

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL

AMARA MUDIÃ CORREIA ALVES

**CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DA PERSPECTIVA DE VIDA ÚTIL DE  
ESTRUTURAS EM CONCRETO FACE AO TEOR DE CLORETO REGISTRADO  
EM MACEIÓ-AL.**

Maceió/AL

2007

Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil  
Área de concentração - Estruturas  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL

Centro de Tecnologia - CTEC  
Departamento de Engenharia Estrutural  
Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil - PPGEC

AMARA MUDIÃ CORREIA ALVES

**CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DA PERSPECTIVA DE VIDA ÚTIL DE  
ESTRUTURAS EM CONCRETO FACE AO TEOR DE CLORETO REGISTRADO  
EM MACEIÓ-AL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, sob a orientação do prof. dr. Flávio Barboza de Lima.

Maceió/AL  
2007

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Renata Barros Domingos**

A474c      Alves, Amara Midiã Correia.  
              Contribuição á análise da perspectiva de vida útil de estruturas em concreto face ao teor de cloreto registrado em Maceió - AL/ Amara Midiã Correia Alves. – Maceió, 2007.  
**xiv, 118f. : il.**

Orientador: Flávio Barboza de Lima.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2007.

**Bibliografia: f. 130-138.**

1. Patologia de construção. 2 Concreto – Estrutura – Vida útil.  
3. Concreto – Estrutura - Análise. I. Título.

CDU: 624.012.3/.4:69.059.4



**Universidade Federal de Alagoas – UFAL**  
**Centro de Tecnologia – CTEC**  
**Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC**  
Av. Lourival de Melo Mota, S/N  
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas  
Tel/Fax: (82) 3214-1276  
E-mail: ppgec@ctec.ufal.br  
Homepage: <http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec>



Membros da Banca de Exame da Dissertação de Mestrado do Engenheiro Civil **AMARA MUDIÁ CORREIA ALVES**, intitulada “CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DA PERSPECTIVA DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS EM CONCRETO FACE AO TEOR DE CLORETO REGISTRADO EM MACEIÓ-AL”, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas, no dia 01 do mês de novembro do ano de 2007, às 14 horas, na Sala de Aula do PPGEC/CTEC/UFAL.

**MEMBROS DA BANCA:**

**Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima**  
Orientador – CTEC/UFAL  
CPF: 304.363.624-49

**Prof. Dr. José Celso da Cunha**  
CEFET-MG  
CPF: 135.060.806-87

**Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes**  
CTEC/UFAL  
CPF: 468.814.504-78

*A Deus, cuja misericórdia jamais será medida, e a meu filho Cainã.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, para quem tudo é possível;

Ao meu filho de dois anos, meus pais e irmãos pelo apoio incondicional, ao meu marido pelas vezes que precisou ser mãe;

Ao meu orientador prof. dr. Flávio Barboza de Lima pela confiança depositada, por sempre ter sido um amigo, sem o qual não teria conseguido;

Aos meus professores, que sempre transmitiram conhecimento, na pessoa do prof. dr. Eduardo Nobre Lages;

A outros professores que sem ser do corpo docente deste mestrado, me auxiliaram tanto na pesquisa quanto nos ensaios: profa. Seleude Wanderley, prof. Josealdo Tonholo, profa. Silvia Uchoa, prof. Antônio Carlos Laranjeiras, Profa. Sandra Cartaxo, Prof. Ricardo Queiroz;

A Margarida Bezerra, técnica de laboratório, a Francisco Fábio de Araújo e José Machado de A. Júnior na exposição dos experimentos;

A meus amigos, Edja Laurindo da Silva e Alexandre Cunha Machado, pela contribuição dada;

A Cleonábula Neves pela amizade;

A meus colegas de curso, por tantas vezes que precisamos estudar juntos, pelo apoio e acolhimento que sempre deram;

A meus colegas de trabalho, pela compreensão;

A tantos outros que apoiaram e incentivaram para a realização desse trabalho.

## RESUMO

A ação do cloreto nas estruturas de concreto em cidades litorâneas vem sendo foco de pesquisa dada sua importância no contexto da garantia de durabilidade. Tem sido estudado tanto os mecanismos de produção do íon cloreto, sua deposição sobre a superfície do concreto e conseqüentemente sua ação patológica. A partir daí, diversas normas indicam medidas de proteção a serem especificadas pelos projetistas, minimizando a percolação desse íon através da camada de revestimento do concreto. Apesar da atual norma brasileira para projeto de estrutura em concreto<sup>5</sup> indicar classes de agressividade ambiental às estruturas de concreto em região costeira, não correlaciona a nenhum teor ou taxa de deposição de cloreto, deixando clara a existência de uma lacuna normativa. Este trabalho se propõe a efetuar uma pesquisa bibliográfica quanto à produção do íon cloreto, seus mecanismos de transporte e deposição na superfície das estruturas de concreto; um estudo experimental de campo e laboratorial, captando o cloreto em pontos dispostos na cidade de Maceió, desde a orla até os tabuleiros<sup>6</sup>. Para quantificar o teor do íon utilizou-se o método de Mohr<sup>7</sup>. Observou-se um aumento nas taxas de deposição de cloreto em pontos situados à beira mar, e uma diminuída à medida que adentra ao continente, tendo sido detectado o cloreto além de 14 km da costa. Através desses resultados foi avaliada a perspectiva de vida útil das estruturas de concreto, face ao ataque por cloretos, para as estruturas situadas em cada ponto de coleta, utilizando-se diversas especificações normativas<sup>8</sup>. Os resultados mostram que obtem-se um significativo ganho de vida útil utilizando-se os critérios da norma americana para estruturas situadas na zona de respingo de maré, enquanto que a norma brasileira é a que apresenta menor projeção dessa vida útil em regiões marinhas.

Palavras-chave: cloreto, vida útil, durabilidade.

---

<sup>5</sup> NBR 6118 (2003): *projeto e execução de obras de concreto armado; procedimento*, revisada em 2004.

<sup>6</sup> Coleta de acordo com a NBR 6211 (2001).

<sup>7</sup> Método que determina a concentração do íon cloreto numa solução, através da titulação com nitrato de prata.

<sup>8</sup> NBR 6118 (2003), ACI 318(2005), ACI 357R-84 (1997) e o boletim n° 3 do FIB (1999).

## ABSTRACT

The action of chlorine in concrete structures of sea coastal cities has been the focus of research data due to its importance in the context of durability guarantee. It has been studied the production mechanisms of the ion chlorine, its deposition on the concrete surface and, eventually, its pathological action. From these data, several norms indicate protection measures to be specified by the projectors, minimizing the percolation of this ion through the cover layer of the concrete. In spite of the present Brazilian norm of planning concrete structures<sup>9</sup> indicates classes of environmental aggressiveness to the concrete structures in coast areas, it does not correlate any content or deposition rate of chlorine, making clear the existence of a normative gap. This work exposes the fulfillment of bibliographical research related to the production of the ion chlorine, its transportation and deposition mechanisms on the surface of concrete structures; an experimental field and laboratorial study catching the chlorine at points located in the city of Maceió, from the shore to the coastal table lowlands<sup>10</sup>. To quantify the ion content, the Mohr's method<sup>11</sup> was used. It could be seen an increase in the levels of chlorine deposition in places situated close to shore and a decrease when going further into the continent, being the chlorine found 14 km off the coast. From these results, it was evaluated the perspective of useful life of concrete structures located at each point of collecting, making use of several normative specifications<sup>12</sup>. The results show that there was a significant gain of useful life when using the criteria of the American norm for structures located in the splashing tide areas, while the Brazilian norm is that which presents smaller projection of useful life in the sea coast areas.

Key words: chlorine, useful life, durability.

---

<sup>9</sup> Planning and executing concrete structures; procedures, reviewed in 2004

<sup>10</sup> Collecting according to NBR 6211 (2001).

<sup>11</sup> Method that determines the chloride ion concentration of a solution by titration with silver nitrate.

<sup>12</sup> NBR 6118 (2003), ACI 318(2005), ACI 357R-84 (1997) e o boletim n° 3 do FIB (1999).

## Lista de Figuras

Figura 1	Mapa da costa brasileira ..... Fonte: <a href="http://baixaki.ig.com.br/download/Google-Earth-em-Portugues.htm">http://baixaki.ig.com.br/download/Google-Earth-em-Portugues.htm</a> , acessado em: 16/05/2007.	19
Figura 2	Formato para projeto de durabilidade ..... Fonte: Boletim nº 238 do CEB (1997), p. 23.	24
Figura 3	Relação entre durabilidade e desempenho ..... Fonte: Boletim nº 3 do FIB (1999), p.4.	26
Figura 4	Fluxograma representativo de um processo com abordagem determinística..... Fonte: Adaptado de Helene (2007).	33
Figura 5	Fluxograma representativo de um processo através de uma abordagem probabilística ..... Fonte: Andrade (2005), p. 941.	33
Figura 6	Causas Físicas da deterioração do concreto..... Fonte: Metha & Monteiro (1994), p. 128.	36
Figura 7	Causas Químicas da deterioração do concreto..... Fonte: Metha & Monteiro (1994), p. 150.	36
Figura 8	Formas de ocorrência de íons-cloreto na estrutura do concreto.... Fonte: Cascudo (1997), p. 46.	40
Figura 9	Representação esquemática da corrosão eletroquímica na presença de cloretos ..... Fonte: Neville (1997), p. 557.	41
Figura 10	Corrosão por pite ..... Fonte: Andrade (1992).	43
Figura 11	Corrosão em pilar de concreto por ataque de cloretos..... Fonte: Helene (1988), p. 23.	43
Figura 12	Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e umidade do ambiente..... Fonte: Andrade (1992), p. 27.	45
Figura 13	Mapa do relevo de Maceió – AL ..... Fonte: Adaptado do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1985).	74

Figura 14	Malha discretizada sobre o mapa de bairros de Maceió com locação dos pontos de coleta cujos experimentos foram ensaiados .....	77
	Fonte: Adaptado do Centro de Geoprocessamento da Prefeitura Municipal de Maceió (1998).	
Figura 15	Vela úmida .....	79
	Fonte: NBR 6211 (2001), p. 5.	
Figura 16	Vela úmida montada e protegida para exposição .....	81
Figura 17	Suporte da vela úmida .....	82
	Fonte: NBR 6211 (2001), p. 6.	
Figura 18	Suporte da Vela úmida .....	83
Figura 19	Vela úmida sendo geo-referenciada no campo .....	84
Figura 20	Isolinhas de taxa de deposição ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{d}$ ) para a cidade de Maceió .....	96
Figura 21	Isolinhas do teor de cloreto ( $\text{mg}/\text{L}$ ) para a cidade de Maceió.....	99

## Lista de Gráficos

Gráfico 1	Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras..... Fonte: Dep. de Engenharia de Construção Civil (1995?), p. 1.	31
Gráfico 2	Representação gráfica da relação existente entre o índice de confiabilidade ( $\beta$ ), a probabilidade de falha ( $P_f$ ) e a penetração de cloretos para o interior do concreto..... Fone: Andrade (2005), p. 945.	39
Gráfico 3	Modelo de vida útil proposto..... Fonte: Tutti & Cascudo (1998).	40
Gráfico 4	Perfil típico de concentração dos cloretos ao longo do cobrimento, em um concreto contaminado por impregnação externa de soluções ricas em cloretos ..... Fonte: Cascudo (1997), p. 45.	44
Gráfico 5	Diagrama de Pourbaix para o ferro em solução de cloretos, em concentração de 10 mol/L ..... Fonte: Schiessl (1988) apud Silva (1995), p. 77.	51
Gráfico 6	Tempo para inicio da corrosão devido a carbonatação ou penetração de cloreto, dependendo do real cobrimento do concreto na medida que atinge o final da estrutura. O exemplo corresponde a concreto não fissurado de alta qualidade ..... Fonte: Boletim nº 3 do FIB (1997), p. 19.	51
Gráfico 7	Influência do fator água-cimento no coeficiente de permeabilidade dos concretos ..... Fonte: Rostam (1991) apud Souza & Ripper (1998), p. 36.	53
Gráfico 8	Efeito da relação água-cimento na penetração de cloretos..... Fonte: Jaergemann (1990) apud Figueiredo (2005), p. 847.	54
Gráfico 9	Valores de espessura de cobrimento mínimo de armaduras, conforme várias normas ..... Fonte: Andrade (1992), p. 40.	61
Gráfico 10	Variação da produção de aerossóis de sal pelo oceano em função da umidade relativa: velocidade do vento a 7,5 m/s; 800 mm/ano de precipitação ..... Fonte: Cole (2003), p. 133.	66
Gráfico 11	Variação da geração de aerossol marinho em função da velocidade do vento e distância da costa: 2m de altura; 0,5 m do solo aproximadamente..... Fonte: Cole et al. (2003), No 2. p. 132.	67

Gráfico 12	Comportamento da salinidade em função da distância ..... Fonte: Morcillo et al (1998) apud Meira & Padaratz (2004), p.3.	68
Gráfico 13	Salinidade de sais influenciada por aerossóis produzidos no oceano. Fonte: Cole et al. (2003), No 4. p. 265.	69
Gráfico 14	Perfil de concentração de cloretos em função da distância em relação ao mar ..... Fonte: Meira & Padaratz (2002), pg. 5.	70
Gráfico 15	Taxa de deposição de cloretos em Maceió .....	93
Gráfico 16	Taxa de deposição de cloretos x distância do mar em Maceió em Maceió.....	94
Gráfico 17	Teores limites de cloreto em Maceió .....	95
Gráfico 18	Perspectiva de vida útil para pilares e vigas em concreto armado projetados em Maceió de acordo com recomendações normativas da NBR 6118 (2003) .....	100
Gráfico 19	Perspectiva de vida útil para lajes em concreto armado projetadas em Maceió de acordo com recomendações normativas da NBR 6118 (2003) .....	101
Gráfico 20	Perspectiva de vida útil para estruturas em concreto protendido projetadas em Maceió de acordo com recomendações normativas da NBR 6118 (2003) .....	101
Gráfico 21	Perspectiva de vida útil para estruturas em concreto projetadas em Maceió com fator água/cimento de 0,55 e cobrimento variável .....	102
Gráfico 22	Perspectiva de vida útil para estruturas em concreto projetadas em Maceió com cobrimento de 3,0 cm e fator água/cimento variável ....	103
Gráfico 23	Perspectiva de vida útil, face ao ataque por cloretos, para estruturas em concreto armado situadas até 130 m de distância do mar projetadas de acordo com recomendações normativas diversas para a cidade de Maceió.....	106
Gráfico 24	Perspectiva de vida útil, face ao ataque por cloretos, para estruturas em concreto armado situadas a mais de 130m de distância do mar de acordo com recomendações normativas para a cidade de Maceió .....	107

## Lista de Tabelas

Tabela 1	Origem das falhas de serviços em edifícios (índices em %). Meseguer (1991) apud Couto & Prizskulnik (2002).	29
Tabela 2	Falhas em estruturas de concreto armado em regiões do Brasil ..... Fonte: Couto & Prizskulnik (2002).	30
Tabela 3	Teor limite de cloreto para diversas normas ..... Fonte: Figueiredo (2005), p. 844.	44
Tabela 4	Critérios de avaliação da permeabilidade à água do concreto..... Fonte: Cascudo (1998), p. 74.	53
Tabela 5	Correspondência entre classe de agressividade e fator água/cimento..... Fonte: Adaptado da NBR 6117:2003 (2004), p. 18.	55
Tabela 6	Fator água/cimento para condições especiais de exposição – ACI . Fonte: ACI 318 (2005), p. 52.	55
Tabela 7	Recomendações limites para o fator água cimento do concreto – FIB ..... Fonte: Adaptado do boletim nº 3 do FIB (1999), vol. 3, p. 24 a 37.	56
Tabela 8	Correspondência entre classe de agressividade e resistência do concreto ..... Fonte: Adaptado da NBR 6117 (2003), p. 18.	57
Tabela 9	Requisitos de resistência para condições especiais de exposição do concreto – ACI ..... Fonte: ACI 318 (2005), p. 52.	58
Tabela 10	Recomendações limites para resistência do concreto – FIB ..... Fonte: Adaptado do boletim nº 3 do FIB (1999), vol. 3, p. 24 a 37.	59
Tabela 11	Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm ..... Fonte: NBR 6118 (2003), p. 16.	62
Tabela 12	Recomendações de cobrimento para estruturas de concreto armado – ACI ..... Fonte: Adaptado do ACI 318 (2005), p. 83-84 e ACI 357R-84 (1997), p. 5.	63
Tabela 13	Tolerância para cobrimento em estruturas de concreto armado – ACI ..... Fonte: Adaptado do ACI 318 (2005), p. 81.	64

Tabela 14	Recomendações de cobrimento para estruturas de concreto armado – FIB .....	64
	Adaptado do boletim n° 3 do FIB (1999), vol. 3, p. 24 a 30 e vol. 1 p. 278.	
Tabela 15	Deposição seca de cloreto na vela úmida (período de 15/08/2000 a 23/01/2001) .....	70
	Fonte: COSTA (2001) p. 71.	
Tabela 16	Faixas de agressividade com base na vida útil das estruturas.....	71
	Fonte: Meira (2004).	
Tabela 17	Dados meteorológicos médios mensais em Maceió-AL.....	76
	Fonte: Estação Meteorológica do CECA/UFAL (2005).	
Tabela 18	Localização dos pontos de coleta do íon cloreto em Maceió-AL .....	86
Tabela 19	Teores de cloreto em Maceió-AL .....	90
Tabela 20	Teores limites cloreto em Maceió.....	95
Tabela 21	Teor de cloreto em Maceió x ponto GPS .....	98
Tabela 22	Recomendações normativas - espessuras de cobrimento para estruturas em concreto armado frente à ação de cloretos .....	104
	Fonte: Adaptado da NBR 6118 (2003); ACI 318 (2005) e ACI 357R-84 (1997); Boletim n° (1999).	
Tabela 23	Recomendações normativas – fator água/cimento para estruturas em concreto armado frente à ação de cloretos .....	104
	Fonte: Adaptado da NBR 6118 (2003); ACI 318 (2005) e ACI 357R-84 (1997); Boletim n° (1999).	
Tabela 24	Recomendações normativas – resistência para estruturas em concreto armado frente à ação de cloretos .....	105
	Fonte: Adaptado da NBR 6118 (2003); ACI 318 (2005) e ACI 357R-84 (1997); Boletim n° (1999).	

## Quadro

Quadro 1	Classes de agressividade ambiental.....	28
	Fonte: NBR 6118(2003). p 14.	

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute (Norma Americana)
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAEL	Norma Francesa
BS 8110	Norma Inglesa (British Standards - Inglaterra. Structural use of concrete)
Bureau	Règle Technique de conception et Calcul des Ouvrages et Construction en Béton Armé Suivant la Méthode des Etats Limites. AFNOR – Association Française de Normalization (França)
CEB	Comite Euro-Internacional du Béton
DIN	Deutsches Institut für Normung (Alemanha). Beton und Stahlbeton bemessung und ausführung (Norma Alemã)
EH	Norma Espanhola (Instrucción para el Proyecto y la Ejecución de Obras de Hormigón en Masa o Armado)
Eurocódigo	Comunidade Económica Europeia
FIB	International Federation for Structural Concrete
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISSO	International Organization for Standardization
JASS	Japan Architectural Society (Japão). (Norma Japonesa)
JCSS	JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY
NBR	Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (Norma Brasileira)
PBQP-H	Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat
pr EN 206-CEN	Performance, production, mise en oeuvre et critères de conformité
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction
SEAGRA	Sociedade de Engenheiros Agrônomos de Alagoas
SEDU	Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

## LISTA DE SÍMBOLOS

atm	Pressão atmosférica
AgNO <sub>3</sub>	Nitrato de prata
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	Cromato de potássio
Ag	Prata
Ag <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	Cromato de prata
NaCl	Cloreto de sódio
°C	Graus Celsius
β	Índice de confiabilidade
P <sub>f</sub>	Probabilidade de falha
t	Tempo
d	Dia
e	Espessura
Fe	Ferro
Cl	Cloro
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico
m/s	Metros por segundo
pH	Potencial de hidrogênio
a/c	Água/cimento
m <sup>2</sup>	Metros quadrados
mg	Miligrama
ml	Mililitro
m	Metro
cm	Centímetros
mm	Milímetro
mg/L	Miligrama por litro
mol/L	Mol por litro
V	Wolt
N	Normal
V <sub>a</sub>	Volume da solução padrão de nitrato de prata gasto na titulação da amostra, em mililitros.
V <sub>b</sub>	Volume da solução de nitrato de prata gasto na titulação da água destilada (branco), em mililitros.
V <sub>am</sub>	Volume da amostra, em mililitros.
V <sub>T</sub>	Volume total da amostra, em litros.
A	Área de exposição (da gaze), em metros quadrados.
Cl <sub>cc</sub>	Teor de cloretos no concreto da camada superficial do componente
C <sub>cr</sub>	Concentração crítica de cloretos nas proximidades da armadura
C <sub>s</sub>	Concentração de cloretos (constante) na superfície de concreto
x	Espessura de cobrimento às armaduras
D	Coefficiente de difusão de cloretos (constante) (cm <sup>2</sup> /ano)
erf	Função complementar de erro de Gauss

## SUMÁRIO

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Lista de Figuras .....	vi
Lista de Gráficos .....	viii
Lista de Tabelas .....	x
Lista de Abreviaturas .....	xii
Lista de Símbolos .....	xiv
<b>CAPÍTULO I</b>	
INTRODUÇÃO .....	17
1.1 Objetivos .....	20
1.2 Apresentação do Trabalho .....	21
<b>CAPÍTULO II</b>	
DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO .....	22
2.1 Durabilidade .....	22
2.1.2 Diretrizes para projetar estruturas duráveis.....	23
2.2 Vida útil .....	30
2.2.1 Agentes agressivos .....	35
<b>CAPÍTULO III</b>	
AÇÃO DA PRESENÇA DE CLORETOS.....	38
3.1 O cloreto como agente agressor.....	38
3.2 Modelos para projeção de vida útil a partir da ação de cloretos .....	46

**CAPÍTULO IV**

CRITÉRIO DE PROJETO VISANDO A DURABILIDADE: QUALIDADE DO CONCRETO .....	48
4.1 Sistema simples de barreira .....	49
4.1.1 Relação água/cimento da camada de cobrimento .....	52
4.1.2 Resistência da camada de cobrimento .....	57
4.1.3 Espessura do cobrimento do concreto .....	60
4.2 Teores de cloretos em cidades litorâneas .....	65

**CAPÍTULO V**

EXPERIMENTAÇÃO .....	73
5.1 Localização dos pontos de coleta .....	73
5.2 Método de coleta .....	78
5.3 Método de determinação do teor de cloreto .....	85
5.4 Resultados Obtidos .....	89

**CAPÍTULO VI**

ANÁLISE DOS RESULTADOS E PREVISÃO DE VIDA ÚTIL .....	92
6.1 Análise dos Resultados .....	92
6.2 Perspectiva de vida útil .....	97

**CAPÍTULO VII**

CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	109
7.1 Sugestões de continuidade .....	112

**CAPÍTULO VIII**

REFERÊNCIAS .....	111
-------------------	-----

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

O concreto armado e protendido, utilizados com freqüência nas obras de engenharia, tanto nos elementos da superestrutura como da subestrutura, estão expostos à agressividade ambiental que ao longo do tempo deteriora tanto o concreto como a armadura, podendo levar ao colapso da peça. As normas, visando garantir a vida útil especificada, estabelecem tanto diretrizes quanto critérios de projeto que visam à durabilidade.

Vários são os agentes agressores existentes no meio ambiente que circunda as estruturas de concreto podendo desencadear o aparecimento de diversas patologias, as quais apresentam uma evolução exponencial em função do tempo de exposição, acarretando proporcionalmente uma diminuição na vida útil que deveria ser especificada em projeto, principalmente em regiões litorâneas pela presença do cloreto somado aos demais agentes patológicos.

Nas diretrizes para durabilidade a NBR 6118 (2003): *projeto e execução de obras de concreto armado; procedimento*<sup>13</sup>, apresenta uma classificação das classes de agressividade ambiental, contudo não a correlaciona a nenhum agente externo, nem mesmo ao teor de cloreto, quanto a esse recomenda apenas que seja verificado se o concreto estará situado em zona de respingos de maré ou em zona marinha, recebendo aerossóis de sal transportado pelo ar. Porém, o regimento normativo exige que as estruturas de concreto conservem suas características originais durante o período correspondente a sua vida útil, considerando ainda como mecanismo preponderante de deterioração da armadura a despassivação por elevado teor de íon cloreto.

---

<sup>13</sup> A NBR 6118 (2003) utilizada neste trabalho foi revisada em 2004.

Diante do exposto identifica-se claramente uma lacuna normativa, cabe ao projetista estrutural classificar a agressividade ambiental a qual sua estrutura estará exposta, face à presença de cloretos, sem contudo ter subsídios suficientes. Numa cidade litorânea, deve-se ter um referencial limítrofe entre ambiente marinho e zona de respingo de maré, como também um divisor a ser utilizado como delimitador da zona urbana, cujo parâmetro ideal é o teor de cloreto existente na atmosfera. Sabe-se que o cloreto proveniente do mar 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.

Dando continuidade às recomendações normativas, destacando-se: NBR 6118 (2003), boletim nº 3 do FIB (1999)<sup>14</sup>, ACI 318 (2005)<sup>15</sup> e ACI 357R-84 (1997)<sup>16</sup>, todos focam na qualidade do concreto como critério de projeto que visa à durabilidade das estruturas, especificando a espessura da camada de cobrimento, o fator água cimento e a resistência do concreto face à agressividade ambiental a qual a estrutura estará exposta.

É necessário estudar a influência da atmosfera local nas estruturas de concreto, partindo da ação de agressores como os sulfatos que originam reações expansivas no concreto; o CO<sub>2</sub> agente principal da carbonatação na camada superficial do concreto; os cloretos responsáveis por acelerar o processo de corrosão do aço, etc. A questão é identificar para a região em estudo, o fator mais relevante em função da concentração deste agente e seu potencial de dano a causar nas estruturas.

O levantamento do teor de cloreto como referencia para a classe de agressividade ambiental em cidades litorâneas justifica-se, pois possibilitará que os projetistas estruturais, consultores em patologia e engenheiros em geral tenham melhores condições para especificar a espessura da camada de cobrimento, o fator água cimento e a resistência característica adequada para o concreto, de acordo com a localização da estrutura e perspectiva de vida útil desejada.

---

<sup>14</sup> *Structural concrete: textbook on behaviour, design and performance updated knowledge of the CEB/FIP model code 1990.*

<sup>15</sup> *Building code requirements for structural concrete.*

<sup>16</sup> *Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures.*

Maceió, por ser uma cidade com aproximadamente 510 km<sup>2</sup> e 903 mil habitantes<sup>17</sup>, contendo raras indústrias não apresenta produção potencial de CO<sub>2</sub>, nem de sulfatos porém, poderá ser identificado um alto teor de agressividade em suas estruturas de concreto oriundos do ataque por cloreto. É uma cidade litorânea localizada no nordeste brasileiro, na costa do continente americano, banhada por águas, de um lado o Atlântico do outro a lagoa Mundaú cuja água salobra proveniente do mar serve como meio de transporte levando o íon cloreto para as regiões internas da cidade. O oceano apresenta batimetrias próximas à praia na ordem de 6000 m, bem mais que outras regiões da costa brasileira, Figura 1, indica talvez uma alta produção de cloreto em sua massa d'água.

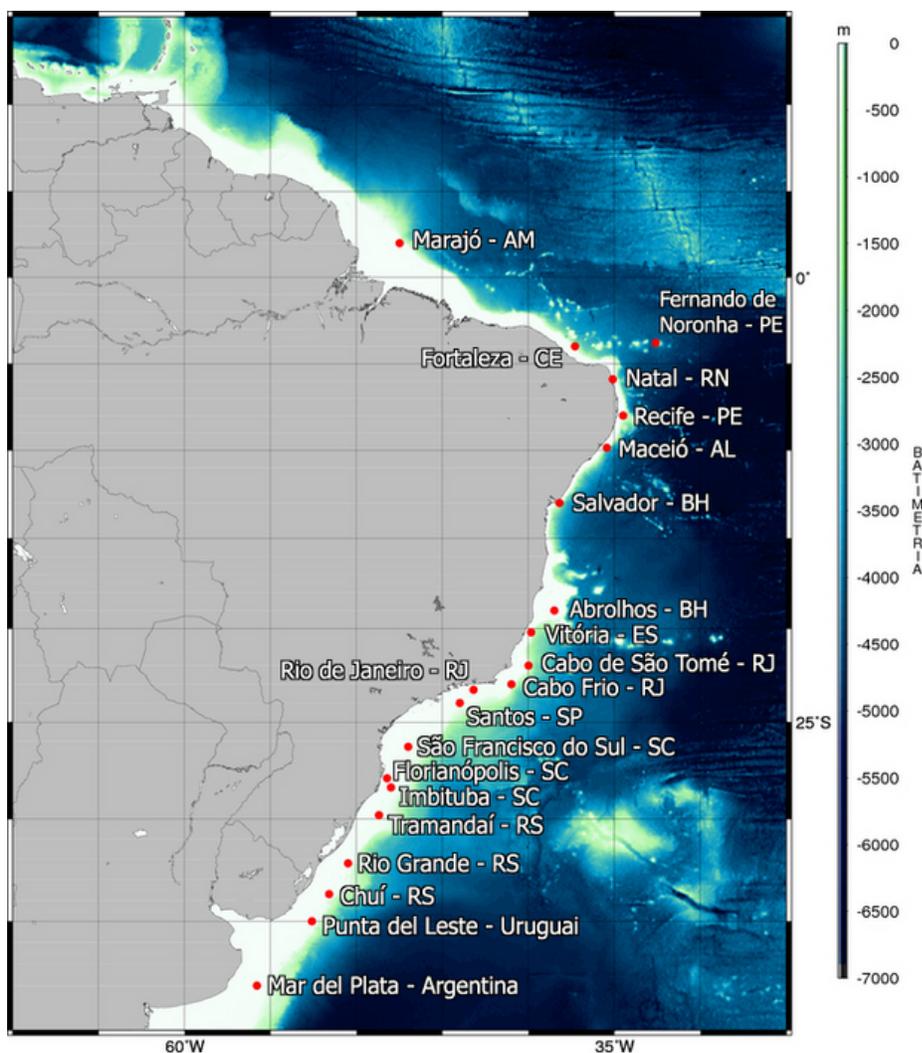


Figura 1 – Mapa da costa brasileira.

Fonte: <http://baixaki.ig.com.br/download/Google-Earth-em-Portugues.htm>, acessado em: 16/05/2007.

<sup>17</sup> Fonte: Instituto Arnon de Mello (2006), p. 387.

A importância desse estudo se deve a sua contribuição na elaboração de projetos de estruturas duráveis, levando-se em conta que os problemas patológicos crescem cumulativamente e o custo de recuperação varia em função do tempo de exposição da estrutura. Optou-se em quantificar o teor de cloreto existente em diversas regiões da cidade de Maceió e verificar a perspectiva de vida útil para estruturas em concreto dispostas no entorno dos pontos de medição.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho objetiva analisar as diretrizes para durabilidade e perspectiva de vida útil de estruturas em concreto, focando o mecanismo preponderante de deterioração por cloreto, considerando as condições de exposição da cidade de Maceió, contribuindo com o estabelecimento de critérios que visam a garantir a vida útil especificada em projeto.

Apresentando-se como objetivos específicos:

- Estudar a ação do íon cloreto nas estruturas de concreto, situadas em ambiente costeiro, e sua área de atuação;
- Analisar medidas de proteção normalizada, quanto à agressividade por cloretos;
- Estudar a ação do íon cloreto nas estruturas de concreto situadas em ambiente costeiro e sua área de atuação;
- Medir o teor de cloreto existente na atmosfera em diversos pontos da cidade de Maceió-AL;
- Verificar a perspectiva de vida útil para estruturas em concreto situadas em diversas regiões de Maceió, face o ataque por cloreto existente na atmosfera, de acordo com especificações normativas;

## 1.2 Apresentação do Trabalho

Esta dissertação foi estruturada em seis capítulos, conforme segue:

Capítulo I: caráter introdutório, contém justificativa e os objetivos do trabalho, além de apresentar sua estrutura;

Capítulo II: versa sobre aspectos gerais de durabilidade e diretrizes para projetar estruturas duráveis, verificando os agentes agressivos.

Capítulo III: analisa a ação do íon cloreto no concreto armado e apresenta modelos para projeção de vida útil para estruturas situadas ao longo do litoral.

Capítulo IV: estuda o critério de projeto visando à durabilidade através do sistema simples de barreira focado na qualidade do concreto segundo recomendações da NBR 6118 (2003), ACI 318 (2005), ACI 357R-84 (1997) e boletim n° 3 do FIB (1999), quanto às especificações de cobrimento e tolerâncias possíveis, apresentando também estudos quanto aos teores de cloretos em cidades costeiras;

Capítulo V: demonstra a experimentação que foi desenvolvida, descrevendo a metodologia e os procedimentos utilizados para obter o cloreto na atmosfera local através do método de ensaio da vela úmida, apresentando os resultados obtidos;

Capítulo VI: analisa os resultados e verifica a perspectiva de vida útil para estruturas de concreto em diversas regiões de Maceió-AL;

Capítulo VII: são feitas as considerações finais face os estudos realizados e recomendam-se sugestões de continuidade e aprofundamento do tema.

## **CAPÍTULO II**

### **DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Nos últimos anos as manifestações patológicas, em especial as oriundas do ataque por cloretos nas estruturas de concreto armado, têm sido foco de diversas pesquisas no Brasil e no mundo devido a crescente preocupação com a segurança das estruturas e os custos com recuperação, sendo a durabilidade e vida útil desses elementos estruturais postos em xeque e recomendado, ou por não dizer exigido, que mecanismos de proteção sejam analisados desde a concepção do projeto estrutural.

#### **2.1 Durabilidade**

Durabilidade, algo que todos almejam quando projetam e executam estruturas de concreto armado, é definida por Metha (1994) como a capacidade que o concreto tem de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

O concreto armado, utilizado como material estrutural há cerca de 150 anos, tem apresentado deterioração prematura mesmo seguindo os requisitos de durabilidade dos códigos normativos, tornando-os questionáveis. Verifica-se que a vida útil especificada em projeto não é atingida, a agressividade ambiental se sobrepõe aos mecanismos de proteção utilizados.

Segundo o boletim n° 3 do FIB (1999), a durabilidade de uma estrutura significa sua resistência contra a ação do meio ambiente que a circunda, sua perda é notável quando um elemento estrutural entra em colapso.

### 2.1.2 Diretrizes para projetar estruturas duráveis

Alerta Isaia (2005), é necessário que os projetistas estruturais agreguem conhecimentos de concepção, dimensionamento e análise estrutural atrelados ao conhecimento de durabilidade e tecnologia do concreto para conceber estruturas duráveis.

Portanto, o projetista deve recorrer a estudos quanto à agressividade ambiental a qual a estrutura estará exposta e utilizar mecanismos, materiais e disposições construtivas que retardem ao máximo a necessidade de intervenções, garantindo assim a durabilidade da estrutura que projeta.

A norma brasileira inclui a durabilidade no rol de requisitos mínimos a serem atingidos pelas estruturas de concreto:

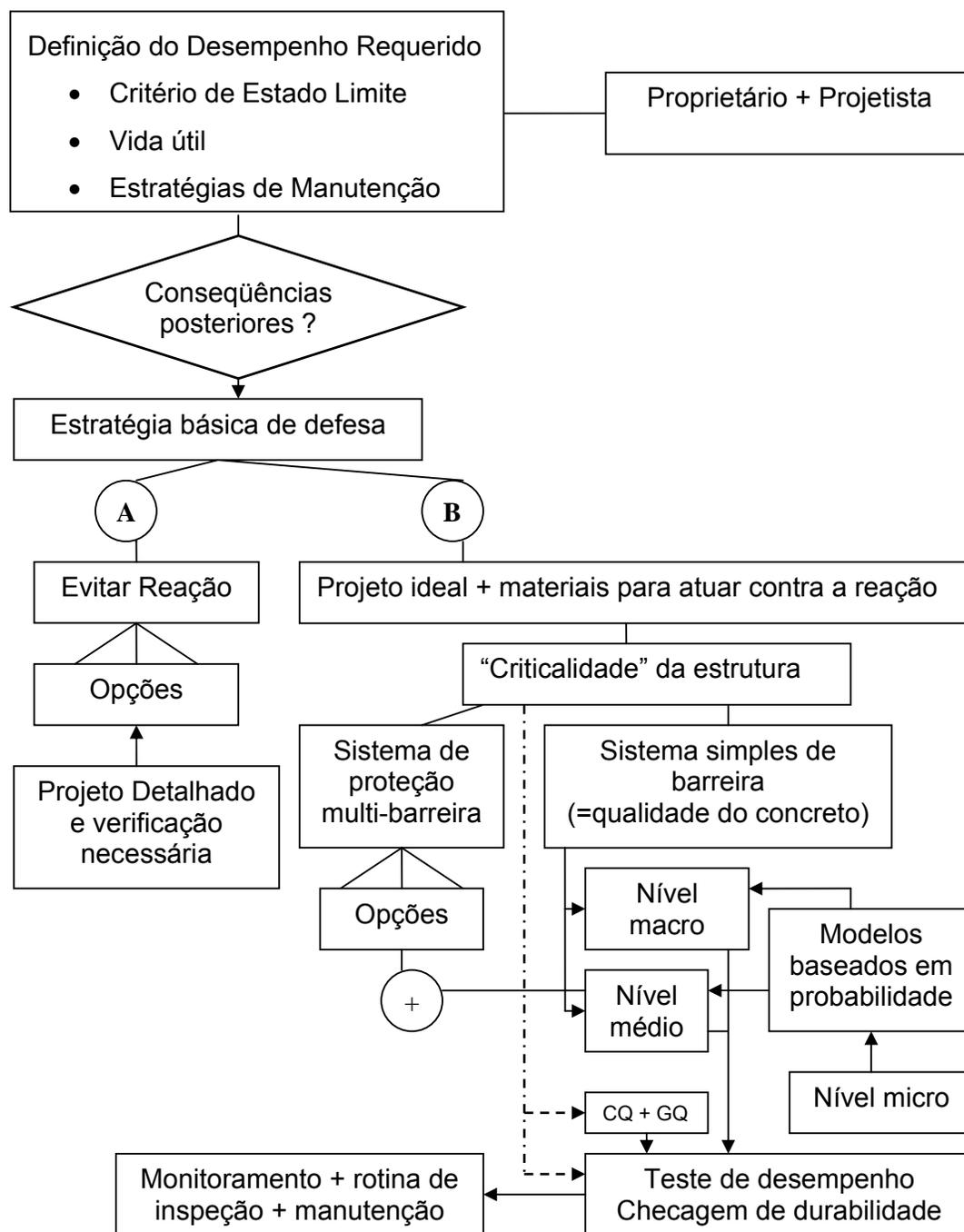
Os requisitos mínimos de qualidade de uma estrutura de concreto: capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade, devem ser atendidos durante a construção e serviço e os requisitos adicionais devem ser estabelecidos junto ao autor do projeto estrutural e o contratante. NBR 6118 (2003), p. 13.

Para que o projetista estrutural atenda as recomendações normativas e contratuais, o boletim nº 238 do CEB (1997), recomenda de acordo com a Figura 2, a forma ideal de confeccionar um projeto estrutural focado na durabilidade, cujas etapas para elaboração de um projeto estrutural estão bem mais complexas, expectativa vida útil e estratégias de manutenção são definidas na concepção do projeto pelo proprietário e projetista, sistemas de proteção são adotados, o nível de projeto mais adequado é escolhido, a estrutura passa pelas etapas de monitoramento, rotina de inspeção e manutenção durante sua vida útil.

O projetista é além de tudo um consultor para especificar, monitorar e analisar as variáveis, que vão desde classificação ambiental, dimensionamento e detalhamento do projeto, métodos construtivos, dentre outros, verificando o controle de qualidade e sua garantia, validando a estrutura através do teste de desempenho e checagem de durabilidade.

Os mecanismos de deterioração existentes são de alta complexidade logo, os projetos devem ser modelados de forma que atenda tanto as condições de

carregamento e deformação quanto às agressividades ambientais, os elementos construtivos e os materiais especificados, em especial o concreto.



Nota: QC = controle de qualidade; GQ = garantia de qualidade

Figura 2 - Formato para projeto de durabilidade

Fonte: Boletim nº 238 do CEB (1997), p. 23.

Para cobrir todas as especificidades descritas, o boletim nº 238 do CEB (1997), recomenda que o projeto focado na durabilidade utilize sistemas de proteção

simples ou multi-barreira sendo desenvolvido em um dos três níveis de modelagem existentes:

- Projeto de Nível Macro: é o nível onde a engenharia estrutural é atualmente empregada, cujos requisitos de dimensionamento são: utilização de tabelas, gráficos ou softwares, sem utilizar fórmulas descrevendo o mecanismo de degradação. Não há verificação nem informação da expectativa de vida útil.
- Projeto de Nível Médio: além do descrito no nível macro, o projetista descreve os processos de deterioração da estrutura e a ação do meio ambiente local na qualidade do concreto, utilizando métodos probabilísticos ou determinísticos referentes à engenharia de materiais.
- Projeto de Nível Micro: o projetista aprofunda suas investigações para determinar a vida útil da estrutura, utiliza modelos para verificar a degradação do material e as ações do meio ambiente, dimensionando a durabilidade da estrutura numa base determinística, descreve a interação do meio ambiente com o concreto, principalmente em sua superfície, e a influência do fator água/cimento, analisa a penetração da carbonatação no concreto e a taxa de corrosão da armadura, juntamente com a influência da temperatura e umidade relativa.

Os modelos e procedimentos para verificação de vida útil podem ser utilizados tanto em projetos de novas estruturas como em verificação da vida em serviço residual de estruturas existentes.

Há várias discussões, tanto no Brasil como em diversos países, grupos estudam a durabilidade das estruturas, desde sua concepção até o fim de sua vida útil em serviço, destacando-se o CEB, hoje FIB – Federation Internationale du Beton e o RILEM – International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials.

O FIB (1999), apresenta o projeto estrutural definindo o desempenho desejado durante a vida útil pretendida e especificando estratégias de defesa contra os agentes de deterioração fundamentando-se no conhecimento do ambiente e sua interação através de variações temporais da microestrutura do concreto, Figura 3.

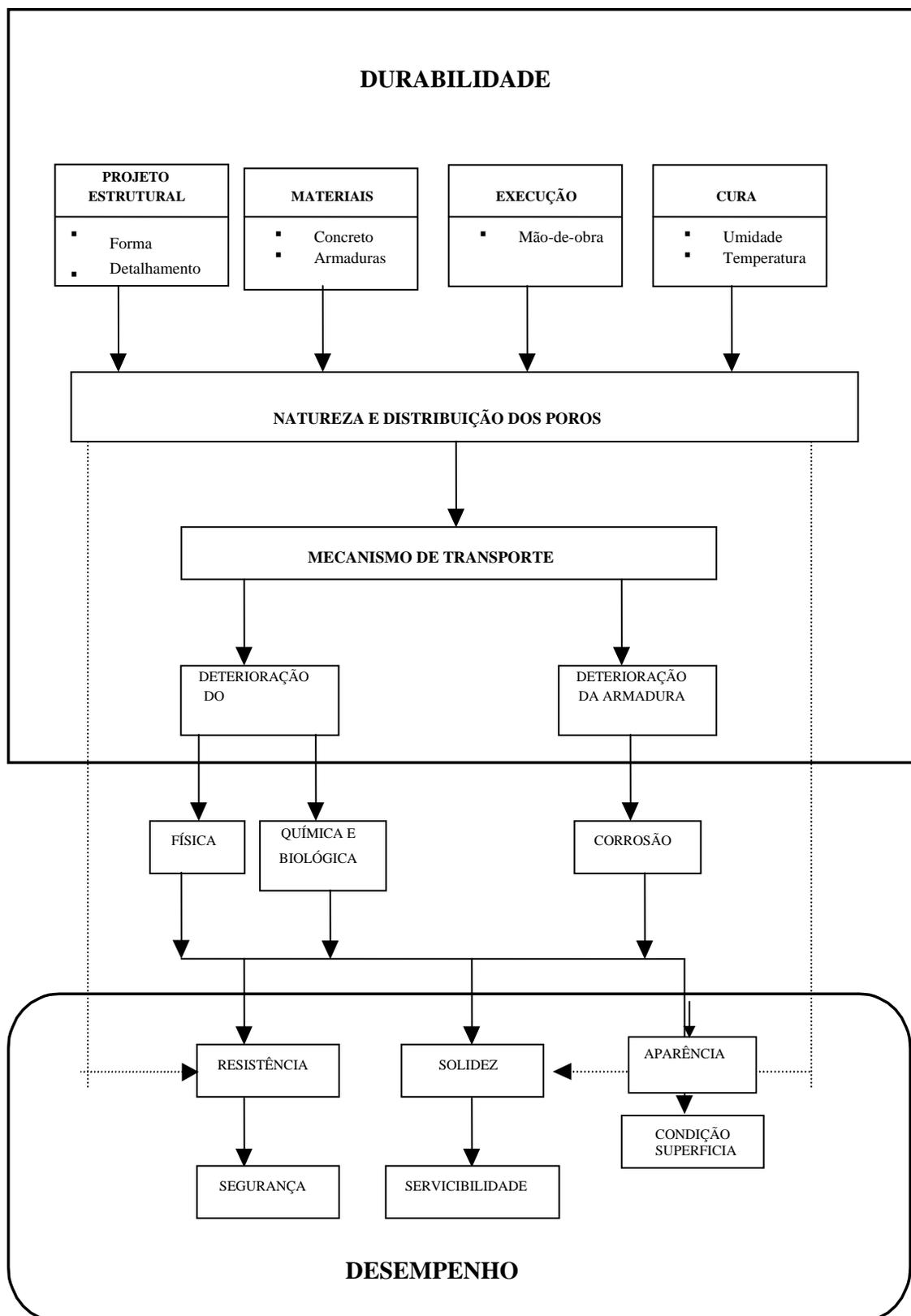


Figura 3 – Relação entre durabilidade e desempenho.  
 Fonte: Boletim n° 3 do FIB (1999), p.4.

Portanto, deve-se conhecer os mecanismos de transporte e processos de deterioração da estrutura para que se indiquem em projeto as estratégias de inspeção e manutenção preventiva.

Segundo Isaia (2005), O RILEM<sup>18</sup> também relaciona procedimentos a serem abordados no projeto em função da durabilidade da estrutura:

- Estudo dos métodos para incorporação da deterioração dos materiais no projeto das estruturas;
- Estudo e seleção dos modelos de durabilidade e dos fatores de degradação usuais das estruturas;
- Estudo e aplicação dos métodos estocásticos de projeto para a durabilidade, métodos probabilísticos em função do tempo;
- Esboço dos procedimentos de projeto com exemplos elucidativos.

O projetista estrutural passa cada vez mais a assumir a responsabilidade de garantia da vida útil de uma estrutura e não só de atestar que a mesma fique “de pé” a partir do dimensionamento e detalhamento entregue para execução.

A norma utilizada para projetos em estrutura de concreto armado no Brasil, NBR 6118 (2003), alerta para que se projetem estruturas em consonância com o ambiente a qual estará inserida, fato que anteriormente não ocorria nas normas de projeto.

As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto conservem suas segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil. NBR 6118(2003), p. 15.

Apesar de contemplar a durabilidade e vida útil das estruturas, não aborda os procedimentos de projeto baseados no desempenho probabilístico de durabilidade, apenas classifica as ações do meio ambiente e mediante a classe de

---

<sup>18</sup> Através do seu comitê técnico TC130-CSL, segundo seu relator Sarja (2000).

agressividade indica a resistência do concreto, o fator água/cimento e o cobrimento a serem utilizados.

Um concreto durável preservará a forma do elemento estrutural e sua capacidade de utilização, obedecendo às determinações de projeto dentro de parâmetros aceitáveis de qualidade, estando este sob a ação do ambiente durante sua vida útil.

O desempenho de uma estrutura visa cumprir a função para a qual foi projetada, este é diretamente afetado pela deterioração do concreto e da armadura, sendo vital que o projetista estrutural avalie as condições de agressividade do meio ambiente a que a estrutura estará exposta de acordo com o Quadro 1, recomendação dada pela NBR 6118 (2003):

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental.

<b>Classe de agressividade ambiental</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto</b>	<b>Risco de deterioração da estrutura</b>
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 micro clima com uma classe de agressividade mas branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

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

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

Fonte: NBR 6118 (2003). p 14.

Ao analisar o Quadro 1, vê-se que a classificação ambiental é genérica, ficando sujeita a interpretações próprias do projetista que pode subjetivamente adotar uma ou outra classificação expondo às vezes a estrutura a uma agressividade à qual não está adequada.

Por exemplo, é especificada uma classe de agressividade em ambiente marinho e outra em zona onde ocorrem respingos de maré, sem contudo indicar e/ou quantificar o elemento limítrofe utilizado.

É necessária uma análise criteriosa dos microclimas no qual a estrutura será inserida para dar suporte ao projetista na identificação de possíveis patologias associadas a fim de que o mesmo utilize mecanismos de proteção em seu projeto.

A causa de uma patologia é o fator que contribui com o aparecimento do dano, seja ele o ambiente que circunda a estrutura, as solicitações mecânicas atuantes, as características do concreto armado e o cobrimento do elemento estrutural, dentre outros, ocorrendo muitas vezes causas simultâneas que repercutem na vida útil da estrutura.

A patologia prejudica a estrutura no que se refere às condições de estética, funcionalidade ou segurança, se faz necessário verificar sua origem para que se possam tomar medidas para que a mesma seja evitada ou ao menos minimizada.

As patologias oriundas durante a elaboração do projeto além de por em risco a estrutura é responsável pelo aumento no custo da construção. Acrescentam-se a estas à ação ambiental, dentre elas a presença do cloreto que acelera o processo de corrosão, e as demais falhas construtivas complementadas pelos problemas gerados por materiais danificados e danos causados durante a execução e utilização, cuja estrutura irá sofrer cumulativamente seus efeitos degradantes.

Pesquisas realizadas em diversos países europeus, Tabela 1, apresentam índices preocupantes de patologias ocorridas na fase de projeto, chegando a atingir 49%, ocorrendo mais falhas que nos demais processos construtivos.

Tabela 1: Origem das falhas de serviços em edifícios (índices em %).

<b>ETAPAS</b>	<b>Bélgica</b>	<b>Reino Unido</b>	<b>Alemanha Federal</b>	<b>Dinamarca</b>	<b>Romênia</b>	<b>Espanha</b>
Projeto	46 a 49	49	37	36	37	41
Execução	22	29	30	22	19	31
Materiais	15	11	14	25	22	13
Uso	8 a 9	10	11	9	11	11
Equipamento	-	-	-	-	-	-
Outros	-	-	-	-	-	-
Causas naturais imprevisíveis			-	-	-	4

Fonte: Meseguer (1991) apud Couto & Priszkulnik (2002).

No Brasil, estudo semelhante foi desenvolvido, Tabela 2, demonstrando que apesar de ser elevado o número de patologias ocorridas durante a elaboração

de projeto, com exceção de Pernambuco, há um número bem maior de patologias oriundas na execução, fato este que obriga ao projetista estrutural a efetuar visitas à obra para aferição quanto à execução de seu projeto.

Tabela 2 : Falhas em estruturas de concreto armado em regiões do Brasil.

Registros / Origem das Falhas	Sudeste	Norte Nordeste	Centro-Oeste (GO, MS, MT)	Distrito Federal	Pernambuco
Ano	1988	1994	1996	1996	1998
Nº de Casos	709	348	155	246	189
Planejamento/Projeto	18	30	22	24	44
Materiais	6	5	9	1	3
Execução	52	39	48	46	41
Uso	14	26	2	3	12
Manutenção	7	-	1	25	-
Outras	3	-	6	1	-

Fonte: Couto & Prizskulnik (2002).

A falha num elemento estrutural originada em qualquer etapa pode levar a prejuízos econômicos graves, além de estar em jogo vidas humanas; um projeto bem detalhado e especificado minimizará o aparecimento de patologias tanto na execução como durante a vida útil.

## 2.2 Vida útil

Entende-se por vida útil, de acordo com Helene (1992): “O período de tempo no qual a estrutura pode cumprir a função para a qual foi projetada sem custos importantes de manutenção, ou seja, deverá estar sob manutenção preventiva, mas não poderá sofrer qualquer tipo de manutenção corretiva, nesse período”.

A vida útil para a qual foi concebido o projeto estrutural deve ser alcançada, fatores complexos concorrem entre si manipulando esta vida útil, como por exemplo: método construtivo, meio ambiente, forma de utilização e manutenção, entre outros, que está além do controle do projetista, a quem cabe utilizar procedimentos de projeto, especificação de materiais e métodos que atuem no outro extremo, assegurando a qualidade do elemento estrutural e garantindo sua durabilidade.

Um modelo qualitativo de vida útil para estruturas submetidas à corrosão apresenta o desempenho estrutural ao longo do tempo em função da corrosão das armaduras, Gráfico 1, é um ponto de partida para o projetista analisar a vida útil e as variáveis que interagem para especificá-la com segurança.

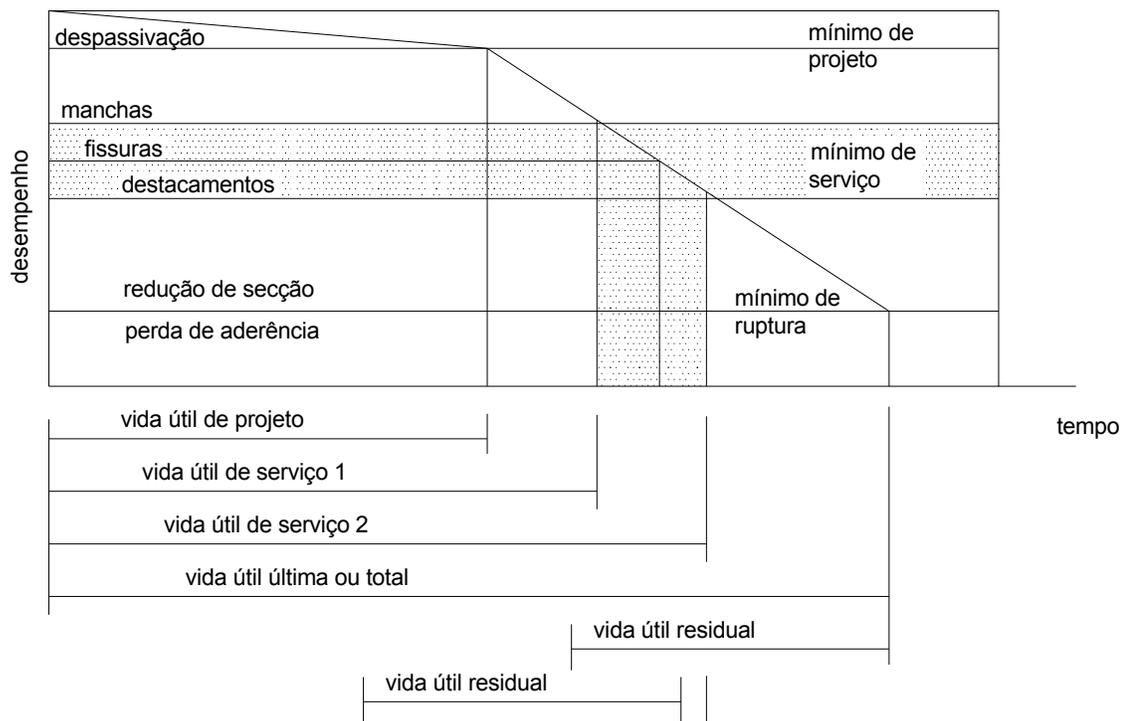


Gráfico 1: Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras.

Fonte: Dep. de Engenharia de Construção Civil (1995?), p. 1.

Têm-se dois estágios de deterioração da estrutura, o primeiro estágio de iniciação corresponde ao período de tempo que leva para o agente agressor atingir a armadura, é a vida útil de projeto. O segundo estágio de propagação corresponde ao tempo que vai desde a iniciação até a ruptura do elemento estrutural, englobando as demais fases de vida útil.

O gráfico 1, apresenta quatro tipos de vida útil que estão vinculadas ao desempenho da estrutura, descritas a seguir:

- Vida útil de projeto: corresponde ao período de iniciação, onde os agentes agressivos, principalmente gás carbônico e cloretos estão

adentrando ao concreto para atingir a armadura, recomenda-se que esta seja adotada no projeto.

- Vida útil de serviço: compreende o período que vai do início da obra até o aparecimento de manifestações patológicas inadmissíveis, como manchas e fissuras; requer uma previsão da taxa de corrosão.
- Vida útil total: compreende o período que vai até a ruptura ou colapso parcial da estrutura, ocorre diminuição de seção da armadura e perda de aderência da mesma com o concreto; requer a adoção de parâmetros como taxa de corrosão, medindo-se *in loco* resistividade elétrica, teor de cloreto, corrente de corrosão entre outros.
- Vida útil residual: compreende o período que vai desde a despassivação do aço até o esgotamento da vida útil de serviço.

É vital que haja monitoramento dos elementos estruturais ao longo do tempo, de acordo com a NBR 6118 (2003), “Os requisitos de manutenção devem ser prescritos pelo projetista e pelo construtor, com entrega de manual de utilização, inspeção e manutenção preventiva necessárias a garantir a vida útil prevista para a estrutura”.

Uma das abordagens existentes para utilização nos modelos de previsão da vida útil numa estrutura é a abordagem determinística, Figura 4, nela não é considerada a variabilidade das características do concreto e do meio ambiente, e sim os mecanismos de transporte de gases, massas e íons através do corpo do concreto.

Para os problemas de engenharia, por possuírem variáveis aleatórias que representam os materiais e fenômenos naturais se desenvolvendo ao longo do tempo, a abordagem probabilística, Figura 5, melhor se adequa. Além de analisar quantitativamente a vida útil estabelecida e os mecanismos de deterioração permite estabelecer as características do concreto necessárias ao meio em virtude da probabilidade de falha vinculada ao caso em estudo.

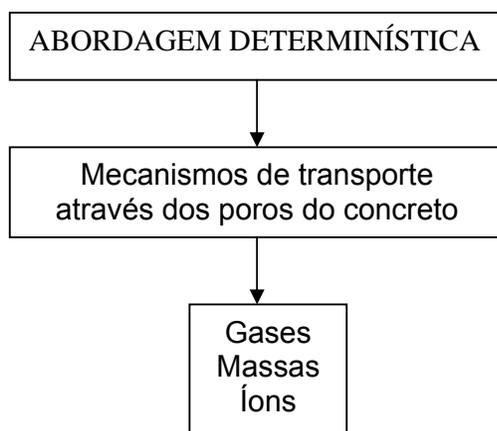


Figura 4: Fluxograma representativo de um processo com abordagem determinística.

Fonte: Adaptado de Helene (1997).

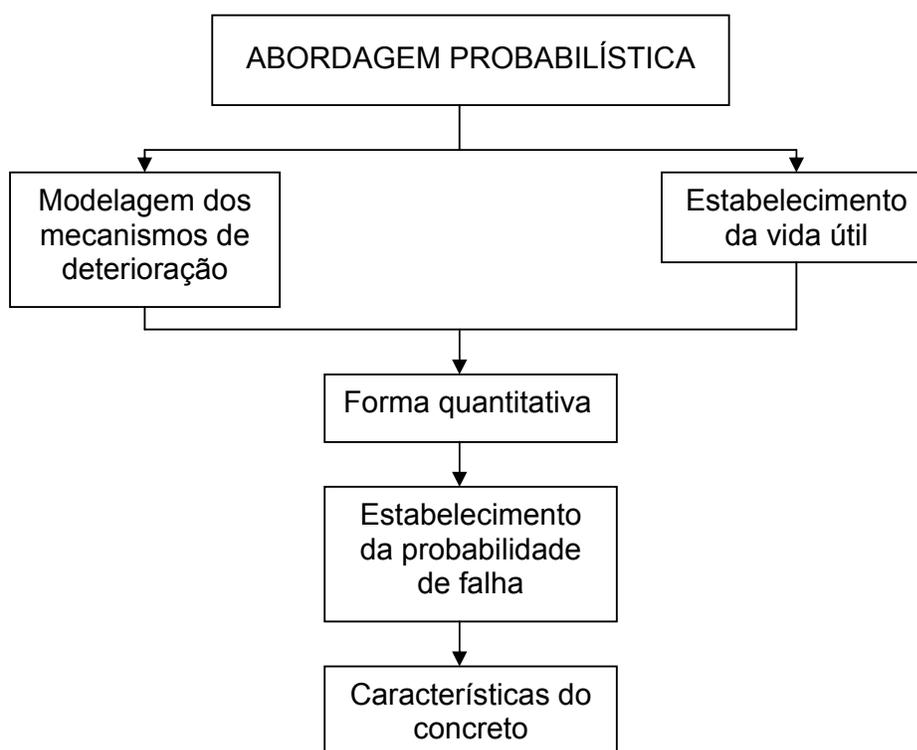


Figura 5: Fluxograma representativo de um processo através de uma abordagem probabilística.

Fonte: Andrade (2005), p. 941.

De acordo com o fluxograma, Figura 5, apresentado para a abordagem probabilística, os parâmetros inerentes às características do concreto: resistência característica, espessura de cobertura, fator água/cimento, especificação de materiais a serem empregados e sua dosagem só podem ser determinados quando se conhece a probabilidade de falha. Andrade (2005) apresenta, a partir desta abordagem, o roteiro proposto para previsão da vida útil das estruturas em concreto.

- O proprietário define a vida útil desejada para a estrutura e o projetista informa o sintoma que a edificação deve apresentar para alertar o final de sua vida útil;
- O projetista realiza uma avaliação do ambiente no qual a estrutura será inserida, identifica os principais mecanismos de degradação e modela-os matematicamente com relação às características do concreto;
- Deve ser feita uma caracterização estatística das variáveis que compõem o modelo matemático, determinando a função densidade de probabilidade, o valor médio e o desvio padrão.

Quanto às considerações da norma brasileira, referente à vida útil a ser utilizada nos projetos de estruturas em concreto armado, a NBR 6118 (2003), alerta que a estrutura de concreto deve manter sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço, durante o período correspondente à sua vida útil, porém não especifica em quanto deveria ser esta vida útil. Durante o projeto normativo especulava-se uma vida útil de 50 anos, tendo sido feito vários estudos e recomendações com esta finalidade, apesar da norma aprovada não fazer referência, algumas dessas recomendações foram mantidas.

Portanto, recai a responsabilidade de definir a vida útil da estrutura para o proprietário e projetista, este deve escolher o modelo adequado para estimar a vida útil da estrutura e especificá-la em projeto, juntamente com os elementos atenuantes às agressividades ambientais.

Seguindo o modelo de abordagem probabilística, o projetista deve ter amplo conhecimento quanto aos tipos de agentes agressivos existentes e sua forma de atuação na degradação da estrutura em concreto afim de utilizar mecanismos adequados de prevenção, o que torna ainda mais difícil se os elementos estruturais sofrerão ataques por cloretos.

### 2.2.1 Agentes agressivos

A vida útil de uma estrutura está ameaçada pela presença de agentes agressivos ao concreto armado, sejam eles mecânicos, físicos ou químicos contribuem cumulativamente, havendo interação entre eles e aceleração do processo de degradação ao ponto de praticamente não se identificar causa e efeito e sim um esforço mútuo de deteriorar o elemento estrutural que somada a ação da água, envolvida na maioria dos processos de degradação, põe impreterivelmente a estrutura em risco.

Ligadas às condições de carregamento, têm-se as causas mecânicas, cujas principais são destacadas abaixo:

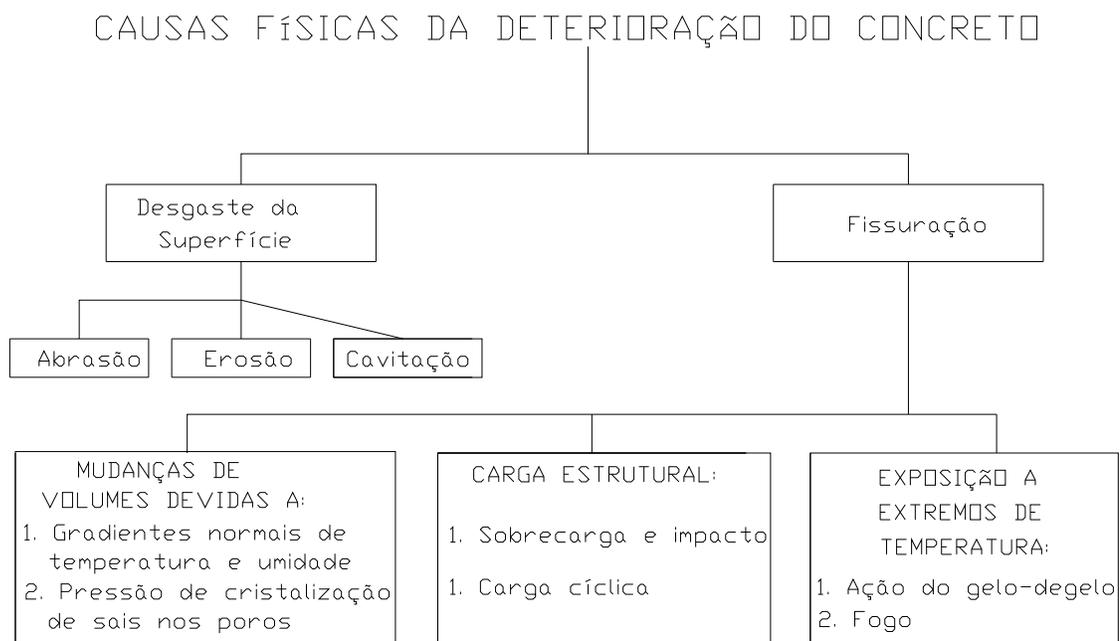
- Sobrecarga: muitas vezes não previstas em projeto ou oriundas de alteração da finalidade da edificação durante sua vida útil;
- Impacto: geralmente acidentais, de difícil previsão pelo projetista;
- Cargas cíclicas: dependem das condições de utilização da estrutura e do ambiente na qual está inserida.

Em geral, ações físicas causam fissuras no concreto, devendo ser bem pesquisadas e analisadas para utilização no dimensionamento da estrutura, estejam elas presentes durante a execução ou utilização.

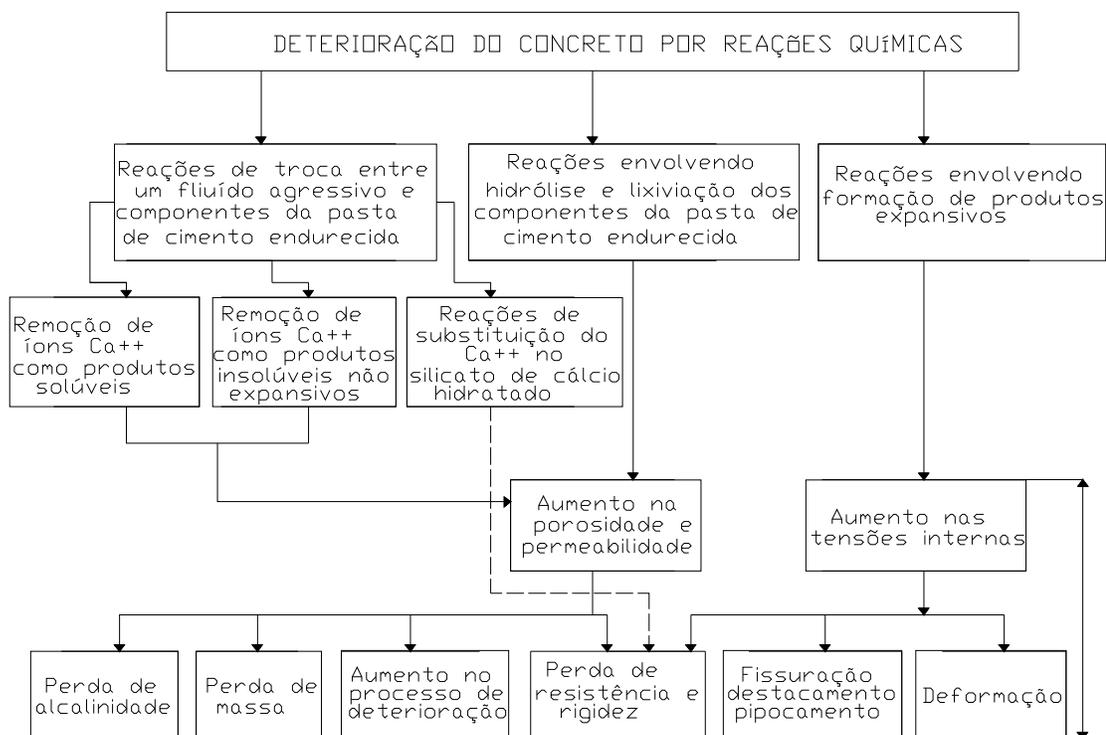
O desgaste superficial e a fissuração são causas físicas de deterioração do concreto, Figura 6, onde o meio ambiente atua através da temperatura, umidade e pressão de cristalização de sais nos poros do concreto. Metha & Monteiro (1994) esclarece que o cloreto em ambiente supersaturado tem potencial poder de deterioração:

... Neste grau de supersaturação, o NaCl (cloreto de sódio), cristalizando a 0 °C, 25 °C e 50 °C, produz pressões de 554, 605 e 654 atm, respectivamente. Esta tensão é forte o suficiente para romper a maioria das rochas. p. 133.

O cloreto quando desencadeia o processo de corrosão da armadura, causando posteriormente a fissuração do concreto, está atuando como uma causa física de deterioração do elemento estrutural.



**Figura 6: Causas Físicas da deterioração do concreto.**  
 Fonte: Metha & Monteiro (1994), p. 128.



**Figura 7: Causas Químicas da deterioração do concreto.**  
 Fonte: Metha & Monteiro (1994), p. 150.

Uma das reações químicas mais danosas ao concreto é a que desencadeia a corrosão da armadura, que através do aumento das tensões internas causam fissuração, destacamento e pipocamento no concreto.

As ações preventivas em sua maioria são especificações do projeto estrutural, como: fator água/cimento, materiais que compõem o concreto, cobrimento, ações, dentre outros, se faz necessário o conhecimento amplo do mecanismo de deterioração pelo projetista para que seja indicado adequado sistema de proteção.

Os tópicos analisados neste capítulo sobre durabilidade e vida útil alertam que a estrutura deve ter uma durabilidade satisfatória, contudo o ambiente externo e interno cuja peça está inserida pode afetar significativamente seu desempenho ao longo do tempo, principalmente se há uma elevada presença de cloretos atrelada aos demais agentes de deterioração, o que veremos no capítulo seguinte.

## **CAPÍTULO III**

### **AÇÃO DA PRESENÇA DE CLORETOS**

Em cidades litorâneas, como é o caso de Maceió, além de outros gases presentes na atmosfera tem-se o íon cloreto, influenciando na vida útil da estrutura em concreto armado, sendo este um acelerador da corrosão das armaduras, pode levar ao colapso estrutural e diminuição da durabilidade, devendo portanto ser verificada a probabilidade de falha para projeção da vida útil de acordo com as condições ambientais:

Imaginando-se uma situação hipotética de uma estrutura onde a mesma seria construída em área salina, pode-se especificar uma probabilidade de falha mais adequada a um determinado estágio limite de serviço (representado fisicamente pela despassivação das armaduras por cloretos), extraindo-se daí um índice a ser especificado para a situação. Andrade & Molin (2001).

#### **3.1 O cloreto como agente agressor**

O íon cloreto presente na natureza, principalmente em regiões marinhas, quando em contato com a superfície de concreto funciona como um acelerador do processo corrosivo afetando significativamente a vida útil da estrutura, requerendo assim um estudo específico quanto a sua forma de atuação e teor necessário para desencadear o dano.

Numa estrutura de concreto, quando inserida em um ambiente com cloretos, recomenda-se conhecer tanto os valores médios quanto a variabilidade de cada um dos fatores que influenciam na despassivação da armadura. É apresentada no Gráfico 2, a relação entre a penetração de cloretos no concreto, ao

longo da espessura da camada de revestimento, e a aplicação dos princípios de confiabilidade.

Analisando o Gráfico 2, verifica-se que no tempo ( $t=0$ ), quando a confiabilidade é máxima, inicia-se a penetração de cloretos pela camada de revestimento do concreto, de espessura ( $e$ ), diminuindo-se o índice de confiabilidade até o instante ( $t=T$ ) quando ocorre a despassivação das barras devido à ação do cloreto e inicia-se o processo de corrosão.

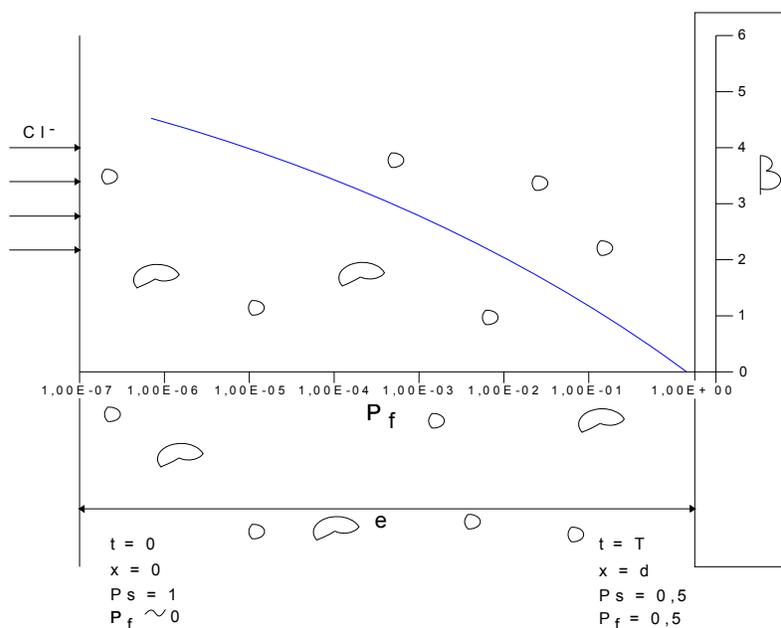


Gráfico 2: Representação gráfica da relação existente entre o índice de confiabilidade ( $\beta$ ), a probabilidade de falha ( $P_f$ ) e a penetração de cloretos para o interior do concreto.  
Fone: Andrade (2005), p. 945.

Com a despassivação da armadura, deteriora-se o elemento estrutural de forma progressiva até o fim do processo da iniciação da estrutura e a propagação de patologia, como é mostrado no modelo de vida útil proposto por Tutti & Cascudo (1988), Gráfico 3.

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.

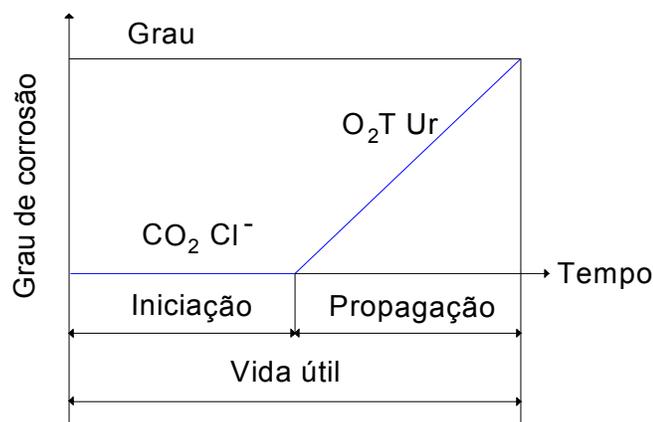


Gráfico 3: Modelo de vida útil proposto.  
Tutti & Cascudo (1998).

A literatura informa que os íons cloretos chegam ao concreto de diversas formas:

- Atmosfera marinha, trazidos pelo ar;
- Água do mar, para estruturas *off shore*;
- Processos industriais (indústrias químicas ou de beneficiamento);
- Através do uso de aceleradores de pega que contém  $\text{CaCl}_2$ ;
- Uso de componentes impuros: areia, brita e água de amassamento;
- Uso de sais de degelo.

O cloreto apresenta-se de três formas distintas, Figura 8:

- Quimicamente ligado ao aluminato tricálcico;
- Adsorvido na superfície dos poros;
- Sob a forma de íons livres.

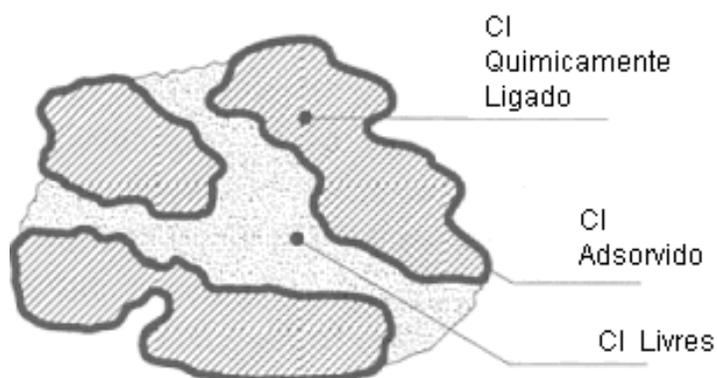


Figura 8: Formas de ocorrência de íons-cloreto na estrutura do concreto.  
Fonte: Cascudo (1997), pg. 46.

Sabe-se que apenas os cloretos livres na solução dos poros do concreto atacam as armaduras, qualquer que seja a forma de contato na superfície da estrutura, o íon  $\text{Cl}^-$  penetra no concreto através da água: movimentação da água, difusão dos íons na água ou absorção, atingindo a armadura inicia-se o processo de corrosão

Os íons cloreto penetram na camada de cobrimento, Figura 9, a depender da porosidade do concreto, até atingir a armadura formando o anodo, iniciando o processo de corrosão através das seguintes reações químicas:



A eletrólise dada pela ação da água e a ação do íon cloreto atacam a armadura, muitas vezes de forma cumulativa, pela presença do cloreto oriundo de diversas fontes.

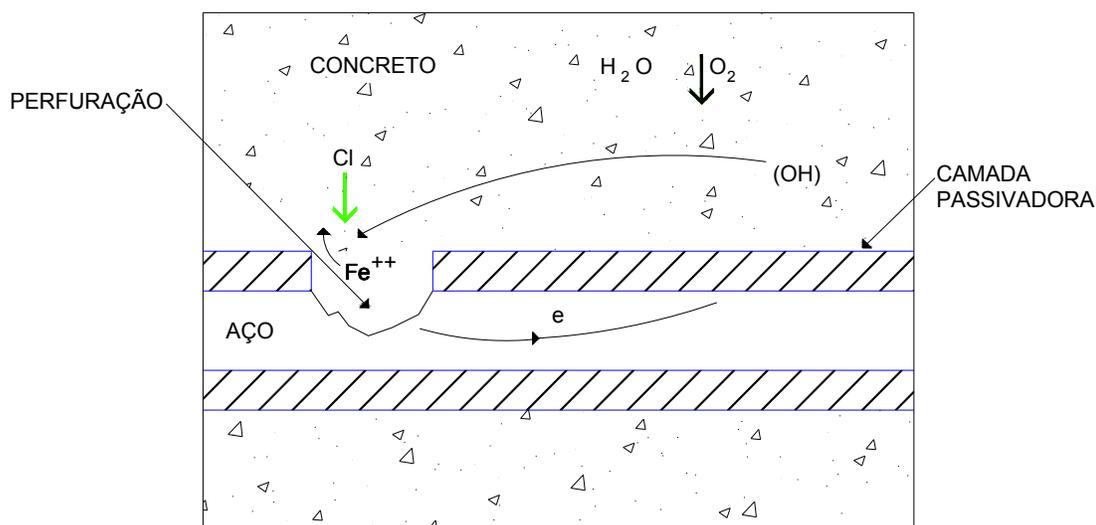


Figura 9: Representação esquemática da corrosão eletroquímica na presença de cloretos.

Fonte: Neville (1997), pg. 557.

A ação dos cloretos além de despassar a armadura, aumenta significativamente a condutividade elétrica acelerando o processo de corrosão e participa das reações para a formação dos produtos de corrosão, sendo altamente danoso ao concreto armado, devendo ser especificado e garantido um concreto de qualidade que iniba a ação do íon cloreto.

As corrosões são classificadas de acordo com a extensão da área de ataque, forma e agentes causadores, a partir da pesquisa bibliográfica são descritas as principais:

- Uniforme: ocorre de forma homogênea em torno da superfície do metal, acarretando perda de material, com formação de produtos de corrosão;
- Com formação de pite: corrosão localizada que acarreta diminuição significativa da resistência mecânica do material, podendo causar a ruptura pontual da armadura caracterizada pela formação de pequenas cavidades;
- Galvânica: formada quando dois metais de diferentes suscetibilidade à corrosão estão embutidos no concreto, por exemplo: aço e alumínio, ou quando existem variações significativas nas características superficiais do aço;
- Intragranular ou Sob tensão: ocorre paralelo às tensões de tração na armadura entre os grãos dos cristais metálicos, gerando fissuras;
- Extragranular ou transgranular: aparece intragrãos quando a estrutura é submetida a esforços mecânicos, promove a fratura da peça;
- Por diferença de concentração: devido à diferença na concentração de íons dissolvidos em torno do aço, como álcalis, cloretos e oxigênio.
- Pela ação do hidrogênio: ocasionada pela difusão do hidrogênio na armadura levando à fragilização e à fratura da estrutura.

Dentre as corrosões citadas, a que ocorre a formação de pite, caracterizada por baixa relação entre os diâmetros e comprimentos da armadura, é causada principalmente por cloretos. Este processo corrosivo e o teor de cloreto necessário para desencadear o processo de corrosão são abordados por Metha & Monteiro (1994):

A corrosão localizada por pites em estruturas de concreto é causada principalmente por cloretos. Na presença destes íons, dependendo da relação  $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$ , relata-se que o filme protetor pode ser destruído pontualmente mesmo para valores de pH consideravelmente acima de 11,5. Quando as relações molares  $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$  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  $\text{Cl}^-$  por metro cúbico de concreto. p. 171.

Na Figura 10, é apresentada a morfologia da corrosão por pite, cuja característica principal é a presença inicialmente de pontos esparsos de corrosão.

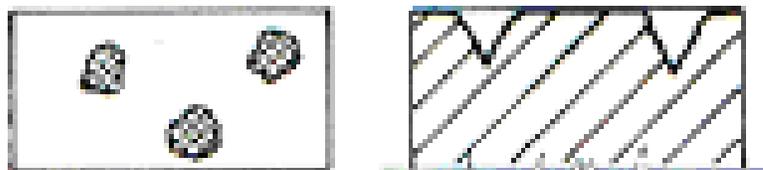


Figura 10: Corrosão por pite.  
Fonte: Andrade (1992).

A propagação da corrosão leva ao lascamento do concreto, visualmente presente na Figura 11, fazendo com que a estrutura perca a condição de serviço para a qual foi projetada. A força de expansão do aço é tão forte que deteriora completamente a peça.

A corrosão é desencadeada pela concentração crítica de cloreto reconhecida no meio científico como sendo 0,4% em relação à massa de cimento, o Gráfico 4 correlaciona o teor crítico de cloreto com a espessura de cobrimento do concreto.



Figura 11: Corrosão em pilar de concreto por ataque de cloretos.  
Fonte: Helene (1988), p. 23.

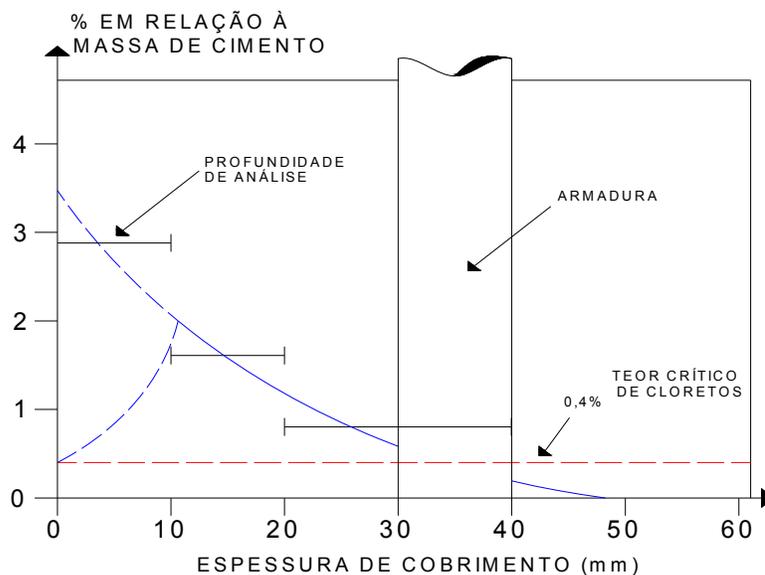


Gráfico 4: Perfil típico de concentração dos cloretos ao longo do cobrimento, em um concreto contaminado por impregnação externa de soluções ricas em cloretos.

Fonte: Cascudo (1997), pg. 45.

A NBR 6118 (2003) não faz referência ao teor limite de cloretos apenas alerta que não é permitido adicionar aditivos contendo cloretos ao concreto armado. O projetista estrutural pode usar como referência a Tabela 3, onde são apresentados alguns limites do teor de cloreto em estruturas de concreto recomendados por diversas normas, para fazer uso de medidas inibidoras do avanço do cloreto em suas estruturas.

Tabela 3: Teor limite de cloreto para diversas normas

NORMA	PAIS	ANO	TEOR DE CLORETOS RECOMENDADO
NBR 6118 (ABNT)	BRASIL	2003	Não se reporta ao teor de cloretos
ACI 318-21	USA	2001	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos; $\leq 0,3\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente normal; $\leq 1\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente seco; $\leq 0,06\%$ em relação à massa de cimento (concreto protendido).
CEB	Europa	1991	0,40% em relação à massa de cimento
ENV 206	Portugal	1991	
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE – SP2	Japão	1986	$\leq 0,60 \text{ kg/m}^3$ de concreto

Fonte: Figueiredo (2005), pg. 844.

Dentre as recomendações normativas, o meio científico brasileiro aceita o valor de referência de 0,4% para o teor limite de cloreto em relação à massa de cimento em estruturas de concreto, conforme recomendações das normas oriundas dos países europeus.

As condições ambientais e a qualidade do concreto podem afetar o teor limite de cloretos, de acordo com o esquema apresentado na Figura 12. A espessura da camada de cobrimento e a qualidade do concreto vão impedir ou minimizar a penetração do cloreto para o interior do elemento estrutural, a exigência de procedimentos de qualidade quanto à permeabilidade da camada de cobrimento deve ser estendida ao controle do fator água cimento e procedimentos de cura do elemento estrutural, pois é a camada de cobrimento que vai garantir a qualidade do concreto quanto à expectativa de vida útil da estrutura.

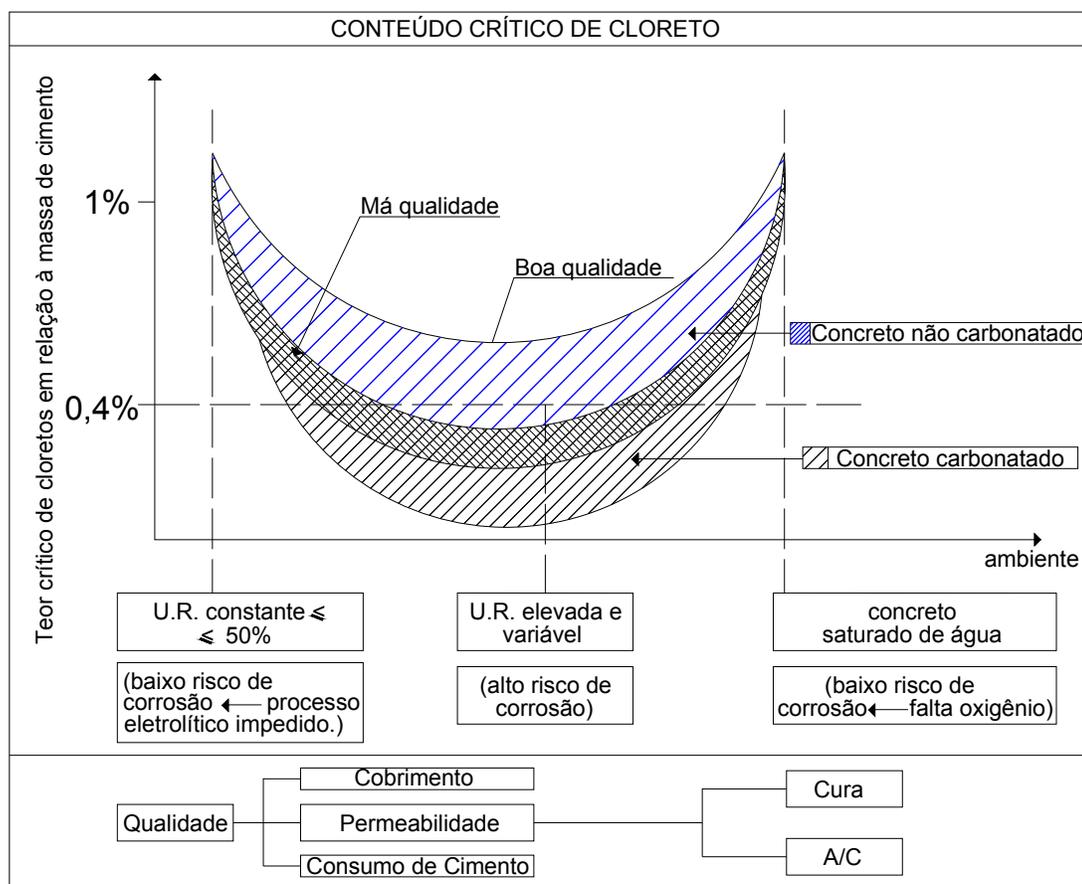


Figura 12: Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e umidade do ambiente.

Fonte: Andrade (1992), pg. 27.

A literatura informa que a umidade relativa variável entre 20% e 95%, desencadeia o processo de carbonatação do concreto, cujo ápice é atingido quando a umidade relativa está em torno de 55%, que somado ao ataque por cloretos vai deteriorar rapidamente a estrutura, por apresentar um alto risco a corrosão acelerando o transporte de íons pelos poros do concreto a depender da porosidade existente na pasta de cimento.

Além da umidade relativa, o aumento de temperatura acelera as reações químicas de degradação do concreto, um gradiente elevado em 10°C dobra a velocidade das reações químicas, logo os ambientes tropicais são bem mais agressivos que regiões frias.

Portanto, os poros do concreto devem ser minimizados principalmente, quando as estruturas se situarem em regiões litorâneas de clima tropical com alta umidade relativa, como por exemplo, ao longo da costa do nordeste brasileiro.

Para melhorar a proteção do aço quanto à corrosão recomenda-se especificar em projeto espessura adequada de cobrimento, fator água/cimento e resistência do concreto, de acordo com recomendações normativas frente à classe de agressividade a qual a estrutura estará exposta, devendo ser garantido na execução as condições de cura e a qualidade do concreto, a fim de que a estrutura atinja a vida útil projetada.

### **3.2 Modelos para projeção de vida útil a partir da ação de cloretos**

Encontra-se na literatura técnica estudos acerca da projeção da vida útil das estruturas em concreto armado, dentre os principais modelos que tem como base a corrosão das armaduras por ação dos cloretos.

O modelo proposto por Clear e Hay (1983) apud Helene (1995?), tem na espessura do cobrimento e no fator água/cimento, agentes intimamente ligados à proteção ao ataque de cloretos e garantia de vida útil da estrutura, que pode ser projetada através da seguinte formulação:

$$t = \frac{2,5 \cdot e^{0,82\sqrt{a/c}}}{a/c \cdot \sqrt[2,38]{C_{cl}}}$$

$t$  = tempo ou vida útil em anos;

$e$  = espessura do cobrimento do concreto à armadura em mm;

$a/c$  = relação água/cimento do concreto em massa;

$C_{cl}$  = concentração de cloretos no ambiente, junto a superfície do concreto em mg/L.

Vê-se ser necessário medir o teor de cloreto do local onde será inserida a estrutura, indicativo de que as características ambientais interferem na durabilidade da estrutura.

O fator preponderante para atuar como defensor quanto à agressividade dos cloretos no modelo de Babaei (1996) apud Helene (1995?), é a espessura do cobrimento, devendo ser utilizado um concreto mais impermeável possível.

$$t = \frac{0,39 \cdot e}{Cl_{cc} - 0,04}$$

$t$  = tempo ou vida útil em anos;

$e$  = espessura do cobrimento do concreto à armadura em mm;

$Cl_{cc}$  = teor de cloretos no concreto da camada superficial do componente, em %, em massa em relação ao cimento.

No modelo de Enright (1998) apud Andrade & Molin (2001), a quantidade e complexidade de variáveis dependem da atuação do meio ambiente ao qual a estrutura está inserida, a espessura de cobrimento e as diversas formas de apresentação dos cloretos são responsáveis pela projeção de vida útil da estrutura.

$$t = \frac{x^2}{4Di} \left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{C_s - C_{cr}}{C_s} \right) \right]^2$$

$C_{cr}$  = concentração crítica de cloretos nas proximidades da armadura (%);

$C_s$  = concentração de cloretos (constante) na superfície de concreto (%);

$x$  = espessura de cobrimento às armaduras (cm);

$t$  = tempo de exposição (anos);

$D$  = coeficiente de difusão de cloretos (constante) ( $\text{cm}^2/\text{ano}$ );

$\text{erf}$  = função complementar de erro de Gauss.

Nos projetos estruturais, a vida útil de uma estrutura que anteriormente era indicada de forma qualitativa, passa a ser indicada de forma quantitativa a partir dos modelos de previsão de vida útil existentes.

Para se alcançar os objetivos deste capítulo, que versa sobre aspectos gerais de durabilidade dos elementos estruturais e vida útil, enfatizando a agressividade por íons cloreto nas estruturas de concreto, houve necessidade de uma revisão bibliográfica acerca da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado; estudo dos agentes agressivos, em especial o cloreto, para que o projetista possa utilizar meios de minimizá-los e ou combater-los; diretrizes para elaboração do projeto estrutural visando que a estrutura alcance a vida útil para a qual foi projetada; verificação dos modelos de projeção de vida útil existente sob ação de íon cloreto; entre outras abordagens correlatas.

O que foi abordado neste capítulo fundamenta a investigação quanto ao teor de cloretos existente na atmosfera de Maceió, para a partir daí o projetista estrutural utilizar mecanismos de proteção adequados, quanto ao ataque por cloretos, dentre os quais: resistência característica do concreto, fator água cimento e espessura da camada de cobrimento do concreto, que serão abordadas no capítulo seguinte.

## **CAPÍTULO IV**

### **CRITÉRIO DE PROJETO VISANDO À DURABILIDADE: QUALIDADE DO CONCRETO**

A durabilidade como critério de projeto é recomendada pela norma brasileira, a mesma recomenda cuidados especiais quanto às condições de drenagem, formas arquitetônicas e estruturais, detalhamento das armaduras, controle de fissuração e medidas especiais de proteção, ressaltando também a qualidade do concreto, NBR 6118 (2003), “A durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto do cobrimento da armadura”.

#### **4.1 Sistema simples de barreira**

A qualidade do concreto é classificada pelo boletim nº 238 do CEB (1997), como um sistema simples de barreira que vem a garantir a durabilidade da estrutura, deve ser previsto e especificado em projeto elementos que protejam o concreto do ataque de gases, íons e substâncias presentes na atmosfera, em especial os cloretos. Os sistemas de proteção ao concreto serão indicados de acordo com a classe de agressividade ambiental na qual a estrutura estará exposta durante toda sua vida útil.

Os cloretos, por exemplo, penetram no concreto através de sua estrutura porosa, ou são adicionados involuntariamente a partir da utilização de agregados ou águas contaminadas, alguns aditivos aceleradores de endurecimento, e ainda a partir de produtos de limpeza utilizados pelo usuário, ocasionando a corrosão das armaduras.

A vida útil da estrutura depende da espessura de cobrimento da armadura, da qualidade do cobrimento, da resistência do concreto (baixo fator água-cimento, aumento do teor de cimento), dentre outros. Em um concreto assim, os agentes agressivos não devem adentrar ao concreto.

Qualquer elemento construtivo, em concreto, que se coloque entre a armadura e a forma para atingir a espessura de cobrimento requerida deve ter a mesma qualidade do concreto do elemento estrutural para que se tenha uma superfície homogênea e uma porosidade mínima em toda a peça, dificultando a atuação de agentes patológicos.

O cobrimento do concreto tem a função de proteger o elemento estrutural, cujas principais formas de proteção, de acordo com literatura técnica, são:

- Proteção física: por impermeabilidade tem-se a proteção do aço ao ataque de agentes agressivos externos.
- Proteção química: em ambiente altamente alcalino, é formada uma capa ou película protetora de caráter passivo dentro dos limites de proteção do concreto, estabilizando seu pH em torno de 12,5 e inibindo a corrosão.

A armadura no interior do concreto encontra-se em meio alcalino, cujo pH no concreto é de aproximadamente 12,5 e o potencial de corrosão no concreto encontra-se entre +0,1 e -0,4 V, com isso as reações verificadas na armadura são de passivação, estando protegida do fenômeno da corrosão por haver uma película protetora de caráter passivo que a envolve, internamente pelo núcleo do concreto e externamente pela camada de cobrimento.

Com a presença do íon cloreto a película protetora do aço pode ser destruída, se o concreto não tiver a qualidade adequada às condições ambientais, iniciando-se assim o processo de corrosão, conforme Gráfico 5. A ação do cloreto faz com que o aço saia da região de imunidade até estar totalmente corroído.

Outro processo que ocorre na camada de cobrimento do concreto diminuindo significativamente sua projeção é a carbonatação, a mesma reduz o pH do concreto a valores inferiores a 9, devido à ação do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera e outros gases ácidos, tais como SO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S. O avanço da carbonatação é progressivo, da face para o interior do elemento estrutural, percolando internamente

através dos poros do concreto vai atingir a armadura despассивando-a, dando início ao processo de corrosão.

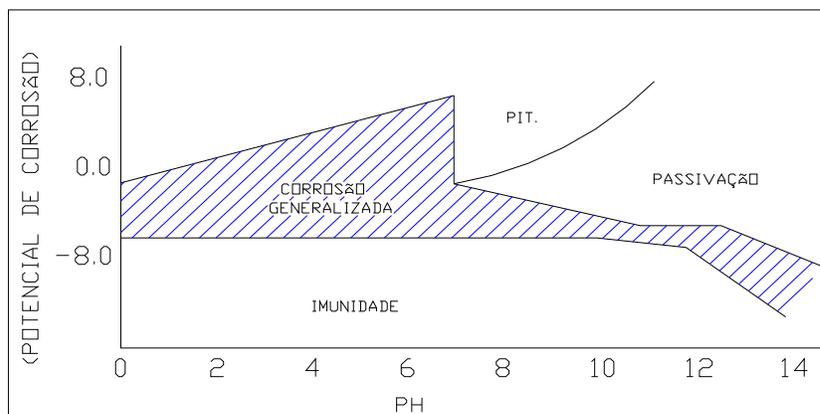


Gráfico 5: Diagrama de Pourbaix para o ferro em solução de cloretos, em concentração de 10 mol/L  
Fonte: Schiessl (1988) apud Silva (1995), p. 77.

Se for somado ao ataque de gás carbônico, uma das causas da carbonatação, a ação do íon cloreto, tem-se o início da corrosão devido ao ataque de duas substâncias. O boletim nº 3 do FIB (1997), Gráfico 6, mostra que a ação do cloreto e a profundidade de penetração deste associado à carbonatação reduzem drasticamente a vida útil da estrutura em concreto especificada em projeto. Fato este preocupante tanto para o projetista, devido à responsabilidade assumida, quanto para o proprietário, pelo ônus que poderá ter com recuperação estrutural.

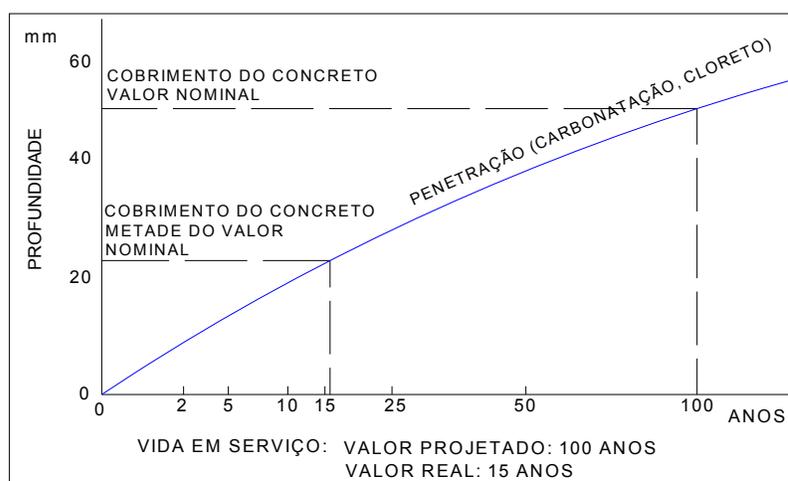


Gráfico 6: Tempo para início da corrosão devido a carbonatação ou penetração de cloreto, dependendo do real cobrimento do concreto na medida que atinge o final da estrutura. O exemplo corresponde a concreto não fissurado de alta qualidade.  
Fonte: Boletim nº 3 do FIB (1997), p. 19.

Nas cidades litorâneas brasileiras, além da umidade e temperatura tem-se a velocidade e direção dos ventos impulsionando a ação de cloretos. O projetista, dentro dos atuais procedimentos de projeto, deve juntamente com o responsável técnico pela execução verificar a dosagem, produtos e forma de produção do concreto e execução do elemento estrutural para que se tenha um concreto impermeável e a camada de cobrimento não seja afetada durante a vida útil especificada em projeto.

Como o cobrimento do concreto é a principal barreira de proteção à armadura, este requer uma atenção especial de quem projeta, sendo exigido do mesmo conhecimento acerca da composição do cobrimento, seus principais agentes agressores e mecanismos de degradação.

#### **4.1.1 Relação água/cimento da camada de cobrimento**

A relação água/cimento e o grau de hidratação do mesmo, são fatores preponderantes de proteção ao elemento estrutural, por determinar o grau de porosidade do concreto, um meio de transporte para entrada de agentes patológicos, conforme esclarece Souza & Ripper (1998):

Não é difícil entender que quanto mais permissivo um concreto for ao transporte interno de água, gases e de outros agentes agressivos, maior será a probabilidade da sua degradação, bem como da do aço que deveria proteger. Também não é difícil concluir que nesses casos a degradação dependerá, diretamente, de dois fatores: Porosidade do concreto e condições ambientais de superfície. Como, em geral, não se poderá lidar com a melhoria das condições ambientais, a única saída, neste sentido, para se evitar a degradação dos concretos, é a redução, ao menor nível possível, da sua porosidade. p. 35.

Para que haja uma barreira à entrada de agentes agressivos, busca-se uma menor porosidade possível para o concreto, principalmente em sua camada de cobrimento, que dever ser “impermeável”, para tal é necessário verificar a dosagem ideal do concreto, principalmente quanto ao fator água/cimento.

Os limites de permeabilidade, Tabela 4, têm uma correlação direta com a qualidade do concreto, conforme alerta Cascudo (1997), “Um concreto será de baixa qualidade quando ele apresentar maiores índices de permeabilidade e absorção...”.

Tabela 4: Critérios de avaliação da permeabilidade à água do concreto.

Permeabilidade (m/s)	Permeabilidade do concreto	Qualidade do concreto
$< 10^{-12}$	baixa	Boa
$10^{-12}$ a $10^{-10}$	média	Média
$> 10^{-10}$	alta	Pobre

Fonte: Cascudo (1998), p. 74.

Um concreto com baixa permeabilidade é a porta aberta para a entrada de gases que originam patologias no elemento estrutural, que somados com a umidade relativa pode impulsionar e acelerar o processo de degradação. Esta permeabilidade é correlacionada ao fator água cimento, Gráfico 7, utilizado na produção do concreto. A curva muda drasticamente de direção após o fator água/cimento 0,6, atingindo elevados valores do coeficiente de permeabilidade, um concreto poroso é a porta de entrada para patologias, principalmente se há íon cloreto presente na atmosfera.

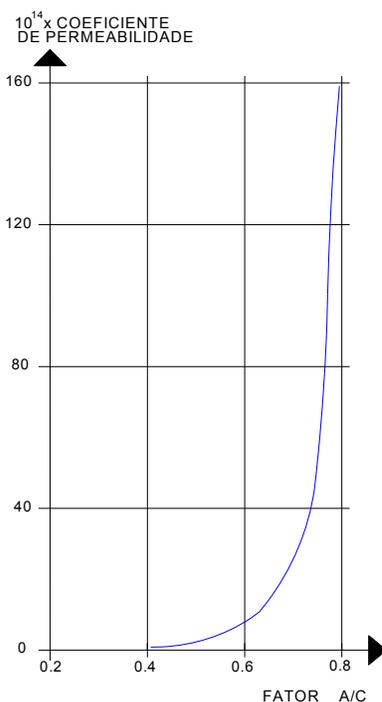


Gráfico 7: Influência do fator água-cimento no coeficiente de permeabilidade dos concretos.

Fonte: Rostam (1991) apud Souza & Ripper (1998), pg. 36.

Uma pequena variação do fator água/cimento afeta bruscamente o coeficiente de permeabilidade, podendo aumentar significativamente a quantidade e tamanho dos poros no concreto.

No Gráfico 8, têm-se uma referência quanto à relação água/cimento que poderá embasar as especificações do projetista e subsidia-lo quanto à defesa da mesma. Um concreto mais denso com menor fator água/cimento funciona como uma barreira inibindo a ação do íon cloreto e aumentando a durabilidade da estrutura, dificultando a penetração deste íon na camada de cobertura do concreto.

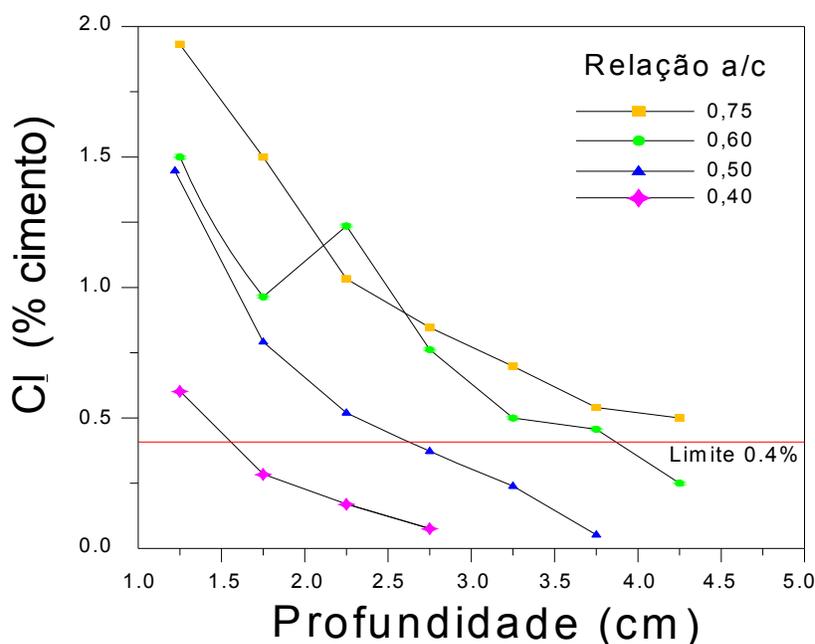


Gráfico 8: Efeito da relação água-cimento na penetração de cloretos.  
Fonte: adaptado de Jaergemann (1990) apud Figueiredo (2005), pg. 847.

Observa-se que todas as relações água/cimento plotadas no Gráfico 8, permitiram que o teor de cloreto ultrapassasse o patamar de 0,4% em relação à pasta de cimento. Contudo a profundidade da camada carbonatada no concreto produzido com menor fator água/cimento, não alcança a armadura, podendo assim atingir a perspectiva de vida útil especificada em projeto.

A porosidade nas estruturas de concreto, em especial em regiões litorâneas deve ser controlada através da utilização de padrões de qualidade específicos a confecção do concreto, principalmente em regiões de clima tropical, cujas variações térmicas originam esforços de tração sobre o concreto, os quais podem causar fissuras no elemento estrutural.

A relação água/cimento é especificada em projeto de acordo com recomendações normativas, a NBR6118 (2003), Tabela 5, correlaciona o fator água/cimento do concreto em função da classe de agressividade ambiental.

Tabela 5: Correspondência entre classe de agressividade e fator água/cimento.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
NOTAS: 1. O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT 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: Adaptado da NBR 6118 (2003), p. 18.

Analisando-se outros códigos normativos verifica-se que os mesmos especificam valores diferentes para o fator água cimento, correlacionando a classes de agressividade similares a norma brasileira, Tabela 6 e 7:

Tabela 6: Fator água/cimento para condições especiais de exposição – ACI.

Condição de exposição da estrutura em concreto armado	Máxima relação água cimento para concretos de resistência normais e de alta resistência
	a/c
Concreto tem baixa permeabilidade quando exposto a água	0,50
Concreto exposto ao gelo e degelo em condição de umidade ou a degelo químico.	0,45
Para proteção da corrosão da armadura em concreto exposto a cloretos provenientes de degelo químico, sais, água salgada, água salobra, água do mar ou spray proveniente dessas fontes.	0,40

Nota: Não é determinado o máximo fator água/cimento para concretos de baixa resistência porque a absorção desses agregados é incerta.

Fonte: ACI 318 (2005), p. 52.

Relacionando os itens diretamente a condição de exposição, verifica-se que o ACI 318 (2005) apresenta, em geral, um controle mais rigoroso que a norma brasileira especificando um menor fator água/cimento para o concreto.

Tabela 7: Recomendações limites para o fator água cimento do concreto – FIB.

Tipo de Exposição do Concreto Armado	Descrição do ambiente de exposição do concreto	Máximo fator água/cimento
		a/c
Classe 1 – Nenhum risco de corrosão ou ataque	. Muito seco	---
Classe 2 – Corrosão induzida pela carbonatação	. Seco ou permanentemente molhado	0,65
	. Molhado, raramente seco	0,60
	. Umidade moderada	0,55
	. Ciclos de molhagem e secagem	0,50
Classe 3 – Corrosão induzida por cloretos excerto provenientes de água do mar	. Umidade moderada	0,50
	. Molhado, raramente seco	0,45
	. Ciclos de molhagem e secagem	0,45
Classe 4 – Corrosão induzida por cloretos provenientes de água do mar	. Exposto ao sal transportado pelo ar mas não em contato direto com a água do mar	0,55
	. Permanentemente submerso	0,55
	. Marinha, respingo e zonas de spray	0,45
Classe 5 – ataque de Gelo/degelo	. Moderada saturação em água, sem agente de degelo	0,55
	. Moderada saturação em água com agentes de degelo	0,55
	. Alta saturação em água sem agente de degelo	0,50
	. Alta saturação em água com agente de degelo ou água do mar.	0,45
Classe 6 – Ataque químico	. Ambiente químico ligeiramente agressivo	0,55
	. Ambiente químico moderadamente agressivo	0,50
	. Ambiente químico altamente agressivo	0,45

Fonte: Adaptado do boletim nº 3 do FIB (1999), vol. 3, pg. 24 a 37.

Observa-se que para estruturas em ambiente marinho, seja em zona de respingo de maré ou área atingida por aerossóis carregados pelo vento, a norma europeia faz as mesmas recomendações que a norma brasileira.

Cabe ao projetista estrutural, com base normativa e pesquisas realizadas, especificar o fator água/cimento a ser utilizado em suas estruturas em concreto, devendo este ser garantido durante a execução através do controle de qualidade.

#### 4.1.2 Resistência da camada de cobrimento

As estruturas em concreto, em geral, são dimensionadas com base na resistência a compressão, os ensaios utilizados corriqueiramente visam quantificar e validar esta resistência para atestar a partir daí a qualidade e durabilidade do elemento estrutural.

O fator água-cimento e a resistência estão intimamente ligados, pois uma estrutura com um alto fator água-cimento apresenta menor resistência devido à existência de poros no concreto, além de por em risco a resistência futura do elemento estrutural por acelerar o processo de corrosão, caso a camada de cobrimento do concreto seja danificada.

A camada de cobrimento deve ter a mesma resistência e fator água/cimento que o núcleo do concreto, mesmo porque a resistência adequada é conseguida, para concretos usuais, utilizando um menor fator água/cimento, o que vem a garantir à impermeabilidade máxima possível da camada superficial. Esta resistência deve ser homogênea em toda a camada, mesmo nos pontos onde são utilizados espaçadores em concreto, com o objetivo de se garantir a durabilidade.

A resistência do concreto é especificada em projeto e utilizada no dimensionamento dos elementos estruturais, a NBR6118 (2003), Tabela 8, correlaciona à resistência em função da classe de agressividade ambiental para que se projetem estruturas, além de esbeltas e econômicas, mas sobretudo duráveis.

Tabela 8: Correspondência entre classe de agressividade e resistência do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Classe de Concreto (ABNT/NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
NOTAS: 1. O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT 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: Adaptado da NBR 6118 (2003), p. 18.

Analisando-se os códigos normativos verificados no item anterior, para se ter uma continuidade na análise, tem-se na Tabelas 9 e 10 as seguintes recomendações quanto a resistência do concreto:

Tabela 9: Requisitos de resistência para condições especiais de exposição do concreto – ACI.

Condição de exposição do concreto armado	Resistência mínima para concretos normais e de alta resistência	
	psi	MPa
Concreto tem baixa permeabilidade quando exposto a água	4000	27,5
Concreto exposto ao gelo e degelo em condição de umidade ou a degelo químico.	4500	30,9
Para proteção da corrosão da armadura em concreto exposto a cloretos provenientes de degelo químico, sais, água salgada, água salobra, água do mar ou spray proveniente dessas fontes.	5000	34,3
Nota: Não é determinado o máximo fator água/cimento para concretos de baixa resistência porque a absorção desses agregados é incerta.		

Fonte: Adaptado do ACI 318 (2005), p. 52.

O regimento normativo, ACI 318 (2005) especifica, uma menor resistência para concreto armado situado em zona de respingos de maré e marinha que a NBR 6118 (2003).

Ressalta-se que o boletim n° 3 do FIB (1999), recomenda resistências maiores para as estruturas em concreto que as normas apresentadas anteriormente, Tabela 10, fato esse que deve garantir um concreto mais impermeável, desempenhando também sua função de mecanismo protetor ao concreto.

A resistência característica obtida através do ensaio a compressão tem sido utilizado geralmente como único aferidor da qualidade do concreto, em detrimento aos demais tipos de ensaios existentes e controle de qualidade no processo executivo, os projetistas não podem se contentar apenas com os resultados de ensaios de resistência conforme atesta Hoffmann & Molin:

O comportamento observado nos ensaios indica que a resistência à compressão não é um bom parâmetro para a avaliação da durabilidade das estruturas de concreto, pois as variações na carga total passante e no coeficiente de difusão de cloretos, para uma mesma resistência à compressão, são muito grandes. (2002).

Tabela 10: Recomendações limites para resistência do concreto – FIB.

Tipo de Exposição do Concreto Armado	Descrição do ambiente de exposição do concreto	Resistência mínima
		MPa
Classe 1 – Nenhum risco de corrosão ou ataque	. Muito seco	----
Classe 2 – Corrosão induzida pela carbonatação	. Seco ou permanentemente molhado	C12/C15
	. Molhado, raramente seco	C20/C25
	. Umidade moderada	C25/C30
	. Ciclos de molhagem e secagem	C30/C37
Classe 3 – Corrosão induzida por cloretos excerto provenientes de água do mar	. Umidade moderada	C30/C37
	. Molhado, raramente seco	C35/C45
	. Ciclos de molhagem e secagem	C35/C45
Classe 4 – Corrosão induzida por cloretos provenientes de água do mar	. Exposto ao sal transportado pelo ar mas não em contato direto com a água do mar	C30/C37
	. Permanentemente submerso	C30/C37
	. Marinha, respingo e zonas de spray	C35/C45
Classe 5 – ataque de Gelo/degelo	. Moderada saturação em água, sem agente de degelo	C30/C37
	. Moderada saturação em água com agentes de degelo	C25/C30
	. Alta saturação em água sem agente de degelo	C30/C37
	. Alta saturação em água com agente de degelo ou água do mar.	C30/C37
Classe 6 – Ataque químico	. Ambiente químico ligeiramente agressivo	C30/C37
	. Ambiente químico moderadamente agressivo	C30/C37
	. Ambiente químico altamente agressivo	C35/45

Fonte: Adaptado do boletim n° 3 do FIB (1999), vol. 3, pg. 24 a 37.

A durabilidade das estruturas frente à ação de cloretos é atingida através de um conjunto de medidas tomadas desde a fase de projeto, a resistência característica é apenas uma delas. As resistências apresentadas são as mínimas exigidas nada impede que sejam utilizados mecanismos especiais de proteção, estes são recomendados principalmente quando a estrutura estará sob condições especiais de agressividade.

### 4.1.3 Espessura do cobrimento do concreto

Para garantir a durabilidade, um dos itens especificados em projeto é a espessura de cobrimento mínimo necessário ao elemento estrutural. É considerado o cobrimento nominal que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução, onde os espaçadores e as dimensões das armaduras devem respeitar os cobrimentos nominais.

A espessura da camada de cobrimento depende da classe de agressividade e dos agentes patológicos existentes. Lima (2005) ressalta que um mesmo elemento estrutural pode estar exposto a níveis de agressividades diferentes:

- Zona de atmosfera marinha: apesar da estrutura não estar em contato com a água do mar, a estrutura recebe uma quantidade de sais que se deposita na superfície do concreto, onde se produzem os ciclos de molhagem e secagem. Esta quantidade de sais diminui à medida que se distancia do mar, a depender da direção e velocidade dos ventos;
- Zona de respingos de maré: ocorre a ação direta do mar na estrutura devido às ondas e ao spray marinho. Os danos à estrutura são causados pela ação dos cloretos, corrosão das armaduras, e pela ação das ondas, erosão.
- Zona de variação de marés: região que ora está exposta a atmosfera, ora está submersa, a depender dos níveis máximos e mínimos das marés. A degradação é proveniente do ataque químico de sais agressivos, ação das ondas e outras substâncias em suspensão e microorganismos.
- Zona submersa: a estrutura encontra-se permanentemente submersa. A deterioração ocorre pela ação de sais agressivos (sulfato e magnésio) e pela ação de microorganismos (corrosão biológica).

A faixa de concreto na zona de ação das marés é bastante agredida necessitando que seja especificada uma espessura mínima de cobrimento maior que nas demais áreas. Contudo para um mesmo elemento estrutural, praticamente

inviabiliza a execução, devendo ser especificado o cobrimento que der maior segurança ao elemento como um todo.

A partir do estudo e caracterização da classe de agressividade ambiental, os códigos normativos especificam a adequada espessura da camada de cobrimento a ser utilizada na elaboração do projeto estrutural.

Devido à importância da espessura do cobrimento nas estruturas de concreto armado, Andrade (1992), apresenta os principais estudos e referências normativas: EH-88 - Norma Espanhola, Código modelo - CEB 90, Eurocódigo nº2 - Comunidade Econômica Européia, pr EN 206-CEN - critérios de conformidade, BS 8110-1985 - norma inglesa, BAEL-83 - norma francesa, DIN 1044-1978 - norma alemã, ACI 318 - boletim de norma americana e JASS - Norma Japonesa; cujos resultados são visualizados no Gráfico 9.

Verifica-se que a espessura de cobrimento recomendada nas normas apresentadas no Gráfico 9, varia de 10 mm a 60 mm, sendo a norma japonesa a mais rigorosa. O ACI 318 utiliza uma maior amplitude para a espessura da camada de cobrimento portanto, se faz necessário um rigoroso conhecimento da agressividade ambiental para especificar corretamente esta espessura.

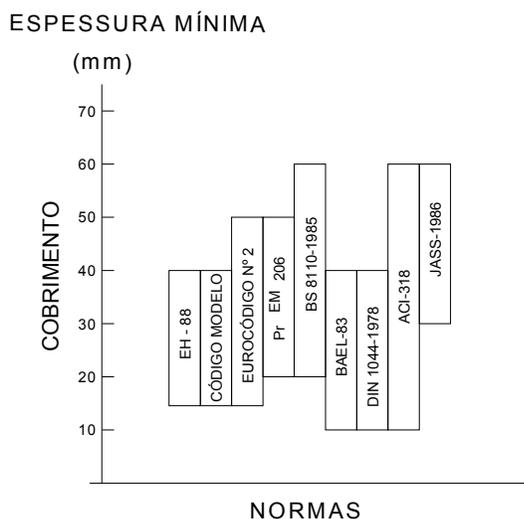


Gráfico 9: Valores de espessura de cobrimento mínimo de armaduras, conforme várias normas.  
Fonte: Andrade (1992), pg. 40.

A norma brasileira especifica a espessura do cobrimento nominal, medido entre a superfície da camada externa e a face externa do estribo, em função da classe de agressividade ambiental e elemento estrutural, esta espessura está entre

20 mm e 50 mm, Tabela 11. Seu cobrimento nominal pode ser reduzido em 5 mm se o controle rigoroso na execução for explicitamente recomendado no projeto estrutural.

Tabela 11: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para  $\Delta c = 10$  mm.

Tipos de estruturas	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		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 a bainha 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 desta tabela podem ser substituídos por 7.4.7.5, respeitado um 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.					

Nota:  $\Delta c$  - Tolerância de execução para o cobrimento.

Fonte: NBR 6118 (2003), p. 16.

Quando há a presença de cloreto na atmosfera, a espessura de cobrimento deve ser especificada com o máximo rigor para que venha a inibir que os íons cloreto que penetrem no concreto alcance níveis críticos de concentração, ocasionando despassivação das armaduras e início do processo corrosivo que reduz a vida útil das estruturas, afetando sua estabilidade, funcionalidade e estética, necessitando de recuperação.

Uma análise em algumas recomendações normativas quanto à espessura do cobrimento se faz necessário para que o projetista estrutural analise juntamente com as recomendações da norma brasileira e especifique corretamente este cobrimento.

De acordo com o ACI 318 (2005), norma americana, o cobrimento é recomendado em função da utilização do elemento estrutural durante sua vida útil e

da agressividade ambiental, na Tabela 12, estão descritas as recomendações para as principais estruturas em concreto armado.

Tabela 12: Recomendações de cobrimento para estruturas de concreto armado – ACI.

Tipo de Exposição do Concreto armado	Elemento estrutural	Espessuras mínimas de cobrimento	
		pol	mm
Em contato e permanentemente exposto ao solo	Qualquer	3	75
Respingo e zona atmosférica sujeita ao spray marinho	Qualquer	2,5	65
Zona atmosférica não sujeita ao spray marinho	Qualquer	2	50
Submerso	Qualquer	2	50
Exposto ao solo ou ao meio ambiente	Qualquer	1.1/2 a 2	38 a 50
Não exposto ao meio ambiente, nem em contato com o solo	Lajes, parede e juntas	3/4 a 1.1/2	19 a 38
	Vigas e pilares	1.1/2	38
	Cascas e placas curvas	3/4 a 1.1/2	19 a 38

Fonte: Adaptado do ACI 318 (2005), p. 83-84 e ACI 357R-84 (1997), p. 5.

Para estruturas expostas a um ambiente mais agressivo, principalmente havendo presença de cloretos, o ACI 318 (2005), recomenda uma espessura de cobrimento maior que a norma brasileira.

Quanto aos limites de tolerâncias o ACI 318 (2005) esclarece em seus comentários: “O projetista pode especificar tolerâncias mais restritivas que aquelas permitidas pelo código, quando necessário para minimizar o acúmulo de tolerâncias resultando em redução excessiva do cobrimento”.

As tolerâncias quanto à espessura do cobrimento ficam a cargo do projetista que além das condições ambientais verifica as condições de esforços e deformações do elemento estrutural para que esteja dentro dos limites normativos de abertura de fissuras.

Os limites de tolerância para o cobrimento do concreto recomendado pelo ACI 318 (2005), Tabela 13, não excederá a 1/3 do cobrimento mínimo do concreto especificado em projeto.

Tabela 13: Tolerância para cobrimento em estruturas de concreto armado – ACI.

Elementos	Espessura do cobrimento	Tolerância mínima no cobrimento do concreto	
		Sob flexão e compressão e paredes estruturais	$c \leq 2$ cm
	$c > 2$ cm	-1/2 “	-12,5 mm

Fonte: Adaptado do ACI 318 (2005), p. 81.

A espessura do cobrimento especificado pelo boletim n° 3 do FIP (1999), código modelo, também é em função da classe de agressividade ambiental, cuja especificação em projeto é o cobrimento nominal, tido como o cobrimento mínimo, Tabela 14, adicionado à tolerância.

Tabela 14: Recomendações de cobrimento para estruturas de concreto armado – FIB.

Tipo de Exposição do Concreto Armado	Descrição do ambiente de exposição do concreto	Espessuras mínimas de cobrimento
		mm
Classe 1 – Nenhum risco de corrosão ou ataque	. Muito seco	10
Classe 2 – Corrosão induzida pela carbonatação	. Seco ou permanentemente molhado; . Molhado, raramente seco; . Umidade moderada; . Ciclos de molhagem e secagem.	25
Classe 3 – Corrosão induzida por cloretos excerto provenientes de água do mar	. Umidade moderada; . Molhado, raramente seco; . Ciclos de molhagem e secagem.	40
Classe 4 – Corrosão induzida por cloretos provenientes de água do mar	. Exposto ao sal transportado pelo ar mas não em contato direto com a água do mar; . Permanentemente submerso;	40
	. Marinha, respingo e zonas de spray.	50 a 75
Classe 5 – ataque de Gelo/degelo	. Moderada saturação em água, sem agente de degelo; . Moderada saturação em água com agentes de degelo; . Alta saturação em água sem agente de degelo; . Alta saturação em água com agente de degelo ou água do mar.	* Depende do tipo de ambiente do entorno
Classe 6 – Ataque químico	. Ambiente químico ligeiramente agressivo; . Ambiente químico moderadamente agressivo; . Ambiente químico altamente agressivo.	* Depende do tipo de ambiente do entorno e produto químico

Fonte: Adaptado do boletim n° 3 do FIB (1999), vol. 3, p. 24 a 30 e vol. 1 p. 278.

Para os cobrimentos especificados pelo boletim n° 3 do FIB (1999), o limite de tolerância não deve ser menor que 5 mm, tolerância de 10 mm poderá ser tomada se para um caso individual for demonstrado que um baixo valor é realmente obtido na prática. Para especificar as tolerâncias deve ser verificado o nível de controle de qualidade na produção do concreto, transporte, lançamento, adensamento e cura para que as reações não ultrapassem a camada de cobrimento do concreto.

Para garantir a durabilidade, o projetista deve especificar a espessura de cobrimento para os diversos elementos estruturais que compõem a estrutura e seus limites de tolerância. Com espessuras diferentes encontradas nos diversos documentos normativos, cabe ao projetista verificar os agentes agressores e as demais formas de proteção existentes, para indicar corretamente este cobrimento.

Um rigoroso controle na execução é assegurando quando são utilizados materiais e métodos construtivos adequados e mão-de-obra qualificada, atrelado à fiscalização em todas as etapas da cadeia produtiva.

O que vem dando suporte ao controle na execução é a implantação de sistemas voltados para a qualidade, a NBR ISO 8402 (1994) define qualidade como “A totalidade de características de uma entidade, que lhes confere a capacidade de satisfazer as necessidades explícitas e implícitas”.

Dentre os programas de qualidade voltados para a construção civil destacam-se o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), lançado em 1988 pela Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano (SEDU) da Presidência da República e as normas da série NBR ISO 9000 (2000), voltados para análise e solução de problemas e aplicação de melhoria contínua dos índices de rejeição do produto.

#### **4.2 Teores de cloretos em cidades litorâneas**

A presença de cloretos na atmosfera ou impregnado ao concreto é fator desencadeante da maioria dos problemas patológicos das estruturas situadas em

regiões litorâneas. Quanto ao cloreto produzido pelo mar, esclarece Meira et al. (2004), “A agressividade marinha se estende além do entorno do mar, penetrando no sentido do continente e atacando as estruturas que se situam na zona onde a névoa salina exerce a sua influência”.

Os aerossóis de sais oriundos do mar podem estar na forma de íon ou na forma de cloreto de sódio, são produzidos tanto pelo oceano em águas profundas, quanto a partir do movimento das ondas em águas rasas, a depender da ação do vento, umidade relativa, temperatura, batimetria, demais condições climáticas e topográficas. Esclarece Cole (2003), “A quantidade de cloreto produzido depende relativamente da extensão dos cumes brancos que cobrem as ondas. É relacionada com a latitude, na região equatorial há baixos cumes brancos, enquanto que em grandes latitudes têm-se altos cumes brancos”.

Apesar de regiões equatoriais apresentarem aparentemente menor produção de cloreto na linha de costa que em regiões com alta latitude, não é indicativo que os problemas patológicos ocasionados nas estruturas de concreto sejam minimizados pois há outros fatores inerentes.

Verifica-se, no Gráfico 10, que o efeito da umidade relativa na concentração de sais é bastante significativa, diminuindo o teor de íon cloreto na media em que aumenta a umidade.

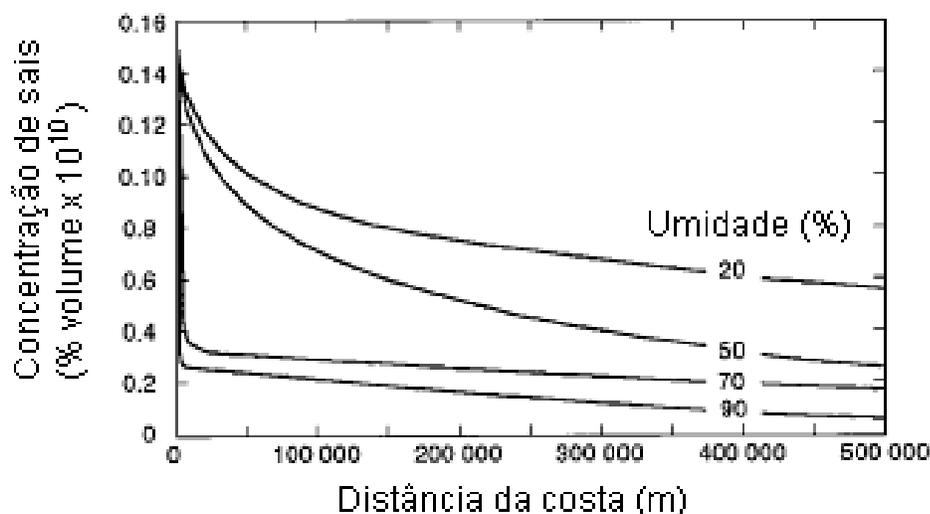


Gráfico 10: Variação da produção de aerossóis de sal pelo oceano em função da umidade relativa: velocidade do vento a 7,5 m/s; 800 mm/ano de precipitação.

Fonte: Cole (2003), p. 133.

Observa-se também no Gráfico 10, a presença de aerossóis de sais a 500 km da costa em proporção oito vezes menor que a beira mar, apesar de dispersos devem ser levados em consideração pelo projetista. Um acréscimo na umidade relativa, em contrapartida, leva a um incremento na velocidade das reações que degradam o concreto, diminuindo a vida útil da estrutura.

Ressalta-se que o íon cloreto produzido pelas ondas se mantém ao longo da linha de costa, por terem maior granulometria, e os oriundos do oceano adentram mais ao continente, sendo facilmente carreados pelo vento. Após ensaios no litoral australiano Cole et al (2003), constatam que a direção e a velocidade do vento são determinantes para a concentração de sal marinho em regiões distantes da costa, Gráfico 11.

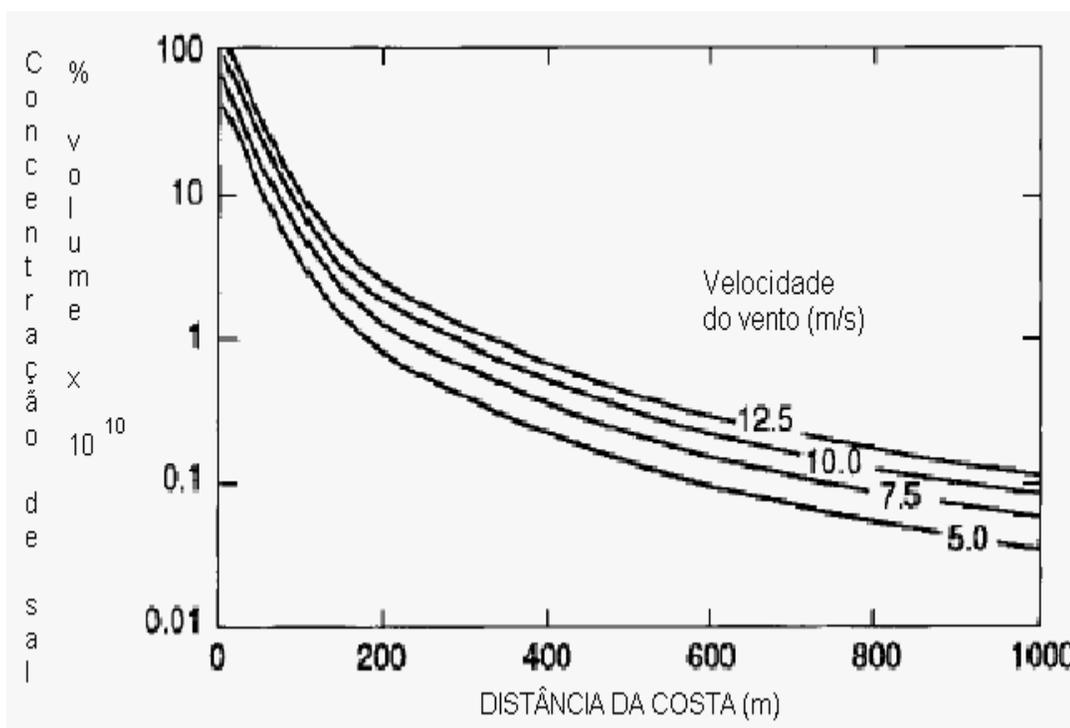


Gráfico 11: Variação da geração de aerossol marinho em função da velocidade do vento e distância da costa: 2 m de altura; 0,5 m do solo aproximadamente.

Fonte: Cole et al. (2003), No 2. p. 132.

Pesquisadores começaram a estudar a concentração de sal na atmosfera marinha afim de quantificar o teor de cloreto existente, desde a linha de maré até continente a dentro, e a relação deste com as demais condições ambientais.

Na coletânea de estudos apresentada no Gráfico 12, foi verificada que a influência da distância em que se encontra a estrutura em relação ao mar constitui o mais importante aspecto no estudo da corrosão em zona de atmosfera marinha. A variabilidade encontrada nos valores da taxa de deposição de cloretos para os diversos países, deixa clara a interferência das respectivas condições ambientais e climáticas.

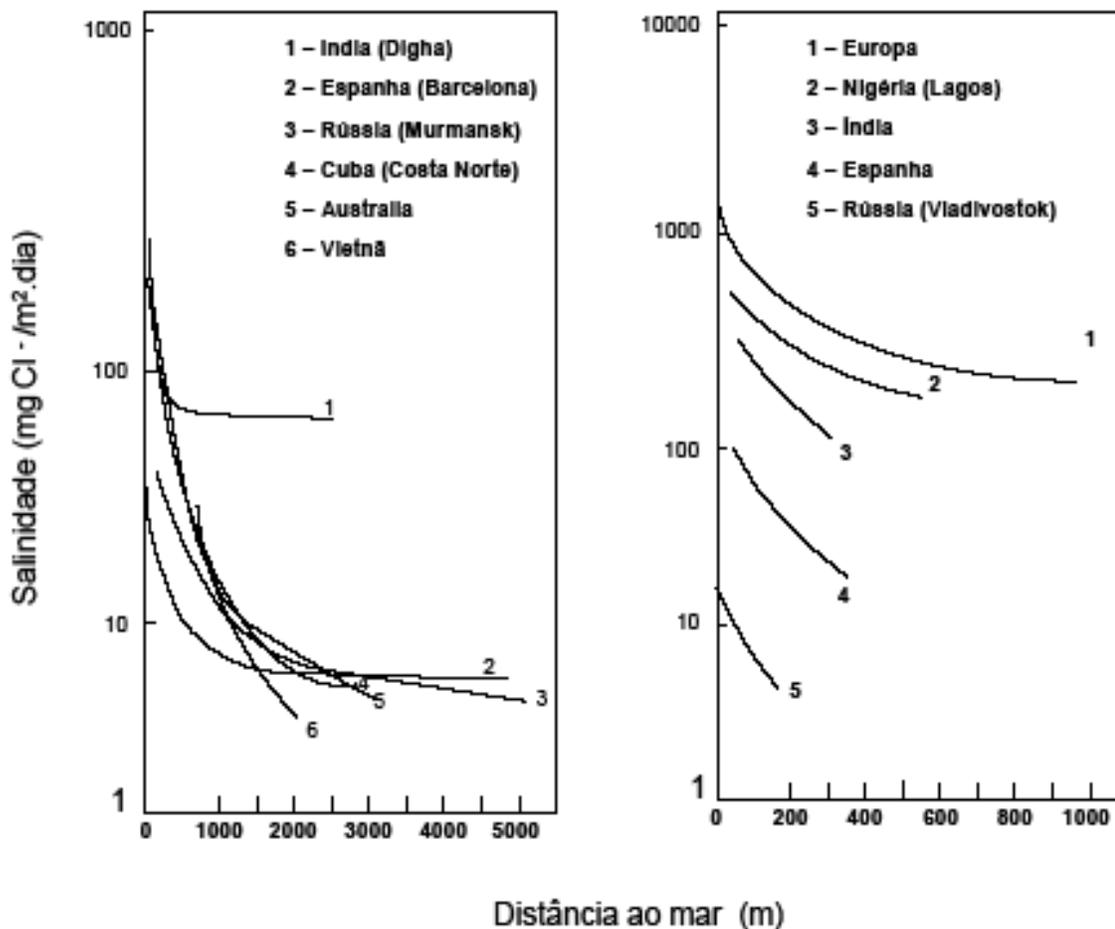


Gráfico 12: Comportamento da salinidade em função da distância.  
Morcillo et al (1998) apud Meira & Padaratz (2002), p. 3.

Tomando-se como referência o estudo feito na Austrália, conforme é apresentado no Gráfico 13, verifica-se para uma mesma distância do mar, por exemplo a 15 km, taxas de deposição de cloretos na ordem de 12, 22 e 38 (mg/m<sup>2</sup>.d). Comprova-se que num mesmo país, em virtude das condições climáticas e ambientais serem inerentes a cada micro-clima, a taxa de deposição de cloreto varia para regiões diversas.

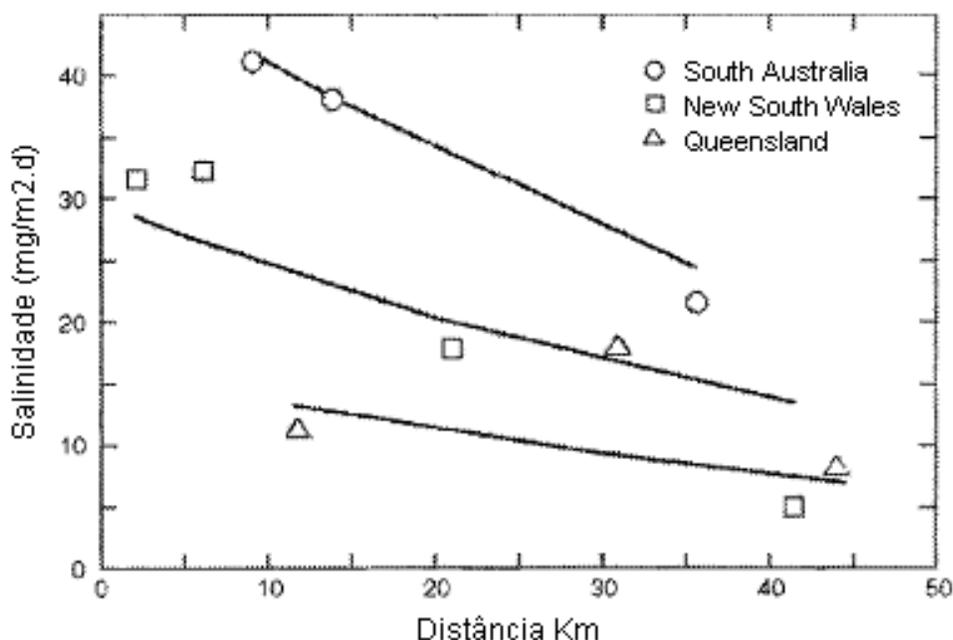


Gráfico 13: Salinidade de sais influenciada por aerossóis produzidos no oceano.

Fonte: Cole et al. (2003), No 4. p. 265.

A taxa de deposição de cloreto ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{d}$ ) nas superfícies das estruturas é medida a partir do teor de cloreto ( $\text{mg}/\text{L}$ ) existente na atmosfera, recomenda-se portanto, que cada cidade ou região colete e quantifique seu próprio teor de cloreto correlacionando-o as características ambientais: umidade relativa, temperatura, direção e velocidade do vento, e geográficas tais como batimetria, altitude, dentre outras.

Dados quanto aos teores de cloretos para as diversas cidades costeiras fundamentarão o projetista para prever a vida útil da estrutura projetada e especificar medidas de proteção adequadas ao elemento estrutural, do ponto de vista do ataque por cloretos.

No Brasil, pesquisadores também começam a medir os teores de cloreto em cidades costeiras e quantificar sua taxa de deposição nas estruturas. Costa (2001) em Salvador/BA, mede a taxa de deposição de cloretos provenientes do spray marinho, utilizando o método da vela úmida nos períodos de amostragem de cinco meses, Tabela 15. É encontrando em alguns pontos, mais distantes da costa, teores de cloreto maiores que em regiões próximas ao mar, confirmando a atuação do vento no carreamento do íon cloreto.

Tabela 15: Deposição seca de cloreto na vela úmida.  
(período de 15/08/2000 a 23/01/2001)

Local	Distância em relação ao mar, em metros	Teor de cloretos, mg Cl / m <sup>2</sup> .dia	
		Média de 10 determinações	Desvio padrão
Flamengo	71.6	46.2	18.8
Flamengo	137.6	9.3	3.8
Itapoá	143.4	21.1	23.5
Itapoá	531.9	4.2	1.5
Placaford	787.7	2.9	1.4
Arembepe	1165.4	2.6	1.5
Stela Mares	2225.5	4.6	1.0
Buraquinho	2645.0	1.8	0.8
Piatã	4704.7	3.7	5.8

Fonte: Costa (2001) p. 71.

Meira & Padaratz (2002), em João Pessoa/PB, medem a taxa de deposição seca de cloreto, utilizando também o método da vela úmida, verifica-se que a partir de 200m da costa a concentração de cloretos cai significativamente, Gráfico 14, evidenciando a ação do mar. Contudo, por ter sido utilizado apenas cinco pontos de coleta a amostra não representa as variações ambientais decorrentes de correntes de vento e existência de obstáculos. Caso um estudo mais detalhado venha a ser feito nessa cidade, o resultado com tendência a zero para distâncias maiores que 1000 m pode ser alterado a depender da direção e velocidade do vento e forma de atuação das ondas ao longo da costa.

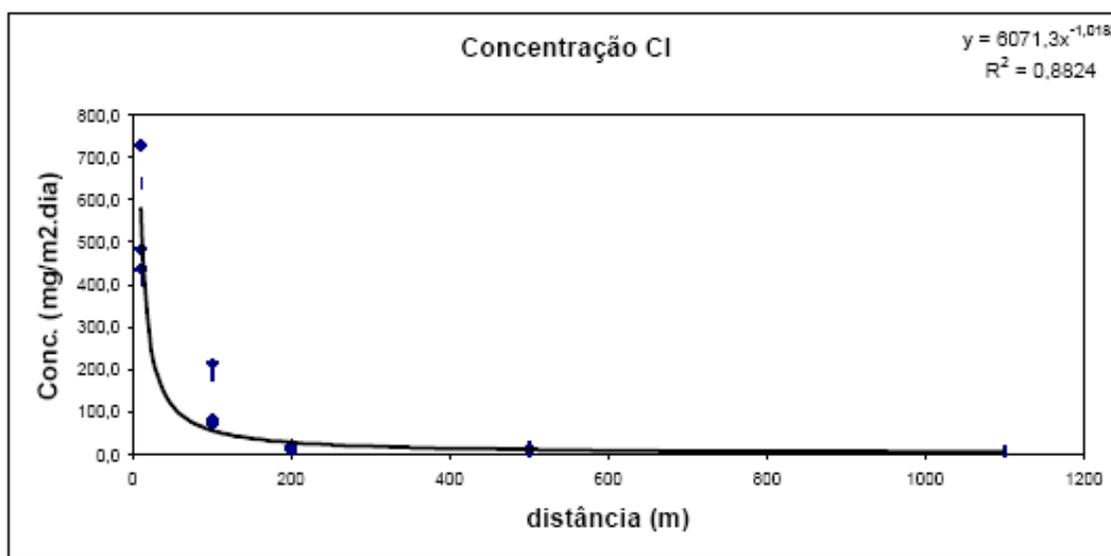


Gráfico 14: Perfil de concentração de cloretos em função da distância em relação ao mar.

Fonte: Meira & Padaratz (2002), p. 5.

De posse do teor de cloreto, indicador do nível de agressividade que estará submetido o concreto em regiões litorâneas, o projetista pode especificar para a estrutura sua vida útil em projeto. Meira (2004), apresenta estimativa de vida útil em função da agressividade por cloretos e espessura da camada de cobrimento, Tabela 16, concluindo que a partir de 700m da orla tem-se uma redução significativa do ataque por cloretos. Conforme ressalta o autor, esses valores são de referência não podendo ser utilizados como certos em todo o litoral brasileiro, devido às características locais do meio ambiente onde estará inserida a estrutura e da geografia da região, dentre outras.

Tabela 16: Faixas de agressividade com base na vida útil das estruturas.

<b>Faixas de agressividade</b>		<b>Distâncias aproximadas** m</b>
Nível de agressividade	Vida útil máxima* (anos)	
Elevada	Até 3 (cob = 10mm) e 17 (cob = 20mm)	Até 130
Moderada	entre 24 (cob = 10mm) e 50 (cob = 20mm)	Entre 130 e 700
Mínima	Superior a 24 (cob = 10mm) e 50 (cob = 20mm)	Acima de 700

\* Para os diversos cobrimentos e materiais estudados.  
 \*\* Nota: cabe aqui ressaltar que essas distâncias não podem ser extrapoladas para todo o litoral brasileiro, mas servem como referência. Isso se deve aos distintos regimes de ventos, distribuição de umidades relativas e temperatura, por exemplo.

Fonte: Meira (2004).

Verifica-se que há necessidade de se conhecer as condições ambientais nas demais cidades litorâneas quanto ao teor de cloreto existente, para que seja especificado em projeto a vida útil da estrutura e mecanismos de proteção, fato este que justifica a disposição de pontos de coleta na cidade de Maceió.

A capital alagoana é uma cidade litorânea num clima tropical, como bem é caracterizada na enciclopédia Municípios de Alagoas:

O município apresenta temperatura média anual em torno de 24,2°C. Durante o mês mais quente (fevereiro), as médias alcançam 25,5°C e, no mais frio (agosto), desce a 22,4°C. Quanto à precipitação anual, varia entre 1.400mm e 1500mm, concentrada de abril a julho, quando chove mais de 70% do total. A evapotranspiração anual é alta, sendo maior de novembro a março, coincidindo com o período de menor precipitação, ocorrendo um total, durante o ano, de 1.208mm. Suas temperaturas são amenizadas pelos ventos Sudeste, que sopram de março a setembro, e pelos ventos de Nordeste, que atuam de novembro a março. Instituto Arnon de Mello (2006), p. 405.

Dentre os diversos pontos abordados neste capítulo objetivando embasar o projetista a conceber estruturas resistentes aos cloretos, fica evidente que não satisfaz mais se projetar estruturas apenas com as fases de concepção, dimensionamento e detalhamento, é claro que em cada uma delas deve haver elementos condicionantes a garantia da durabilidade, porém sendo acrescentado uma nova fase ao projeto que englobe especificação de materiais constituintes do concreto e validação dos procedimentos construtivos.

No próximo capítulo serão apresentados juntamente com os resultados, os procedimentos de ensaio e método de análise utilizada para quantificar o teor de cloreto em Maceió, distribuindo 25 coletores nas regiões propícias a utilização de estruturas em concreto.

## **CAPÍTULO V**

### **EXPERIMENTAÇÃO**

Dentro do estudo das diretrizes para durabilidade das estruturas de concreto, buscou-se verificar a que níveis de agressividade por cloreto estão sujeitas as estruturas em concreto em Maceió-AL foi então, efetuada uma experimentação para identificar o teor de cloretos inorgânicos existentes na atmosfera nas diversas regiões da cidade, desde a orla até os tabuleiros, e a partir daí se determinar as taxas de deposição sobre as estruturas. As etapas da experimentação e os procedimentos adotados estão detalhados a seguir:

Inicialmente foram definidos pontos de coleta, tempo de exposição, método de captação e medição a serem utilizados. A literatura recomenda o ensaio através do método da vela úmida para determinar o teor de cloretos inorgânicos existentes na atmosfera e depositados sobre superfície de área conhecida. A coleta do cloreto na atmosfera foi realizada de acordo com os procedimentos recomendados na norma NBR 6211 (2001), que por sua vez está fundamentada na norma americana ASTM D 512-89 publicada em 1999. A metodologia desse ensaio se aplica especificamente para determinação do teor de cloretos solúveis em água, como os produzidos no oceano e na linha de ondas que penetram no continente.

#### **5.1 Localização dos pontos de coleta**

A fim de atingir os objetivos deste trabalho, necessitava-se expor os experimentos em pontos que representassem Maceió e que viabilizassem a pesquisa. Para tal escolheu-se as regiões de planície e tabuleiro, identificadas no

mapa que apresenta o relevo da cidade, Figura 13, desprezando-se as grutas e encostas devido à dificuldade de acesso e baixo potencial de utilização, em escala e a curto prazo, de edificações ou obras de arte em estruturas de concreto.

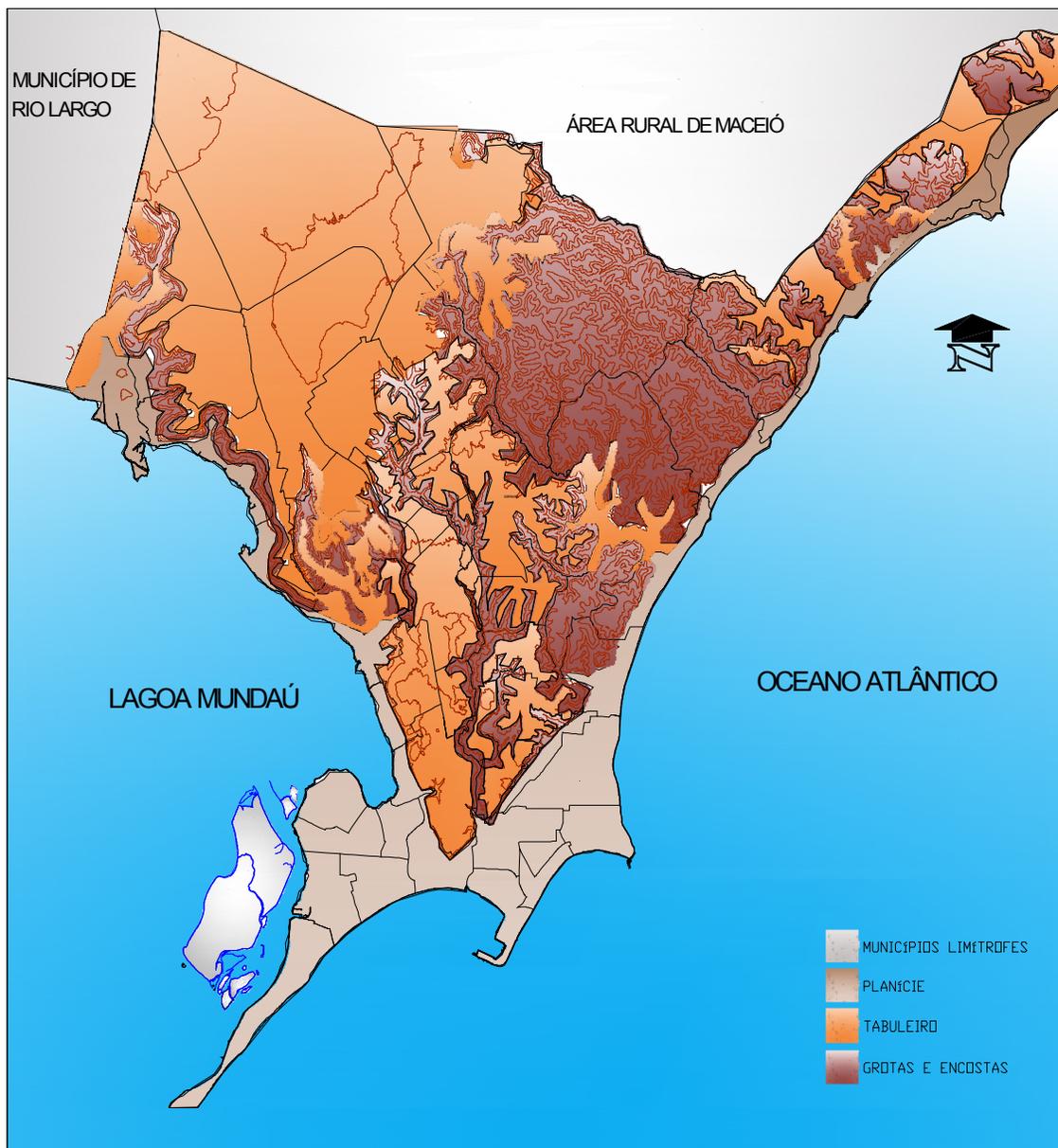


Figura 13: Mapa do relevo de Maceió – AL.

Fonte: Adaptado do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1985).

Maceió apresenta extensa área de planície e tabuleiros pontuada por encostas, sendo circundada por água, de um lado o Oceano Atlântico produtor do íon cloreto, do outro a lagoa Mundaú que recebe aporte de água do mar de acordo

com o ciclo de marés e banha a cidade do litoral ao interior. Tem suas estruturas propícias à agressividade pela ação de cloretos.

Diante do exposto foram estabelecidos alguns parâmetros para escolha da época de exposição dos experimentos para captação do íon  $\text{Cl}^-$  e os respectivos locais dos pontos de medição:

- Época de coleta: de primavera a verão, por apresentar o ar menos denso com maior velocidade nos ventos e menor precipitação;
- Área a ser disposta os coletores: região propícia à utilização de estruturas de concreto, da planície costeira aos tabuleiros, sendo descartados grutas e encostas;
- Pontos de disposição dos coletores: escolhidos de acordo com a incidência dos ventos predominantes sudeste (proveniente do mar) e nordeste, facilidade de acesso, e setorização no mapa;
- Quantidade de coletores: determinada de forma a cobrir a área a ser disposta, totalizando 26, sendo um coletor para o ensaio em branco devidamente lacrado e vinte e cinco coletores expostos em campo;
- Tempo de exposição do coletor: recomendado pela norma NBR 6211(2001), 30 dias.
- Segurança do equipamento: para inibir a ação de vândalos, optou-se por colocar os coletores em propriedade privadas, necessitando de autorização dos proprietários, ou públicas que fossem fechadas com vigilância.

Foi escolhida para coleta a época de maior velocidade do vento ocorrida no ano anterior, como mostrado na Tabela 17, montada a partir de dados coletados pela Estação Meteorológica do Centro de Ciências Agrárias da UFAL onde, as incidências de vento medidos nas direções sudeste e nordeste, respectivamente para outubro e novembro do ano de 2005 resultaram em 2,7 m/s e 3,0 m/s admitindo valores médios mensais.

Tabela 17: Dados meteorológicos médios mensais em Maceió-AL.

<b>Variáveis</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
Direção do Vento <sup>1</sup> à 10m	SE	SE	NE	SE
Velocidade do Vento (ms <sup>-1</sup> ) à 10m	2,4	2,7	3,0	2,7
Precipitação Pluvial (mm)	54.1	18.8	14.2	61.5
Temperatura do ar (°C)	23,2	24,4	25,5	25,5
Umidade relativa do ar (%)	83,3	79,0	76,0	78,0
Nota: SE = sudeste; NE= nordeste.				

Fonte: Estação Meteorológica do CECA/UFAL (2005)<sup>19</sup>.

Apresentam-se também na Tabela 17 os valores de maior temperatura e umidade relativa do ar, para os meses escolhidos para realização do ensaio, já que estes fatores influenciam diretamente tanto no alcance dos íons cloretos, adentrando ao continente, quanto na aceleração do processo de corrosão, quando há deposição do cloreto na estrutura em concreto.

Para escolha dos pontos de medição foi traçada uma malha discretizada por quadrículas de 1000 m x 1000 m sobre o mapa de Maceió cujos vértices indicam pontos potenciais para a disposição dos experimentos, seus eixos são posicionados na direção dos ventos predominantes para captar aerossóis provenientes do mar: sudeste e nordeste.

Devido às mudanças ocasionais da velocidade e direção do vento tanto pelas interferências dos obstáculos naturais, como as falésias mortas, quanto dos edifícios, dentre outros, tem-se dois eixos perpendiculares formando o vetor de captação do cloreto na atmosfera.

A locação em campo dos experimentos inicialmente obedeceu à metodologia de discretização da malha ao longo das linhas sudeste e nordeste, na prática alguns pontos sofreram deslocamento por dificuldade de autorização por parte dos proprietários dos imóveis, segurança dos equipamentos e ou condições de acesso, contudo estes coletores foram dispostos em áreas próximas aos pontos iniciais de acordo com a metodologia apresentada.

<sup>19</sup> Dados fornecidos pelo Professor José Leonaldo de Souza, coordenador da Estação Meteorológica do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Estão identificados no mapa de Maceió, Figura 14, apenas os pontos cujos coletores foram ensaiados, sendo desprezados os que se encontravam danificados quando da ocasião do seu recolhimento. Estes devidamente geo-referenciados estão locados sobre a malha discretizada no mapa, as quadrículas cujos lados medem 1000 m, são utilizadas também para verificar a distância entre o ponto onde foi disposto o coletor e o mar, seguindo o eixo de direção do vento sudeste.

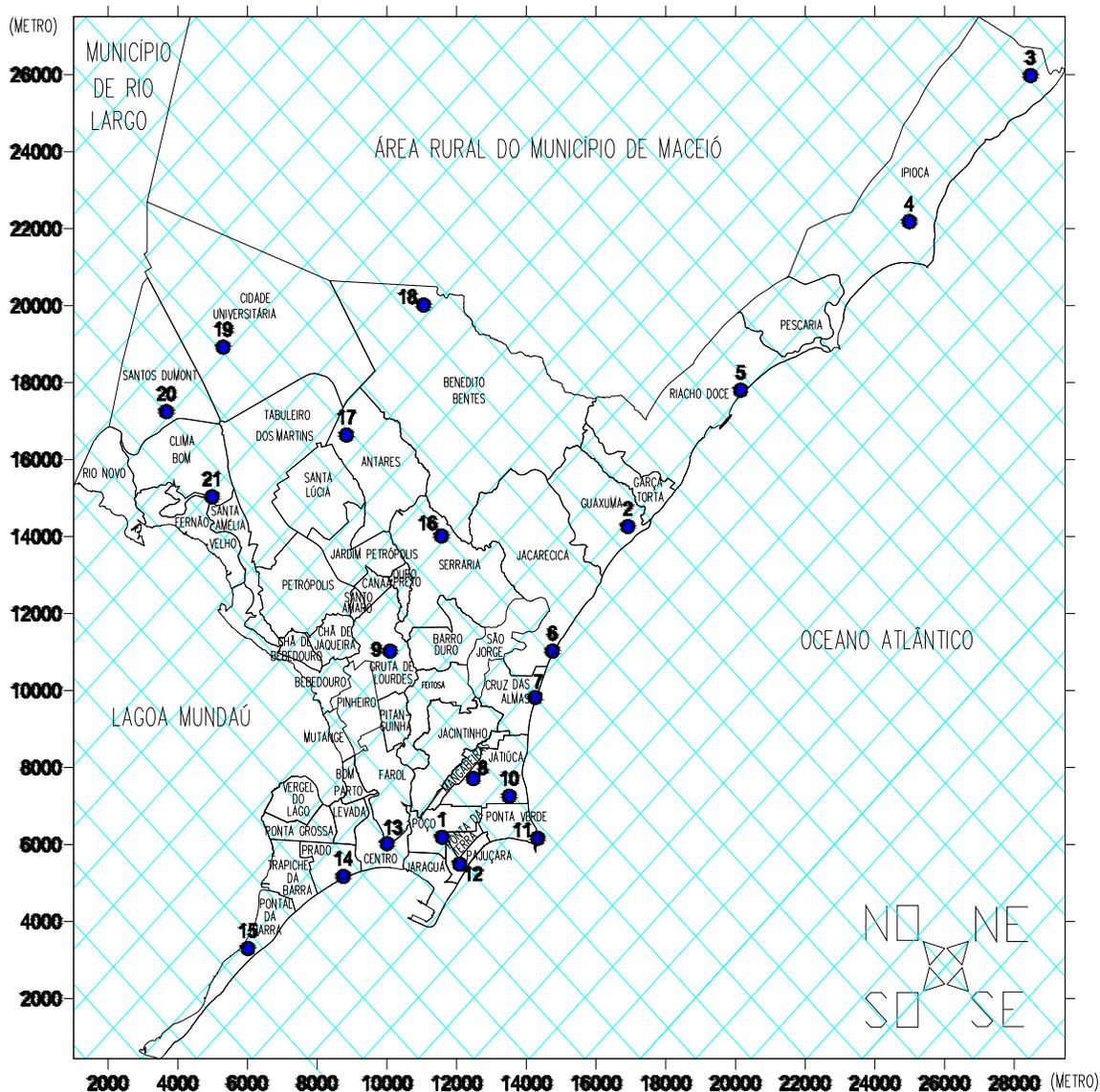


Figura 14: Malha discretizada sobre o mapa de bairros de Maceió com localização dos pontos de coleta cujos experimentos foram ensaiados.  
Fonte: Adaptado do Centro de Geoprocessamento da Prefeitura Municipal de Maceió (1998).

Vê-se, na Figura 14, a indicação dos bairros e seus limites, como também do oceano, produtor de cloretos, e da lagoa receptora que poderá servir como meio de transporte de parte deste cloreto, levando-os até as regiões distantes do mar. Os pontos GPS 22 a 25, referentes aos coletores 9, 14, 11 e 13 respectivamente não foram geo-referenciados pois os experimentos encontravam-se danificados quando da ocasião da coleta, sendo descartados do ensaio.

Os experimentos foram dispostos em campo duas vezes, de 1 a 31 de outubro de 2006 e de 2 de novembro a 2 de dezembro de 2006, totalizando em ambos os casos 30 dias de coleta, utilizando os mesmos pontos em ambas as exposições.

## **5.2 Método de coleta**

A coleta de cloretos inorgânicos existentes na atmosfera pelo método da vela úmida, conforme determina a NBR 6211 (2001), consiste na preparação da vela e aparato de sustentação, exposição e recolhimento da amostra, cujos procedimentos devem ser realizados em ambiente isento de contaminantes para preservação e validação do ensaio.

A vela úmida, de acordo com recomendação normativa, Figura 15, deve ser constituída de um frasco coletor de material inerte, vidro ou polietileno com aproximadamente 800 ml de capacidade, sobre o qual é fixado um tarugo cilíndrico também de material inerte com 2,5 cm de diâmetro e altura total de 15 cm, envolvido com dupla camada de gaze cirúrgica, cuja área exposta da gaze à atmosfera é de aproximadamente 100 cm<sup>2</sup>.

O frasco coletor contendo aproximadamente 200 ml de água glicerinada, isenta de cloretos, deve ser vedado por uma rolha de borracha que possua dois orifícios aos quais são inseridos tubos de vidro para passagem dos extremos das gazes que ficam embebidos na água.

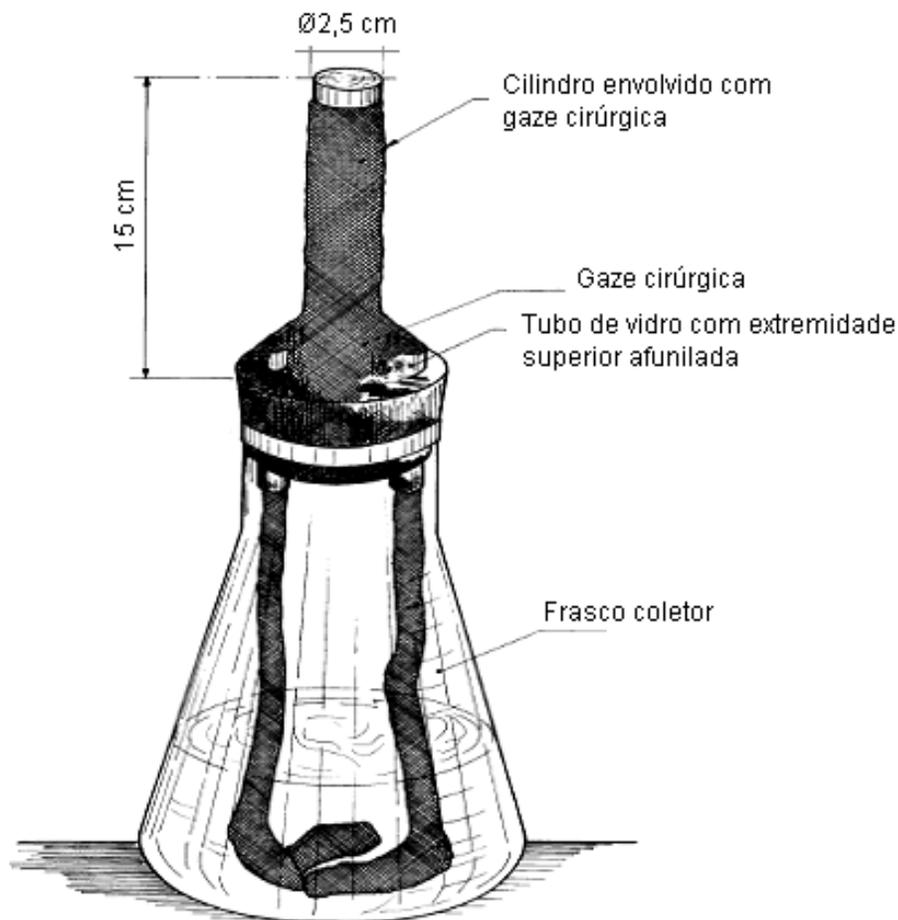


Figura 15: Vela úmida.  
Fonte: NBR 6211 (2001), p. 5.

Durante os procedimentos de montagem da vela úmida recomenda-se dispor de um ambiente isento de cloretos e utilizar luvas de pvc (sem látex) para que não haja contaminação.

Para realização deste ensaio foi confeccionada a vela úmida adaptando-se materiais inertes similares aos indicados na recomendação normativa, desde que atendessem perfeitamente as condições de uso e desempenho requerido. Segue a descrição dos materiais utilizados:

- Cilindro: recipiente de vidro com capacidade volumétrica de 1000 ml;
- Rolha: circular, para vedar o frasco coletor, confeccionada por torneiro mecânico em pvc maciço, material inerte, com diâmetro de 7 cm e com 2,5 cm de altura em formato cônico para colaborar com a vedação do frasco, possuindo um orifício central de 2 cm não vazado que servia de

sustentação para o tarugo. Como o material da rolha é inerte, foi perfurado em seus extremos dois furos por onde passaram as gazes para o interior do cilindro, sem a necessidade de se utilizar os cilindros de vidros indicados na NBR 6211 (2001), facilitando a montagem da vela úmida, este procedimento pode ser utilizado por outros pesquisadores que venham a fazer experimentos correlatos;

- Tarugo: cilíndrico, feito também por torneiro mecânico em pvc maciço com 2 cm de diâmetro e 17 cm de comprimento, destes, 2 cm foram fixados na rolha e 15 cm expostos para sustentação da gaze;
- Gaze: cirúrgica, isenta de minerais e/ou quaisquer outras substâncias contaminantes, foi adquirida em loja de materiais cirúrgicos;
- Água: utilizou-se água destilada coletada no laboratório de saneamento ambiental da Universidade Federal de Alagoas, sendo na 1ª experimentação 200 ml de água destilada e na 2ª experimentação 400 ml de água destilada com adição de glicerol, produto químico que visa minimizar a evaporação, diluído a 20%.

Após montagem das velas úmidas, totalizando 26, as mesmas foram vedadas com saco plástico visando protegê-las de contaminantes durante o percurso até os pontos de coleta. Foram identificadas e acondicionadas em caixa para transporte, dispostas em campo, permanecendo por 30 dias.

Uma das velas permaneceu lacrada e guardada em armário isento de cloretos para realização do ensaio em branco, que serve de referência para os demais ensaios, vinte e cinco foram expostas em campo num mesmo dia para que todos os experimentos estivessem sob as mesmas condições climáticas durante o período de exposição.

Tem-se a vela úmida protegida antes de ser exposta, Figura 16, no campo é retirado o plástico protetor, a gaze umedecida por seus extremos estarem embebidos em água absorve os componentes existentes na atmosfera, entre eles o cloreto. Após trinta dias os experimentos são recolhidos, cobertos com plástico em pvc e lacrados para evitar contaminação futura, sendo levados ao laboratório de saneamento ambiental para quantificar o teor de cloreto absorvido.



Figura 16: Vela úmida montada e protegida para exposição.

A NBR 6211 (2001) orienta quanto ao modo de exposição da vela úmida, esta deve ser colocada em campo numa posição mais alta que qualquer obstáculo situado num raio de 3 m a uma altura mínima de 1 m do solo, na posição central de um aparato de sustentação, Figura 17, que deve ser feito de material inerte e possua uma cobertura de 50 cm x 50 cm e uma base para apoio do coletor. A distância que a gaze deve ter para a haste de sustentação é de 25 cm e para a estrutura da cobertura 20 cm.

O suporte para a vela úmida foi confeccionado, de acordo com as recomendações normativas, utilizando-se os seguintes materiais:

- Haste: madeira mista, confeccionada com barrote de 3x2" com 1,5 m de comprimento, duas cantoneiras de metal para sustentação da cobertura e da base de apoio da vela úmida;

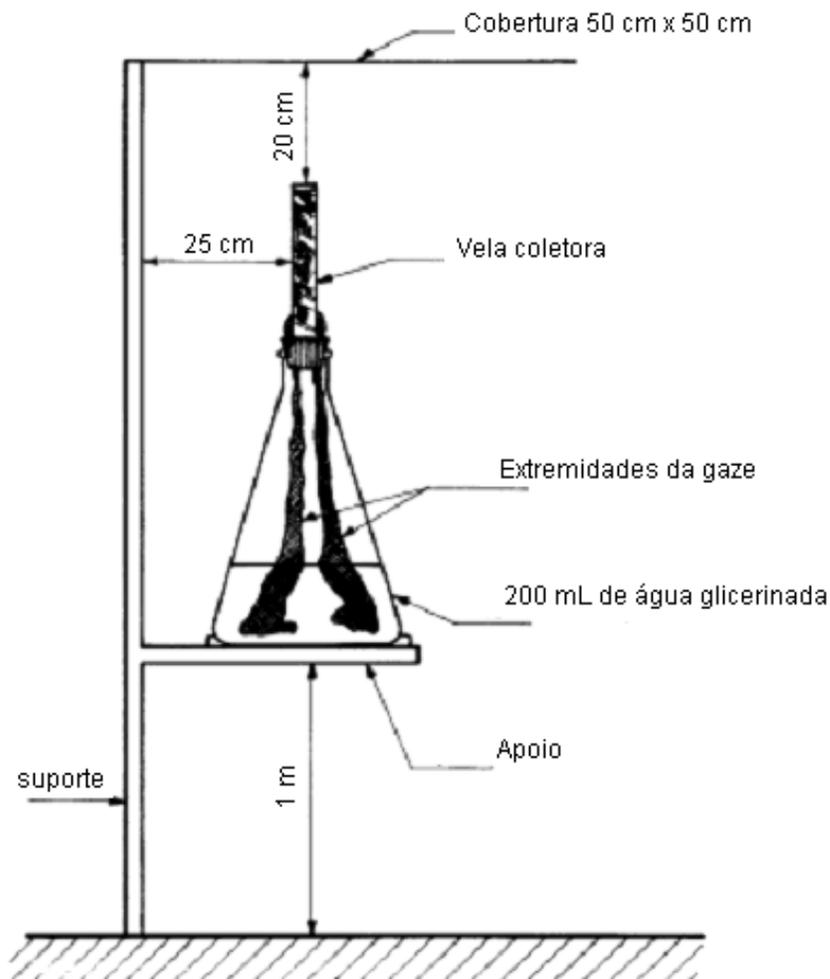


Figura 17: suporte da vela úmida.

Fonte: NBR 6211 (2001), pg. 6.

- Placa de coberta: compensado de 6 mm, medindo 50 cm x 50 cm;
- Base de apoio: compensado de 6 mm, medindo 15 cm x 30 cm;
- Fixador: garrafa pet cortada ao meio e fixada na base de apoio com brochas, dentro da qual se colocou a vela úmida de forma que a mesma não tombasse sob a ação do vento;
- Suporte da haste: recipiente metálico com volume interno de 18 litros preenchido com areia, capaz de servir como estrutura de fundação da haste, garantindo sua estabilidade;
- Segurança: para inibir a presença de curiosos foi colocada uma placa “perigo! Não mexa”, o perigo em questão era danificar o experimento.

Os aparatos de sustentação, totalizando 25, Figura 18, foram colocados nos pontos autorizados para coleta, sendo utilizados na 1ª e 2ª exposição da vela úmida. Vê-se que a vela úmida fica protegida da ação direta do sol, exposta às condições ambientais da atmosfera local, inerentes a cada ponto de medição, alimentada pela água destilada que umedece a gaze num circuito fechado de entrada de componentes, dentre os quais o cloreto, e saída de água dando continuidade ao processo que é afetado apenas pela evaporação.



Figura 18: Suporte da Vela úmida.

Enquanto as velas úmidas ficavam em campo havia necessidade de se efetuar uma ronda nos locais em que se encontravam para verificação de danos causados e recomendações, mesmo assim seis experimentos foram danificados,

dois na primeira e quatro na segunda exposição, uns por estarem expostos a forte corrente de vento, outros pela ação de vândalos.

Com o tempo, a estrutura de suporte apresentava o efeito do meio ambiente, as peças metálicas: cantoneiras, parafusos e pregos encontravam-se enferrujados, fato ocorrido mais rapidamente nas regiões próximas ao mar que aos poucos ia atingindo os demais pontos. Apesar da deterioração gradativa destas estruturas, as mesmas conseguiram resistir o tempo necessário para a realização dos ensaios, de outubro a dezembro de 2006.

As posições das velas úmidas, encontradas em perfeitas condições para ensaio, foram geo-referenciadas com a utilização de GPS calibrado, Figura 19, na medida em que se ia recolhendo os experimentos. Devido à captação de substâncias da atmosfera, a gaze cirúrgica aos poucos começava a apresentar um aspecto sujo, prova que a mesma correspondia à finalidade a qual foi projetada.



Figura 19: Vela úmida geo-referenciada em campo.

As coordenadas em graus referentes ao eixo sul e oeste dos pontos de coleta, distância do mar, altitude e o endereço dos locais de exposição estão apresentados na Tabela 18. Estes pontos geo-referenciados quando locados em mapa apresentam margem de erro de 5 m.

Apesar de Maceió situar-se entre o oceano Atlântico e a lagoa Mundaú, não foi levado em consideração o efeito desta característica ao aporte de cloretos às regiões internas da cidade, verificando-se apenas a distância dos pontos coletores ao mar seguindo a linha de eixo sudeste da referida malha.

A distância do mar e a altitude onde se encontrava cada coletor vão influenciar, como observa Cole (2003), tanto na captação do cloreto produzido no oceano, que adentra mais ao continente e atinge pontos com maiores altitudes, como na região dos tabuleiros, quanto na captação do cloreto produzido na linha de ondas que permanecem próximos à costa, no caso de Maceió em sua planície litorânea que possui baixas altitudes.

### **5.3 Método de determinação do teor de cloreto**

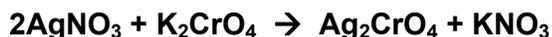
Ao término do período de coleta, os experimentos devidamente lacrados e identificados eram levados ao laboratório de saneamento ambiental para análise. Para medir o anion cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) a literatura disponibiliza métodos gravimétricos, volumétricos, potenciométricos e colorimétricos. Neste ensaio optou-se por utilizar o método volumétrico de Mohr, que determina o teor de cloretos solúveis em água, de acordo com a metodologia de análise utilizada no laboratório de saneamento ambiental da Universidade Federal de Alagoas.

No método de Mohr, a padronização é feita utilizando-se o nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) com solução padrão de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), como indicador tem-se a solução de cromato de potássio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ). A titulação é identificada quando todos os íons de  $\text{Ag}^+$  tiverem se depositado sob a forma de  $\text{AgCl}$ , havendo a precipitação de cromato de prata ( $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ) visualizada numa coloração marrom-avermelhada.

Tabela 18: Localização dos pontos de coleta do íon cloreto em Maceió-AL.

Ponto GPS	Coordenadas (graus)		Altitude m	Distância do mar m	Local de Exposição	Endereço	
	S9	W35				Logradouro	Bairro
1	39.767	43.193	9.98	1055.9	residência	R. Dr. Zeferino Rodrigues	Poço
2	35.530	40.362	15.70	309.0	SESC	Av. comendador Gustavo Paiva	Guaxuma
3	29.378	34.224	16.00	644.8	residência	Cond. Parque Rio Sauassuí	Ipioca
4	31.371	36.072	13.60	976.2	floricultura	AL 101 Norte	Ipioca
5	33.670	38.644	21.30	78.0	posto de combustível	AL 101 Norte	Riacho Doce
6	37.229	41.512	11.70	20.2	SEAGRA	Av. Comendador Gustavo Paiva	Jacarecica
7	37.860	41.775	6.85	16.9	Hotel Matsubara	Av. Brigadeiro Eduardo Gomes	Cruz das Almas
8	38.967	42.718	11.40	2375.4	residência	Av. Emp. Carlos da Silva Nogueira	Jatiúca
9	37.229	43.987	54.20	5485.8	residência	Loteamento Betânia	Gruta de Lourdes
10	39.208	42.171	16.20	904.6	residência	Rua dr. O. Vasconcelos	Jatiúca
11	39.781	41.738	13.30	51.9	barraca Carlitos	Av. Álvaro Otacilio	Ponta Verde
12	40.134	42.924	6.37	202.5	colégio Im. Conceição	Av. dr. A. Gouveia Pajuçara	Pajuçara
13	39.854	44.034	58.50	1001.0	CREA-AL	Rua O. Sarmento	Farol
14	40.302	44.699	4.21	49.2	posto Veneza	Av. Assis Chateaubriand	Prado
15	41.285	46.154	5.65	415.2	Corpo de Bombeiros	Av. Assis Chateaubriand	Pontal da Barra
16	35.658	43.204	61.20	4417.4	Arara azul	Rua A	Serraria
17	34.282	44.653	94.30	8195.1	residência	Av. Menino Marcelo	Antares
18	32.508	43.476	97.20	8534.9	5º Batalhão da Polícia Militar	Av. Cachoeira do Merim	Benedito Bentes
19	33.082	46.531	79.90	12745.0	UFAL	BR 104 - Conj. Universitário	Cidade Universitária
20	33.963	47.397	96.50	14251.2	frigorífico	BR 316	Santos Dumont
21	35.123	46.700	99.10	10609.2	PM box polícia militar	Rótula da Av. Jorge Monteiro de Barros	Santa Amélia
22	X	x	x	x	Aeroclube	Av. Durval de Góes Monteiro	Jardim Petrópolis
23	X	x	x	x	residência	R. Delmiro Golveia	Mutange
24	X	x	x	x	CEAGB	Av. Fernandes Lima	Farol
25	X	x	x	x	colônia de pescadores	Av. Senador Rui Palmeira	Ponta Grossa

As reações químicas ocorridas durante o processo de titulação das amostras são as seguintes:



Faz-se necessário preparar e padronizar a solução de nitrato de prata a ser utilizada na titulação das amostras: pesa-se a massa de  $\text{AgNO}_3$ , a mesma deve ter sido previamente seca em estufa a  $150\text{ }^\circ\text{C}$  por duas horas, necessita-se de 250 ml de solução de 0,1 ml/L. Para padronização utiliza-se 0,17 g de NaCl em um erlenmeyer, com adição de água e 1ml de cromato de potássio a 5% como indicador.

Para realização deste ensaio todos os experimentos foram recolhidos num mesmo dia, após 30 dias de exposição em campo, lacrados com plástico protetor e acondicionados em caixa para transporte ao laboratório. Os procedimentos de ensaio para medição do teor de cloreto em cada vela úmida foram realizados em um ambiente isento de cloretos. O pesquisador deve utilizar luvas de pvc (sem látex), para evitar contaminação oriunda do suor das mãos, dentre outros.

A vela úmida é colocada em uma bancada, retira-se o plástico protetor e com uma pinça esterilizada desenrola-se a gaze cirúrgica colocado-a num becker de vidro com adição de 200 ml de água destilada para lavagem da mesma. Toda água existente no frasco coletor como também as águas provenientes de lavagem da gaze e do frasco é reservada para análise. Foram preparados três coletores por vez para o ensaio.

Retira-se inicialmente 50 ml da água de lavagem para que seja verificado seu pH que deve estar entre 7 e 10, para tal, liga-se o peagômetro por aproximadamente 30 minutos, efetua-se a calibração para então medir o pH da amostra. Caso o pH seja menor que o indicado deve ser ajustado adicionando-se lentamente a solução de hidróxido de sódio para elevá-lo ou a solução de ácido sulfúrico para diminuí-lo; muitas amostras necessitaram de calibração em seu pH para que as mesmas fossem tituladas.

Para determinar o teor de cloreto é necessário dispor de uma alíquota de 50 ml, proveniente da solução com pH ajustado, em uma proveta adicionando 3 gotas de fenolftaleína e em seguida gotas de NaOH até que a solução apresente a cor rosa. Este procedimento foi feito para os 22 coletores, tanto para o coletor em branco como para os vinte e um coletores recolhidos em campo, deixando as amostras prontas para a titulação.

Colocam-se os 50 ml de solução da amostra preparada anteriormente num erlenmeyer sobre um agitador para que seja efetuada a titulação, que é feita adicionando-se gota a gota da solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$  a 0,0141 N) na amostra até que a cor marrom avermelhada apareça e se mantenha firme, indicando o fim da titulação.

A titulação inicia-se pelo coletor em branco que será utilizado como indicador para os demais coletores, sua solução deve ser colocada num erlenmeyer e corrigida através da adição de 0,5 g de carbonato de cálcio e 1 ml do indicador a um volume de água igual ao volume final da titulação, que é o somatório de 50 ml da alíquota mais a solução de nitrato de prata que foi adicionada para titulação da amostra. A correção do branco não deve ser muito maior que 0,1 ml e esse valor deve ser deduzido do volume gasto na titulação.

A cor da amostra referente ao coletor em branco, após titulação, deve ser igual à cor da solução titulada, marrom avermelhada, fazendo-se no mínimo uma duplicata.

De posse da titulação do coletor branco como referência, pode-se determinar o teor de cloreto das 21 amostras coletadas e deixadas prontas para ensaio, titulando-as como recomendado anteriormente. O volume da solução de  $\text{AgNO}_3$  gasto para a titulação das alíquotas extraídas de cada coletor é anotado para se calcular a concentração de cloreto existente.

Utiliza-se a fórmula seguinte para que seja determinado o teor de cloreto existente em cada amostra:

$$\text{Cloreto (mg/l)} = ((V_a - V_b) \cdot N \cdot 35500) / (V_{am})$$

Onde,

Va = volume da solução padrão de nitrato de prata gasto na titulação da amostra, em mililitros;

Vb = volume da solução de nitrato de prata gasto na titulação da água destilada (branco), em mililitros;

N = normalidade da solução de nitrato de prata usada;

Vam = volume da amostra, em mililitros.

De posse do teor de cloreto de cada experimento, calcula-se a taxa de deposição diária de cloretos sobre superfície conhecida para cada ponto de exposição:

$$\text{Cloretos (mg/m}^2\text{.d)} = (\text{Cloretos (mg/l)} \cdot \text{VT}) / (\text{A} \cdot \text{t})$$

Onde,

VT = volume total da amostra, em litros;

A = área de exposição (da gaze), em metros quadrados;

t = tempo de exposição, em dias.

#### 5.4 Resultados Obtidos

A seguir estão apresentados os resultados obtidos. Deve ser ressaltado que na primeira exposição não se obteve sucesso uma vez que, a maioria dos coletores encontravam-se secos quando foram recolhidos, devido à evaporação da solução utilizada. Então foi efetuada uma segunda exposição aumentando-se a quantidade de solução nos frascos coletores em 200 ml, totalizando 400 ml.

Estão apresentados na Tabela 19, os resultados da experimentação referentes à segunda exposição das velas úmidas, relacionando-se o ponto georeferenciado, distância do mar, número do coletor, volume total da amostra, resultado da titulação, com teor de cloretos e sua taxa de deposição resultante. Verifica-se que o teor de cloreto encontrado estava aproximadamente entre 17 (mg/L) e 372 (mg/L), o mesmo contato com a gaze da vela úmida a depender principalmente das características do vento e existência de obstáculos.

Tabela 19: Teores de cloreto em Maceió-AL.

Ponto GPS	Distância do mar (m)	No. do coletor	Volume total (ml)	Titulação (ml)	Teor de Cloretos (mg/l)	Taxa de deposição de Cloretos (mg/m <sup>2</sup> .d)
1	1055.9	21	550	5.4	29.03	53.23
2	309.0	7	815	5.4	29.03	78.87
3	644.8	4	815	4.2	17.02	46.23
4	976.2	5	690	12.2	97.11	223.35
5	78.0	15	698	12.4	99.11	230.59
6	20.2	6	820	39.7	372.41	1017.92
7	16.9	9	888	18.8	163.18	483.01
8	2375.4	8	750	5.4	29.03	72.58
9	5485.8	22	540	6.8	43.05	77.49
10	904.6	10	510	5.8	33.04	56.16
11	51.9	12	515	29.7	272.30	467.45
12	202.5	2	720	5.2	27.03	64.87
13	1001.0	25	745	8.2	57.06	141.71
14	49.2	20	865	14.2	117.13	337.72
15	415.2	24	610	6.2	37.04	75.32
16	4417.4	23	675	5.6	31.03	69.83
17	8195.1	3	905	4.2	17.02	51.34
18	8534.9	17	720	5.6	31.03	74.48
19	12745.0	19	890	4.4	19.02	56.43
20	14251.2	1	825	5.8	33.04	90.85
21	10609.2	18	505	6	35.04	58.98

Para determinar o teor de cloreto (mg/L) absorvido pelos coletores, de todos os vinte e um pontos ensaiados, retirou-se do volume total das águas de lavagem uma alíquota de 50 ml para titulação. O ensaio em branco, cujo volume de

solução total foi de 634 ml e gastou em sua titulação 2,5 ml da solução de nitrato de prata, serviu como indicador para a titulação das demais amostras.

No capítulo seguinte são analisados os resultados obtidos, quanto a taxa de deposição de cloretos com relação à distância do mar, na cidade de Maceió, e a vida útil a ser atingida pelas estruturas de concreto frente ao teor de cloreto absorvido pelos coletores segundo diretrizes de durabilidade de estruturas de concreto normalizadas.

## **CAPÍTULO VI**

### **ANÁLISE DOS RESULTADOS E PREVISÃO DE VIDA ÚTIL**

Neste capítulo serão analisados os resultados obtidos na experimentação. A partir destes resultados, utilizando-se recomendações normativas, foi realizada para os respectivos pontos de coleta uma previsão de vida útil para as estruturas em concreto.

#### **6.1 Análise dos Resultados**

Neste trabalho é analisado tanto o teor de cloreto existente na atmosfera, quanto a taxa de deposição deste nas estruturas. O cloreto depositado na superfície da estrutura de concreto vai agredir a estrutura, cujo dano só é verificado com o passar do tempo quando é visualizada a patologia oriunda da corrosão do aço. Ensaios para verificação do potencial da corrosão, dentre outros, podem ser utilizados para acompanhar o avanço dessa patologia.

Tem-se no Gráfico 15 uma apresentação na forma de barras dos resultados das taxas de deposição de cloretos encontradas nos ensaios realizados e a localização dos pontos de coleta de íon cloreto correlacionados aos pontos GPS geo-referenciados. Observa-se o aparecimento de picos que de acordo com a Tabela 19, apresentada no capítulo anterior, os relaciona a distância ao mar, podendo-se concluir que se trata dos coletores que se situavam à beira mar, cujo maior valor refere-se ao ponto GPS 6 distante de 20,2 m do mar, localizado no bairro de Jacarecica.

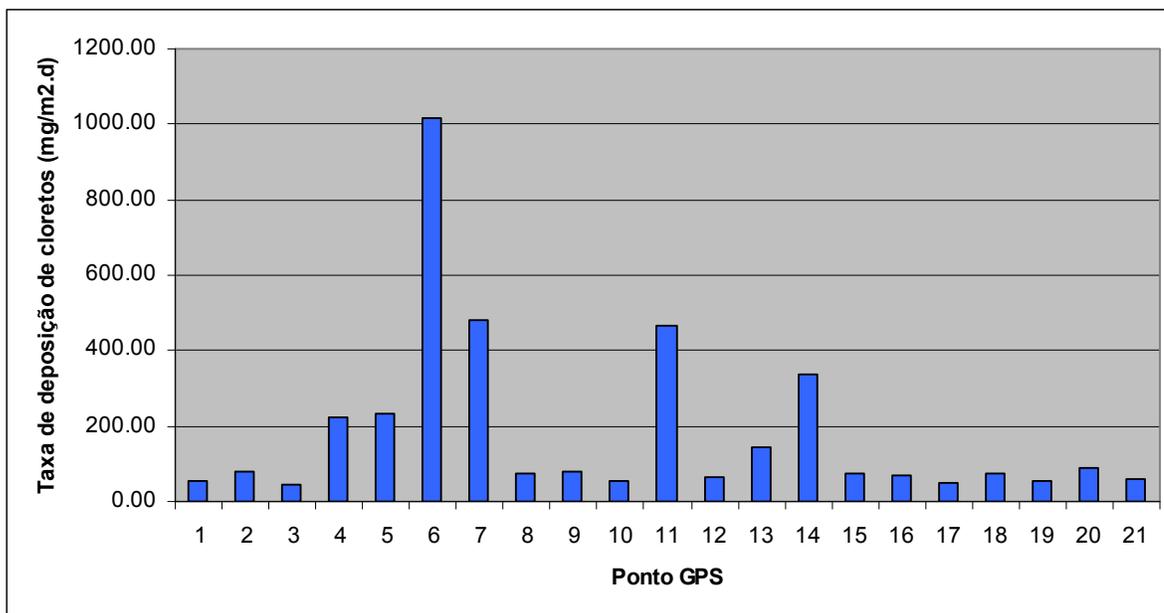


Gráfico 15: Taxa de deposição de cloretos em Maceió.

O ponto 6, no Gráfico 15, apresenta aparentemente um resultado destoante dos demais, contudo optou-se por não descartá-lo por situar-se numa região de mar aberto cujos cumes brancos existentes nas ondas são observados à beira mar. Pode ter sido influenciado pela presença de fortes ventos, já que não havia obstáculo entre o coletor e o mar, e pela corrente marinha pois nessa região não há a presença de recifes.

Por exemplo, o ponto 11 no Gráfico 15, situado na praia de Ponta Verde, apresenta uma taxa de deposição de cloreto bem inferior ao ponto 6. Observa-se a existência de recifes de areia submersos no oceano, cujas ondas estão além de 100 m distantes da orla, apresentando um mar com águas calmas ao longo da costa no entorno do local onde foi disposto o experimento.

A partir destes resultados foi plotado o Gráfico 16 que correlaciona a taxa de deposição de cloretos com a distância do coletor em relação ao mar. Verifica-se que próximo ao mar resultaram os maiores valores para a taxa de deposição, diminuindo à medida que atinge os tabuleiros, demonstrando coerência na experimentação realizada em relação a outros trabalhos como por exemplo Meira & Padaratz (2002), p. 5.

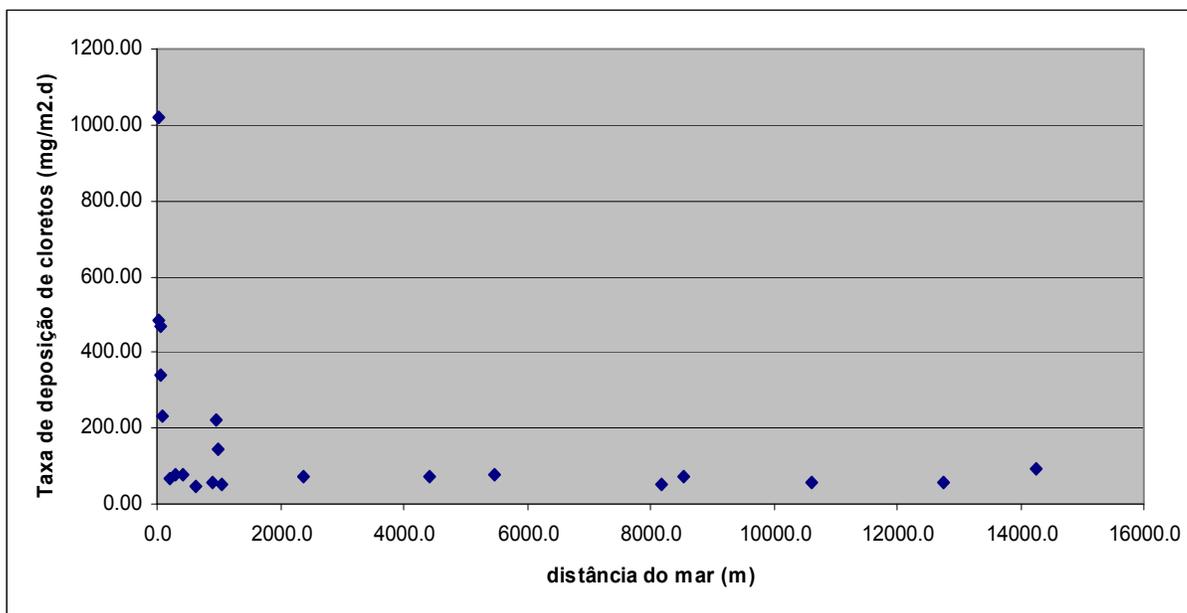


Gráfico 16: Taxa de deposição de cloretos x distância do mar em Maceió.

Analisando-se o Gráfico 16 pode ser observada também uma concentração de pontos nos primeiros 100 m em relação ao mar, com resultados variando entre  $40 \text{ mg/m}^2.\text{d}$  e  $230 \text{ mg/m}^2.\text{d}$  aproximadamente, alguns destes pontos podem ser descartados pois aparentam ter sofrido influência de obstáculos acarretando variação pontual da direção do vento e conseqüentemente diminuído a captação de cloreto pelo coletor. Para os pontos distantes além de 10.000 m do mar observou-se a presença de cloretos com taxas de deposição na ordem de  $56 \text{ mg/m}^2.\text{d}$  a  $91 \text{ mg/m}^2.\text{d}$ , confirmando que o cloreto produzido no oceano pode adentrar no continente a depender da topografia, correntes de vento, inexistência de obstáculos a grandes altitudes, dentre outros.

Segundo Costa (2001), também foram encontrados teores de cloreto no interior de Salvador, a aproximadamente 5 km do litoral, com valores maiores do que verificados a 800 m de distância do mar, o que indica que correntes de vento e outras variáveis são também responsáveis pelo carreamento dos aerossóis de sal.

É importante ressaltar que a cidade de Maceió situa-se numa região geográfica cujo oceano atinge batimetrias na ordem de 6000 m em áreas próximas ao continente, além de dispor de uma lagoa cuja água salobra capta parte da água do mar podendo transportar o íon cloreto para regiões internas, e contribuir com as

taxas de deposição de cloretos encontradas em pontos distantes 14.251,20 m do mar, ponto de GPS número 20.

Num panorama geral, relacionando o íon cloreto encontrado na atmosfera de Maceió com a fonte produtora, tem-se na Tabela 20 os teores limites e médio de cloreto e suas respectivas distâncias do mar agrupadas em faixas de medições.

Tabela 20: Teores limites de cloreto em Maceió-AL.

Distâncias Limites do mar (m)	Teor mínimo de cloreto (mg/l)	Teor médio de cloreto (mg/l)	Teor máximo de cloreto (mg/l)	Distância média do mar (m)
10 a 100	99.1	204.8	372.4	43.2
100 a 1000	17.0	48.1	97.1	690.5
1000 a 10000	17.0	33.9	57.1	4437.9
> 10000	19.0	29.0	35.0	12535.1

No Gráfico 17 são plotadas as curvas de aproximação referentes aos teores limites e médio de cloreto, permitindo uma correlação do comportamento deste íon com a distância média do mar dos respectivos pontos de coleta. As curvas divergem na região costeira devido às interferências inerentes ao meio, tanto na produção do íon cloreto quanto no seu transporte, convergindo à medida que a concentração deste íon tende a zero.

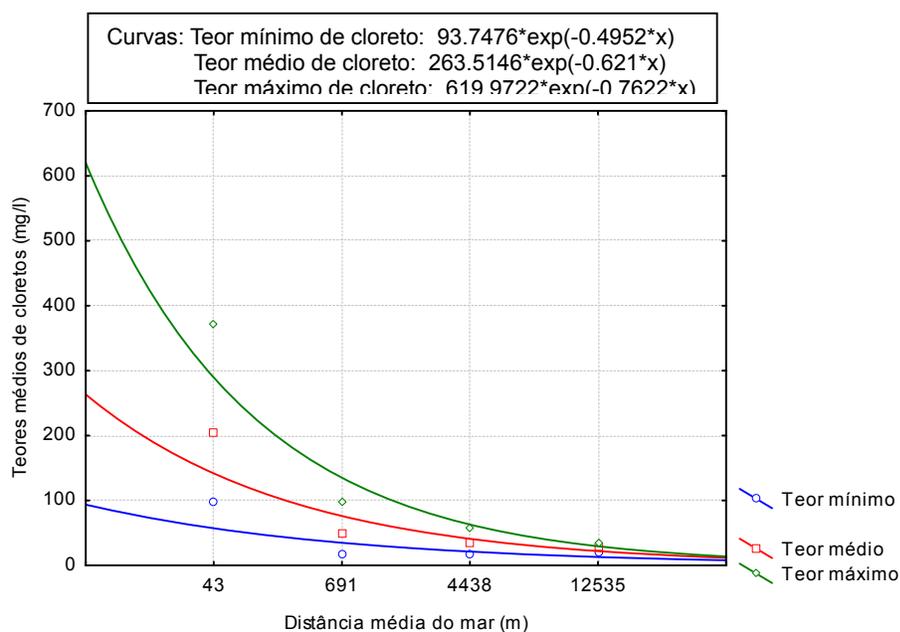


Gráfico 17: Teores limites de cloreto em Maceió-AL.

Verifica-se que o teor de íon cloreto encontrado na linha litorânea, Gráfico 17, varia aproximadamente de 100 mg/l a 600 mg/l, a depender das condições ambientais, dentre outras. Este cloreto vai sendo depositado nas superfícies de concreto à medida que adentra a continente de forma proporcional ao seu teor encontrado na atmosfera.

Num mapa geo-referenciado da cidade de Maceió, foram inseridas as coordenadas GPS de cada ponto coletor e estruturado uma carta gráfica contendo as isolinhas correspondentes às taxas de deposição de cloretos, determinadas a partir do teor de cloreto existentes em cada coletor, Figura 20.

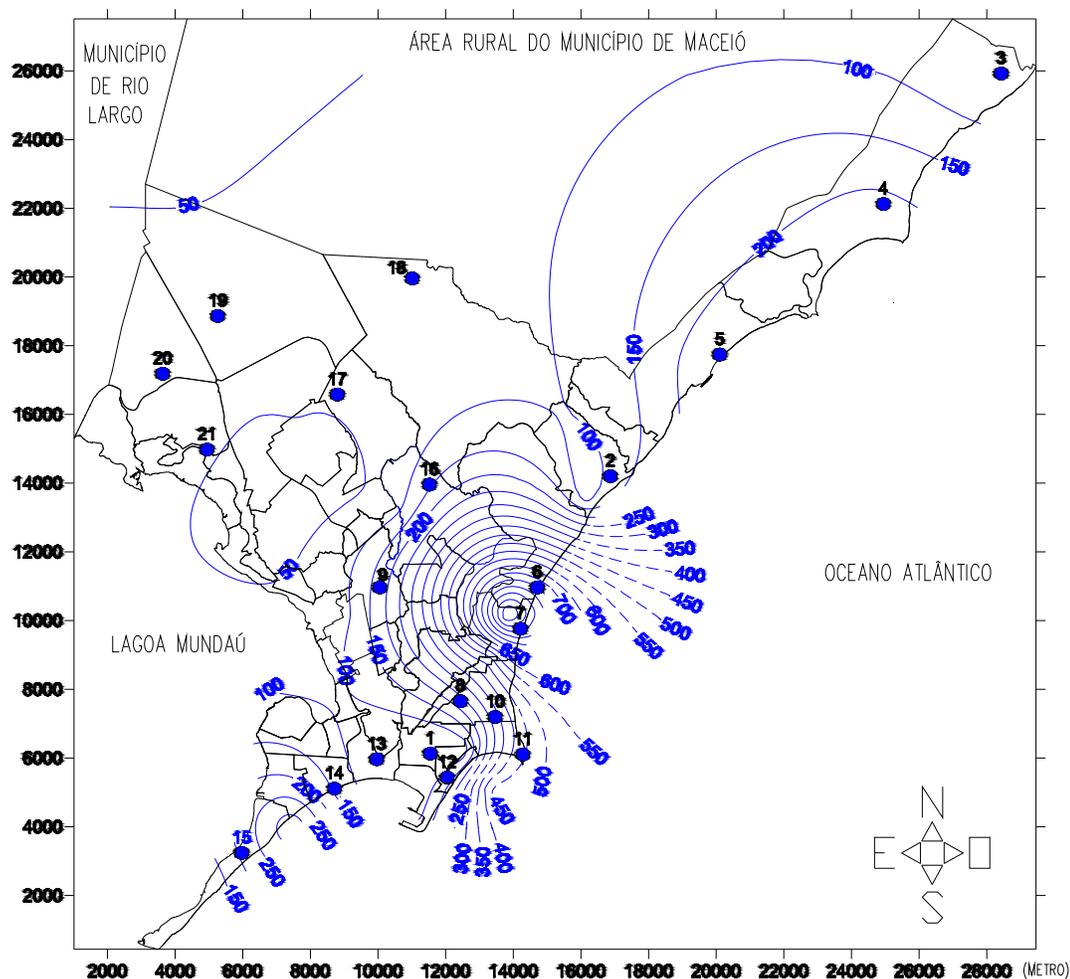


Figura 20: Isolinhas da taxa de deposição ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{d}$ ) de cloretos para a cidade de Maceió.

Fonte: Adaptado do Centro de Geoprocessamento da Prefeitura Municipal de Maceió, (1998).

A análise das isolinhas, traçadas distantes uma da outra 50 mg/m<sup>2</sup>.d demonstra claramente a tendência de maior deposição de cloretos ao longo da orla, contudo os mesmos atingem os tabuleiros, dissipando-se lentamente conforme demonstrado através de um maior espaçamento entre as curvas. Observa-se que para a curva plotada próxima ao limite da cidade de Maceió com a cidade de Rio Largo, a taxa de deposição de cloreto é da ordem de 20 vezes menor que o ponto GPS n° 6 situado à beira mar.

Os cloretos depositados nas estruturas de concreto vão influenciar em sua durabilidade. Por isso é necessário analisar a vida útil dessas estruturas a partir do teor de cloreto existente na atmosfera, de forma que possibilite utilizar medidas de proteção específica do concreto devido ao cloreto que nele se deposita.

## 6.2 Perspectiva de vida útil

Para prever a vida útil para as estruturas de concreto situadas nos locais dos pontos de medição foi utilizado o modelo proposto por Clear & Hay (1993) apud Helene (1995?). Este método foi escolhido, dentre os demais apresentados, por suas variáveis estarem representando fielmente os elementos deste estudo, principalmente a concentração de cloreto junto à superfície do concreto.

Justifica-se este estudo por correlacionar o agente agressor aos elementos de proteção inerentes a qualidade do concreto em detrimento da vida útil do elemento estrutural, cuja formulação é apresentada a seguir:

$$t = \frac{2,5 \cdot e^{0,82}}{a/c \cdot C_{cl}^{2,38}}$$

t = tempo ou vida útil em anos;

e = espessura do cobrimento do concreto à armadura em mm;

$a/c$  = relação água/cimento do concreto em massa;

$C_{cl}$  = concentração de cloretos no ambiente, junto a superfície do concreto em mg/L.

As diversas análises de vida útil para as estruturas de concreto realizadas neste trabalho foram feitas a partir do teor de íon cloreto absorvido por cada coletor, cujos valores correlacionados com o ponto GPS são apresentados na Tabela 21. Para estabelecer as espessuras de cobertura e o fator água/cimento foram utilizadas as recomendações normativas.

Tabela 21: Teor de cloreto em Maceió x ponto GPS.

Ponto GPS	Teor de cloreto (mg/L)	Ponto GPS	Teor de cloreto (mg/L)	Ponto GPS	Teor de cloreto (mg/L)
1	29.03	8	29.03	15	37.04
2	29.03	9	43.05	16	31.03
3	17.02	10	33.04	17	17.02
4	97.11	11	272.30	18	31.03
5	99.11	12	27.03	19	19.02
6	372.41	13	57.06	20	33.04
7	163.18	14	117.13	21	35.04

A partir da Tabela 21 foi traçado sobre o mapa de Maceió uma carta gráfica contendo as isolinhas de cada teor de cloreto, absorvido pelos coletores, conforme é apresentado juntamente com as respectivas localizações dos pontos de medição, Figura 21.

Na análise das isolinhas pode-se observar também uma concentração de cloretos ao longo do litoral, cujo ápice no ponto GPS número 6 situado a 20,2 m de distância do mar, na Sociedade de Engenheiros Agrônomos de Alagoas (SEAGRA), carece ser melhor investigado quanto ao fator de influência preponderante, seja corrente marinha, vento, inexistência de obstáculos, dentre outros, e sua contribuição com a redução na vida útil das estruturas de concreto.

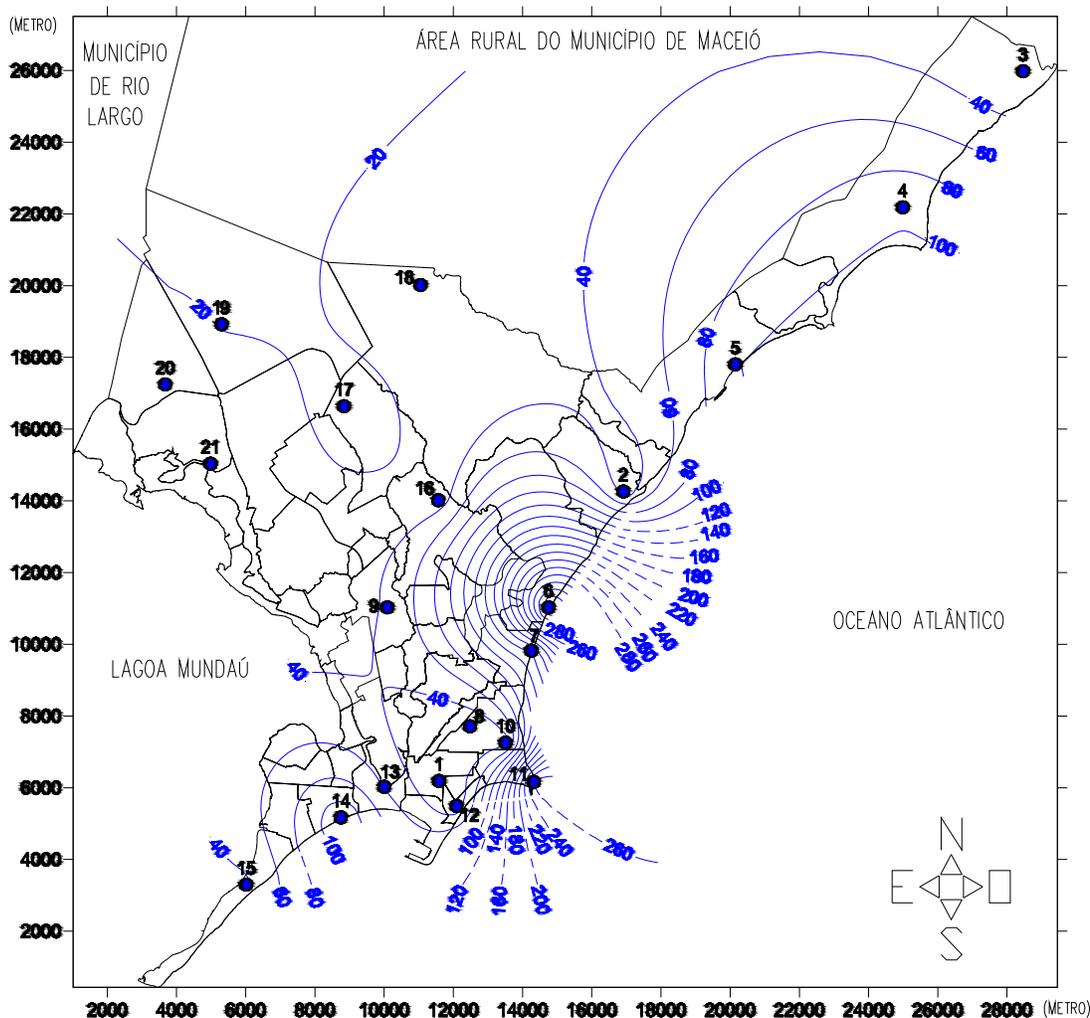


Figura 21: Isolinhas do teor de cloreto (mg/L) para a cidade de Maceió.

Fonte: Adaptado do Centro de Geoprocessamento da Prefeitura Municipal de Maceió, (1998).

Verifica-se inclusive que o cloreto adentra o continente atingindo regiões internas da cidade, como o ponto GPS número 19 situado na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), cujas estruturas apesar de “distantes” do mar são afetadas pelo cloreto que aí chega a depender da direção e velocidade do vento e demais condições geográficas e ambientais.

Seguindo as recomendações normativas da NBR 6118 (2003) se projetou a vida útil das estruturas em concreto, quanto ao ataque por cloretos, referente às quatro classes de agressividade ambiental para os 21 pontos ensaiados em Maceió. No Gráfico 18 é apresentada a projeção dessa vida útil para pilares e vigas em concreto armado.

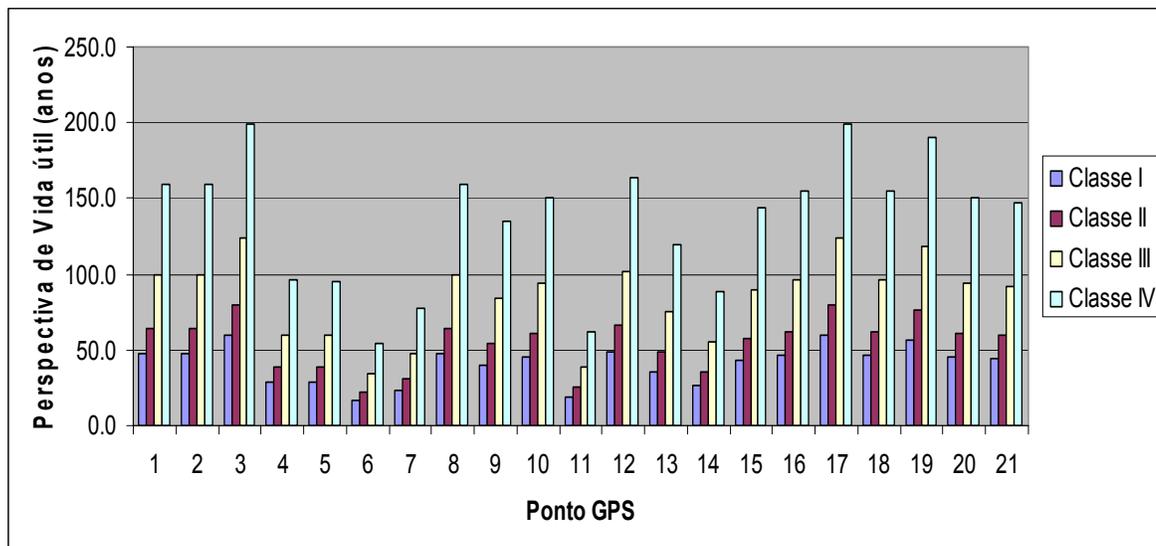


Gráfico 18: Perspectiva de vida útil para pilares e vigas em concreto armado projetados em Maceió de acordo com recomendações normativas da NBR 6118 (2003).

Observa-se para pilares e vigas um ganho de vida útil significativo na medida em que são utilizados no projeto estrutural mecanismos de proteção referentes a uma maior classe de agressividade ambiental, de acordo com as seguintes mudanças de classe: de I para II, de II para III, de III para IV, ganho respectivamente de vida útil em 35%, 55% e 60%.

A mesma análise foi feita para as lajes em concreto armado, já que a NBR 6118 (2003) reduz em 5 mm o cobrimento para esses elementos, conforme é mostrado no Gráfico 19, encontrando um ganho de vida útil de 42%, 64% e 66% para as respectivas mudanças de classe: de I para II, de II para III, de III para IV.

Além da estrutura em concreto armado necessita-se que seja verificado o comportamento da estrutura em concreto protendido face ao ataque por cloretos, já que a mesma, devido a sua tipologia na qual o aço trabalha sob tensão, exige uma garantia em cumprir a vida útil especificada, principalmente pelas peculiaridades apresentadas em sua recuperação.

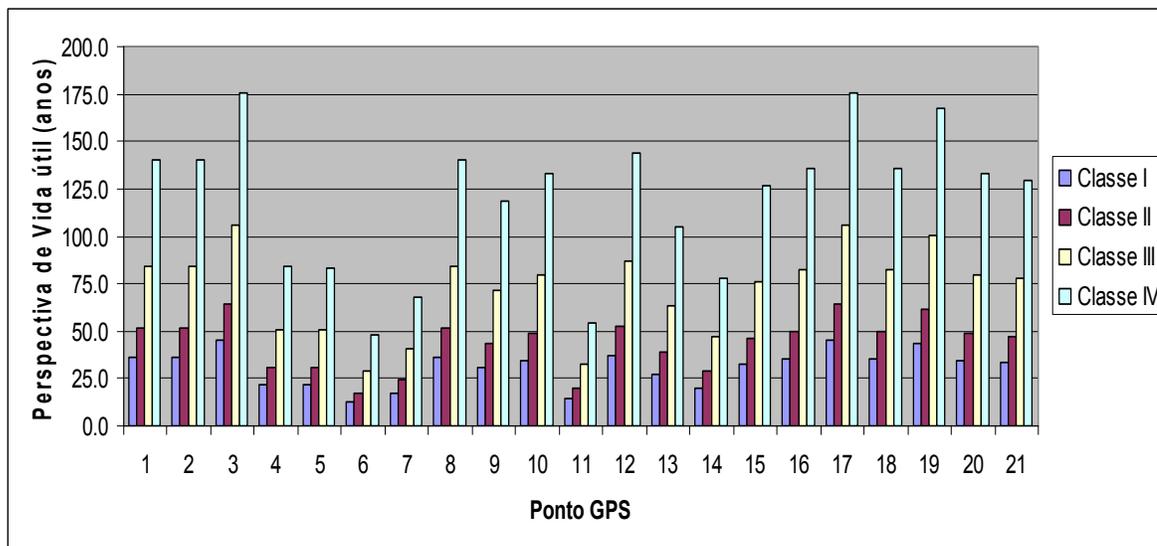


Gráfico 19: Perspectiva de vida útil para lajes em concreto armado projetadas em Maceió de acordo com recomendações normativas da NBR 6118 (2003).

Verificando-se então um crescimento na utilização de estruturas em concreto protendido em Maceió, foi feita a análise de vida útil face ao ataque por cloretos também para elas, apresentada no Gráfico 20, cujos ganhos de vida útil encontrados com a mudança de classe a nível de projeto resultou o mesmo obtido para lajes em concreto armado.

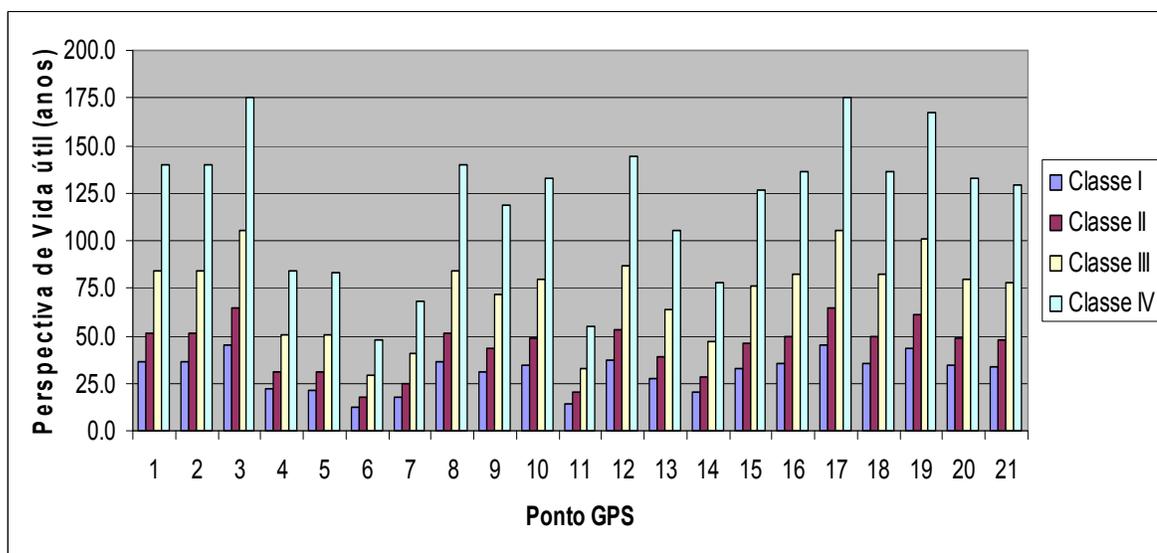


Gráfico 20: Perspectiva de vida útil para estruturas em concreto protendido projetadas em Maceió de acordo com recomendações normativas da NBR 6118 (2003).

Outros fatores além do íon cloreto são determinantes nas perspectivas de vida útil analisadas anteriormente para as diversas classes de agressividade, dentre eles o cobrimento e o fator água/cimento. Para se verificar a influência destes isoladamente nas estruturas de concreto foram então plotados os Gráficos 21 e 22:

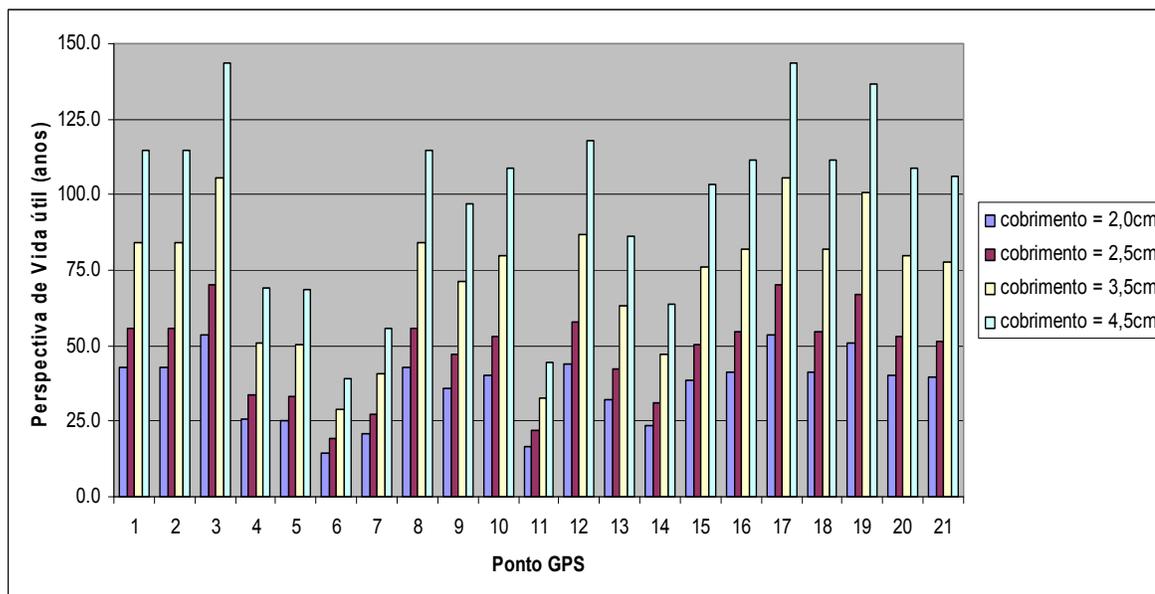


Gráfico 21: Perspectiva de vida útil para estruturas em concreto projetadas em Maceió com fator água/cimento de 0,55 e cobrimento variável.

Observa-se que ao aumentar apenas o cobrimento, das estruturas de concreto, de 2 cm para 4,5cm, de forma seqüencial, conforme apresentada no Gráfico 21, obtem-se um ganho de vida útil de 31%, 51% e 36% respectivamente, indicando a importância da espessura do cobrimento na durabilidade dessas estruturas quanto ao ataque por íon cloreto.

Quanto ao fator água/cimento apresentado no Gráfico 22, tem-se um ganho de vida útil para as estruturas de concreto face ao ataque por cloretos de 8%, 9% e 22% respectivamente para  $a/c = 0,65; 0,60; 0,55, 0,45$ . Apesar de “pequeno” em relação ao ganho obtido com o aumento da espessura de cobrimento, o fator água/cimento está intimamente ligado na proteção da camada superficial do concreto quanto ao efeito da carbonatação, dentre outros, contudo se há redução da espessura da camada de cobrimento, devido ao aparecimento de outras patologias no concreto armado haverá redução de vida útil cumulativamente devido ao alto fator água/cimento e baixo cobrimento adquirido.

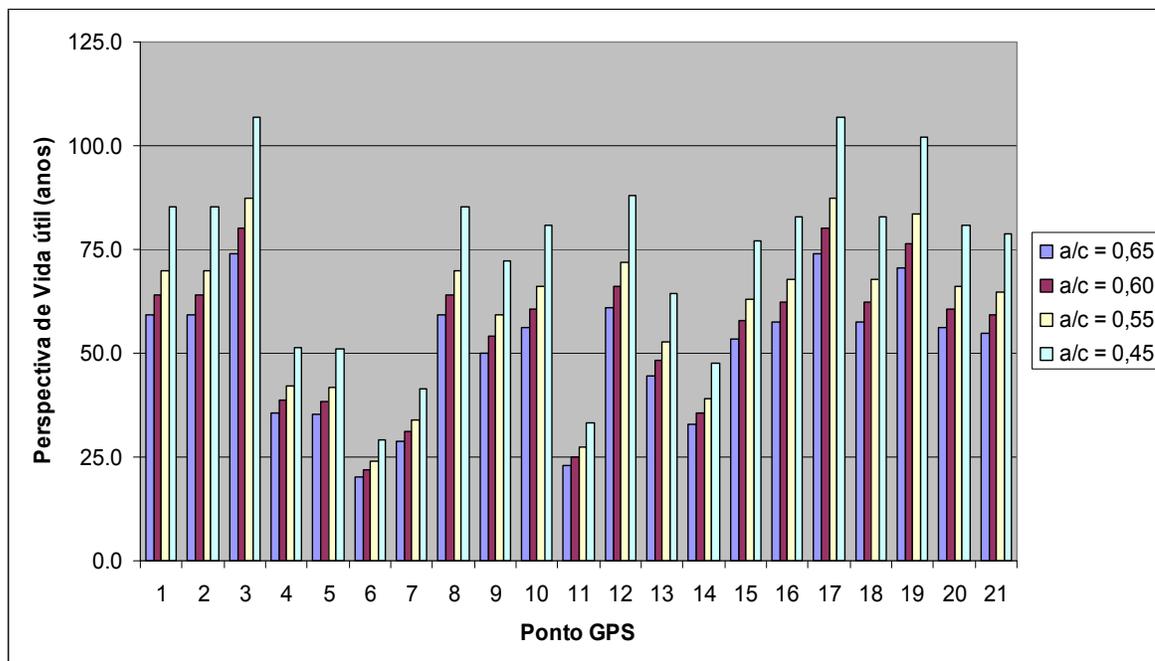


Gráfico 22: Perspectiva de vida útil para estruturas em concreto projetadas em Maceió com cobrimento de 3,0 cm e fator água/cimento variável.

Verifica-se, para efeito comparativo, uma preocupação quanto à proteção das estruturas de concreto nos diversos regimentos normativos, contudo especificam valores diferentes para a resistência, espessura da camada de cobrimento e fator água/cimento do concreto. Diante disso, optou-se por quantificar a perspectiva de vida útil, para estruturas situadas em regiões sob a presença de cloretos, utilizando-se as recomendações das normas: brasileira NBR 6118 (2003), européia Boletim no. 3 do FIB (1999) e boletim normativo americano ACI 318 (2005) e ACI 357R-84 (1997), cujos valores estão apresentados nas Tabelas 22, 23 e 24:

Ressalta-se que cada país tem suas condições climáticas e componentes agressivos peculiares à cada região, o que justifica que cada um realize pesquisas específicas a fim de que seu instrumento normativo represente perfeitamente suas condições de agressividade representativas do país. No caso do Brasil, há ainda que se verificar agressividades regionais ou por não dizer localizadas, devido a diversidade climática existente, claramente notável em Maceió, cidade banhada por águas com salinidades diferentes, deixando claro a existência de uma lacuna normativa na classificação dessa agressividade.

Tabela 22: Recomendações normativas - espessuras de cobrimento para estruturas em concreto armado frente à ação de cloretos.

A G R E S S I V I D A D E	Normas	NBR 6118 mm	ACI 318 e ACI 357R-84 mm	Boletim n°. 3 do FIB mm
	Marinha, exposta ao sal transportado pelo ar	35-40	50	40
	Spray e respingos de maré	45-50	65	50-75

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (2003); ACI 318 (2005) e ACI 357R-84 (1997); Boletim n°. 3 do FIB (1999).

Observa-se que a NBR 6118 (2003) especifica os menores valores para o cobrimento das estruturas em concreto armado, em detrimento dos demais regimentos normativos, havendo com isso uma menor perspectiva de vida útil para as estruturas brasileiras, já que o aumento da espessura de cobrimento é um dos fatores que apresentaram maior ganho de vida útil frente ao ataque por cloretos.

Tabela 23: Recomendações normativas – fator água/cimento para estruturas em concreto armado frente à ação de cloretos.

A G R E S S I V I D A D E	Normas	NBR 6118 mm	ACI 318 e ACI 357R-84 mm	Boletim n°. 3 do FIB mm
	Marinha, exposta ao sal transportado pelo ar	0,55	0,40	0,55
	Spray e respingos de maré	0,45	0,40	0,45

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (2003); ACI 318 (2005) e ACI 357R-84 (1997); Boletim no. 3 do FIB (1999).

O regimento normativo americano apresenta o menor fator água/cimento, aumentando conseqüentemente a vida útil das estruturas em concreto armado situadas ao longo de sua costa. Sendo observado, neste caso, uma igualdade nas

especificações normativas da norma brasileira e do código modelo, contudo, por se tratar de um país tropical, o Brasil, e em especial a cidade de Maceió apresenta outras agressividades que aceleram a deterioração de suas estruturas, principalmente por ter temperaturas maiores que nos países europeus.

Tabela 24: Recomendações normativas – resistência para estruturas em concreto armado frente à ação de cloretos.

A G R E S S I V I D A D E	Normas	NBR 6118 mm	ACI 318 e ACI 357R-84 mm	Boletim n°. 3 do FIB mm
	Marinha, exposta ao sal transportado pelo ar	30	35	30 - 37
	Spray e respingos de maré	40	35	35 - 45

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (2003); ACI 318 (2005) e ACI 357R-84 (1997); Boletim no. 3 do FIB (1999).

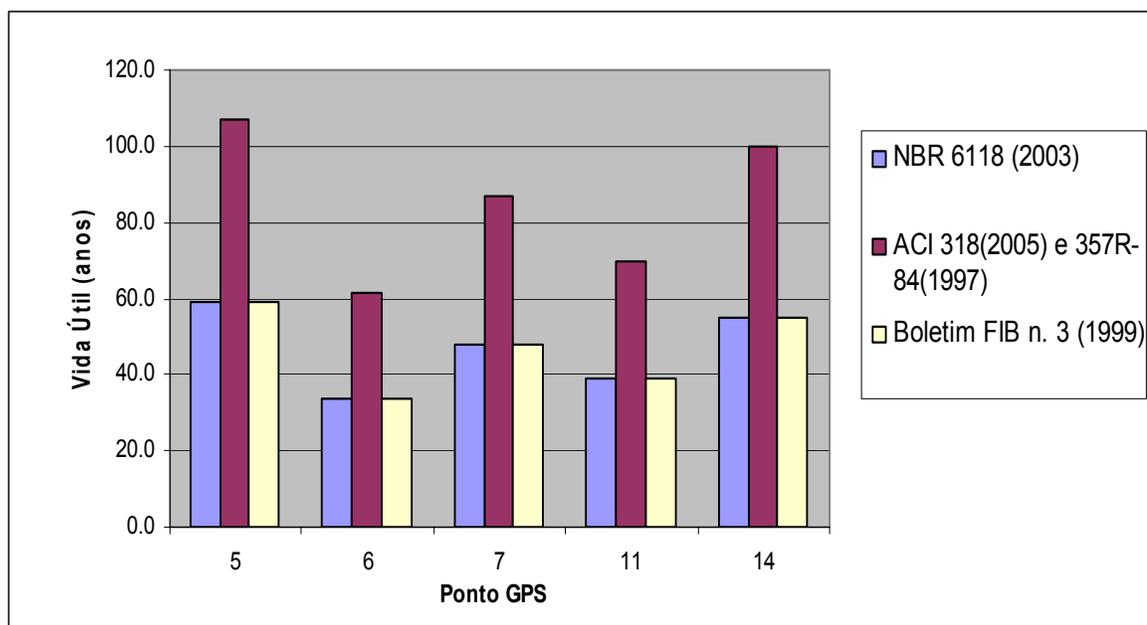
Observa-se que a norma europeia especifica resistências maiores para suas estruturas em concreto armado, o que garantirá um melhor controle de qualidade para o mesmo, reduzindo conseqüentemente seus poros, evitando que o cloreto atinja mais rapidamente a armadura, aumentando então a vida útil de suas estruturas.

Como os três regimentos normativos analisados divergem em suas especificações quanto à espessura da camada de cobrimento e o fator água/cimento, resulta então em projeções de vida útil diferentes para um mesmo elemento estrutural submetido a semelhantes agressividades por cloreto, de acordo com o modelo de vida útil proposto por Clear & Hay (1993) apud Helene (1995?), utilizado neste trabalho.

Verifica-se então a necessidade de análise para os 21 pontos georeferenciados, cujos teores de cloreto foram quantificados em Maceió, quanto à perspectiva de vida útil para estruturas em concreto armado projetadas segundo especificações normativas da NBR 6118 (2003), ACI 318 (2005) e 357R-84 (1997) e Boletim no. 3 do FIB (1999).

Optou-se em verificar a vida útil dessas estruturas utilizando-se a subdivisão de classe normativa: zona de elevada agressividade exposta ao spray e respingo de maré, para os pontos GPS que de acordo com Meira (2004) distam aproximadamente 130 m do mar; e zona de agressividade marinha, exposta ao sal transportado pelo ar, para os demais pontos ensaiados.

Verifica-se que tanto utilizando as recomendações da norma brasileira quanto da norma européia, para as estruturas situadas nas zonas de respingos de maré, Gráfico 23, tem-se a mesma perspectiva de vida útil, enquanto que utilizando em projeto as recomendações da norma americana tem-se um ganho bastante significativo desta vida útil em 81%.



Nota: NBR 6118 (2003) cob.=40mm a/c=0,55; ACI 318 (2005) e ACI 357R-84 (1997) cob.=50mm a/c=0,40; Boletim no. 3 do FIB (1999) cob.=40mm a/c=0,55.

Gráfico 23: Perspectiva de vida útil, face ao ataque por cloretos, para estruturas em concreto armado situadas até 130 m de distância do mar projetadas de acordo com recomendações normativas diversas para a cidade de Maceió.

Diante do exposto, se justifica utilizar simples mecanismos protetores como baixo fator água cimento e maior espessura de cobrimento, especificados pela norma americana, para estruturas em concreto armado situadas a menos de 80m do mar, ponto GPS número 5, alcancem cerca de 107 anos de vida sem a necessidade de manutenção corretiva face ao ataque por cloretos.

A mesma análise foi feita para os demais pontos GPS ensaiados em Maceió, cujos experimentos encontravam-se distantes do mar entre 202 m e 14.250 m, conforme representado no Gráfico 24. Segundo especificações da norma brasileira a perspectiva de vida útil para estruturas situadas em zona marinha chega a atingir apenas 96 anos, ponto GPS número 4, sem manutenção corretiva, o que poderá vir a onerar bastante os custos futuros com manutenção.

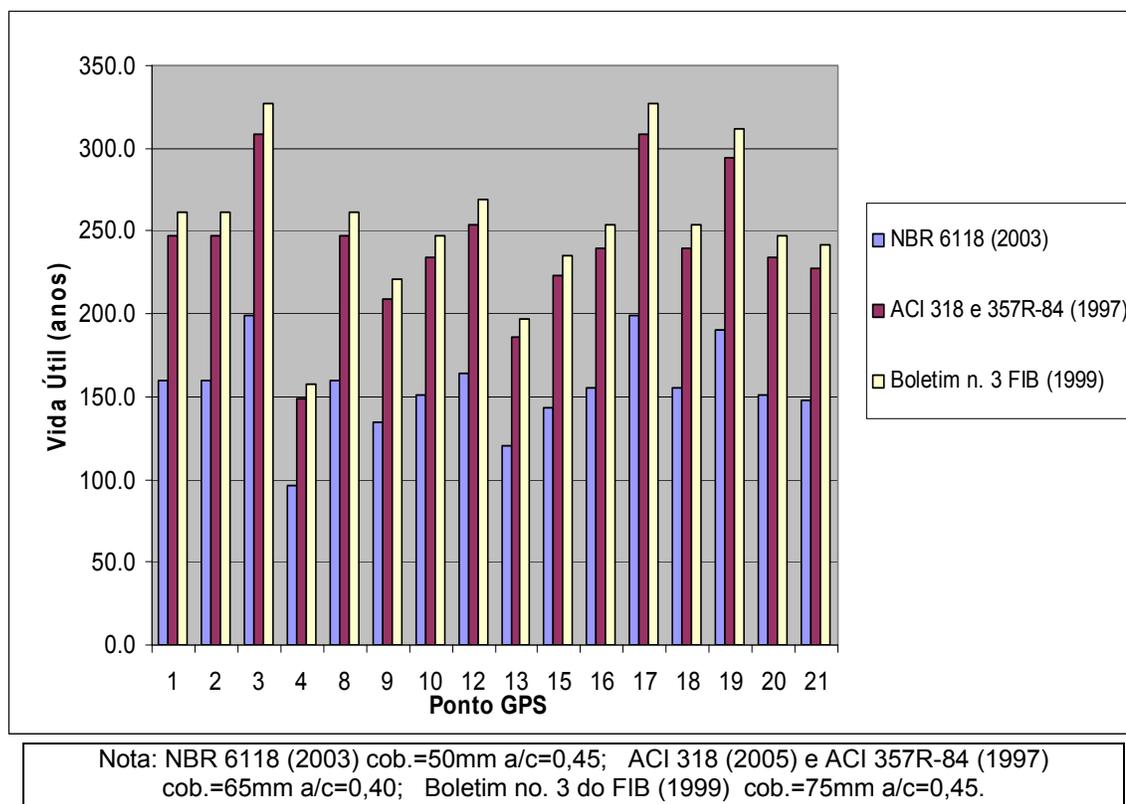


Gráfico 24: Perspectiva de vida útil, face ao ataque por cloretos, para estruturas em concreto armado situadas a partir de 130 m de distância do mar de acordo com recomendações normativas para a cidade de Maceió.

Observa-se ainda que ocorrendo uma migração quanto às especificações normativas de espessura de cobrimento e fator água/cimento durante a elaboração do projeto estrutural, garante-se uma maior vida útil para as estruturas em concreto armado, sob a ação do íon cloreto. No caso de Maceió, referente aos pontos situados além de 130 m de distância do mar, há um ganho de vida útil atingida pela migração entre as normas, conforme segue:

- Da norma brasileira para a norma americana: 55%;
- Da norma americana para o código modelo: 6%;
- Da norma brasileira para o código modelo: 64%;

É importante ressaltar que para as estruturas analisadas atingirem as perspectivas de vida útil apresentadas, os projetistas devem utilizar no projeto mecanismos que funcionem ao menos como um sistema simples de barreira que foca na qualidade do concreto, conforme recomendação do boletim n° 238 do CEB (1997), tendo-se entretanto a garantia de que as especificações de projeto sejam seguidas durante a execução, com padrão de qualidade satisfatório.

## CAPÍTULO VII

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho, a partir de pesquisa bibliográfica, estudou a ação do íon cloreto nas estruturas de concreto verificando que este é produzido tanto em águas profundas do oceano quanto em águas rasas, na região de ondas ao longo da costa, adentrando no continente através das correntes de vento e depositando-se na superfície do concreto. Inicia-se a corrosão quando o íon cloreto atinge a armadura, cujo processo é acelerado pela presença de elevadas umidade relativa e temperatura.

A depender da direção e velocidade do vento o cloreto produzido no oceano atinge grandes distâncias, enquanto que o cloreto produzido na linha de ondas permanece ao longo da costa, por apresentar maior granulometria. Sendo bastante prejudicial às estruturas, o cloreto apresentado na forma de íon livre que atravessa a camada de revestimento e atinge a armadura.

As cidades litorâneas têm no íon cloreto um agente patológico que reduz a vida útil especificada em projeto de forma cumulativa, juntamente com os demais agentes agressores, necessitando-se que sejam especificadas em projeto sistemas de proteção ao menos de simples barreira, focado na qualidade do concreto<sup>20</sup>, em especial na camada de revestimento, evitando a percolação de gases através de seus poros.

As normas NBR 6118 (2003), boletim n° 3 do FIB (1999), ACI 318(2005) e ACI 357R-84 (1997), analisados neste trabalho apresentam medidas de proteção diferentes quanto à agressividade por cloretos, justificadas pelas peculiaridades ambientais existentes nos respectivos países de origem. Contudo, todas elas são

---

<sup>20</sup> Baixo fator a/c, maior espessura de revestimento e maiores resistências.

mais rigorosas quanto às especificações de proteção ao concreto na medida em que, no caso da presença de cloreto, a estrutura se localiza mais próxima do mar.

Verificou-se uma lacuna na NBR 6118 (2003) quanto à classificação ambiental de suas estruturas frente à ação de cloretos, já que a mesma não informa limites para o teor de cloreto existente na atmosfera ou para taxa de deposição destes em estruturas de concreto, repercutindo conseqüentemente nos mecanismos de proteção a serem utilizados. Propõe apenas uma classificação geral do tipo de ambiente onde estará situada a estrutura correlacionando qualitativamente com a classe de agressividade ambiental. Esta lacuna pode ser parcialmente suprida pelas demais normas analisando a perspectiva de vida útil desejada pelo proprietário e projetista quando da elaboração do projeto estrutural.

O regimento normativo americano, segundo recomendações do ACI 318(2005) e ACI 357R-84 (1997), também classifica a agressividade de suas estruturas de acordo com zonas de respingos de maré ou zonas de atmosfera marinha, sem quantificar o teor de cloreto nessas regiões, contudo especifica menores limites para o fator água/cimento que os indicados na atual norma brasileira, sendo mais rigorosa quanto à espessura da camada de cobrimento.

Apesar do boletim nº 3 do FIB (1999) recomendar o mesmo fator água/cimento que a NBR 6118 (2003), especifica maiores espessuras de cobrimento, garantindo assim uma melhor proteção a estrutura e melhor perspectiva de vida útil.

As normas indicam que as medidas de proteção mais eficazes estão ligadas a melhoria da qualidade da camada de cobrimento, para isso é especificado um menor fator água/cimento, maior espessura de cobrimento com aumento da resistência do concreto na medida em que se expõe a estrutura ao agente agressor.

Em virtude de Maceió ser uma cidade banhada por águas, de um lado o oceano, do outro uma lagoa com água salobra, optou-se em medir o teor de cloreto existente em diversos pontos da cidade, no intuito de preencher parte da lacuna existente na atual norma brasileira, correlacionando a concentração de cloreto na atmosfera e a perspectiva de vida útil de acordo com as classes de agressividade ambiental recomendadas pelas normas anteriormente citadas.

Visando atingir os objetivos deste trabalho foram expostos por duas vezes, em 25 pontos da cidade geo-referenciados, coletores do ar atmosférico e consequentemente seus íons e gases, dentre os quais o cloreto, utilizando o método da vela úmida de acordo com os procedimentos regidos pela NBR 6211 (2001), destes 21 pontos referentes a segunda exposição foram ensaiados, os demais se encontravam danificados.

Como resultado obtido nesta pesquisa, os teores de cloretos medidos variavam de 17 mg/L e 372 mg/L, cuja concentração maior se dava ao longo da linha litorânea, indo se dissipando a medida que se distanciava do mar. Contudo foi constatado que este cloreto atinge os tabuleiros, sejam carregados pelo vento, sejam transportados pela massa d'água da lagoa.

Consequentemente, as taxas de deposição de cloretos nas estruturas em concreto encontradas nos diversos pontos ensaiados variaram de 46 mg/m<sup>2</sup>.dia a 1018 mg/m<sup>2</sup>.dia, na mesma ordem de grandeza que outros estudos correlatos. Ressalta-se que não foi considerada a influência da lagoa quanto ao transporte do íon cloreto a regiões internas da cidade.

Em virtude dos resultados encontrados e das recomendações normativas quanto aos mecanismos de proteção a serem utilizados nas estruturas de concreto sob a ação de cloreto, indicados nas três normas anteriormente analisadas, foi verificada a perspectiva de vida útil das estruturas de concreto no entorno dos pontos ensaiados, utilizando o modelo proposto por Clear & Hay (1983) apud Helene (1995?), que leva em consideração o teor de cloreto na atmosfera, a espessura da camada de cobrimento e o fator água/cimento do concreto.

A análise dessa vida útil, a ser especificada em projeto, revelou de acordo com o esperado, maior perspectiva de vida útil para estruturas projetadas de acordo com especificações normativas mais rígidas: maior espessura de cobrimento e menor fator água/cimento.

Para estruturas em concreto situadas, no caso de Maceió, além de 130 m da linha de costa, a norma européia apresentou um ganho de vida útil de 6% sobre a norma americana e de 64% sobre a norma brasileira. Já para estruturas situadas

até 130 m do mar, tem-se a situação ideal para estruturas projetadas pela norma americana, com um ganho de 81% sobre as outras.

É visível o baixo desempenho de vida útil alcançado pelas especificações recomendadas pela norma brasileira, dentre as demais analisadas neste trabalho, quanto aos elementos protetores recomendados, espessura de revestimento e fator água/cimento, face ao ataque de cloretos.

Faz-se necessário que tanto a elaboração dos projetos estruturais quanto a execução das estruturas de concreto adotem rígidos padrões de qualidade, para garantir que patologias oriundas nessas fases venham a diminuir ainda mais a vida útil das estruturas situadas em ambiente marinho.

### **7.1 Sugestões de continuidade**

Visando um estudo mais aprofundado, sugere-se medir os teores de cloreto mês a mês, depositados ao longo do ano, nestes ou em outros pontos georeferenciados, observando-se além do teor de cloreto absorvido, outros efeitos oriundos de variações climáticas.

No caso específico de Maceió-AL, se faz necessário estudar de maneira mais detalhada a influência da lagoa Mundaú quanto ao transporte do íon cloreto, levando-se em consideração suas implicações na direção e velocidade dos ventos, dentre outros.

O cloreto é produzido tanto em águas turbulentas e rasas, ao longo da linha de costa, como em águas calmas e profundas dos oceanos, um estudo que correlacione a batimetria e a concentração de cloreto que adentra o continente acrescentaria dados, de forma substancial, quanto à existência do íon cloreto em regiões internas, bem além da zona de respingos de maré.

Como o cloreto não é o único agente agressor, recomenda-se analisar outros agentes patológicos, isoladamente ou em conjunto com o íon cloreto, mapeando a cidade de Maceió e correlacionando a concentração desses agentes a durabilidade das estruturas em concreto.

Analisar outros mecanismos de deterioração relativos ao envelhecimento da armadura, como por exemplo a despassivação por carbonatação, devido à ação do gás carbônico.

Cabe também, verificar as perspectivas de vida útil das estruturas em concreto, utilizando-se outros modelos de projeção e demais regimentos normativos não abordados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ivan Ramalho de. **Os materiais constituintes e as principais características de durabilidade do concreto.** In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Foz do Iguaçu: IBRACON, 2001, 1 CD-ROM.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete (aci 318-05) and commentary (aci 318r-05) reported by aci committee 318.** ACI 318-05, Estados Unidos da América, 2005. 430p.

\_\_\_\_\_. **Guide to Durable Concrete.** ACI 201.2R-01, Estados Unidos da América, 2001. 41p.

\_\_\_\_\_. **Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures.** ACI 357R-84, Estados Unidos da América, 1997. 23p.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: ISAIA, Geraldo C. (Org). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações - Volume II.* São Paulo: IBRACON, 2005, p. 923-951.

ANDRADE, Jairo; MOLIN, Denise Dal. **Aplicação dos princípios de confiabilidade na previsão da vida útil de projeto das estruturas de concreto armado.** In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, IBRACON, 2001, 1 CD-ROM.

ANDRADE, Maria Del Carmen. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: PINI, 1992.

ANDRADE, Tibério. **Patologia das estruturas.** In: ISAIA, Geraldo C. (Org). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações - Volume II.* São Paulo: IBRACON, 2005, p. 953-983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto e execução de obras de concreto armado; procedimento.** Rio de Janeiro, 2004. 76 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14643: Corrosão atmosférica – Classificação da corrosividade de atmosferas,** Rio de Janeiro, 2001, 12p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6211: Corrosão atmosférica – Determinação de cloretos na atmosfera pelo método de vela úmida.** Rio de Janeiro, 2001, 6p.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. At al. **Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho.** In: 44° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte: IBRACON, 2002, 1 CD-ROM.

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

\_\_\_\_\_. Oswaldo. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas.** Goiânia, GO: Editora UFG, Co-edição São Paulo: PINI, 1998. 237 p.

CECA/UFAL, **Dados médios mensais.** 2005. 1 Tabela.

COLE, I. S. et al. **Holistic model for atmospheric corrosion Part 1 – Theoretical framework for production, transportation and deposition of marine salts.** Corrosion Engineering Science and Technology – Volume 38, Austrália, n. 2, 129f, 2003.

COLE, I. S. et al. **Holistic model for atmospheric corrosion Part 2 – Experimental measurement of deposition of marine salts in a number of long range studies.** Corrosion Engineering Science and Technology – Volume 38, Austrália, n. 4, 259-266f, 2003.

COSTA, Ana Rita Firmino. et al. **Série apontamento: orientações metodológicas para produção de trabalhos acadêmicos.** 6. ed. Maceió: EDUFAL, 2004.

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

COUTO, Leila Maria Ferreira; PRISZKULNIK, Simão. **Qualidade no projeto: fonte de excelência às estruturas de concreto.** In: 44° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte: IBRACON, 2002, 1 CD-ROM.

CUNHA, José Celso da. **Projeto de estruturas de concreto.** In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO NBR 6118/2003. **Aula 1 (NB-1 2003).** ppt. Belo Horizonte, 2004.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **New Approach to Durability Design: an example for carbonation induced corrosion.** Bulletin d' Information n° 238, Suíça, 1997, 142p.

Departamento de Engenharia de Construção Civil (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). **Vida útil de estruturas de concreto armado sob o ponto de vista da corrosão da armadura.** São Paulo, 1995 ?

INSTITUTO ARNON DE MELLO (Maceió, AL): **Enciclopédia Municípios de Alagoas.** Maceió/AL, 2006, 405p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil): **Mapas de Maceió:** 1985. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br> > Acesso em 16 de maio de 2007.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Structural concrete: textbook on behaviour, design and performance updated knowledge of the CEB/FIP model code 1990.** Bulletin n° 1, Suíça, 1999, 232p.

\_\_\_\_\_. **Structural concrete: textbook on behaviour, design and performance updated knowledge of the CEB/FIP model code 1990.** Bulletin n° 3, Suíça, 1999, 281p.

FIGUEIREDO, Enio Pazini. **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto.** In: ISAIA, Geraldo C. (Org). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações - Volume II.* São Paulo: IBRACON, 2005, p. 829-855.

HELENE, Paulo R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo: PINI, 1986.

\_\_\_\_\_, Paulo R. L. **Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1988.

\_\_\_\_\_,P. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES e VI CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE. *Anais*, v. 1. Porto Alegre, 1997.

HOFFMANN, Anelise Todeschini; MOLIN, Denise Dal. **Comportamento da penetração e migração de clorestos em concretos em função da resistência à compressão axial.** In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte: IBRACON, 2002, 1 CD-ROM.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Questões de ensino e pesquisa na durabilidade das estruturas do concreto.** *Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil*, Santa Maria, vol. 2, n. 2, p. 92-104, nov., 2005.

LIMA, Flávio Barboza. At al. **Análise estatística do concreto produzido em Alagoas nos últimos 4 anos.** In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte: IBRACON, 2002, 1 CD-ROM.

LIMA, Maryangela Geimba de. **Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto.** In: ISAIA, Geraldo C. (Org). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações - Volume I.* São Paulo: IBRACON, 2005, p. 713-751.

MAPA. **Mapa da costa brasileira.** Disponível em:  
<<http://baixaki.ig.com.br/download/Google-Earth-em-Portugues.htm> > Acesso em 16 de maio de 2007.

MEIRA, G. R. et al. **Chloride profiles in marine atmosphere zone – influence of chloride deposition rate.** In: IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING, Olinda: American Concrete Institute - ACI, 2005, 1 CD-ROM.

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

MELO, Karoline Alves. **Análise do cobrimento de estruturas de concreto armado segundo critérios de durabilidade em relação ao processo de difusão de cloretos.** Maceió, 2003, 66f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto, estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994.

MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal. **Permeabilidade, Difusibilidade e Porosidade do concreto. Interface pasta agregado. Ensaio para determinação de penetração de água e cloretos. Novas propostas de ensaio.** In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Foz do Iguaçu: IBRACON, 2001, 1 CD-ROM.

NEVILLE, Adam. M. **Propriedades do concreto.** 2ª. ed. São Paulo: Pini, 1997.

SILVA, Paulo Fernando A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera**. São Paulo: Pini, 1995.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

VILASBOAS, José Márcilio L. **Durabilidade das edificações de concreto armado em Salvador: uma contribuição para a implantação da NBR 6118:2003**. Salvador, 2004, 229f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia, 2004.