, caracterizada pela presença de 3,5% (35 g/L) de sais em massa dissolvidos



(ODRIOZOLA e GUTIÉRREZ, 2007 *apud* ROMANO, 2009). Pontes (2006), citando Forschhammer (s.d. *apud* BICZÓK, 1972), apresenta a composição da água do mar em relação aos sais, a qual está apresentada na tabela 2.

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>34,2</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Pontes (2006)

A agressividade química ocorre em dois processos: presença de sais agressivos na estrutura impulsionando reações químicas com os componentes do cimento e a corrosão de armaduras em razão da presença de íons cloro no ar atmosférico e de fatores, como umidade relativa do ar (LIMA *et al.*, 2006).

No tocante aos aspectos físicos, os fatores preponderantes para a degradação de estruturas de concreto são ventos e ondas. Segundo Lima Neto (2011), quando os ventos começam a atuar na superfície oceânica, ocorre colisão entre as moléculas de ar e água, iniciando-se um processo de transferência de energia. Assim, surgem pequenas deformações, gerando rugosidades na superfície do mar. À medida que as deformações aumentam com a continuidade da atuação do vento, elas se transformam em pequenas ondas que se propagam e crescem ao passo que se aproximam da praia.

Lima *et al.* (2006) ressalta que o vento também degrada as estruturas devido ao fato de ser agente de transporte do aerossol marinho e de catalisar os ciclos de molhagem e secagem das estruturas, favorecendo a precipitação ou formação de sais.

As ondas, segundo Morelli e Lima (2004), que chegam à zona de praia e se encontram com as estruturas de concreto são as grandes causadoras de deterioração superficial devido ao impacto contínuo da água do mar no concreto ou aos respingos e névoa marinha.

Como efeito da ação das marés, uma estrutura exposta passa por ciclos de molhagem/secagem, calor/frio, o que acelera os processos de degradação envolvidos. As marés variam entre 0,5 m, em algumas localidades, até 15 m em outras. A variação das marés no oceano é geralmente pequena, quase sempre menor do que 1m; no entanto, próximo à costa, essa variação pode chegar a mais de 5 m. A variação das marés afeta, além da estrutura exposta ao ar livre a qual pode receber a água do mar diretamente ou apenas por respingos ou névoa, também as partes das estruturas que estão sujeitas às variações do nível do lençol freático (LIMA *et al.*, 2006).

No que tange aos aspectos biológicos, segundo o mesmo autor, os principais organismos agressores às estruturas de concreto são os organismos encrustadores que se fixam nas estruturas e que causam danos diretamente desgastando parte da estrutura, ou de forma indireta, na produção de resíduos metabólicos, enzimas e ácidos.

### **2.4.3 *Aerosol marinho***

Warneck (1988) define aerosol como o conjunto de ar e partículas carregadas pelo mesmo, sob forma coloidal. Sendo assim, podem-se ter diversos tipos de aerosol, conforme características do local de exposição e das partículas em suspensão, sejam rural, urbano, marinho ou ático.

O aerosol marinho, em termos de sua origem e ocorrência, é abordado por Romano (2009):

O aerosol marinho tem origem na agitação da superfície do mar ocasionada pelo vento. Esse efeito gera bolhas de ar que logo explodem, produzindo gotículas em forma de jorro, película ou espuma. As ondas, na zona onde quebram, são responsáveis pela geração de um maior volume de aerosol, com a formação de bolhas em maior quantidade. De forma menos significativa, existe uma parcela de aerosol formada pela evaporação direta da água do mar, que também carrega partículas de sal.

Após a formação de gotículas, elas entram em equilíbrio com o ambiente e, dependendo das condições de temperatura e umidade relativa, assumem forma de partículas salinas ou soluções salinas de distintas concentrações (MEIRA, 2004). De acordo com Zezza e Macri

(1995), citados por Meira (2004), abaixo de 70% - 74%, de umidade relativa, as gotículas supersaturadas se transformam em partículas de sal, mudando de fase.

Taylor e Wu (1992) apresentam em suas pesquisas para essas partículas uma classificação em três faixas de diâmetro:

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

Segundo Feliu *et al.* (1999), citado por Silva (2011), após a produção do aerosol marinho, este é transportado para o interior do continente pelo vento. Durante este transporte ao longo de vários metros, partículas que compõem o aerosol marinho vão perdendo altitude devido o efeito da gravidade e se depositam em obstáculos encontrados no caminho.

Alves (2007) ressalta que o cloreto proveniente do mar, portanto, adentra ao continente a depender principalmente da direção e velocidade do vento, cuja topografia, existência de obstáculos e demais características climáticas e geográficas vão influenciar direta ou indiretamente na concentração deste íon nas áreas internas da cidade. Esses fatores que influenciam esse transporte serão abordados a seguir.

#### 2.4.3.1 Vento

Pontes (2006) cita vários estudos (WOODCOCK, 1953; LOVETT, 1978; TAYLOR e WU, 1992; GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996) na descrição da existência da relação entre a velocidade do vento e a concentração de sais no aerosol marinho por meio de função de exponencial. A Figura 17 mostra os resultados de alguns estudos que relacionam concentração salina e velocidade do vento. Segundo vários autores (TAYLOR; WU, 1992; McKAY *et al.*, 1994; GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996 *apud* BORBA JÚNIOR, 2011), essa relação segue a seguinte função empírica:

$$\ln(s) = A.v + B \quad (6)$$

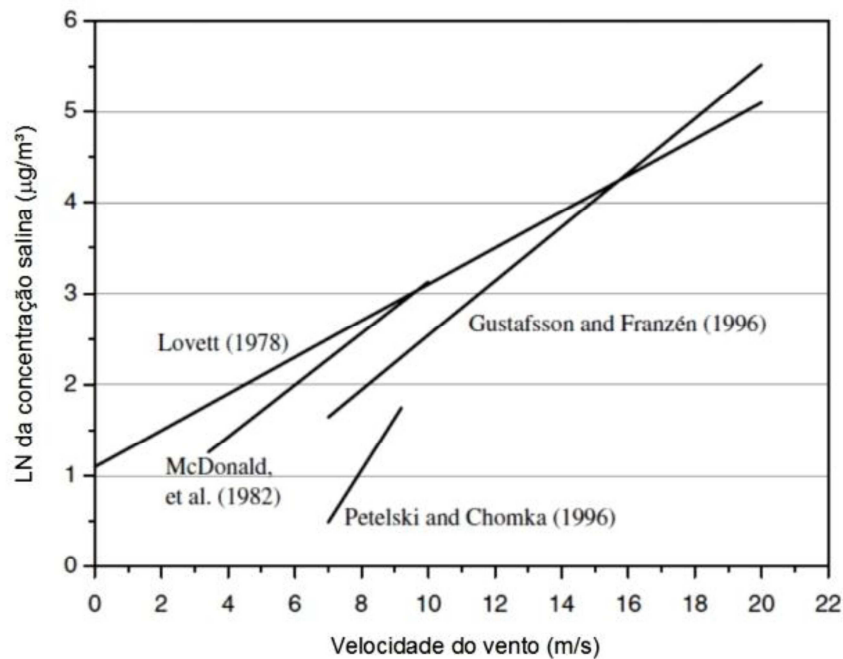
Onde:

s – concentração salina no aerosol;

v – velocidade do vento;

A, B – constantes que dependem do ambiente.

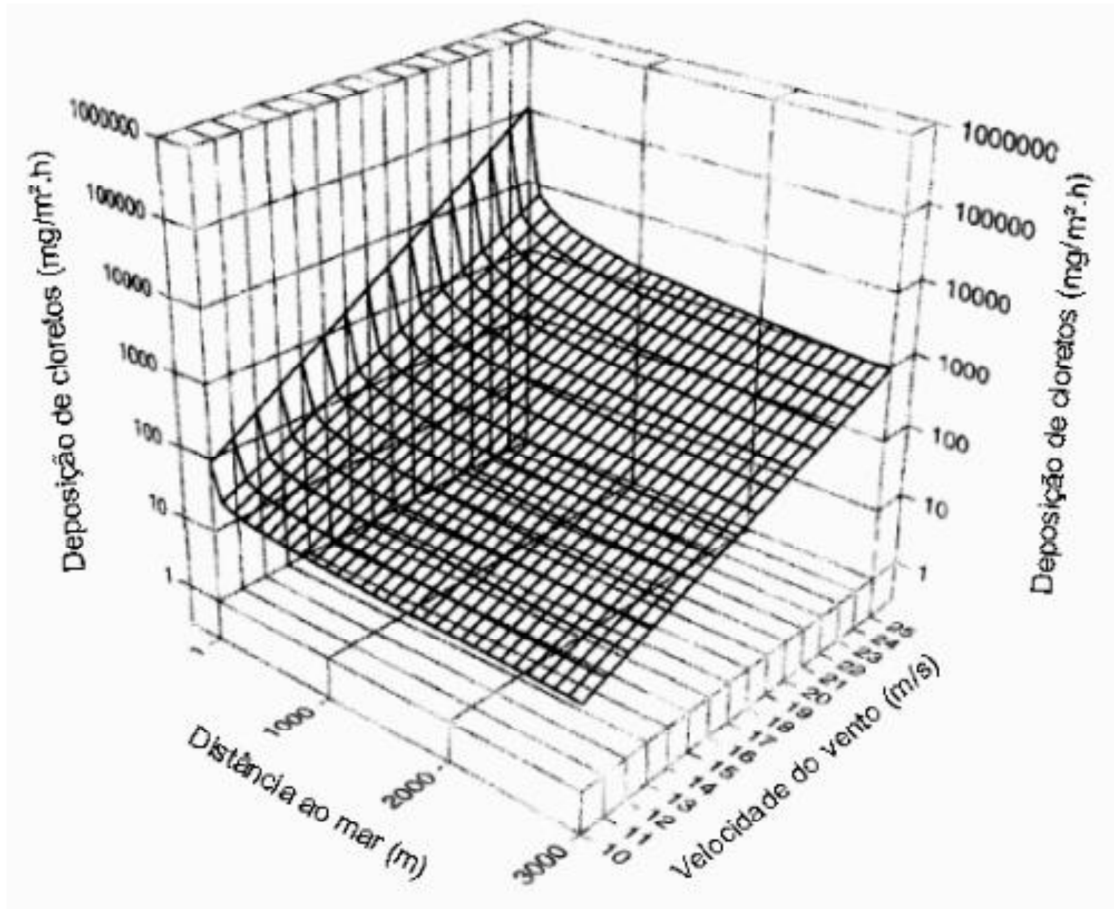
Figura 17 – Relação entre velocidade do vento e concentração salina em diversos estudos.



Fonte: Meira *et al.* (2006) adaptado por Borba Junior (2011).

Quando o aerossol chega ao continente, o vento continua influenciando a concentração salina. Quanto maior a intensidade do vento, mais partículas grandes serão carregadas a distâncias maiores da costa antes de se depositarem (BORBA JÚNIOR, 2011). Segundo Lovett (1978), a velocidade do vento aumenta a quantidade de partículas de aerossol, facilitando formação daquelas de maior tamanho e massa, sendo essas as que se depositam mais rapidamente nas superfícies estruturais. A Figura 18 ilustra o comportamento da deposição de cloretos em função do vento e do afastamento da costa.

Figura 18 – Modelo de deposição de cloretos.



Fonte: Gustafsson; Franzén (1996) adaptado por Borba Junior (2011).

Outro aspecto a ser considerado em relação ao regime dos ventos é a sua direção. Morcillo *et al.* (2000) *apud* Borba Junior (2011) ressalta que os ventos provenientes do mar são os que atuam no aumento da concentração na névoa. Dessa forma, ventos que se originam no continente podem ser desconsiderados na composição da relação entre deposição de cloretos e regime dos ventos.

O vento desenvolve influência preponderante na geração e transporte de aerossol, com efeito acentuado nas medidas de deposição de cloretos a partir do patamar de 3 m/s. Isto se reflete no comportamento temporal do aerossol, que apresenta períodos anuais alternados de maior e menor concentração salina (Meira *et al.*, 2006 *apud* Alves, 2007).

#### 2.4.3.2 Umidade

A quantidade de água presente no interior do concreto, segundo Perepérez *et al.* (1987 *apud* Andrade, 2001), pode ser relacionada diretamente com a umidade relativa do ambiente, desde que o mesmo não esteja saturado. Essa água nos poros afeta diretamente a difusão de gases e íons no concreto (ANDRADE, 2001).

Biczok (1964 *apud* Silva, 2011) relata que estruturas de concreto em zona de atmosfera marinha podem ser atacadas sem estar em contato direto com a água do mar, pois o ar do ambiente marítimo possui sais que podem penetrar na pasta de cimento, sendo esse ataque mais intenso no inverno e outono devido à alta umidade relativa do ar nessas estações do ano.

Em ambientes com umidade relativa relativamente alta, os poros da estrutura ficam saturados, proporcionando condição necessária para difusão de íons cloro no interior do concreto (ROMANO, 2009).

Para Tutti (1982 *apud* Pontes, (2006), a corrosão se torna mais significativa com o aumento da umidade relativa do ar, atingindo um valor máximo quando ela está em 95%, e reduzindo a um nível mais baixo perto da saturação. Complementando o exposto, segundo Saetta, Scotta e Vitaliani (1993), quando a umidade relativa decresce ao valor de 75%, os íons apresentam considerável queda de difusividade, reduzindo o processo corrosivo. Por fim, segundo Wang *et al.* (2010), a taxa de corrosão se aproxima de zero quando a umidade relativa está abaixo de 50%.

#### 2.4.3.3 Temperatura

A influência da temperatura na difusão de cloretos nas estruturas de concreto é amplamente discutida no meio acadêmico. Helene (1993), citado por Pereira e Cincotto (2001), considera que a temperatura tem papel crucial no processo de penetração de cloretos. Um aumento de 15°C para 30°C praticamente duplica o coeficiente de difusão de Cl<sup>-</sup>. Já para Andrade (2001), alguns autores consideram que com o aumento da temperatura durante a cura ocorre uma redução desse coeficiente de difusão em função da melhoria de microestrutura do concreto.

Al-Khaja (1997), citado por Romano (2009), observou que há um aumento significativo da penetração de cloretos quando a temperatura de exposição passa de 20°C para

45°C, principalmente em concretos convencionais quando comparados com concretos de alta resistência, que possuem menor porosidade.

Segundo Neville (1997), a temperatura age aumentando a cinética na maioria dos processos de natureza química do concreto, incluindo o caso de corrosão de armaduras do concreto por ataque de cloretos. Esse fato explicaria a razão pela qual as estruturas localizadas em regiões quentes se deterioram mais rapidamente que as inseridas em regiões frias.

#### 2.4.3.4 *Altitude*

Cipriano e Blanchard (1984) estudaram, durante oito dias, sendo quatro no mês de outubro e quatro no mês de novembro de 1981, a influência da altitude na concentração do aerosol marinho em uma edificação na praia de Oahu no estado norte americano Hawaii. Os autores supracitados concluíram que existe uma redução gradual da concentração de íons cloro na medida em que se aumenta a altitude em razão de as maiores partículas de sais voltarem à superfície do oceano ou mesmo ao nível do solo do continente, uma vez que a gravidade é fator atuante nas partículas. Desse modo, perceberam que a concentração de íons cloro diminuía rapidamente com altitudes maiores de 250 m, onde o ar é bastante estável.

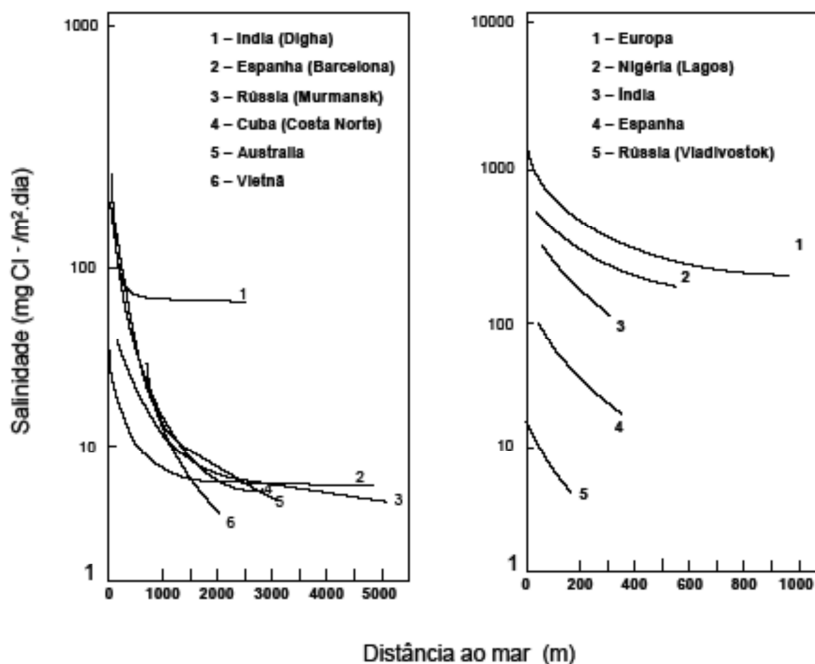
Medeiros *et al.* (2010), citados por Silva (2011), em seus estudos realizados em edificação localizada a 700 metros do mar na Barra da Tijuca do Rio de Janeiro concluíram a corrosão de armaduras da edificação se apresentava gradativamente menor a medida que se aumentava a altitude analisada.

Em suma, esses e outros estudos permitem a realização de análises a respeito da influência da altura de análise da estrutura em relação à agressividade dos íons cloro.

#### 2.4.3.5 *Distância em relação ao mar*

Em diversos estudos realizados no mundo e expostos na Figura 19, foi verificada que a influência da distância entre estrutura e mar constitui o mais importante aspecto no estudo de corrosão em atmosfera marinha. A variabilidade de taxa de deposição de cloretos para os diversos países corroboram para a significativa interferência desse fator.

Figura 19 – Comportamento da salinidade em relação à distância.



Fonte: Morcillo *et al.* (1998) *apud* Meira & Padaratz (2002).

No Brasil, diversos pesquisadores realizaram medições de teores de cloreto em cidades costeiras e quantificar sua taxa de deposição nas estruturas. Costa (2001) em Salvador (BA), pioneiramente mediu a taxa de deposição de cloretos provenientes do spray marinho na região metropolitana dessa cidade, utilizando o método da vela úmida nos períodos de amostragem de cinco meses. Portanto, esse estudo foi o precursor de todos os estudos subsequentes.

Em João Pessoa (PB), Meira e Paradatz (2002) também realizaram estudo semelhante com cinco velas úmidas instaladas para realização do monitoramento de deposição de íons cloro na costa paraibana. Esse estudo indicou redução significativa da concentração desse íon a partir de 200 metros da costa.

Por meio de várias análises, Meira e Paradatz (2002) equacionaram as duas variáveis distância do mar e deposição de íons cloro conforme Equação 7:

$$Y = ae^{-bx} \quad (7)$$

onde:

y: Deposição de íons cloro, em mg/m<sup>2</sup>.dia;

x: Distância em relação ao mar;

a e b: Constantes que podem assumir qualquer valor, dependendo do ambiente analisado.



Pontes (2006) realizou estudo semelhante na Praia de Boa Viagem, em Recife (PE) e concluiu que a deposição de cloretos dá-se de modo significativo nos primeiros 400m e atinge valores ínfimos a partir dos 700 m do mar.

Portanto, ressalta-se, com os vários estudos mostrados aqui e em outros diversos já realizados que a concentração de íons cloro agressivos às estruturas reduzem a medida que se avança em direção ao continente, podendo essa concentração variar ainda em função de outros fatores já explanados como vento ou altitude.

## **2.5 Determinação do teor de íons cloro no ar atmosférico**

A metodologia de determinação do teor de íons cloro presente no ar atmosférico de determinada região mais disseminada e utilizada em diversos estudos realizados em todo mundo é a vela úmida.

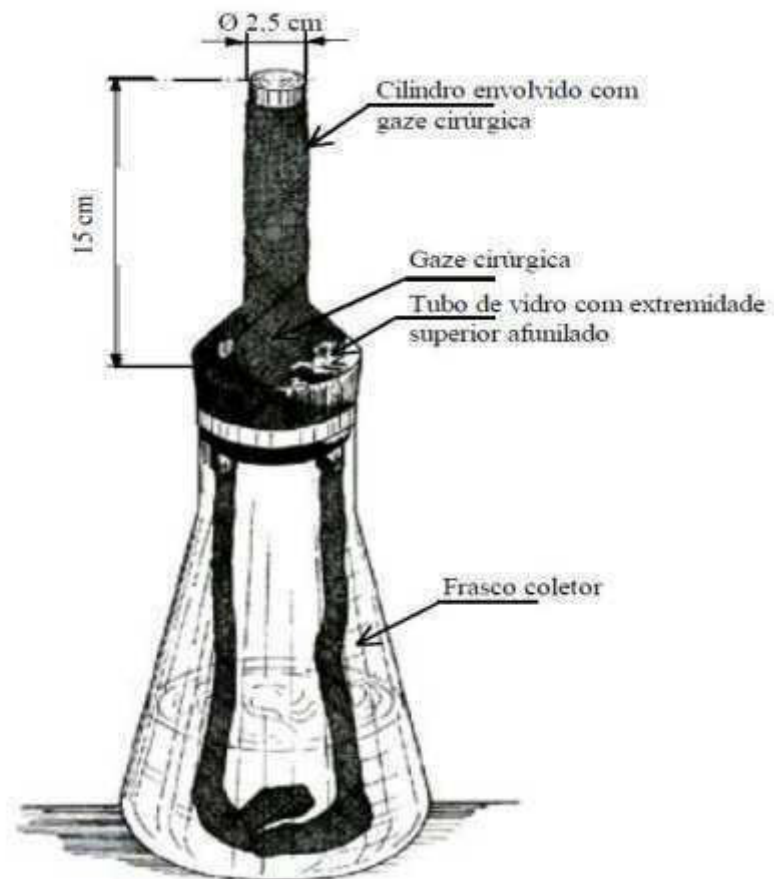
Inicialmente, um sensor simples foi proposto pela ASTM G-140 (Determining Atmospheric Deposition Rate by Wet Candle Method) de 1996 e consiste em um Erlenmeyer com água, ao qual é introduzido um tubo de ensaio enrolado com uma gaze. Por ascensão capilar, a gaze fica úmida e consegue capturar os íons presentes no ar que entram em contato com ela. O mecanismo de difusão permite que estes íons se movam para o interior da solução presente no frasco coletor. Com isso surgiu toda a metodologia estabelecida pela NBR 6211 (ABNT, 2001).

A vela úmida, de acordo com a NBR 6211 (ABNT, 2001), consiste em um cilindro envolvido com gaze cirúrgica e fixado a um frasco coletor por meio de uma rolha. O cilindro é constituído de material inerte como vidro ou polietileno, de aproximadamente 2,5 cm de diâmetro, sobre o qual é enrolada uma camada dupla de gaze cirúrgica. A área da superfície da gaze exposta à atmosfera deve ser de aproximadamente 100 cm<sup>2</sup>. O cilindro é introduzido numa rolha de borracha, ficando com uma altura de 15 cm acima dessa aproximadamente. A rolha deve possuir dois tubos de vidro localizados o mais próximo possível do cilindro, pelos quais passam as extremidades da gaze, que devem atingir o fundo do frasco. Estes tubos devem ter formato adequado para que o líquido que desce pela gaze seja drenado, sem perda, para o frasco coletor. O frasco coletor deve ser de vidro, polietileno ou outro material inerte, com aproximadamente 800 ml de capacidade.

A já referida norma ressalta também que a vela úmida deve ser preparada utilizando luvas de PVC e em ambiente isento de contaminantes, devendo-se também tomar

cuidado para que o material utilizado não contamine a solução com cloretos ou com interferentes. A Figura 20, extraída da NBR 6211 (ABNT, 2001), esquematiza um modelo para a vela úmida.

Figura 20 – Vela úmida.



Fonte: NBR 6211 (ABNT, 2001)

### 3 METODOLOGIA

Inicialmente realizou-se uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema para embasar o estudo e verificar outros que já foram realizados em cidades brasileiras e do mundo.

Para quantificar o teor de íons cloro na praia do Porto das Dunas em relação à distância da costa, realizou-se o procedimento experimental estabelecido pela NBR 6211 (ABNT, 2001).

Fez-se também uma caracterização climatológica do local, por meio da determinação de parâmetros de velocidade e de direção do vento, umidade, precipitação, temperatura, semanalmente, com base em dados disponíveis no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

É válido ressaltar que esse instituto estabelece três medidas de vento: direção, velocidade média e rajadas de vento, com ocorrência de até 3 segundos. No caso a diferença entre o segundo e o terceiro parâmetros é que o aquele apresenta a média das velocidades encontradas no período de uma hora, enquanto que a rajada de vento é a máxima velocidade encontrada no mesmo período.

#### 3.1 Localização de velas

A pesquisa foi desenvolvida na orla marítima da praia do Porto das Dunas, município de Aquiraz, estado do Ceará. Esta região vem atraindo um número considerável de empreendimentos imobiliários.

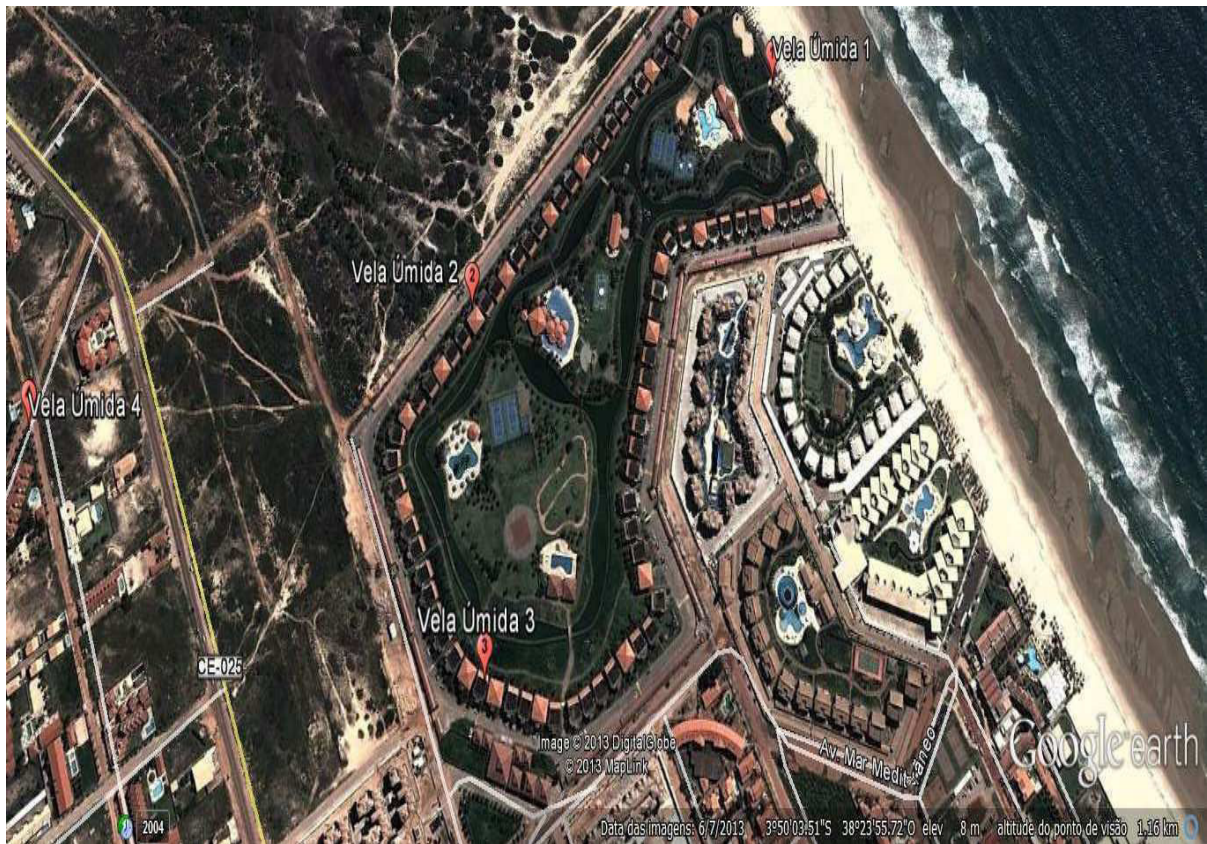
O estudo foi feito por meio da instalação de cinco velas úmidas, sendo uma na guarita de acesso da praia do Porto das Dunas ao Aquaville Resort, uma no bloco 40, uma no bloco 59, uma no condomínio Mariúba e uma instalada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFC para servir de ensaio branco, sendo essa utilizada a título de comparação com as velas expostas às condições ambientais. As distâncias das velas colocadas na praia do Porto das Dunas em relação ao mar são, respectivamente, 76, 500, 650, 1000 metros, conforme mostrado na Tabela 3 e Figura 21.

Tabela 3 – Localização geodésica das velas úmidas

Nº Vela úmida	Latitude	Longitude	Distância (m)
1	3°49'56.83"S	38°23'48.49"O	76
2	3°50'3.17"S	38°24'1.21"O	500
3	3°50'11.90"S	38°24'0.22"O	650
4	3°50'6.59"S	38°24'17.93"O	1000

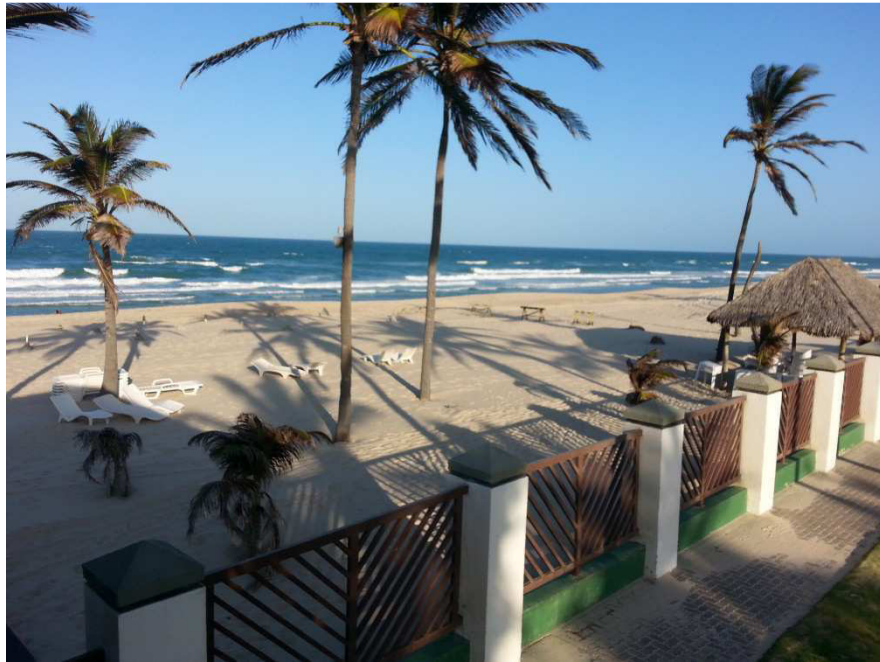
Fonte: Próprio autor.

Figura 21 – Disposição das velas úmidas.



Fonte: Adaptado do Google Earth

Figura 22 – Vista da guarita do Aquaville Resort para a praia, local onde foi colocada uma vela úmida a 76 metros do mar.



Fonte: Próprio autor

Figura 23 – Vela úmida 1 a 76 metros do mar.



Fonte: Próprio autor.

Figura 24 – Vela úmida 2 a 500 metros do mar.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25 – Vela úmida 3 a 650 metros do mar.



Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Vela úmida 4 a 1000 metros do mar.



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 – Vela úmida (branco) 5 no LMCC (UFC).



Fonte: Próprio autor.

As velas ficaram expostas durante os meses de agosto, setembro e outubro de 2013, totalizando três coletas para cada vela instalada. Em cada mês elas foram retiradas, para se fazer a determinação de íons cloro no ar atmosférico conforme estabelecido na NBR 6211

(ABNT, 2001). Em seguida foram preparadas novas velas úmidas para nova exposição nos mesmos locais pré-fixados.

É válido ressaltar que todo o procedimento de preparo das velas úmidas e de amostragem para determinação dos íons cloro foi realizado conforme a NBR 6211 (ABNT, 2001).

### **3.2 Preparação de velas úmidas**

As velas úmidas utilizadas no estudo foram confeccionadas conforme estabelecido na NBR 6211 (ABNT, 2011) com tubos de ensaio de vidro de 25 mm x 200 mm e tubos de poliestireno de 12 mm x 75 mm, além do frasco de Erlenmayer de boca larga com capacidade de 1000 ml.

A solução de aproximadamente 200 ml contida no interior da vela úmida, conforme estabelecido na supracitada norma, é denominada água glicerinada, sendo essa contida de 200 ml de Glicerol ( $\text{CHOH}(\text{CH}_2\text{OH})_2$ ), 1000 ml de água destilada e 20 gotas de ácido octanóico ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ ).

Uma vela adicional (Branco) foi também preparada para servir com referência na determinação de íons cloro presentes nas outras velas expostas na praia do Porto das Dunas. Esta vela foi guardada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará (LMCC).

Além do ensaio em Branco, a eficiência do ensaio descrito na NBR 6211 (ABNT, 2001) foi testada utilizando uma quantidade conhecida de cloretos (solução-padrão de cloreto de sódio).

### **3.3 Amostragem**

Conforme recomendações da NBR 6211 (ABNT, 2001), o procedimento de amostragem abaixo foi realizado tanto para as velas instaladas na praia como para a vela do ensaio branco:

1. Instalar a vela conforme descrito no item 3.3.4 da norma supracitada e deixá-la exposta por um período em torno de 30 dias;
2. Terminado o tempo de exposição, a gaze deve ser retirada com uma pinça e colocada em um recipiente com cerca de 200 mL de água destilada;



3. Para que todos os íons cloro sejam dissolvidos, a solução deve ser bem agitada;
4. A gaze, então, é retirada da solução e lavada com água, sendo esta reservada;
5. As soluções do frasco coletor e as águas de lavagem são misturadas, completando-se com água a um volume conhecido (VT);
6. Por fim, a amostra é identificada, anotando-se a área da superfície exposta, em metros quadrados (S), o volume total da amostra em mililitros após diluição com água (VT), o local e o tempo de exposição em dias (t).

### 3.4 Determinação do teor de íons cloro

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

Os reagentes utilizados na determinação são os seguintes:

1. Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$   $d=1,42$ );
2. Nitrato mercúrico ( $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ );
3. Indicadores mistos: difenilcarbazona e azul-de-bromofenol;
4. Etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) a 95%;
5. Hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ).

As soluções utilizadas na montagem e análise das velas úmidas seguem descritas no Anexo A.

A NBR 6211 (ABNT, 2001) expressa os resultados obtidos com a análise da vela úmida em massa de cloreto por unidade de área e tempo, através da Equação 6:

$$\text{Cloreto} \left( \left( \frac{\text{mg}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right) \right) = \frac{2(A - B) \times M \times 35,5 \times V_T}{V_a \times S \times t} \quad (6)$$

Onde:

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

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

M é a concentração de solução-padrão de nitrato mercúrico, 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 da gaze exposta, em metros quadrados;

$t$  é o tempo de exposição, em dias.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da determinação do teor de cloretos pelo método da vela úmida nos meses analisados estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Resumo de concentração de cloreto no período estudado.

Concentração de cloretos (mg/m <sup>2</sup> .dia)					
Estação	Distância	05/ago a 07/set	10/set a 09/out	09/out a 06/nov	Média
1	76	783,57	1670,93	1837,44	1430,65
2	500	271,93	115,60	122,58	170,04
3	650	131,98	111,05	258,29	167,11
4	1000	185,72	103,14	116,23	135,03
5	4700	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor.

Esses resultados serão relacionados, nos itens a seguir, aos parâmetros climatológicos e à distância ao mar.

### 4.1 Comportamento climatológico

#### 4.1.1 Vento

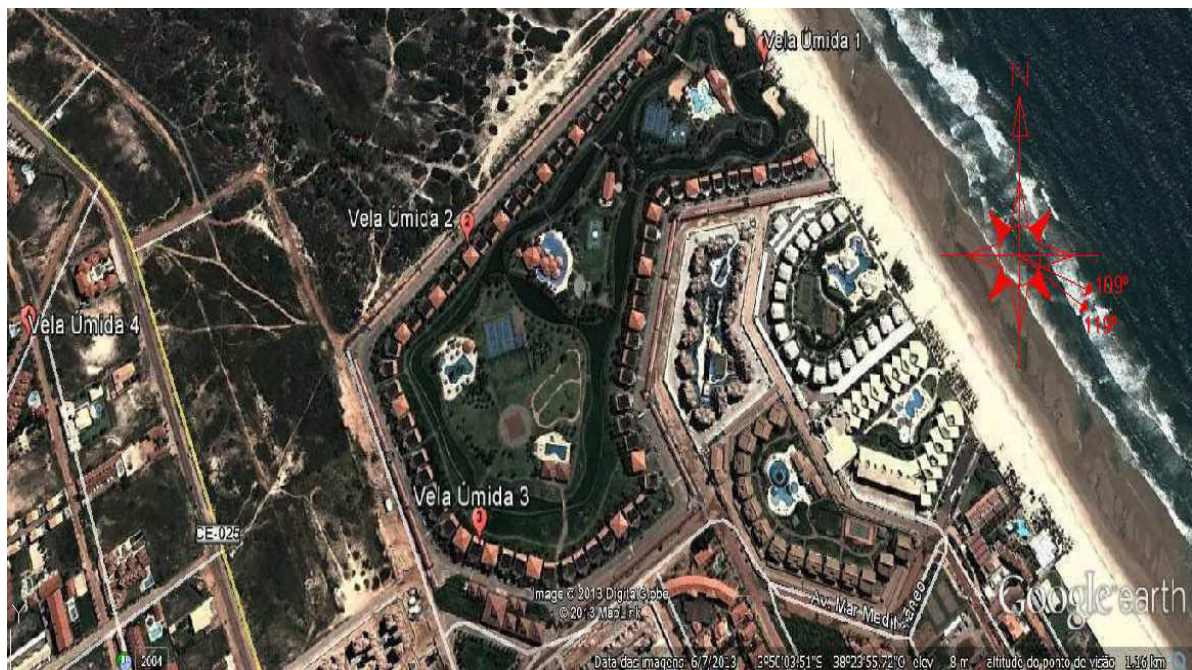
Observou-se que a direção do vento teve uma variação de 109° a 119°. A velocidade média dos ventos sempre se manteve acima de 3 m/s sem ultrapassar a marca de 4 m/s. Contudo ressalta-se que se observaram, no período analisado, rajadas com velocidades de até 9,77 m/s, bem acima da média. Esses resultados podem ser observados no Quadro 6 e na Figura 28.

Quadro 6 – Acompanhamento semanal de direção, velocidade média e rajada de vento.

VENTO						
Período: 05 de agosto de 2013 a 07 de setembro de 2013						
Semana	05/ago a 10/ago	11/ago a 17/ago	18/ago a 24/ago	25/ago a 31/ago	01/set a 07/set	Média
Direção	121	118	116	120	119	119
Velocidade média	3,54	3,43	3,45	3,01	3,59	3,40
Rajada	8,53	8,33	8,32	7,22	8,72	8,22
Período: 10 de setembro de 2013 a 09 de outubro de 2013						
Semana	10/set a 14/set	15/set a 21/set	22/set a 28/set	29/set a 05/out	06/out a 09/out	Média
Direção	116	119	111	108	104	112
Velocidade média	3,96	3,98	3,29	3,82	3,12	3,66
Rajada	9,57	9,51	7,76	8,97	7,59	8,73
Período: 09 de outubro de 2013 a 06 de novembro de 2013						
Semana	09/out a 12/out	13/out a 19/out	20/out a 26/out	27/out a 02/nov	03/nov a 06/nov	Média
Direção	113	115	110	102	108	109
Velocidade média	4,10	3,62	3,57	3,59	3,54	3,66
Rajada	9,77	8,76	8,71	8,49	8,48	8,79

Fonte: INMET (2013).

Figura 28 – Direção predominante do vento.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

#### 4.1.2 Umidade relativa

A umidade relativa, no período do estudo, apresentou variação entre 60% e 75%, conforme apresentado no quadro 7. Tendo em vista que a umidade relativa está consideravelmente abaixo de 95%, pode-se inferir que esse parâmetro atmosférico, nessas condições, gera um ambiente propício para corrosão.

Quadro 7 – Acompanhamento semanal da umidade relativa.

UMIDADE RELATIVA (%)						
Período: 05 de agosto de 2013 a 07 de setembro de 2013						
Semana	05/ago a 10/ago	11/ago a 17/ago	18/ago a 24/ago	25/ago a 31/ago	01/set a 07/set	Média
Máxima	67,82	71,81	68,94	71,71	70,79	70,22
Mínima	63,44	67,43	64,68	67,24	66,51	65,86
Média	66,15	70,00	67,21	69,92	69,12	68,48
Período: 10 de setembro de 2013 a 09 de outubro de 2013						
Semana	10/set a 14/set	15/set a 21/set	22/set a 28/set	29/set a 05/out	06/out a 09/out	Média
Máxima	66,57	66,51	72,15	67,00	68,68	68,18
Mínima	62,45	61,84	67,69	62,27	64,30	63,71
Média	65,22	64,54	70,38	64,93	67,24	66,46
Período: 09 de outubro de 2013 a 06 de novembro de 2013						
Semana	09/out a 12/out	13/out a 19/out	20/out a 26/out	27/out a 02/nov	03/nov a 06/nov	Média
Máxima	66,34	68,37	69,04	68,13	72,27	68,83
Mínima	61,85	63,58	64,58	63,65	67,75	64,28
Média	64,11	65,86	66,95	65,94	69,94	66,56

Fonte: INMET (2013).

#### 4.1.3 Precipitação

O período em estudo coincidiu com o período de baixa pluviometria. Contudo vale ressaltar que o primeiro mês analisado apresentou precipitação significativamente superior aos outros meses em estudo, influenciando nos resultados de deposição de cloretos. O acompanhamento de precipitação é apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 – Acompanhamento semanal de precipitação.

PRECIPITAÇÃO						
Período: 05 de agosto de 2013 a 07 de setembro de 2013						
Semana	05/ago a 10/ago	11/ago a 17/ago	18/ago a 24/ago	25/ago a 31/ago	01/set a 07/set	Total
Precipitação (mm)	0,00	9,80	1,80	2,20	8,80	22,60
Período: 10 de setembro de 2013 a 09 de outubro de 2013						
Semana	10/set a 14/set	15/set a 21/set	22/set a 28/set	29/set a 05/out	06/out a 09/out	Total
Precipitação (mm)	0,00	0,00	2,40	0,60	4,80	7,80
Período: 09 de outubro de 2013 a 06 de novembro de 2013						
Semana	09/out a 12/out	13/out a 19/out	20/out a 26/out	27/out a 02/nov	03/nov a 06/nov	Total
Precipitação (mm)	0,20	1,20	4,00	0,60	3,80	9,80

Fonte: INMET (2013).

#### 4.1.4 Temperatura

Em se tratando de temperatura, pôde-se observar uma diminuta variação no período de estudo, sendo esse parâmetro praticamente constante, influenciando pouco na variabilidade de deposição de cloretos nos meses avaliados. Esses valores estão apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Acompanhamento semanal da temperatura.

TEMPERATURA						
Período: 05 de agosto de 2013 a 07 de setembro de 2013						
Semana	05/ago a 10/ago	11/ago a 17/ago	18/ago a 24/ago	25/ago a 31/ago	01/set a 07/set	Média
Máxima	31,50	31,70	32,30	33,10	32,90	32,30
Mínima	22,50	23,60	23,70	22,80	23,30	23,18
Média	27,02	27,02	27,32	27,30	27,12	27,16
Período: 10 de setembro de 2013 a 09 de outubro de 2013						
Semana	10/set a 14/set	15/set a 21/set	22/set a 28/set	29/set a 05/out	06/out a 09/out	Média
Máxima	32,20	33,30	32,20	32,50	32,80	32,60
Mínima	22,80	22,90	22,90	23,90	23,50	23,20
Média	27,30	27,57	27,21	27,60	27,83	27,50
Período: 09 de outubro de 2013 a 09 de novembro de 2013						
Semana	09/out a 12/out	13/out a 19/out	20/out a 26/out	27/out a 02/nov	03/nov a 06/nov	Média
Máxima	32,80	32,30	33,00	32,40	32,50	32,60
Mínima	24,70	22,80	24,40	24,90	24,70	24,30
Média	27,94	27,52	27,71	27,79	27,83	27,76

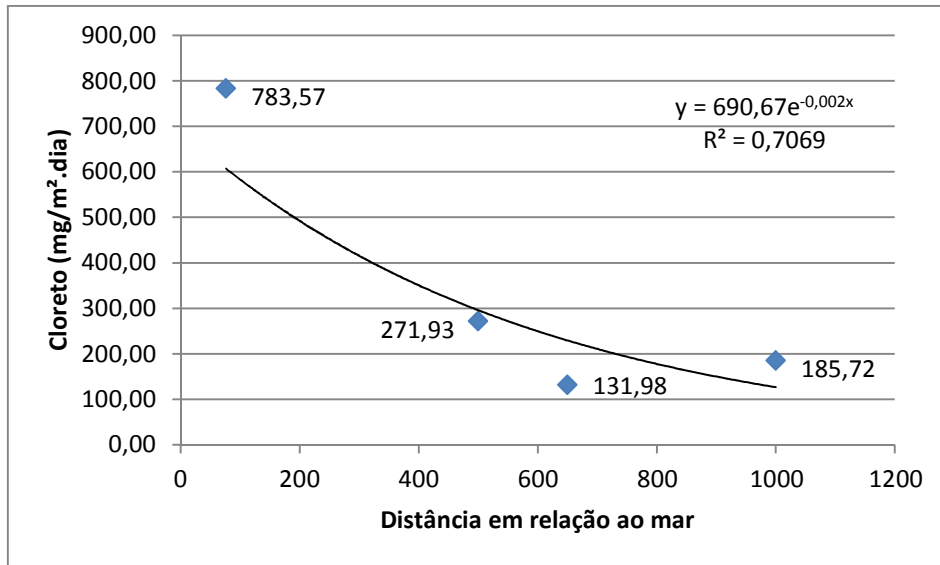
Fonte: INMET (2013).

## 4.2 Deposição de cloretos

### 4.2.1 *Influência da distância em relação ao mar em relação à deposição de cloretos*

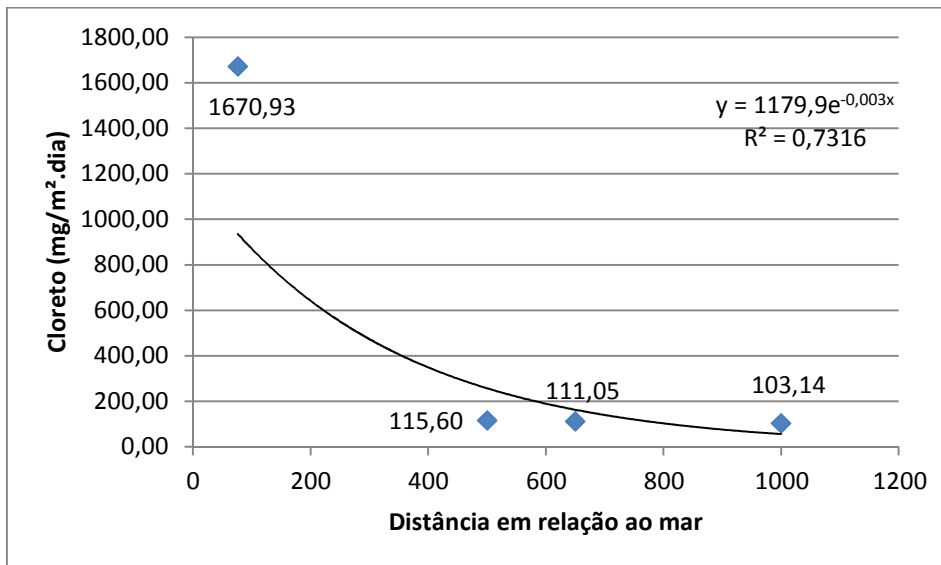
Observou-se claramente o decréscimo de deposição de cloretos com o aumento da distância em relação ao mar, conforme ilustrados nas Figuras 29, 30, 31 e 32. Viu-se também uma significativa diferença na deposição de cloretos a 76 metros do primeiro mês em relação aos dois meses seguintes, ultrapassando o dobro daquela deposição.

Figura 29 – Deposição de íons cloro (05 de agosto a 07 de setembro de 2013)



Fonte: Próprio autor.

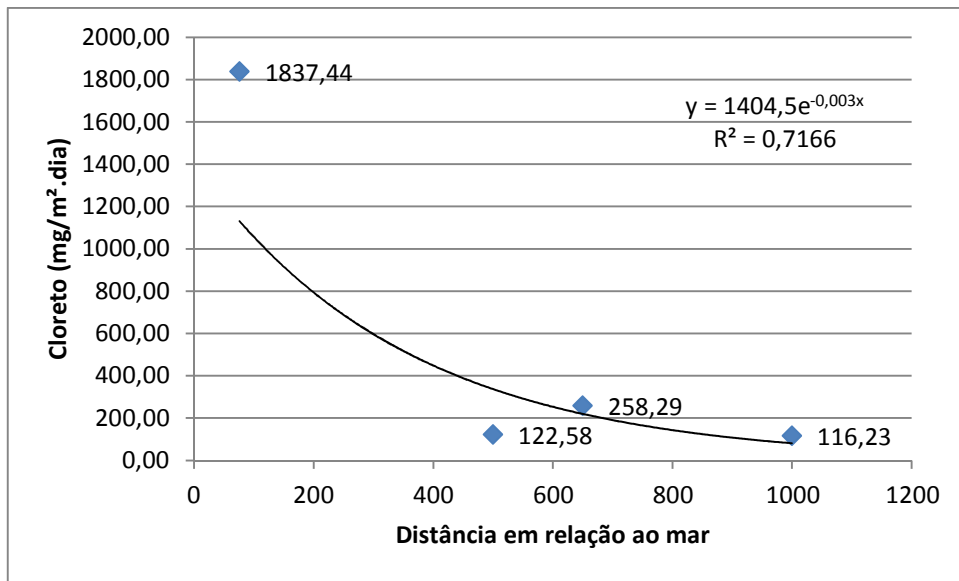
Figura 30 – Deposição de íons cloro (10 de setembro a 09 de outubro de 2013)



Fonte: Próprio autor.

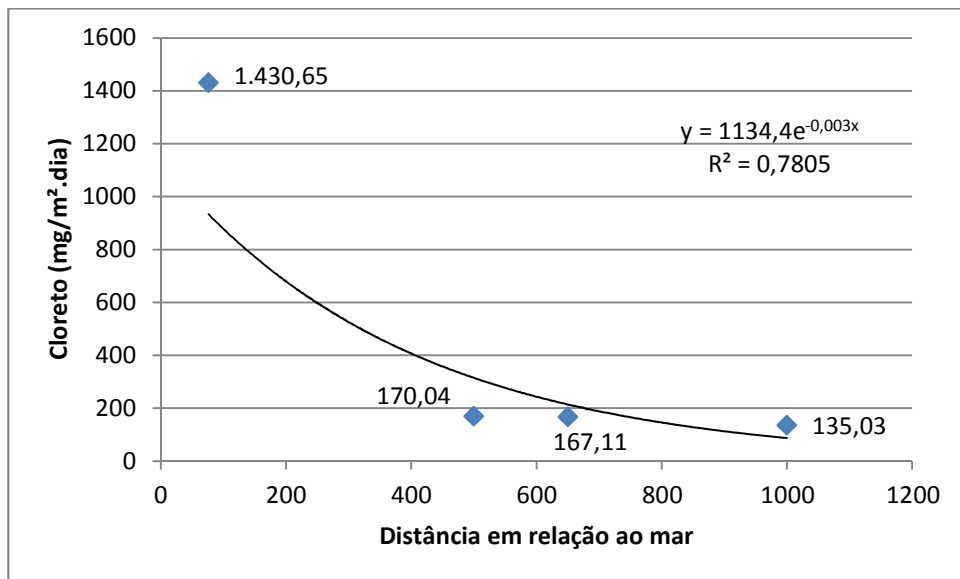


Figura 31 – Deposição de íons cloro (09 de outubro a 06 de novembro de 2013)



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 – Deposição média de íons cloro



Fonte: Próprio autor.

Nos gráficos apresentados, modelou-se os dados através de função exponencial para representar matematicamente o comportamento das duas variáveis analisadas, conforme realizados em diversos estudos. Observa-se que todos os dados apresentaram boa correlação, com coeficiente de determinação sempre acima de 0,70.

O modelo das médias dos valores encontrados foi ajustado através de linearização da função exponencial. Tabacniks (2003) explica que funções do tipo  $y = ae^{bx}$  são melhor linearizadas aplicando o logaritmo natural em ambos os termos:

$$\ln(y) = \ln(ae^{bx}) \quad (7)$$

$$\ln(y) = \ln(a) + bx \quad (8)$$

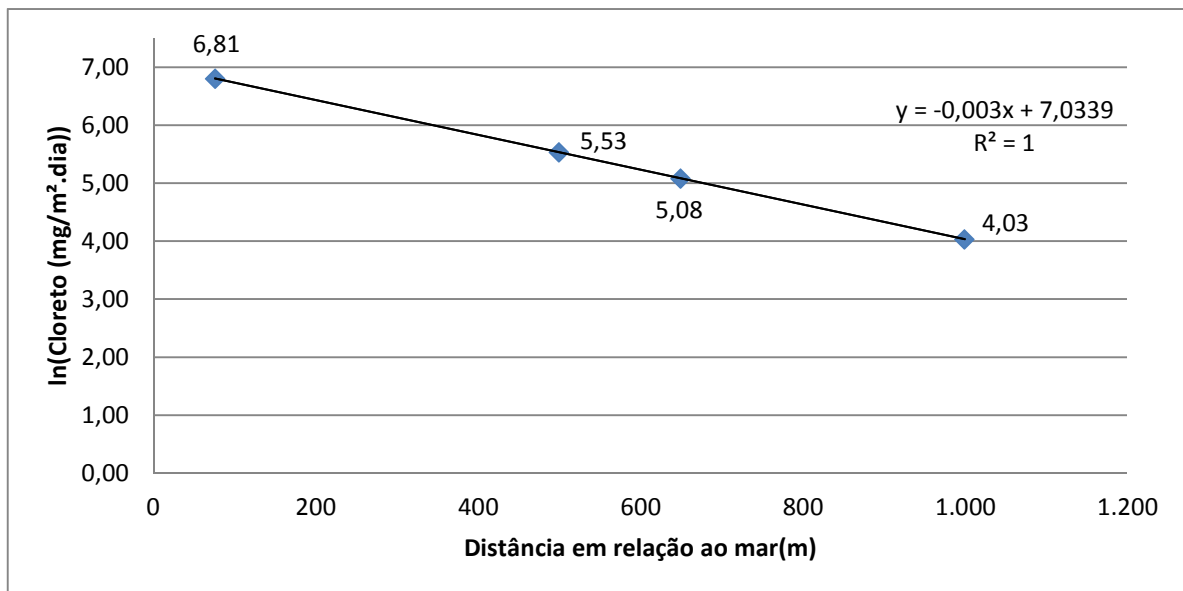
Definindo  $Y = \ln(y)$  e  $A = \ln(a)$  tem-se uma equação da reta:

$$Y = A + bx \quad (9)$$

Com base nesse modelo linearizado, tem-se a Figura 33 que descreve melhor o comportamento de deposição de cloretos em relação à distância ao mar através da Equação 10 com coeficiente de determinação de 1 e o Quadro 10 com a previsão de valores dessa deposição em relação a várias distâncias. Observa-se claramente a substancial melhoria de  $R^2$  nessa linearização em relação à equação encontrada para os dados de deposição média de íons cloro dispostos na Figura 32, embora não seja usual utilizar os dados na forma linearizada.

$$Y = -0,003x + 7,0339 \quad (10)$$

Figura 33 – Modelo linearizado de deposição média de íons cloro



Fonte: Próprio autor.

Quadro 10 – Previsão de modelo linear de deposição de cloretos.

Distância em metros	ln(cloreto(mg/m <sup>2</sup> .dia))	Cloreto(mg/m <sup>2</sup> .dia) Linearizado
100	6,73	840,38
200	6,43	622,57
300	6,13	461,21
400	5,83	341,67
500	5,53	253,12
600	5,23	187,52
700	4,93	138,91
800	4,63	102,91
900	4,33	76,24
1000	4,03	56,48

Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.2 Comparação com outros estudos

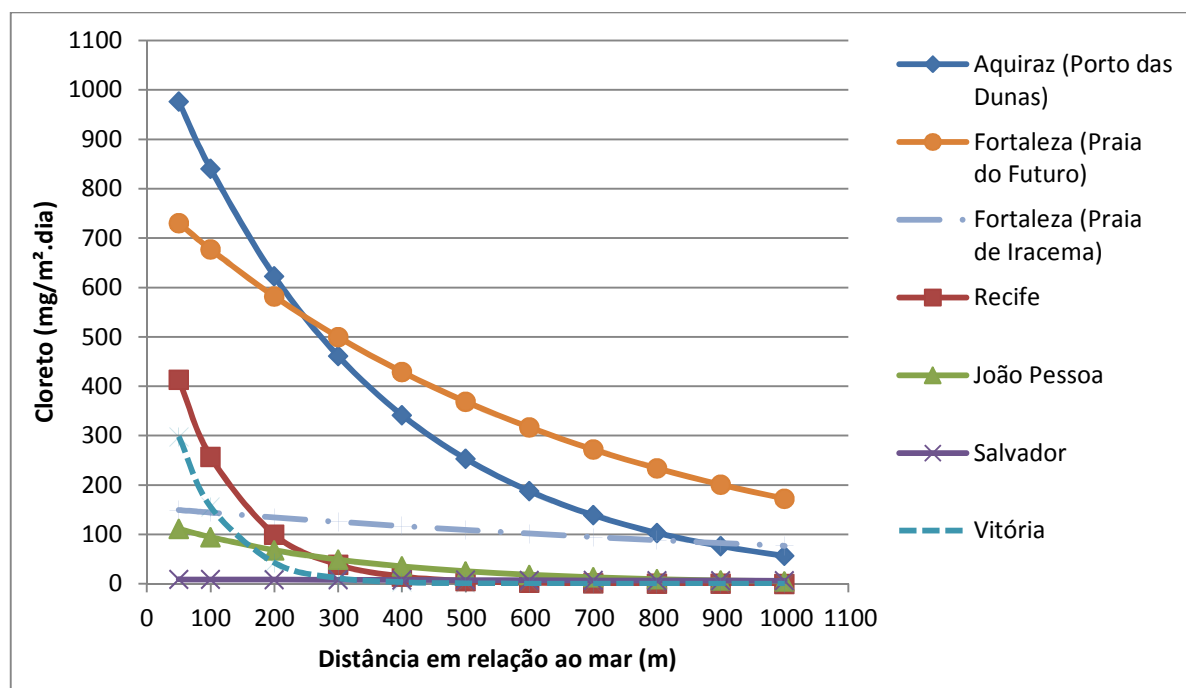
Alguns pesquisadores realizaram medições em outras cidades brasileiras: Portella e Cabral (2013) na praia do Futuro em Fortaleza, Oliveira (2013) na praia de Iracema em Fortaleza, Costa (2001) em Salvador, Meira e Padaratz (2002) em João Pessoa, Pontes (2006) em Recife e Borba Junior (2011) em Vitória. O Quadro 11 e a Figura 34 mostram os resultados obtidos nesses estudos e o Quadro 12 apresenta uma análise comparativa desses resultados.

Quadro 11 – Comparação de resultados com outras cidades brasileiras.

Concentração de cloretos (mg/m <sup>2</sup> .dia)							
Distância em relação ao mar (m)	Aquiraz (Porto das Dunas)	Fortaleza (Praia do Futuro)	Fortaleza (Praia de Iracema)	Recife	João Pessoa	Salvador	Vitória
	$Y=1134,4e^{-0,003x}$	$Y=788,31128e^{-0,00152x}$	$Y=154,59e^{-0,0007x}$	$Y=664,99e^{-0,0095x}$	$Y=131,38e^{-0,0033x}$	$Y=9e^{-0,0004x}$	$Y=571,25e^{-0,013x}$
50	976,39	730,62	149,27	413,55	111,40	8,82	298,22
100	840,38	677,15	144,14	257,18	94,45	8,65	155,68
200	622,57	581,66	134,39	99,46	67,90	8,31	42,43
300	461,21	499,64	125,31	38,47	48,82	7,98	11,56
400	341,67	429,19	116,84	14,88	35,10	7,67	3,15
500	253,12	368,67	108,94	5,75	25,23	7,37	0,86
600	187,52	316,68	101,57	2,23	18,14	7,08	0,23
700	138,91	272,02	94,71	0,86	13,04	6,80	0,06
800	102,91	233,67	88,30	0,33	9,38	6,54	0,02
900	76,24	200,72	82,33	0,13	6,74	6,28	0,00
1000	56,48	172,41	76,77	0,05	4,85	6,03	0,00

Fonte: Próprio autor; Portella e Cabral (2013); Oliveira (2013); Pontes (2006); Meira e Padaratz (2002); Costa (2001); Borba Junior (2011).

Figura 34 – Comparação de deposição média de íons cloreto em várias cidades brasileiras.



Fonte: Próprio autor; Portella e Cabral (2013); Oliveira (2013); Pontes (2006); Meira e Padaratz (2002); Costa (2001); Borba Junior (2011).

Quadro 12 – Comparativo de agressividade.

Comparativo de agressividade							
Distância em relação ao mar (m)	Aquiraz (Porto das Dunas)	Fortaleza (Praia do Futuro)	Fortaleza (Praia de Iracema)	Recife	João Pessoa	Salvador	Vitória
	Cloreto(mg/m <sup>2</sup> .dia)	% mais agressivo	% mais agressivo	% mais agressivo	% mais agressivo	% mais agressivo	% mais agressivo
100	840,38	24%	483%	227%	790%	9619%	440%
200	622,57	7%	363%	526%	817%	7394%	1367%
300	461,21	-8%	268%	1099%	845%	5678%	3889%
400	341,67	-20%	192%	2197%	874%	4355%	10742%
500	253,12	-31%	132%	4300%	903%	3335%	29372%
600	187,52	-41%	85%	8328%	934%	2549%	80014%
700	138,91	-49%	47%	16043%	965%	1942%	217672%
800	102,91	-56%	17%	30823%	998%	1475%	591865%
900	76,24	-62%	-7%	59134%	1031%	1114%	1609027%
1000	56,48	-67%	-26%	113366%	1066%	836%	4373961%

Fonte: Próprio autor

Comparando-se o resultado obtido no Porto das Dunas em Aquiraz com os de outras cidades brasileiras, pode-se inferir algumas relações. Assim como verificado nos outros estudos, a deposição de íons cloro decresce exponencialmente à medida que se afasta do mar em direção ao continente. Todavia, têm-se elevadas concentrações de cloretos mesmo a 800 metros da costa, caso observado somente na praia do Futuro em Fortaleza.

Ressalta-se também, conforme observado no Quadro 12, o fato da agressividade observada na praia do Porto das Dunas ter sido maior que o da praia do Futuro em Fortaleza somente até 200 metros da costa, invertendo-se essa superioridade a partir de 300 metros, enquanto que na Praia de Iracema dessa mesma cidade essa inversão só ocorreu a partir de 900 metros da costa. Notadamente essas duas cidades litorâneas apresentam características ambientais bem mais agressivas do que as outras cidades.

Assim, só pelo motivo de a Praia do Porto das Dunas apresentar elevadas concentrações de cloretos em seu ar atmosférico, já é possível considerar qualitativamente esta região como agressiva, merecendo cuidados especiais com cobrimento, resistência do concreto, dentre outros.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 Conclusões**

Os resultados desse estudo confirmaram a alta agressividade do meio quanto à névoa salina de origem marinha, quando comparados com outros resultados obtidos em cidades brasileiras.

O estudo aponta que as condições meteorológicas da região se mostram bastantes favoráveis à formação da névoa salina de origem marinha, principalmente em se tratando de vento e precipitação. O método da vela úmida mostrou-se ser uma boa técnica na determinação de íons cloro presentes na atmosfera marinha de uma região, independente das características climatológicas do meio ambiente.

Conseguiu-se correlacionar satisfatoriamente deposição de íons cloro e distância em relação ao mar através de uma função exponencial, conforme amplamente realizado em diversos estudos no Brasil e no mundo.

Foi verificado, analogamente aos diversos trabalhos publicados, que a taxa de deposição de íons cloro decresce exponencialmente na medida em que se afasta do mar e adentra o continente. No caso da região da Praia do Porto das Dunas, semelhante somente à Praia do Futuro, em Fortaleza, a névoa salina é ainda bastante elevada aos 800 metros de distância do mar, indicando que, embora decrescendo exponencialmente, deve se estender um pouco mais além deste limite. Com isso, devido ao aumento número de novos empreendimentos nesse local, faz-se necessário uma análise mais crítica na confecção de projetos nessa área, uma vez que essa zona possui significativa agressividade.

Por fim, é importante ressaltar que os dados obtidos nesta pesquisa se referem, exclusivamente, a um trecho específico da Praia do Porto das Dunas, Aquiraz (CE), pois, como foi observado, existem discrepâncias no comportamento de outras regiões brasileiras. Contudo, desse trabalho pode-se inferir o quão agressivo é a região estudada, sendo, portanto, necessária uma melhor avaliação dos critérios de projeto para a confecção de estruturas mais duráveis e econômicas, no médio e longo prazos.

### **5.2 Sugestões**

Com base nos resultados obtidos neste estudo, nas dificuldades encontradas e na importância deste tema, sugerem-se alguns melhoramentos e temas para pesquisas futuras:

- a) Instalar velas úmidas em diferentes alturas para a avaliação da influência da altura das edificações na deposição de íons cloro, bem como a relação entre obstáculos na disseminação de cloretos ao longo da costa (efeito barreira).
- b) Instalação de anemômetros no local para estudo *in loco* de velocidade e direção do vento, uma vez que esse parâmetro atmosférico possui significativa interferência nos resultados.
- c) Realizar essa mesma pesquisa em um período de um ano, visando a uma melhor avaliação de fatores climáticos e de suas influências na deposição de cloretos e à obtenção de resultados mais precisos.
- d) Após a realização de diversos estudos desse tipo em vários pontos da orla marítima, comparar os resultados obtidos com outros estudos e confeccionar um mapeamento indicativo de agressividade, podendo efetivamente contribuir de sobremaneira para uma maior eficiência na elaboração de projetos.

## REFERÊNCIAS

ALVES, A. M. C. **Contribuição à análise da perspectiva da vida útil de estruturas em concreto face ao teor de cloretos registrados em Maceió – AL**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2007.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992. 104p.

ANDRADE, C. **Procesos de corrosión em el hormigón y métodos modernos de cálculo de la carbonatación, penetración de cloretos y propagación de la corrosión**. In: Curso de Estudios Mayores de La Corrosión (CEMCO), 15, 2001, Madrid. Seminário sobre Durabilidad del hormigón e evaluación de estructuras corroídas. Madrid: IETcc, abr. 2001.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas por corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos**. Porto Alegre-RS, 2001. 256 p. Dissertação (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANDRADE, R. I. L. **Dinâmicas e conflitos na zona costeira de Aquiraz: Porto das Dunas e Prainha em Análise**. Fortaleza-CE, 2008. 150p.; il. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia.

ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6211**: Corrosão atmosférica: Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

BORBA JUNIOR, J. C. **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha : estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste**. Vitória-ES, 2011. 150 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo.

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**. Porto Alegre-RS, 2000. 165 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CARMONA, T. G. **Modelos de previsão de despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas a carbonatação**. São Paulo, Universidade de São Paulo PCC.USP, 2005 (Dissertação de mestrado)



CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo; Pini; 1997. Goiânia: Ed. UFG, 237p. ISBN 8572660801

CIPRIANO, R. J.; BLANCHARD, D. C. **The vertical distribution of the concentration of sea salt in the marine atmosphere near Hawaii**. Tellus, 1984.

COSTA, E. A. L. **Determinação do potencial de agressão dos sais marinhos sobre as argamassas de revestimento na região metropolitana de Salvador**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.

DURACRETE. **Models for environmental actions on concrete structures**. The European Union – Brite EuRam III, March, 1999.

FERREIRA, L. A. *et al.* **Curso de formação de operadores de refinaria: química aplicada, corrosão**. Curitiba: Petrobras: UnicenP. 2002. 32 p. : il. ; 30cm.

GARCIA, R. B.; PADARATZ, I. J.; SZPOGANICZ, B. **Agressividade marinha medida pela taxa de deposição de cloretos na Região da Grande Florianópolis**. IN: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais... Bento Gonçalves, IBRACON, 2007.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 341 p.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo, Pini/IPT, 1986. 47p.

LIMA, M. G. *et al.* **Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho – importância dos estudos envolvendo microclima**. Seminário e WorkShop em Engenharia Oceânica – FURG. Rio Grande-RS, 2006. Disponível em <<http://www.semengo.furg.br/2006/20.pdf>>. Acesso em 03 setembro 2013.

LIMA NETO, I. E. **Engenharia Costeira e Portuária**. Universidade Federal do Ceará, 2011. (Apostila).

LÓPEZ-OCHOA, D. M. **Estudo do desgaste erosivo-corrosivo de aços inoxidáveis de alto nitrogênio em meio lamacento**. São Paulo-SP, 2007. 176 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

LOVETT, R. F. **Quantitative measurement of airborne sea-salt in the North Atlantic**. Tellus, v. 30, p. 358-364, 1978.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* **Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 66, n. 1, mar. 2013. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672013000100008&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672013000100008&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em 26 maio 2013.

MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema de corrosão em estruturas de concreto armado.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J. **Custos de Recuperação e Prevenção em Estruturas de Concreto Armado: Uma Análise Comparativa.** IX Encontro Nacional de Tecnologia Construída, 2002.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J. **Efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos.** In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte: IBRACON, 2002, 1 CD-ROM.

METHA, P. K; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto, estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 2008.

MORELLI, F.; LIMA, M. G. **Caracterização do ambiente marinho às estruturas de concreto.** Divisão de Infra-Estrutura Aeronáutica – ITA, São Paulo, 2004

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Tradução de Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

OLIVEIRA, P. C. M. **Avaliação do teor de deposição de íons cloreto na atmosfera da praia de Iracema em Fortaleza/CE.** 2013. 59 f. Monografia – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2013.

PEREIRA, L. F. L. C. CINCOTTO, M. A. **Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: influência do tipo de cimento.** – São Paulo : EPUSP, 2001. 19 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/294)

PIRES, V. D. **Levantamento das incidências patológicas nas edificações do Cabo Verde-Ilha de Santiago-Cidade da Praia.** Niterói, 2007.

PONTES, R. B. **Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife – PE.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, 2006

PORTELLA, C.; CABRAL, A. **Deposição de cloreto em zona marinha pelo método da vela úmida em função do distanciamento ao mar.** In: XII Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción: CONPAT-Colombia, 2013.

RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e seu controle.** São Paulo: Hemus, [1988]. 339p.

RIBEIRO, F. H. M.; AZEVEDO, C. S.; CARASEK, H. **A durabilidade do Concreto Armado em Ambiente Marinho.** World TecNet n. 00047, 1999

ROMANO, F. S. **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do

Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS. 2009.

SAETTA, A. V., SCOTTA, R. V., VITALIANI, R. V. **Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete.** ACI Material Journal, v. 90, n. 5, p. 441-451, 1993.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-005/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p.

SILVA, F. A. S. **Avaliação do teor de íons cloreto no ar atmosférico da praia do futuro em Fortaleza/CE.** 2011. 59 f. Monografia – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2011.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica.** Porto Alegre-RS, 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

TABACNIKS, M. H. **Conceitos básicos da Teoria dos Erros.** Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2003. (Apostila).

TAYLOR, N. J.; WU, J. **Simultaneous Measurements of Spray and Sea Salt.** J. Geophys. Res., Vol. 97, No. C5, pp. 7355-7360, 1992.

TUUTTI, K. **Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel.** PERFORMANCE OF CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENT, ACI SP-65, 1980.

VARELA, K. H. D. **Corrosão das armaduras em Betão Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação nas Edificações de Cabo Verde.** Universidade Jean Piaget de Cabo Verde, 2010.

WANG, X., NGUYEN, M., STEWART, M.G., SYME, M., LEITCH, A. (2010). **Analysis of Climate Change Impacts on the Deterioration of Concrete Infrastructure – Part 1: Mechanisms, Practices, Modelling and Simulations – A review.** Published by CSIRO, Canberra. ISBN 97804310365 8

WARNECK, P. **Chemistry of the natural atmosphere.** Academic Press, Inc. New York, 1988.

## **ANEXO A – SOLUÇÕES PARA MONTAGEM DA VELA ÚMIDA E PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÍONS CLORO SEGUNDO NBR 6211 (ABNT, 2001)**

- 1) Solução 0,05 M (0,05 N) de ácido nítrico: 3 mL de ácido nítrico diluído em água a 1000 mL;
- 2) Água glicerinada: 200 mL de glicerol diluído em água a 1000 mL com adição de 20 gotas de ácido octanóico como fungicida;
- 3) Solução-padrão 0,0125 M (0,025 N) de nitrato de mercúrio: 4,2830 g de nitrato de mercúrio hidratado dissolvidos em 50 mL de água acidificada com 0,5 mL de ácido nítrico. A solução deve ainda ser diluída com água a 1000 mL em balão volumétrico. Caso necessário, a solução final será filtrada e padronizada em relação à solução-padrão de cloreto de sódio.
- 4) Solução-padrão 0,00705 M (0,0141 N) de nitrato de mercúrio: 2,4200 g de nitrato de mercúrio hidratado dissolvidos em 25 mL de água acidificada com 0,25 mL de ácido nítrico. Diluir a solução com a água a 1000 mL em balão volumétrico e filtrar, se necessário, padronizando-a em relação à solução de cloreto de sódio.
- 5) Solução-padrão 0,025 M (0,025 N) de cloreto de sódio: 1,4612 g de cloreto de sódio seco durante 1h a 600°C dissolvidos com água a 1000 mL em balão volumétrico.
- 6) Solução de indicador misto: 0,5 g de difenilcarbazona e 0,05 g de azul-de-bromofenol dissolvidos em 100 mL de etanol a 95%. Esta solução deve ser armazenada em frasco escuro e descartada após seis meses.
- 7) Solução 0,25 M (0,25 N) de hidróxido de sódio: 10 g de hidróxido de sódio dissolvidos com água a 1000 mL.

## **ANEXO B – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÍONS CLORO SEGUNDO A NBR 6211 (ABNT, 2001)**

A seguir mostrar-se-á as etapas estabelecidas pela NBR 6211 (ABNT, 2001) para a determinação do teor de íons cloreto.

- 1) Terminado o tempo de exposição da vela úmida,
- 2) Tomar uma alíquota que não contenha mais que 20 mg de íon cloreto. Anotar o volume da alíquota ( $V_a$ ). Diluir a alíquota com água a 50 mL, se necessário;
- 3) Adicionar de 5 a 10 gotas de indicador misto e agitar o recipiente. Caso, após a adição do indicador, apareça a coloração azul-violeta ou vermelha, adicionar  $\text{HNO}_3$  0,05 M, gota a gota, até mudar a coloração para amarela, e adicionar 1 mL de ácido em excesso. Caso, após a adição do indicador, apareça a coloração amarela ou laranja, adicionar, gota a gota, solução de NaOH 0,25 M, até mudança para a cor azul-violeta. Adicionar então  $\text{HNO}_3$  0,05 M, gota a gota, até que seja obtida coloração amarela, e adicionar 1 mL de ácido em excesso;
- 4) Titular com solução de nitrato mercúrico 0,0125 M até coloração azul-violeta permanente. Anotar o volume de solução gasto, em mililitros (A);
- 5) Efetuar o ensaio em branco, utilizando a mesma solução-padrão de nitrato de mercúrio utilizado para titular a amostra. Anotar o volume de solução gasto, em mililitros (B).

Em nota, a norma NBR 6211 (ABNT, 2001) faz a seguinte ressalva: Se o volume da amostra contiver menos que 2,5 mg de íon cloro, a titulação final tanto da amostra como do branco deverá ser feita utilizando a solução padrão 0,00705 M de nitrato mercúrico, usando microbureta.

## ANEXO C – RESULTADOS MENSAIS DE TEOR DE CLORETOS (MÉTODO DA VELA ÚMIDA)

Quadro 13 – Determinação do teor de íons cloro (05/agosto a 07/setembro de 2013)

05 DE AGOSTO DE 2013 A 07 DE SETEMBRO DE 2013									
Estação	Distância	Vt (mL)	S (m <sup>2</sup> )	Titulação $Hg(NO_3)_2 \cdot H_2O$				t (dias)	Cloreto (mg/m <sup>2</sup> .dia)
				Va (mL)	M	A (mL)	B (mL)		
1	76	910	0,01343	50	0,0125	23,0	1,5	33	783,57
2	500	900	0,01335			9,0			271,93
3	650	970	0,01186			4,5			131,98
4	1000	1000	0,01158			5,5			185,72
5	4700	900	0,01178			1,5			-

Fonte: Próprio autor.

Quadro 14 – Determinação do teor de íons cloro (10/setembro a 09/outubro de 2013)

10 DE SETEMBRO DE 2013 A 09 DE OUTUBRO DE 2013									
Estação	Distância	Vt (mL)	S (m <sup>2</sup> )	Titulação $Hg(NO_3)_2 \cdot H_2O$				t (dias)	Cloreto (mg/m <sup>2</sup> .dia)
				Va (mL)	M	A (mL)	B (mL)		
1	76	900	0,01335	50	0,0125	45,0	4,5	29	1670,93
2	500	890	0,01178			7,0			115,60
3	650	855	0,01414			7,5			111,05
4	1000	900	0,01335			7,0			103,14
5	4700	900	0,01178			4,5			-

Fonte: Próprio autor.

Quadro 15 – Determinação do teor de íons cloro (09/outubro a 06/novembro de 2013)

09 DE OUTUBRO DE 2013 A 06 DE NOVEMBRO DE 2013									
Estação	Distância	Vt (mL)	S (m <sup>2</sup> )	Titulação $Hg(NO_3)_2 \cdot H_2O$				t (dias)	Cloreto (mg/m <sup>2</sup> .dia)
				Va (mL)	M	A (mL)	B (mL)		
1	76	900	0,01335	50	0,0125	46,0	3	28	1837,44
2	500	810	0,01257			6,0			122,58
3	650	800	0,01178			9,0			258,29
4	1000	840	0,01374			6,0			116,23
5	4700	900	0,01257			3,0			-

Fonte: Próprio autor.