

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DISSEMINAÇÃO DE ÍONS CLORETO NA ORLA MARÍTIMA DO BAIRRO DE
BOA VIAGEM, RECIFE-PE**

RONALDO BEZERRA PONTES

Recife

2006

RONALDO BEZERRA PONTES

**DISSEMINAÇÃO DE ÍONS CLORETO NA ORLA MARÍTIMA DO BAIRRO DE
BOA VIAGEM, RECIFE-PE**

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial, exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Concentração em Engenharia das Construções, orientado pelos professores Eliana Cristina Barreto Monteiro e Romilde Almeida de Oliveira.

Recife

2006

P814d Pontes, Ronaldo Bezerra
Disseminação de íons cloreto na orla marítima do
Bairro de Boa Viagem, Recife-PE / Ronaldo Bezerra
Pontes ; orientadores Eliana Cristina Barreto Monteiro,
Romilde Almeida de Oliveira, 2006.
121 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de
Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil, 2006.

1. Concreto armado - Corrosão. 2. Cloretos. 3. Corrosão
e anticorrosivos. 4. Engenharia civil. I. Título.

CDU 620.193

RONALDO BEZERRA PONTES

**DISSEMINAÇÃO DE ÍONS CLORETO NA ORLA MARÍTIMA DO BAIRRO DE
BOA VIAGEM, RECIFE-PE**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Concentração em Engenharia das Construções.

Avaliado por:

Prof.a Eliana Cristina Barreto Monteiro
(Orientadora – Dra. - UNICAP)

Prof. Romilde Almeida de Oliveira
(Orientador – Dr. - UNICAP)

Prof. Antônio Oscar Cavalcanti da Fonte
(Examinador interno – Dr. - UNICAP)

Prof. Enio José Pazini Figueiredo
(Examinador externo – Dr. - UFG)

Data: 30 / 03 / 2006

Recife

2006

DEDICATÓRIA

A Deus, pela oportunidade dada;
A minha mãe, pelo esforço e amor;
A minha tia-mãe, pelo carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, nosso Pai, a Jesus, nosso Irmão e Mestre Maior; e à Espiritualidade, Amiga e Benfeitora, que, nas horas das grandes decisões, tenho a certeza de sua presença.

A minha mãe biológica e de coração, Ivanilda, pelo esforço em me educar; e a minha mãe de coração “nesta” existência, Tereza, pelo carinho.

A minha querida família, em especial a Deide, pela ajuda, em parte, na minha educação e a Diogo, pelo apoio na língua inglesa.

A Mariazinha, que, na hora da decisão, entre o estudo e o trabalho, estava lá, com o seu sexto sentido, para dizer: “VÁ ESTUDAR!”.

Aos PROFESSORES, Eliana Cristina Barreto Monteiro e Romilde Almeida de Oliveira, meus orientadores, meus sinceros agradecimentos, pelo incentivo, pela vibração com os resultados, por nós obtidos, e pelo tempo disponível e indispensável para orientação.

Ao PROFESSOR, Sérgio Carvalho de Paiva, pelo apoio e participação imprescindível na etapa de procedimento experimental.

Aos PROFESSORES do Mestrado, Antônio Oscar Cavalcanti da Fonte, Arnaldo Cardim Carvalho Filho, Maria da Graça V. X. Ferreira, Paulo Roberto do Lago Helene, Robson Pequeno de Sousa e Valdemir Alexandre dos Santos, pelo ensino e amizade.

Aos PROFESSORES, José Orlando Vieira Filho e Sérgio do Rêgo Barros Machado Dias, pela recomendação ao Mestrado e pelos ensinamentos, ainda na graduação, tão importantes para aprovação nas cadeiras do Mestrado.

Às PROFESSORAS, Maria Bernadete de Santana, a quem devo a correção de Português, e Maria do Carmo Maciel Lins, pela ajuda, nas horas de que precisei.

Aos Companheiros do Mestrado, Benigno, Carlos, Gilberto, Gorguinha, Lavínia, Léo, Sérgio e Wallace, pela amizade e ajuda nos momentos difíceis.

Ao PROSUP/CAPES, pelo apoio financeiro.

À UNICAP, pela liberação da verba para compra dos materiais necessários para o procedimento experimental.

A Ana Leticia Lima de Oliveira Duarte, da DIMAT/UNICAP, pelo empenho na compra dos materiais necessários para o procedimento experimental.

Ao Laboratório de Computação, em especial a André Salazar Malta, pelo apoio.

À Companhia de Terrenos Prazeres, na pessoa de Helena Maria de Castro Chaves, pela sua permissão em expor o experimento em área privada, bem como aos moradores desta área, pelo apoio.

À Aeronáutica, na pessoa de Adriano Siebra Paes Barreto, por ter feito as articulações iniciais para concessão da exposição do experimento em área privada.

A Lincoln Carlos Gomes Reis, pelo consentimento da exposição do experimento em área privada.

Aos pesquisadores, que contribuíram, e aos que continuam contribuindo para o desenvolvimento da pesquisa, com publicações de grandes trabalhos.

Enfim, aos esquecidos, minhas desculpas, pois, durante dois anos, fica difícil lembrar-me de todos, mas aqui ficam meus sinceros agradecimentos.

ENSINARÁS O BEM, ESCALANDO OS
GALARINS DA POPULARIDADE, PELO
VERBO FÁCIL QUE TE FULGURA NA
BOCA E SERÁS, EM RAZÃO DISSO, O
FAVORITO DAS MULTIDÕES, DURANTE
ALGUM TEMPO; MAS, SE PRATICARES A
VIRTUDE QUE APREGOAS,
SACRIFICANDO-TE COM SINCERIDADE
E DEVOTAMENTO, EM AUXÍLIO DOS
QUE TE RODEIAM, ILUMINARÁS O
CAMINHO TERRESTRE E VIVERÁS EM
LONGAS FILAS DE CORAÇÕES
AGRADECIDOS.

EMMANUEL – PSICOGRAFADO POR
FRANCISCO CÂNDIDO XAVIER

RESUMO

Diante da exposição à névoa salina, as estruturas em concreto podem sofrer ataques por cloretos, provocando corrosão das armaduras. As peças com faces voltadas aos ventos dominantes estão mais suscetíveis, especialmente aquelas que possuem grande superfície em relação ao volume, como são os casos de pilares e vigas. Este trabalho tem como objetivo avaliar os níveis de agressividade marinha, na orla marítima do Bairro de Boa Viagem, Recife-PE, em função de sua distância em relação ao mar, medindo a taxa de deposição de cloretos, pelo método da vela úmida, tendo como apoio o monitoramento do ambiente. Os resultados indicam que os íons cloreto chegam à superfície das estruturas a distintos níveis de concentração, dependendo da distância em relação à sua fonte geradora, no caso, o mar. Conclui-se que a deposição de cloretos decresce, numa relação do tipo exponencial, à medida que há um aumento do distanciamento em relação ao mar, e que a agressividade é significativa até 400 m da orla marítima.

PALAVRAS-CHAVE: concreto, corrosão de armaduras, atmosfera marinha, deposição de cloretos, vela úmida.

ABSTRACT

Exposing concrete structures to the saline mist, they can suffer chlorides attacks and could cause reinforcement corrosion. The structures parts with faces directed to dominant winds are more susceptible, especially those with great surface in relation to the volume, such as pillars and beams. This work objective is to evaluate the level of marine aggressiveness, in marine edge of Boa Viagem quarter, Recife-PE, in function of the distance to the sea, measuring the value of chloride deposition, using the wet candle method, with the support of the environment management. The results indicate that chloride ions reach surface structure in different levels of concentration, depending on the distance from its origin, in this case, the sea. The conclusion is that chloride deposition decreases, in an exponential relation, when there is an increase of the distance to the sea, and that aggressiveness is significantly as far as 400 m from the marine edge.

KEY-WORDS: concrete, reinforcement corrosion, marine atmosphere, chloride deposition, wet candle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Deterioração de estrutura de concreto em água do mar.....	26
Figura 2.2 – Representação esquemática dos fluxos inerentes ao aerosol marinho.....	29
Figura 2.3 – Esquema da corrosão produzida pela água do mar.....	37
Figura 2.4 – Tipos de exposição marinha.....	40
Figura 2.5 – Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade do ambiente.....	52
Figura 2.6 – Modelo de vida útil.....	54
Figura 2.7 – Vida útil tendo por base o fenômeno da corrosão das armaduras em estruturas de concreto.....	55
Figura 2.8 – Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento às armaduras (C_{Cl}) em função do ambiente, da classe de f_{ck} do concreto (C10 a C50) e da vida útil desejada (1 a 100 anos).....	65
Figura 3.1 – Vela úmida.....	76
Figura 3.2 – Suporte da vela úmida.....	78
Figura 3.3 – Representação esquemática da distribuição das zonas de exposição do aparato da vela úmida.....	82
Figura 4.1 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de ago./2005.....	100
Figura 4.2 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de set./2005.....	100
Figura 4.3 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de out./2005.....	101
Figura 4.4 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de nov./2005.....	101
Figura 4.5 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de dez./2005.....	101
Figura 4.6 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de jan./2006.....	102

Figura 4.7 – Relação entre a deposição média de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de ago./2005 a jan./2006.....	102
Figura 4.8 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de ago./2005 a jan./2006, com intervalo de confiança de 95%.....	103
Figura 4.9 – Modelo linearizado.....	104
Figura 4.10 – Relação entre a deposição de cloretos e a velocidade do vento.....	106
Figura 4.11 – Esquema da canalização do vento na 5. ^a estação de monitoramento.....	107
Figura 4.12 – Relação entre a deposição de cloretos e a precipitação.....	108

LISTA DE FOTOS

Foto 3.1 – Vela úmida.....	77
Foto 3.2 – Suporte da vela úmida com indicação da dimensão da cobertura.....	79
Foto 3.3 – Aparato da vela úmida a 7 m do mar.....	83
Foto 3.4 – Aparato da vela úmida a 100 m do mar.....	83
Foto 3.5 – Aparato da vela úmida a 160 m do mar.....	84
Foto 3.6 – Aparato da vela úmida a 230 m do mar.....	84
Foto 3.7 – Aparato da vela úmida a 320 m do mar.....	85
Foto 3.8 – Coleta da vela úmida e da solução do frasco coletor.....	86
Foto 3.9 – Lavagem do frasco coletor com água destilada.....	86
Foto 3.10 – Coleta da água de lavagem do frasco coletor.....	87
Foto 3.11 – Introdução da água glicerinada no frasco coletor.....	87
Foto 3.12 – Instalação da vela úmida no frasco coletor.....	88
Foto 3.13 – Material completo da coleta (vela úmida, solução e águas de lavagem do frasco).....	89
Foto 3.14 – Retirada da gaze para lavagem com água destilada.....	89
Foto 3.15 – Lavagem do cilindro com água destilada.....	89
Foto 3.16 – Lavagem da gaze com água destilada.....	90
Foto 3.17 – Soluções dos frascos coletores somadas às águas de lavagem dos frascos, dos cilindros e das gazes de cada estação de monitoramento.....	90
Foto 3.18 – Colocação da solução com as águas de lavagem na proveta para verificação do volume total.....	90
Foto 3.19 – Verificação do volume total das águas de lavagem.....	91
Foto 3.20 – Tomada da alíquota com 50 mL para titulação.....	93
Foto 3.21 – Adição do indicador misto difenilcarbazona e azul-de-bromofenol.....	93

Foto 3.22 – Início da acidificação com ácido nítrico.....	93
Foto 3.23 – Final da acidificação com ácido nítrico.....	94
Foto 3.24 – Início da titulação.....	94
Foto 3.25 – Final da titulação.....	94
Foto 4.1 – Efeito canalização do vento.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais íons do Oceano Atlântico.....	24
Tabela 2.2 – Composição da água do mar.....	24
Tabela 2.3 – Classificação da agressividade de águas ácidas.....	25
Tabela 2.4 – Abertura máxima de fissuras segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo (mm).....	58
Tabela 2.5 – Relação água/cimento máxima segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.....	59
Tabela 2.6 – Consumo mínimo de cimento (Kg/m^3) segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.....	60
Tabela 2.7 – Tipo de cimento recomendado segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.....	60
Tabela 2.8 – Resistência à compressão mínima (MPa) segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.....	61
Tabela 2.9 – Cobrimento (mm) segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.....	62
Tabela 3.1 – Maré mínima e máxima mensal no período de jan./2003 a jan./2006, modificado.....	68
Tabela 3.2 – Resultados da composição iônica do mar de Boa Viagem.....	69
Tabela 3.3 – Composição iônica do mar de Boa Viagem (média).....	69
Tabela 3.4 – Resultados da composição molecular do mar de Boa Viagem.....	70
Tabela 3.5 – Composição molecular do mar de Boa Viagem (média).....	70
Tabela 3.6 – Frequência média por direção do vento no ano de 2003.....	71
Tabela 3.7 – Frequência média por direção do vento no ano de 2004.....	72
Tabela 3.8 – Frequência média por direção do vento no período de jan./2005 a jan./2006.....	72
Tabela 3.9 – Média mensal da velocidade do vento no período de jan./2003 a jan./2006.....	72

Tabela 3.10 – Precipitação total mensal no período de jan./2003 a jan./2006.....	73
Tabela 3.11 – Média mensal da umidade relativa do ar no período de jan./2003 a jan./2006.....	73
Tabela 3.12 – Média mensal compensada da temperatura no período de jan./2003 a jan./2006.....	74
Tabela 3.13 – Total mensal da insolação no período de jan./2003 a jan./2006.....	74
Tabela 3.14 – Resumo dos dados climatológicos no período de estudo, modificado.....	75
Tabela 3.15 – Determinação do teor de cloretos no mês de agosto (01/08/05 a 31/08/05)..	96
Tabela 3.16 – Determinação do teor de cloretos no mês de setembro (31/08/05 a 29/09/05).....	96
Tabela 3.17 – Determinação do teor de cloretos no mês de outubro (29/09/05 a 31/10/05).....	96
Tabela 3.18 – Determinação do teor de cloretos no mês de novembro (31/10/05 a 30/11/05).....	96
Tabela 3.19 – Determinação do teor de cloretos no mês de dezembro (30/11/05 a 29/12/05).....	97
Tabela 3.20 – Determinação do teor de cloretos no mês de janeiro (29/12/05 a 31/01/06).....	97
Tabela 3.21 – Resumo da deposição de cloretos em cada estação de monitoramento no período de estudo.....	97
Tabela 4.1 – Análise de variância.....	104
Tabela 4.2 – Predição do modelo.....	105

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	17
1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA	17
1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	20
1.3 OBJETIVO	21
1.4 CONTEÚDO	21
CAPÍTULO 2	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 MEIO AMBIENTE – FATORES INTERVENIENTES	23
2.1.1 Ambiente marítimo	23
2.1.1.1 Formação e transporte do aerossol marinho	27
2.1.1.1.1 Influência da velocidade do vento	31
2.1.1.1.2 Influência da altura	32
2.1.1.1.3 Influência da distância em relação ao mar	33
2.1.1.2 Mecanismos de deterioração e envelhecimento em ambiente marítimo	34
2.1.1.3 Fatores de deterioração e envelhecimento em ambiente marítimo	39
2.2 CORROSÃO PELOS ÍONS CLORETO	41
2.2.1 Fatores que influenciam a penetração de íons cloreto	44
2.2.1.1 Concentração de cloretos	44
2.2.1.2 Relação Cl^-/OH^-	45
2.2.1.3 Grau de carbonatação	46
2.2.1.4 Tipo de cimento	46
2.2.1.5 Relação água/cimento	47
2.2.1.6 Compactação e cura	48
2.2.1.7 Umidade	48
2.2.1.8 Temperatura	49
2.2.1.9 Cobrimento	49
2.2.1.10 Fissuras	49
2.2.1.11 Grau de saturação	50

2.2.1.12	Tipo de cátion.....	50
2.3	VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	52
2.3.1	Exigências de Normas.....	55
2.3.1.1	Fissuras.....	56
2.3.1.2	Relação água/cimento.....	58
2.3.1.3	Consumo de cimento.....	59
2.3.1.4	Tipo de cimento.....	60
2.3.1.5	Resistência à compressão.....	61
2.3.1.6	Cobrimento da armadura.....	61
2.3.2	Modelos deterministas de transporte de massa no concreto.....	62
CAPÍTULO 3		
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS.....		67
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	67
3.1.1	Localização e características do ambiente pesquisado.....	67
3.2	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	67
3.2.1	Localização do ambiente.....	67
3.2.2	Características da água do mar.....	68
3.2.2.1	Variação de maré.....	68
3.2.2.2	Composição iônica e molecular.....	68
3.2.3	Características climatológicas do ambiente.....	71
3.2.3.1	Direção predominante e velocidade do vento.....	71
3.2.3.2	Precipitação.....	73
3.2.3.3	Umidade relativa.....	73
3.2.3.4	Temperatura.....	74
3.2.3.5	Insolação.....	74
3.2.3.6	Resumo das características climatológicas do ambiente.....	74
3.2.4	Características dos materiais.....	75
3.2.4.1	Vela úmida.....	75
3.2.4.2	Suporte, proteção e colocação da vela úmida.....	77
3.2.4.3	Reagentes.....	79
3.2.5	Preparação da vela úmida.....	80
3.2.6	Condições de exposição.....	81
3.2.7	Procedimento da amostragem.....	85

3.2.8	Procedimento.....	91	
3.2.8.1	Princípio do método.....	91	
3.2.8.2	Interferências.....	91	
3.2.8.3	Determinação do teor de cloretos.....	92	
3.2.9	Resultados.....	95	
CAPÍTULO 4			
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....			98
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR.....	98	
4.2	CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA DO AMBIENTE.....	99	
4.2.1	Comportamento da umidade relativa.....	99	
4.2.2	Comportamento da temperatura.....	99	
4.2.3	Comportamento da insolação.....	99	
4.3	COMPORTAMENTO DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS.....	99	
4.3.1	Efeito da distância em relação ao mar.....	99	
4.3.2	Efeito da direção predominante e velocidade do vento.....	105	
4.3.3	Efeito da precipitação.....	107	
CAPÍTULO 5			
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....			109
5.1	CONCLUSÕES.....	109	
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110	
REFERÊNCIAS.....			111

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA

No século passado, o bom desempenho das estruturas de concreto já era pesquisado. As primeiras obras analisadas foram em ambiente marítimo, uma vez que estas apresentaram, mais cedo, problemas de deterioração, devido ao meio altamente agressivo.

As estruturas de concreto armado, quando sujeitas à corrosão das armaduras, têm sua vida útil diminuída, por ser este um mecanismo de deterioração que afeta significativamente a durabilidade, ocasionando conseqüências negativas para a estabilidade, funcionalidade e estética das construções. Sérios danos, causados pela corrosão das armaduras do concreto, manifestam-se sob a forma de expansão, fissuração, destacamento do cobrimento, perda de aderência e redução da seção da armadura. Devido ao elevado número de estruturas afetadas, a corrosão das armaduras tem sido um grande problema na construção civil.

Muitos são os casos de relatos de reparo ou perda parcial da utilização de uma estrutura, aumentando, muito e prematuramente, o custo de manutenção de uma obra, como se pode averiguar em alguns casos, descritos a seguir.

Em nível internacional, pesquisas como a de Hadley (1948), que analisou várias estruturas marítimas, nos Estados Unidos, construídas entre 1896 e 1916, mostraram que essas estruturas, com 20 a 30 anos de idade, já apresentavam problemas significativos de deterioração. Mehta e Monteiro (1994) descrevem que, entre 1962 e 1964, foram investigadas 716 estruturas de concreto com 20 a 50 anos de idade, ao longo da costa da Noruega, constatando-se que 20% das vigas dos tabuleiros apresentavam, prematuramente, problemas

de corrosão de armadura. Conforme Liauw (1974), estruturas de concreto executadas em Hong Kong, na década 50, utilizando água do mar no amassamento, tiveram elevados custos na tentativa de recuperação, sendo demolidas com uma vida útil de serviço de apenas 15 anos, em média. Além do ambiente agressivo, outros fatores influenciaram no breve ataque, como, por exemplo, a execução das estruturas com má qualidade. Segundo o CEB-FIP, Bulletin 152 (1983), ataque químico em concreto foi observado em Western Cape Province South Africa, 10 anos após sua execução. Chandra, Cederwall e Nilsson (1994), em pesquisa realizada na Suécia, apresentaram diversos casos de deterioração de pontes, destacando a ponte de Öland que, com pouco mais de 20 anos de construída, teve 112 dos 154 pilares reparados. Nos Estados Unidos, 253.000 tabuleiros de pontes apresentam algum problema de deterioração, sendo que 35.000 novos casos de deterioração surgem a cada ano (MEHTA, 1993). Um histórico de construções portuárias, pontes e estruturas à beira-mar, na Noruega, mostrou vários casos de deterioração precoce das mesmas. Os casos mais graves referiam-se às pontes, cerca de 25% de um total de 320, manifestaram vastas zonas deterioradas, por corrosão de armaduras e, em vários casos, eram obras com menos de 25 anos, sendo um deles uma ponte com cerca de 10 anos (GJØRV, 1994).

No caso do Brasil, que apresenta uma costa marítima bem extensa, com grandes cidades portuárias, pode-se presumir que a corrosão de armadura, muitas vezes, esteja ligada ao ataque de íons cloreto, visto que os mesmos, normalmente, podem atacar a camada passiva que envolve a armadura imersa no concreto.

Dal Molin (1988) observou, nas estruturas com graves danos, que 40% das manifestações patológicas, na região Sul, referiam-se à corrosão de armaduras. Carmona e Marega (1988) chegaram a 30%, na região Sudeste. Na região Norte, Aranha (1994) chegou a 46%. Nince e Clímaco (1996) ressaltaram 30%, na Cidade de Brasília, na região Centro-Oeste e, em Recife, na região Nordeste, 64% foi observado por Andrade (1997).

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 sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil (ABNT-NBR 6118, 2003). A agressividade do ambiente, devido ao transporte e à deposição de cloretos, pode ser o fator desencadeador e acelerador da corrosão em armaduras e é, em função desta agressividade, que novas exigências poderão ser impostas às estruturas de concreto. Existe, portanto, a necessidade da caracterização do nível de agressividade da região onde construções serão implantadas.

Do ponto de vista econômico, os custos de manutenção envolvidos são bastante expressivos. O estudo da durabilidade do concreto armado, em ambiente marítimo, deve contribuir para a escolha do melhor material a ser empregado, assim como uma execução mais apropriada, em função do tipo e grau de agressividade, para presumir, com mais domínio, o tempo de vida útil da estrutura e para avaliar a periodicidade de medidas de vistorias e/ou reparos por meio de um planejamento com monitoramento.

Com esta visão, a pesquisa, aqui proposta, busca contribuir para o avanço do conhecimento sobre a durabilidade de estruturas de concreto armado, em zona de atmosfera marinha, e propõe-se a fazer um levantamento da deposição de cloretos, na orla marítima do Bairro de Boa Viagem, Recife-PE, verificando o seu efeito com relação ao distanciamento do mar e sua interação com o ambiente, podendo, assim, colaborar para que se possa melhor adequar as características das estruturas às condições de agressividade ambiental, reduzindo custos de manutenção.

1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A ABNT-NBR 6118 (2003), que determina parâmetros de projeto para estruturas de concreto, traz, como uma das principais novidades, a introdução de classes de agressividade ambiental. Ao todo são quatro níveis, que vão desde ambientes menos agressivos até locais com agressividade muito alta, em uma escala de I a IV. Esses níveis de agressividade contribuirão para definir a classe de concreto a ser empregada, a relação água/cimento adotada, o cobrimento nominal, além de exigências referentes à fissuração. As estruturas, expostas à atmosfera marinha, enquadram-se nas classes III, de forma indireta, ou IV, quando chegam a receber respingos de maré; contudo, na ABNT-NBR 6118 (2003) não existem dados numéricos disponíveis que caracterizem cada classe, com relação ao nível de agressividade.

Em ambiente onde há influência de cloretos como são os casos de regiões próximas da orla marítima e de certos setores de indústrias, poderá haver despassivação da armadura, em decorrência de elevado teor de íons cloro, resultando em deterioração da armadura e, por decorrência, do concreto circundante.

Para verificar se um local, para implantação de uma obra, deve ser considerado na classe III, há a necessidade da determinação da concentração de cloretos. Não existem, na presente data, dados concretos para considerar uma certa região como marinha e, portanto, classificada como classe III. Surge, assim, a necessidade da determinação da concentração de cloretos, ao longo da costa brasileira, para a delimitação do nível de agressividade, conforme a distância do mar. Este mapeamento, da referida concentração, não poderá ser caracterizado apenas pela distância do mar. Devem ser consideradas as barreiras impostas ao deslocamento do vento, que dependerá da topografia da região e de outros tipos de obstruções, tais como:

edificações (no caso de zonas urbanas), florestas ou outros tipos de ocupações nas regiões próximas da costa.

Esta pesquisa foi motivada pela necessidade de se conhecer os níveis de concentração de cloretos para atendimento às prescrições da ABNT-NBR 6118 (2003), no que concerne à definição dos parâmetros básicos (classe de concreto, relação água/cimento e cobertura nominal), para especificação das peças de concreto, das edificações que tenham este material como elemento estrutural. Tal conhecimento permite desenvolver os projetos das estruturas, de concreto armado, tratando, de forma preventiva, em uma ação “a priori”, o problema do ataque à armadura, pela ação dos cloretos. Este tipo de ação não sendo empreendida, as estruturas correrão o risco de sofrerem intervenções corretivas, com as manifestações patológicas advindas.

A região escolhida, para o presente estudo, foi a orla marítima do Bairro de Boa Viagem, região fortemente habitada na Cidade do Recife-PE.

1.3 OBJETIVO

O objetivo da pesquisa consiste em avaliar o nível de deposição de cloretos, em zona de atmosfera marinha na Região Metropolitana do Recife, especificamente no Bairro de Boa Viagem, em função de sua distância em relação ao mar; empregando o método da vela úmida, tendo como apoio a caracterização climatológica do ambiente.

1.4 CONTEÚDO

A pesquisa está apresentada em cinco capítulos, sendo que o primeiro caracteriza a pesquisa proposta, o segundo realiza uma revisão bibliográfica, enquanto os três últimos

referem-se à pesquisa experimental propriamente dita, à discussão dos resultados e às considerações finais, respectivamente.

No Capítulo 1, são apresentadas a importância e a justificativa do tema, bem como a motivação e o objetivo do trabalho.

No Capítulo 2, é feita uma descrição sobre ambiente marítimo. Discute-se a formação e transporte do aerossol marinho e os fatores que os influenciam, bem como os mecanismos e os fatores de deterioração e envelhecimento, em estruturas de concreto armado, no ambiente marinho. É abordada a corrosão pelos íons cloreto e os fatores que influenciam a penetração destes íons. São apresentadas definições de vida útil e exigências de normas para obtenção da durabilidade em concreto armado, no ambiente marítimo, como também são descritos os modelos deterministas de transporte de massa no concreto.

No Capítulo 3, é abordado o procedimento experimental realizado, e são apresentados os resultados.

No Capítulo 4, é feita a discussão dos resultados obtidos. Abordam-se as características da água do mar, as características climatológicas do ambiente e suas relações com o comportamento da deposição de cloretos.

No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais, baseadas e fundamentadas nas referências bibliográficas e nos resultados obtidos no presente trabalho, as recomendações e sugestões resultantes da pesquisa que deverão ser objetos de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MEIO AMBIENTE – FATORES INTERVENIENTES

2.1.1 Ambiente marítimo

Os primeiros estudos de durabilidade do concreto foram realizados em ambiente marítimo, pois é nesse meio em que são encontrados diversos agentes agressivos, atuando conjuntamente, e onde apareceram, primeiramente, graves problemas de corrosão.

Os principais agentes que atacam a pasta de cimento em ambientes marítimos são os sais de magnésios e os sulfatos (BICZÓK, 1972; MEHTA e MONTEIRO, 1994), e o principal agente que ataca o aço no concreto estrutural é o cloreto (HELENE, 1986).

Mehta e Monteiro (1994) descrevem que a maioria das águas marítimas é, razoavelmente, uniforme quanto à composição química. No Oceano Atlântico, o teor total médio de sais é de 3,5% (35 g/L). A quantidade dos principais íons, contidos nas águas desse oceano, é indicada na Tabela 2.1, conforme a norma DIN 4030 (1991).

Tabela 2.1 – Principais íons do Oceano Atlântico (DIN 4030, 1991).

Íons	Quantidade de íons (mg/L)
SO ₄ ²⁻	2.800
Mg ²⁺	1.300
Ca ²⁺	400
Cl ⁻	19.900
Na ⁺	11.000
K ⁺	400
pH	> 8

Conforme Forschhammer (s.d. apud BICZÓK, 1972), a composição da água do mar em relação aos sais é mostrada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Composição da água do mar (FORSCHHAMMER, s.d., apud BICZÓK, 1972).

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

A DIN 4030 (1991), o CEB-FIP, Bulletin 213/214 (1993) e a CPH-EHE (1999) classificam a agressividade das águas conforme a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação da agressividade de águas ácidas conforme DIN 4030 (1991), CEB-FIP, Bulletin 213/214 (1993) e CPH-EHE (1999).

Grau de agressividade	pH	CO₂ agressivo (ppm)	SO₄²⁻ (mg/L)	Mg²⁺ (mg/L)	* NH₄⁺ (mg/L)
Leve	6,5-5,5	15-40	200-600	300-1000	15-30
Severa	5,5-4,5	40-100	600-3000	1000-3000	30-60
Muito Severa	< 4,5	> 100	> 3000	> 3000	> 60

* somente no CEB-FIP, Bulletin 213/214 (1993) e na CPH-EHE (1999).

Segundo Biczók (1972), as águas salobras podem corroer com grande intensidade o concreto e o aço devido ao alto conteúdo de CO_2 e baixo valor de pH, enquanto a água do mar possui baixo teor de CO_2 livre e um pH geralmente igual ou superior a 8. Mehta e Monteiro (1994) mencionam valores entre 7,5 e 8,4 para pH da água do mar, sendo o valor médio de equilíbrio 8,2. Outro fato observado é que, em pontos diferentes ao longo da costa e em diversas profundidades, a constituição de substâncias existentes na água é normalmente variada. Sendo assim, é necessário que se estude cada caso, para se obter a melhor solução para execução de uma obra (BICZÓK, 1972). É também o caso de estuários, baías, etc, onde pode-se encontrar pH menor que 7,5 devido à presença de maiores teores de CO_2 livre, resultando, desse modo, em um ambiente mais agressivo (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Com os valores da Tabela 2.1 para a água do mar, a DIN 4030 (1991) classifica o ambiente como severo, conforme Tabela 2.3. Porém, no caso de estuários de rios e canais, por exemplo, essa classificação pode ser reavaliada, utilizando-se a Tabela 2.3.

Existem exemplos de concretos que apresentam um desempenho bem melhor em uma região, comparada à outra, como, por exemplo, concretos que utilizaram o cimento de alto forno apresentaram bons resultados em obras da costa Atlântica da França, enquanto, no mar Báltico, os resultados não foram satisfatórios. Ensaio, realizados na Polônia, mostraram que esse cimento não apresentou o desempenho esperado frente a ataques por sulfatos de magnésio e água salobra, enquanto cimentos Portland comuns e pozolânicos apresentaram um melhor desempenho (BICZÓK, 1972).

Conforme Neville (1982), Mehta e Monteiro (1994), além da ação química da água do mar, pode-se ter agressão por congelamento, impacto e abrasão das ondas. A soma desses efeitos torna o ambiente mais agressivo, como, por exemplo, em estruturas costeiras e de alto mar.

Segundo Biczók (1972), a água do mar possui cloretos e sulfatos, os quais estão ligados tanto a álcalis como a íons de magnésio e absorvem também o anidrido carbônico da atmosfera. O efeito mecânico também está presente nesse ambiente, podendo retirar da superfície do concreto o material solto oriundo da corrosão, ficando nova superfície de concreto exposta ao ataque.

A Figura 2.1 mostra um esquema da deterioração de uma estrutura de concreto em água do mar, segundo o CEB-FIP, Bulletin 183 (1992).

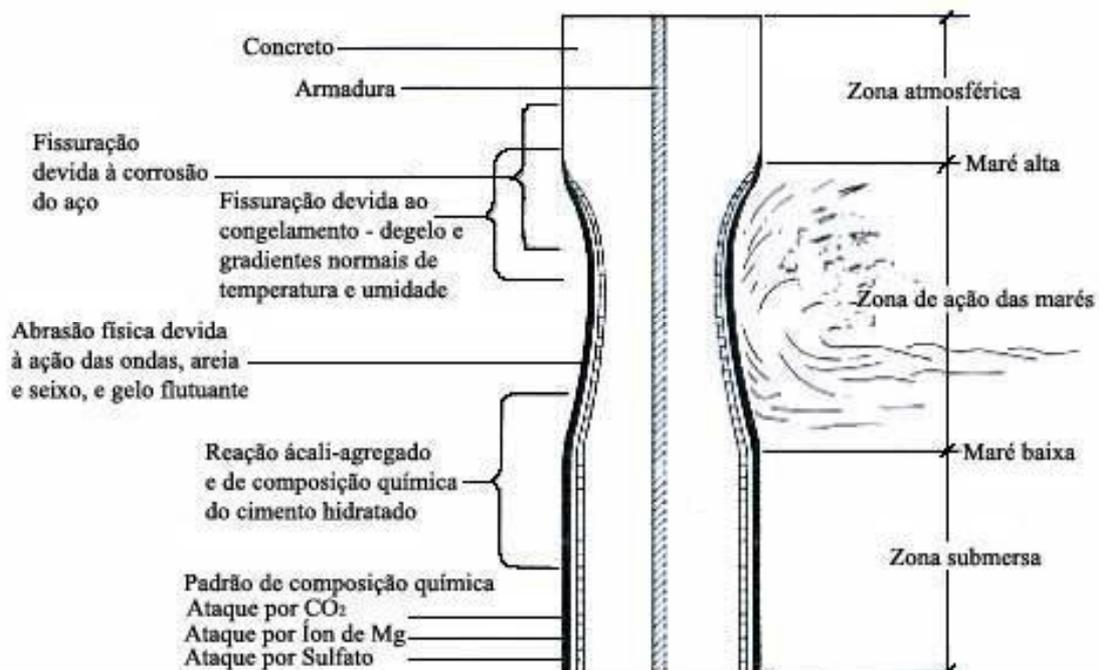


Figura 2.1 – Deterioração de estrutura de concreto em água do mar (CEB-FIP, Bulletin 183, 1992).

Helene (1981) menciona que a atmosfera marinha também contém agentes agressivos, como cloretos de sódio e de magnésio, além de sulfatos, tanto nas gotículas de

água em suspensão como em forma de cristais. A concentração de cloretos junto à superfície de concreto é bem mais elevada na zona sujeita a respingo (splash zone) que em zona totalmente submersa (PRUDÊNCIO, 1993).

Segundo Villaverde et al. (1994), ao realizarem uma avaliação da Subestação Rio Grande 2 da CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica), o meio agressivo da atmosfera marítima, a umidade relativa do ar normalmente elevada, a proximidade com indústrias de fertilizantes e com uma refinaria de petróleo, a alta porosidade do concreto e cobrimentos baixos foram as principais causas do alto grau de deterioração da estrutura de concreto armado por ataque de cloretos e sulfatos.

2.1.1.1 Formação e transporte do aerossol marinho

Conforme Fitzgerald (1991), O'Dowd et al. (1997), a formação do aerossol marinho tem origem na agitação da superfície do mar causada pelo vento. Este efeito gera bolhas de ar que, em seguida, explodem produzindo gotículas em forma de jorro, filme (película) ou espuma. Na zona de quebra das ondas, estas bolhas são mais numerosas e são formadas pelo aprisionamento do ar na superfície da água, com o movimento de quebra das ondas. Embora o efeito de quebra das ondas seja responsável pela geração de um maior volume de aerossol, este também se origina a partir da pressão que o vento exerce sobre a superfície do mar. Assim, as áreas de mar aberto também colaboram para a produção do aerossol, ainda que de forma menos expressiva.

Fitzgerald (1991), Taylor e Wu (1992) salientam ainda que, além da formação indireta do aerossol marinho, com a ruptura das bolhas de ar, também existe um efeito direto com a produção de gotas na forma de espuma, resultante da agitação na crista das ondas desencadeada pelo vento. Este efeito é um importante contribuinte na formação de partículas de maior tamanho.

Segundo Zezza e Macri (1995), após a geração das gotículas, estas entram em equilíbrio com o ambiente e, dependendo das condições de temperatura e umidade relativa, adquirem a forma de partículas salinas (cristais) ou soluções salinas de distintas concentrações. Salientam ainda que, quando a umidade relativa situa-se abaixo de 70-74%, as gotículas supersaturadas se transformam em partículas de sal, mudando de fase.

Morcillo et al. (2000) descrevem que estas partículas suspensas no ar, na forma sólida ou líquida, têm tamanhos que variam de 0,1 a 400 μm . Usualmente, estas partículas estão agrupadas em dois grandes grupos, denominados de partículas depositáveis ($\phi \geq 10 \mu\text{m}$) ou partículas flutuantes ($\phi < 10 \mu\text{m}$) (AMBLER e BAIN, 1955).

Taylor e Wu (1992) apresentaram, para estas partículas, uma classificação com três faixas:

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

Independentemente da classificação descrita, é importante considerar que as partículas de maior tamanho e massa depositam-se mais rápido, enquanto as de menor tamanho e massa permanecem mais tempo em suspensão.

Uma vez gerado, o aerosol marinho é transportado na direção do continente, de forma associada, envolvendo a formação e o transporte do mesmo. Petelski e Chomka (1997) abordaram este assunto através de um modelo, em forma de fluxo que considera as várias possibilidades de entradas e saídas em um volume representativo do aerosol na zona de costa. Meira (2004a) fez a inclusão, neste modelo, do fluxo do aerosol na zona de atmosfera marinha, conforme Figura 2.2.

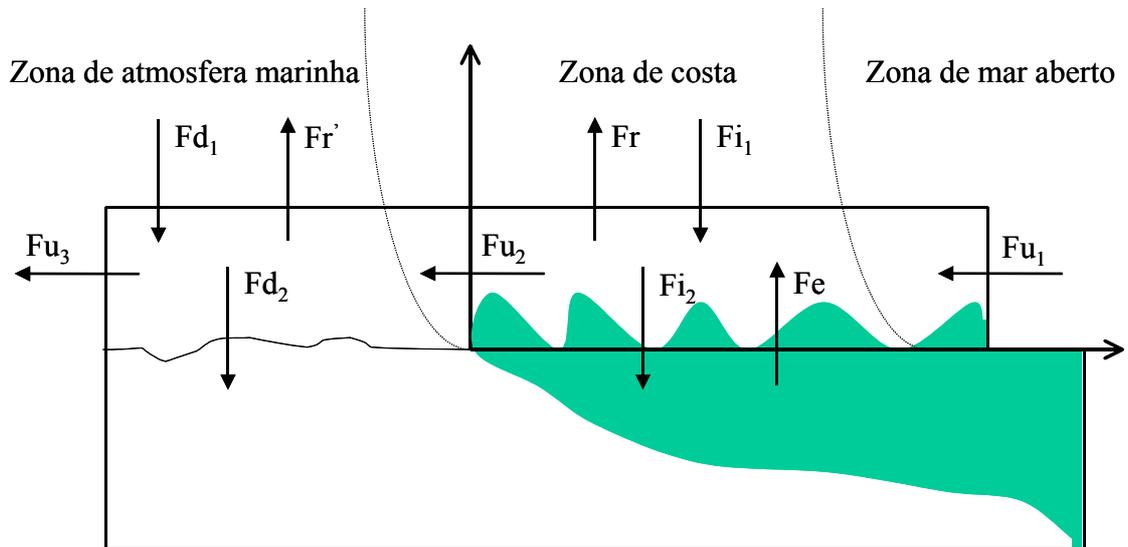


Figura 2.2 – Representação esquemática dos fluxos inerentes ao aerossol marinho (MEIRA, 2004a).

Onde:

- a) Fd_1 e Fd_2 = fluxos de deposição na zona de atmosfera marinha;
- b) Fi_1 e Fi_2 = fluxos de deposição na zona de costa;
- c) Fr e Fr' = fluxos turbulentos devido às condições do vento;
- d) Fe = fluxo gerado a partir da superfície do mar;
- e) Fu_1 , Fu_2 e Fu_3 = fluxos advectivos que entram e saem da zona de estudo.

Meira (2004a), sobre cada um desses fluxos, descreveu que:

- a) os fluxos de deposição (Fd) decorrem do efeito gravimétrico, onde a massa das partículas/gotículas faz com que elas se movam na direção de camadas inferiores, devido à ação da gravidade. A deposição também pode ocorrer pela presença de obstáculos, onde a fricção das massas de ar com estes faz com que parte do aerossol se deposite nas suas superfícies. Este tipo de deposição pode ocorrer de forma seca ou úmida, onde, no primeiro caso, ocorre na ausência de chuva, enquanto, no segundo, vem acompanhada de precipitação pluviométrica;

- b) os fluxos de deposição (F_i) derivam do efeito gravimétrico, onde a massa das partículas/gotículas faz com que elas se movam na direção de camadas inferiores, devido à ação da gravidade;
- c) o fluxo turbulento (F_r), também conhecido como difusão turbulenta, ocorre com o movimento aleatório de massas de ar na forma de redemoinhos, decorrente de instabilidades causadas pela pressão de corte com o movimento corrente das massas de ar. Os redemoinhos formados são alongados, formando longos filamentos, e, através das suas grandes superfícies, ocorre um processo difusivo, equilibrando-se com o meio. Ainda na vertical, é importante apontar a possibilidade de um fluxo convectivo devido ao movimento das massas de ar quente comuns em zonas de instabilidade do ar; contudo, este fluxo é de difícil separação do fluxo turbulento, portanto, é visto em conjunto com o primeiro (ERIKSSON, 1959). O fluxo turbulento (F_r') assume as mesmas características daquele presente na zona de costa e, portanto, é pouco expressivo em relação aos demais;
- d) o fluxo emitido (F_e) corresponde ao movimento do aerossol na sua geração, em função do fenômeno esclarecido nos parágrafos anteriores;
- e) os fluxos advectivos (F_u) correspondem ao transporte horizontal do aerossol já presente na atmosfera, devido ao deslocamento das massas de ar com a ação do vento.

Os fluxos difusivos podem se fazer presentes em paralelo aos fluxos advectivos; contudo, são pouco expressivos diante dos demais. O fluxo advectivo é o mais importante na zona de costa e alcança os maiores valores. Isto porque esta é a zona de maior influência das partículas maiores que são, predominantemente, transportadas da forma citada. Adentrando a zona de atmosfera marinha, o transporte de sais, devido ao movimento das massas de ar, e a

sua deposição, por ação gravimétrica ou pelo efeito de fricção com obstáculos (quando presente), são os efeitos que predominam, embora possam ocorrer fenômenos de menor importância sob o ponto de vista da concentração de sais nas zonas próximas do mar, como é o caso da resuspensão de pequenas partículas e fluxos de caráter difusivo, conforme já comentado (MEIRA, 2004a).

Conforme Morcillo (1998), uma vez formado o aerossol marinho, o mesmo caminha na direção do continente e tem a sua relação com a salinidade atmosférica fortemente influenciada por variáveis, como a direção e velocidade dos ventos predominantes, a distância da costa, a topografia da zona, a altitude, etc. Algumas destas variáveis serão descritas a seguir.

2.1.1.1.1 Influência da velocidade do vento

A relação entre a velocidade do vento e a concentração de sais do aerossol marinho gerado pode ser explicada pelo próprio processo de formação do aerossol marinho, já comentado na seção anterior.

Woodcock (1953), Lovett (1978), Taylor e Wu (1992), Gustafsson e Franzén (1996) e Meira (2004a), a partir de estudos, descreveram que esta relação segue uma função do tipo exponencial. Lovett (1978) salientou, ainda, que este comportamento se deve ao fato de que o acréscimo da velocidade do vento acresce a quantidade de partículas no aerossol e facilita a formação de partículas de maior tamanho e massa. A ampliação da velocidade do vento faz com que haja um aumento na quantidade de partículas de cada tamanho, possibilitando, em especial, que as maiores partículas tenham uma maior participação (FITZGERALD, 1991). Uma taxa de crescimento na quantidade de partículas maiores que 0,5 μm , cerca de duas vezes superior ao das partículas entre 0,01 e 0,045 μm , foi observada por Piazzola e Despiau (1997), com a velocidade do vento variando entre 5 e 20 m/s.

Segundo Gustafsson e Franzén (1996) e Morcillo et al. (1999), o vento tem importante relação quando o aerossol é transportado na direção do continente. Com sua amplitude, maiores partículas podem alcançar maiores distâncias antes de se depositarem, aliando-se ao efeito de formação de um aerossol com maior concentração salina.

Velocidades de vento superiores a 10 m/s desempenham importante papel na produção do aerossol marinho (FELIÚ, MORCILLO e CHICO, 1999).

Morcillo et al. (2000) descrevem que existe uma boa relação entre a velocidade do vento e o seu tempo de atuação com a deposição de cloretos.

O processo agressivo, com origem na formação e no transporte do aerossol marinho, assume maior importância quando o vento supera determinado valor. Segundo Spiel e Leeuw (1996), este patamar está entre 7 e 11 m/s, mas, para Piazzola e Despiau (1997), este valor é a partir dos 5 m/s. Porém, em estudo realizado por Morcillo et al. (2000), os resultados indicaram que, a partir de 3 m/s, este efeito já passa a ser expressivo, sendo também esta a regra adotada por Fitzgerald (1991) e O'Dowd et al. (1997).

2.1.1.1.2 Influência da altura

Blanchard e Cipriano (1984) estudaram a influência da altura na distribuição vertical da concentração salina, em uma faixa de 14,5 a 620 m, acima da superfície do mar e concluíram que existe uma diminuição na concentração de sais à medida que se aumenta a altitude, o que se acentua nos metros mais próximos do mar. Este efeito se deve à presença de partículas maiores, que são fortemente influenciadas pelo efeito da gravidade, fazendo com que não alcancem níveis muito elevados em altitude e depositem-se mais rápido.

Barbosa et al. (2003) averiguaram a concentração de cloretos em pilares sem nenhum tipo de proteção superficial, em diversos pavimentos, numa estrutura com 40 pisos, localizada a 700 m da costa, construída no início da década de 70 e abandonada até o

presente, concluindo que a concentração de cloretos em níveis mais altos diminui gradualmente.

2.1.1.1.3 Influência da distância em relação ao mar

Jaegerman (1990) observou que, nos primeiros 400 metros de solo a partir da costa, havia uma redução acentuada da concentração de cloretos no aerosol marinho, na região do Mediterrâneo.

À medida que há um distanciamento em relação ao mar, o efeito gravimétrico e a fricção com obstáculos do aerosol marinho assumem maior participação no fenômeno, contribuindo para que haja uma diminuição da concentração salina com o aumento da distância em relação ao mar; com isto, deve-se considerar que as construções, na zona de atmosfera marinha, sofrem níveis de agressividade distintos (GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996; MORCILLO et al., 2000).

Castro, De Rincón e Pazini (1999) realizaram ensaios em corpos-de-prova, expostos em zona de névoa a 50 m, 100 m, e 780 m, e observaram uma grande diminuição da intensidade de penetração de cloretos de 50 m para 780m.

Petelski e Chomka (2000) descrevem que há uma redução da concentração das partículas, de maior diâmetro, à medida que distâncias maiores, em relação ao mar, são atingidas.

Castro, De Rincón e Pazini (2001) verificaram, em corpos-de-prova, expostos a 50, 100 e 780 m do mar e com diferentes relações de água e cimento, que o perfil de cloretos diminui com o distanciamento da costa e que essa diminuição também persiste mesmo quando a relação água/cimento aumenta.

Costa (2001), realizando ensaios com corpos-de-prova de argamassa, expostos de 72 m a 4705 m em relação à água do mar, observou que a intensidade de penetração de cloretos diminuiu muito de 72 m até 532 m.

Meira e Padaratz (2002) ressaltaram que a taxa de deposição de cloretos, oriundos do aerosol marinho, após os duzentos metros iniciais, é menos acentuada, atingindo valores mínimos de concentração de cloretos depois do primeiro quilômetro de distância, em relação ao mar.

Nunes et al. (2004) verificaram a influência da distância da água do mar, na intensidade de ataque de cloretos, em quatro estruturas de concreto armado, localizadas na Cidade do Rio Grande-RS, com mais de 15 anos de serviço e com diferentes distâncias (0, 160, 630, 2200 m). Observaram que o teor de cloretos, nas camadas mais próximas da superfície das estruturas, diminui acentuadamente até a distância de 630 m.

2.1.1.2 Mecanismos de deterioração e envelhecimento em ambiente marítimo

Os principais agentes, encontrados em ambientes marítimos e industriais, que normalmente são causa de ataque ao concreto armado, são o gás carbônico, os íons sulfato, os íons cloreto, as chuvas ácidas, a fuligem, os fungos e bactérias. Muitas vezes esses ambientes marítimos, industriais e densamente urbanizados podem estar combinados, aumentando o nível de agressividade (HELENE, 1993).

Segundo Neville (1982), Mehta e Monteiro (1994), o efeito do sulfato da água do mar é diferente do efeito de uma água que só contém sulfato (água subterrânea), pois a presença de cloreto torna a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e o sulfoaluminato de cálcio ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) mais solúveis, sendo esses elementos lixiviados pelo movimento da água do mar, evitando a expansão desses. Mehta e Monteiro (1994) descrevem que, quando é utilizado cimento Portland com alto teor de C_3A para execução de concreto em contato com água do mar, observa-se que esse ataque provoca erosão ou perda de constituintes sólidos da pasta de cimento ao invés de haver expansão, aparentemente porque a troca dos íons OH^- pelos íons Cl^- do meio evita expansão da etringita (sulfoaluminato de

cálcio). Casualmente, esta opinião é consistente com a hipótese de que é necessário um meio alcalino para a expansão da etringita pela adsorção de água.

Hadley (1948), após observar estruturas marítimas ao longo da costa do Pacífico, nos Estados Unidos e Canadá, afirmou não encontrar sinais de ataque por sulfato devido ao contato com a água do mar. Salienta ainda que o concreto deve ser executado com material de boa qualidade, densidade e permeabilidade uniformes e proteção da armadura contra corrosão. Ocasionalmente, encontrou sinais de ação dissolvente da água do mar. Há o desaparecimento da película superficial do cimento ou enfraquecimento em uma zona de ninho de abelha, ficando algumas partículas soltas. O mesmo pesquisador afirma que tais fatos podem ocorrer em água doce.

No caso de concreto, executado a partir de cimento com alto teor de C_3A e alto teor de saturação (bastante permeável), haverá formação de sulfoaluminato de cálcio que irá atacar o concreto, pois o teor de cloretos da água do mar não poderá impedir a cristalização daquele. No caso de concreto, executado com cimento Portland com baixo teor de C_3A , o ataque ao concreto será reduzido pela ação dos cloretos. O cloreto de sódio torna a gipsita mais solúvel, evitando a cristalização desse. Dessa forma, o concreto, executado com cimento Portland, compacto e pouco permeável, corrói-se de forma muito lenta (BICZÓK, 1972).

Como já foi visto, o hidróxido de cálcio livre, na pasta do concreto endurecido, pode causar deterioração por troca de base, envolvendo íons magnésio; sendo esse fato confirmado em estruturas marítimas onde havia depósitos brancos de $Mg(OH)_2$, também chamado brucita, e silicato de magnésio hidratado (LEA, 1970; MEHTA, 1980; ATWOOD e JOHNSON, 1924, apud MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Conforme Biczók (1972), a concentração alta de sulfatos, aproximadamente 3,7 g em 35 g do total de sais, pode criar uma corrosão por expansão (formação de gipsita e sulfoaluminato de cálcio). A quantidade de sais de magnésio, 1,297 g/L de íons Mg^{++} do total

de 35 g de sais, pode provocar uma corrosão por troca catiônica e separação das combinações solúveis da pasta de concreto endurecido. Uma corrosão por lixiviação só é possível quando temos pressão hidráulica por apenas um lado e quando o concreto é permeável.

Já Moskvin et al. (1980) afirmam que, na presença de cloreto de sódio, somente pequenas quantidades de sulfoaluminatos de cálcio hidratado se cristalizam, e que, na presença de grandes quantidades de sais de magnésio, existentes nas águas de mar, não é possível a formação de sulfoaluminatos, pois aqueles dissolvem o C_3A .

O hidróxido de magnésio permanece em estado amorfo e deposita-se nos poros do concreto endurecido. A solução de sais de magnésio desmancha, com grande velocidade, os cristais de sulfoaluminato de cálcio hidratado, impedindo a corrosão do concreto endurecido. A corrosão por magnésio, devido à água do mar, é muito pequena, devido à quantidade reduzida do íon Mg para formação de $Mg(OH)_2$. Sendo assim, a corrosão por água do mar é controlada, evitando a formação de sulfoaluminato de cálcio, o que é evitado por uma boa densidade do concreto (KIND, 1954, apud BICZÓK, 1972).

Segundo Moskvin et al. (1980), o concreto é atacado pela água do mar conforme a Figura 2.3, sendo o processo descrito na seqüência:

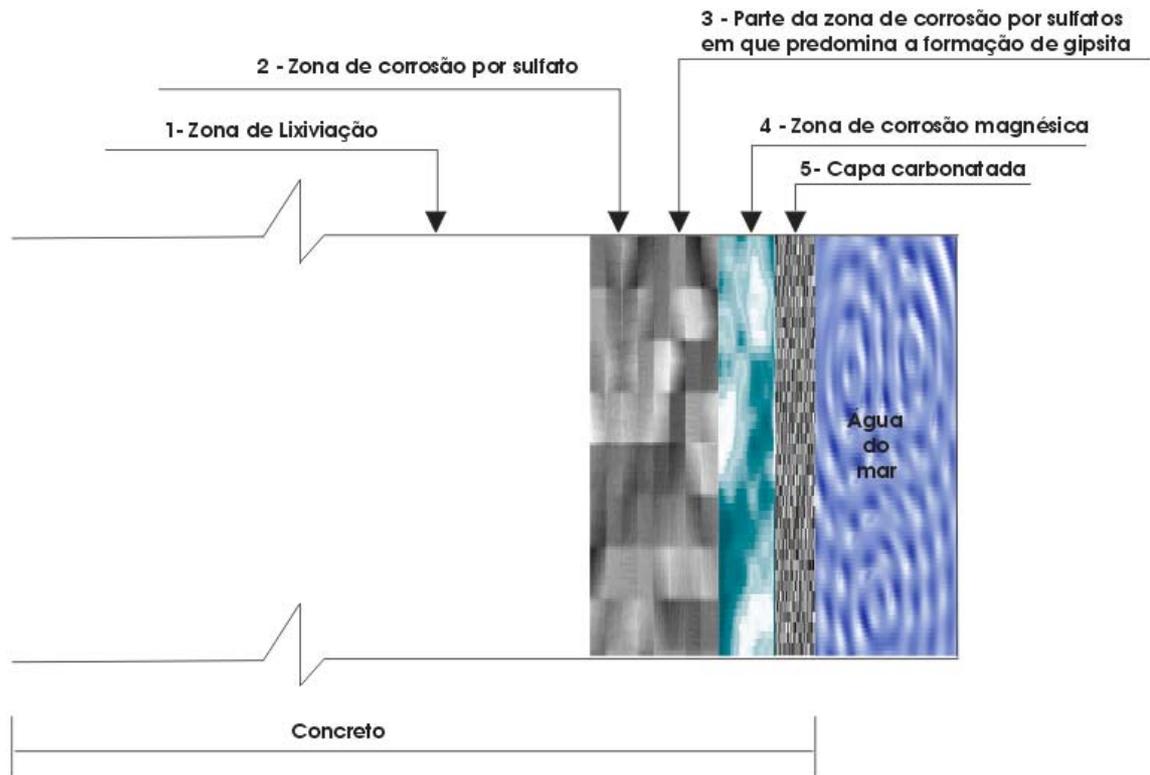


Figura 2.3 – Esquema da corrosão produzida pela água do mar (MOSKVIN et al., 1980).

- a) o ácido carbônico, existente na água do mar, que penetra pela superfície externa do elemento, ataca a camada mais externa da estrutura de concreto, transformando o hidróxido de cálcio em bicarbonato (camada 5);
- b) a água do mar continua a penetrar no concreto, havendo reação entre os sais de magnésio e o hidróxido de cálcio, formando cloreto de cálcio bastante solúvel ou sulfato de cálcio pouco solúvel (camada 4). Nessa camada, o teor de cal é pequeno devido à falta do hidróxido de cálcio ou pela transformação em gipsita. Na fase sólida dessa camada, está presente o hidróxido de magnésio, e, na fase líquida, o cloreto de cálcio, formando uma massa branca e leitosa;
- c) os sulfatos não combinados com o íon magnésio continuam a penetrar no concreto, provocando ataque por sulfato, formando uma zona que se caracteriza pela presença de gipsita e de sulfoaluminatos de cálcio, havendo

corrosão por expansão. Na parte mais externa dessa zona (camada 3), assim como na zona anterior (camada 2), só há formação de gipsita devido à presença de íons magnésio;

- d) devido à penetração da água liberada do ácido carbônico, dos sais de magnésio e dos sulfatos, há formação de uma zona a qual sofre ataque por lixiviação (camada 1).

O limite entre as diversas camadas se desloca com o tempo, sendo que a solução de sais de magnésio desloca-se sobre os sulfoaluminatos de cálcio, formados na camada seguinte mais interna, destruindo esses e evitando expansões maiores. Os sais de magnésio penetram no concreto pela infiltração da água do mar, devido à diminuição da difusão do Ca(OH)_2 , procedente do interior da pasta de cimento (MOSKVIN et al., 1980).

Lea (1970) descreve que elementos de concreto, com dimensões não muito grandes, expostos a mar aberto, são, preferencialmente, sujeitos à lixiviação ao invés de expansão. Em estruturas como paramento de cais, onde a água do mar pode percolar em quantidade insuficiente para haver lixiviação, podem ocorrer efeitos de expansão.

Conforme Mehta e Monteiro (1994), concreto permeável é passível de ser atacado por água do mar com teores normais de CO_2 dissolvido, sendo encontrado, nesse caso, silicarbonato de cálcio (taumasita), carboaluminato de cálcio hidratado (hidrocalumita) e carbonato de cálcio (aragonita) no concreto deteriorado nesse ambiente.

Segundo Neville (1982), o efeito prejudicial da água do mar, em concreto armado, é devido à criação de zonas anódicas e catódicas pela penetração de sais, resultando na corrosão do aço e ruptura do concreto que envolve a armadura.

O concreto também pode ser atacado sem estar em contato com a água do mar, pois o ar do ambiente marítimo possui sais que podem penetrar na pasta de cimento, sendo

esse ataque mais intenso no inverno e outono devido à alta umidade relativa do ar nessas estações do ano e com teor de sais maior (BICZÓK, 1972).

Biczók (1972) salienta, ainda, que o ataque dos agentes agressivos, contidos em água, é menos intenso que os contidos no ar. A formação de sulfoaluminatos de cálcio, por ataque da água do mar, é realizada junto com a hidratação de partículas de cimento, e novos elementos tendem a fechar os poros do concreto, impedindo a infiltração dos agentes agressivos. Os agentes agressivos, contidos no ar, formam sulfoaluminatos de cálcio ao mesmo tempo em que se continuam depositando sais, o que provoca um intenso ataque ao concreto.

2.1.1.3 Fatores de deterioração e envelhecimento em ambiente marítimo

Segundo Helene (1981), a velocidade de corrosão do concreto é 30 a 40 vezes mais rápida em atmosfera marítima que em atmosfera rural. A intensidade do ataque é aumentada conforme a localização da estrutura de concreto, na seguinte ordem: zona constantemente submersa, zona de névoa, zona da variação da maré e zona de respingo de maré. Bury e Domone (1974), Neville (1982), Taylor (1992) e Mehta e Monteiro (1994), igualmente, concluem que elementos, totalmente submersos em água do mar, são menos atacados que os concretos expostos a ciclos de molhagem e secagem na zona de maré. Mehta e Monteiro (1994) salientam ainda que concreto sujeito a agentes agressivos do ar ou névoa sofre um ataque de intensidade intermediária em relação à zona de variação de maré. Mehta (1980) descreve que, na zona totalmente submersa, só há ataque químico; na zona atmosférica, ação do congelamento e corrosão da armadura; e, na zona de maré, sofre todos os tipos de ataques físicos e químicos.

A Figura 2.4 mostra os tipos de exposição marinha, conforme o CEB-FIP, Bulletin 183 (1992).

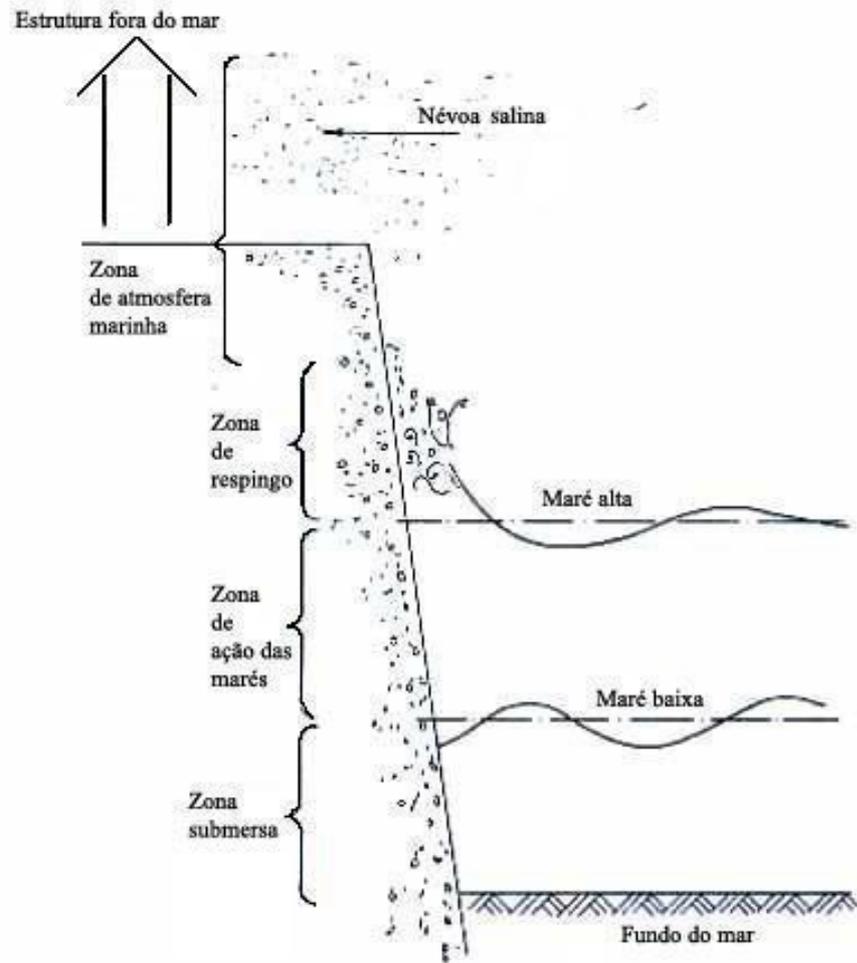


Figura 2.4 – Tipos de exposição marinha (CEB-FIP, Bulletin 183, 1992).

A intensidade do ataque da água do mar é diminuída com o passar do tempo devido à decomposição de hidróxido de magnésio nos poros do concreto (NEVILLE, 1982). Por outro lado, salientam Mehta e Monteiro (1994) que ataques por congelamento, expansão álcali-agregado, cristalização de sais, quando temos uma face exposta à molhagem e outras não, corrosão da armadura, erosão por correnteza, onda ou objetos flutuantes, normalmente aumentam a permeabilidade do concreto, acelerando o ataque de agentes agressivos.

Neville (1982) descreve que o ataque por água do mar é mais intenso em clima tropical; enquanto Biczók (1972) acredita que o congelamento é o aspecto decisivo para obras marítimas situadas em zonas polares, e a resistência aos agentes agressivos é o aspecto mais importante em zonas tropicais.

Estudos, feitos por pesquisadores da Alemanha, concluíram que cimentos com altos teores de óxidos de alumínio e ferro produzem concretos com baixa resistência ao ataque da água do mar, enquanto os pesquisadores norte-americanos, além de concordarem que o cimento deve ter pequena quantidade de Al_2O_3 , concluem também que deve conter baixos teores de CaO , ou seja, o cimento Portland de alta resistência inicial apresenta um desempenho menor que o cimento Portland comum frente ao ataque de água do mar (BICZÓK, 1972).

Campus (1963 apud BICZÓK, 1972) concluiu que a intensidade do ataque da água do mar é menor quanto mais denso e menos permeável é o concreto, e quanto maior for a quantidade de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ do cimento.

Lea (1970) relatou que o cimento com escória, pozolana ou resistente a sulfatos é de boa resistência ao ataque por água do mar, sendo melhor o desempenho desses que o cimento Portland comum, principalmente em regiões de clima quente ou tropical, onde o ataque químico é a principal causa do ataque. Entretanto, o cimento aluminoso não tem apresentado bom desempenho, frente ao ataque por água do mar, nos trópicos; mas tem resistido bem em climas moderados (BICZÓK, 1972).

2.2 CORROSÃO PELOS ÍONS CLORETO

As armaduras no concreto permanecem em condições normais, em um meio alcalino que permite que elas trabalhem na região de passividade do diagrama de Pourbaix (POURBAIX, 1961). Entretanto, essa passividade pode ser alterada pela presença de íons cloreto em quantidades suficientes para romper pontualmente a película passiva, conhecida por corrosão por cloretos.

A presença de cloretos no concreto pode ser originada das seguintes fontes mais comuns: aditivos, agregados contaminados por sais, água de amassamento, soluções de sais degelantes, água do mar, atmosfera marinha (maresia), processos industriais (HELENE, 1986; ANDRADE, 1992; MEHTA e MONTEIRO, 1994; FIGUEIREDO e HELENE, 1994).

Segundo Figueiredo e Helene (1994) e Ollivier (1998), os íons cloreto podem se apresentar das seguintes formas no interior do concreto:

- a) quimicamente combinados na forma de cloroaluminatos;
- b) fisicamente adsorvidos na superfície dos poros de hidratação;
- c) livres na solução dos poros do concreto.

Segundo Andrade (1992), os íons cloreto atacam o aço do concreto armado, atacando a capa passivante de forma pontual, corrosão essa conhecida com o nome de pite. Essa corrosão pode avançar e provocar a ruptura pontual da barra de aço.

Os cloretos, mesmo em meio alcalino, podem causar corrosão da armadura, pois destroem a capa passivada do aço, sendo que, para maiores teores de cloreto, a probabilidade de despassivação aumenta (HELENE, 1993).

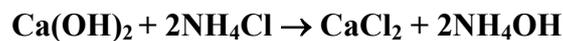
Steopoe (1935 apud BICZÓK, 1972) descreve que o cloreto de sódio, contido no concreto, reage, formando cloreto de cálcio que é dissolvido.

O cloreto de sódio aumenta também a solubilidade do Ca(OH)_2 em 40%, visto que os íons **Ca** podem ser substituídos pelos íons **Na** na combinação Ca(OH)_2 . A superfície carbonatada não é atacada pelo cloreto de sódio, que contém um teor baixo de Ca(OH)_2 e um teor alto de CaCO_3 , visto que os silicatos e aluminatos não são atacados pelo **NaCl** (BICZÓK, 1972).

Segundo Kind (1954 apud BICZÓK, 1972), quando o concreto, executado com cimento Portland comum, fica exposto a soluções que contêm sulfatos, MgCl_2 e pequenas quantidades de CaCl_2 , aumenta sua resistência ao ataque dos sulfatos, pois há uma diminuição

de Ca(OH)_2 . Assim como, estando o concreto em contato com uma solução contendo sulfato, CaCl_2 e uma pequena quantidade de MgCl_2 , também aumenta sua resistência ao ataque dos sulfatos, porque há uma formação pequena de sulfoaluminato de cálcio, devido à transformação de aluminatos hidratados em cloroaluminatos. Nesse caso, os íons cloreto também ficam combinados e não atacam o aço.

O cloreto de potássio atua de forma semelhante ao cloreto de sódio. O cloreto de alumínio e o cloreto de magnésio, assim como os cloretos ligados aos íons NH_4 , **Fe**, **Cu**, reagem com a cal formando compostos solúveis na água, pois são cátions de base mais fraca que o cálcio, conforme reação demonstrada abaixo (BICZÓK, 1972):



Por outro lado, o cloreto de cálcio provoca a oxidação do aço, pois atua como eletrólito, mesmo para pequenas quantidades colocadas no concreto, ou que penetra após seu endurecimento (BICZÓK, 1972).

Neville (1997) comenta que, quando o concreto conserva-se submerso, os cloretos penetram até profundidades consideráveis; mas não haverá corrosão, a menos que haja oxigênio presente no cátodo.

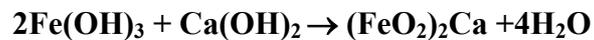
O efeito higroscópico do concreto é elevado com a presença dos íons cloreto, aumentando assim a umidade dos poros da pasta de cimento, podendo crescer a intensidade de ataque desses íons a níveis inaceitáveis, devido à diminuição da resistividade; sendo esses efeitos analisados, em ensaios com corpos-de-prova de argamassa, por López e Gonzáles (1993) que estudaram valores de saturação críticos. No caso de grandes quantidades de cloretos, o concreto tende a conservar mais umidade, diminuindo a resistividade do concreto (abaixo de $50 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$), fato que aumenta o risco de corrosão do aço (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Helene (1981) descreve as seguintes reações de ataque ao aço:



Observa-se, na reação, que o produto final da corrosão não consome cloreto, podendo esse processo acarretar grandes agressões ao aço, mesmo para baixos teores de íons cloreto.

Alves (1982) salienta ainda que, quando há formação de hidróxido férrico, esse, na presença da cal hidratada, forma um pó branco estável denominado ferrito de cálcio:



2.2.1 Fatores que influenciam a penetração de íons cloreto

No modelo de Tuutti (1980), o tempo que os cloretos levam para alcançar a armadura do concreto, corresponde ao denominado tempo de iniciação e depende dos seguintes fatores, conforme Andrade (1992), Figueiredo e Helene (1994):

- a) **concentração de cloretos no meio externo;**
- b) natureza do cátion que acompanha o cloreto;
- c) se há presença de outro ânion como o sulfato;
- d) processo de execução;
- e) grau de carbonatação;
- f) qualidade do concreto: tipo de cimento, proporção de aluminato tricálcico, relação água/cimento e tipo de cura;
- g) temperatura;
- h) abertura e quantidade das fissuras.

2.2.1.1 Concentração de cloretos

Ensaio com cloreto de cálcio mostram que, para iniciar a corrosão, é necessário que o teor de cloreto de cálcio supere certos valores. Segundo Monfore et al. (1960 apud STEINOUR, 1964), isso ocorre quando temos apenas 0,25% de cloreto de cálcio em relação

ao peso de cimento. Helene (1993) cita teores de 0,3%, e Andrade (1992), 0,4%, ambos de Cl^- livres em relação ao peso de cimento. O que permite esse baixo teor de cloreto é o fato do íon OH^- ser um excelente inibidor, retardando a reação química que forma a ferrugem, conforme Bäumel (1959 apud BICZÓK, 1972) e Monfore et al. (s.d. apud BICZÓK, 1972).

Os íons cloreto que apresentam risco são os dissolvidos na fase aquosa, após a cura do concreto. Os íons combinados que formam cloroaluminatos, segundo Andrade (1992), Prezze e Monteiro (1996), como, por exemplo, $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, conforme Mehta (1993), não são agressivos à armadura.

As normas apresentam, na maioria, como limites, os teores totais de íons cloreto, pois os íons combinados podem voltar a dissolver devido a ataque de agentes agressivos, como CO_2 e SO_4^{2-} (ANDRADE, 1992; MEHTA, 1993; BAUER e HELENE, 1996).

Segundo Mehta (1993), os cloroaluminatos tornam-se instáveis em meio com baixo valor de pH. Quanto maior o teor de Cl^- adicionados ao concreto, menor o percentual de Cl^- fixados, embora tenha um aumento da quantidade fixada (ARYA, BUENFELD e NEWMAN, 1990; RASHEEDUZZAFAR, 1992).

2.2.1.2 Relação Cl^-/OH^-

Mesmo em pH acima de 11,5, o filme protetor do aço pode ser destruído para uma relação superior a 0,6, pois esse se torna instável ou permeável (HAUSMANN, 1967; MEHTA e MONTEIRO, 1994). Já Goñi e Andrade (1990), realizando ensaios com soluções alcalinas, concluíram que valores críticos de Cl^-/OH^- estariam entre 0,25 e 0,8. Ensaios de Lambert, Page e Vassie (1991), em corpos-de-prova e uma fonte externa de cloretos, mostraram, para a despassivação da armadura, valores iguais a 3 para relação Cl^-/OH^- .

Os óxidos e os hidróxidos, que formam a ferrugem, possuem volumes de 3 a 10 vezes maiores que o aço, exercendo, devido a essa expansão, tensões que podem ultrapassar a 15 MPa (CÁNOVAS, 1988).

2.2.1.3 Grau de carbonatação

A instabilidade dos cloroaluminatos é dependente do pH. A solubilidade do sal de Friedel aumenta com o grau de carbonatação dos corpos-de-prova; conseqüentemente, quanto mais carbonatados os corpos-de-prova, mais íons cloreto livres terão (SURYAVANSHI e SWAMY, 1996).

Bakker (1988) salienta que o ataque por cloreto, combinado com ataque por carbonatação, aumenta a intensidade da ação corrosiva do aço, sendo essa a causa de muitos problemas de corrosão severa em elementos de concreto.

De acordo com Dhir, Jones e Mccarthy (1993), em concretos parcialmente carbonatados, o ingresso de cloretos pode ser acelerado até 100%. Observaram, também, que as intensidades de corrosão, devido ao ataque de cloretos, foram aumentadas de duas a três vezes no concreto carbonatado.

Jones, Mccarthy e Dhir (1994) estudaram, através do ingresso de cloretos, o tempo de início de corrosão e observaram que este tempo é reduzido quando os corpos-de-prova já estão, parcialmente, carbonatados. Observou-se que este tempo foi reduzido 3 vezes para cimento Portland comum e 4 vezes para cimento com adição de cinza volante.

Monteiro (1996) observou, pesquisando alguns cimentos quanto à capacidade de proteção em relação à corrosão, que o ingresso de íons cloreto foi acelerado quando os corpos-de-prova já estavam carbonatados.

Carbonatação pode liberar Cl^- do concreto endurecido, elevando o teor desses íons livres, atingindo uma concentração que provoca um intenso ataque ao aço (TUUTTI, 1982).

2.2.1.4 Tipo de cimento

Concreto, executado com cimento Portland comum, protege mais o aço que concreto com cimento sulforresistente (baixo teor de aluminato tricálcico) (ROBERTS, 1962; PAGE, SHORT e HOLDEN, 1986; BAKKER, 1988). Cimento com adição de escória ou

cinza volante é mais resistente ao ataque de cloretos que o cimento Portland comum (PAGE, SHORT e HOLDEN, 1986; BAKKER, 1988), assim como concretos com sílica ativa e cinza de casca de arroz (ISAIA e HELENE, 1993). Esse fato se deve ao refinamento dos poros com o uso dessas adições.

A composição química do cimento tem grande influência na penetração de cloretos, já que o C_3A e o C_4AF se combinam com os cloretos para formar os cloroaluminatos. Essa reação diminui o fluxo de penetração de cloretos devido à redução da concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto (PAGE, SHORT e HOLDEN, 1986). De acordo com Rasheeduzzafar et al. (1990), quanto mais C_3A contiver o cimento, mais tempo levará a corrosão das armaduras para se iniciar, devido à sua influência na fixação de cloretos.

Os cimentos com adições de escória e cinza de carvão podem fixar respectivamente, 85% e 57% mais Cl^- que o cimento Portland comum (ARYA, BUENFELD e NEWMAN, 1990).

A resistência do concreto, executado com cimento com adição de cinza volante, frente à penetração de íons cloreto, deve-se à diminuição da difusibilidade e aumento da capacidade de não deixar esses íons livres (THOMAS e MATTHEWS, 1992; HELENE, 1993; FIGUEIREDO e HELENE, 1994).

2.2.1.5 Relação água/cimento

A relação a/c contribui para obtenção de um concreto mais denso (FIGUEIREDO e HELENE, 1994).

A quantidade de cimento tem pouca influência sobre o ataque de íons cloreto sobre o concreto, sendo a relação a/c o fator mais importante (PFEIFER, LANDGREN e PERENCHIN, 1986; MANGAT e MOLLOY, 1992).

Monteiro (1996), pesquisando três tipos de cimentos nacionais, verificou que a redução da relação água/cimento melhorou o desempenho dos cimentos em relação à corrosão de armaduras por íons cloreto, aumentando significativamente a sua fase de iniciação.

2.2.1.6 Compactação e cura

Collepari, Marcialis e Turriziani (1972) verificaram que os concretos mais bem compactados têm o coeficiente de difusão de cloreto inferior àqueles não-compactados.

Jaegermann (1990) pesquisou a penetração de cloretos e a profundidade de penetração nos corpos-de-prova, depois de um ano de exposição no clima do Mar Mediterrâneo. Ele observou, claramente, a influência do período de cura na penetração de cloretos, depois de um ano de exposição. Porém, depois de 3 anos de exposição, o período de cura não mostrou ter nenhuma influência significativa na profundidade de penetração de cloretos.

Kayyali e Haque (1988), estudando argamassas com ou sem adição de cinza volante, observaram que, prolongando o período de cura, melhorou a capacidade de retenção de cloretos para a argamassa sem adição de cinza volante.

Cabrera (2000), pesquisando a corrosão em corpos-de-prova de concreto com sílica ativa, expostos a diferentes tipos de cura, notou que a cura a 20°C e a 100% de umidade é a que apresenta maior resistência ao ingresso de íons cloreto.

2.2.1.7 Umidade

Concreto de poros saturados com umidade tem resistividade pequena, mas o acesso de oxigênio fica dificultado, diminuindo a intensidade de ataque ao aço (proteção catódica). Baixa umidade nos poros, a resistividade do concreto é alta, sendo pequeno o ataque ao aço. Poros com grande umidade, mas sem saturação, a resistividade é baixa, e o acesso de oxigênio é facilitado, sendo a velocidade de corrosão do aço máxima (ANDRADE, 1992; FIGUEIREDO e HELENE, 1994).

A corrosão aumenta com o acréscimo da umidade relativa. Atinge um valor máximo quando a umidade relativa está em 95%, e reduz a um nível mais baixo perto da saturação (TUUTTI, 1982). Ainda contribui, para intensificar a corrosão, o fato do concreto absorver, com facilidade, a umidade do meio e perder, com menos facilidade, esta umidade (FIGUEIREDO e HELENE, 1994).

2.2.1.8 Temperatura

Sobre a influência da temperatura na penetração de cloretos, segundo Goñi e Andrade (1990), as temperaturas mais elevadas aumentam a velocidade de transporte dos íons no concreto, enquanto Helene (1986) afirma que a diminuição acentuada da temperatura pode causar condensação no interior do concreto, aumentando a umidade nos poros.

Tuutti (1982) examinou os efeitos da temperatura a -20°C , e os resultados sugerem que a velocidade de corrosão é reduzida 10 vezes a cada redução de temperatura de 20 graus abaixo de 0°C .

2.2.1.9 Cobrimento

A espessura do cobrimento da armadura deve ser limitada não só no sentido do cobrimento mínimo, como também de um cobrimento máximo (PFEIFER, LANDGREN e PERENCHIN, 1986). Cobrimento excessivo é antieconômico, e corre-se o risco de fissuras. Para espessuras acima de 6 cm, aumenta a expectativa desse problema surgir. Na garantia de um cobrimento mínimo e efetivo, é importante uma execução controlada do concreto, garantindo lançamento, adensamento e cura adequados (SILVA, 1995).

2.2.1.10 Fissuras

Formam-se regiões anódicas no interior das fissuras e regiões catódicas maiores junto a elas, além de permitir a penetração de elementos agressivos com maior facilidade (ANDRADE, 1992).

A intensidade do ataque depende das dimensões da fissura, da qualidade do concreto e da relação entre a área da região catódica e a área da região anódica (FIGUEIREDO e HELENE, 1994).

Vigas são mais suscetíveis à deterioração que paredes de concreto, ambos em ambiente marítimo. Isso é explicado pelas fissuras que surgem mais em peças que possuem maiores esforços de tração, segundo Bury e Domone (1974), ao observarem estruturas marítimas.

2.2.1.11 Grau de saturação

Guimarães (2000), pesquisando, em corpos-de-prova, o coeficiente de difusão efetiva de íons cloreto em função do grau de saturação, que variou de 57% a 98%, observou um aumento de $0,18 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ a $2,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente, evidenciando, assim, uma maior penetração de íons cloreto com o aumento do grau de saturação.

Em estudos sobre a difusividade em meios não saturados, Almenar (2000) e Nielsen e Geiker (2003 apud MEIRA, 2004a) demonstraram a acentuada queda no coeficiente de difusão com a redução do grau de saturação. No primeiro caso, as medidas demonstraram uma redução no coeficiente de difusão de $9,92 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ em concretos com grau de saturação ao redor de 70%, para $0,21 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ em concretos com grau de saturação de 33%. No segundo caso, o coeficiente de difusão decresceu de $12,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para $2,7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, variando-se as condições ambientais de saturado para 66% de grau de saturação.

2.2.1.12 Tipo de cátion

Conforme Kröpp et al. (1995), o tipo de cátion, envolvido no processo de difusão, também é um fator que implica na taxa de penetração de cloretos, já que a mencionada taxa depende da quantidade de cloretos que são fixados, e este processo, por sua vez, depende do tipo do sal que contém os cloretos.

Existe um acréscimo na quantidade de cloretos combinados na presença de **KCl**, **CaCl₂**, **MgCl₂**, respectivamente, em comparação com a presença de **NaCl** (BYFORS, 1990).

Andrade e Page (1986) analisaram a consequência de uma mesma quantidade de cloretos originados do **NaCl** e **CaCl₂**, com relação à corrosão da armadura, obtendo a conclusão de que os corpos-de-prova que continham **CaCl₂** foram mais afetados pela corrosão, apesar de conter menor quantidade de cloretos livres e menor relação **Cl/OH**. Goñi, Moragues e Andrade (1989) descrevem que esta maior agressividade do **CaCl₂** pode estar relacionada à redução do pH, resultante nesta circunstância.

A Figura 2.5 mostra a variação do conteúdo crítico de íons cloreto em função da qualidade do concreto e da umidade relativa do ambiente, levando em conta se o concreto está ou não carbonatado (CEB-FIP, Bulletin 183, 1992). O ponto 0,4% x U.R. elevada e variável é salientado, sendo o valor médio, normalmente, aceito em relação à massa de cimento, que equivale a 0,05% a 0,1% em relação à massa de concreto.

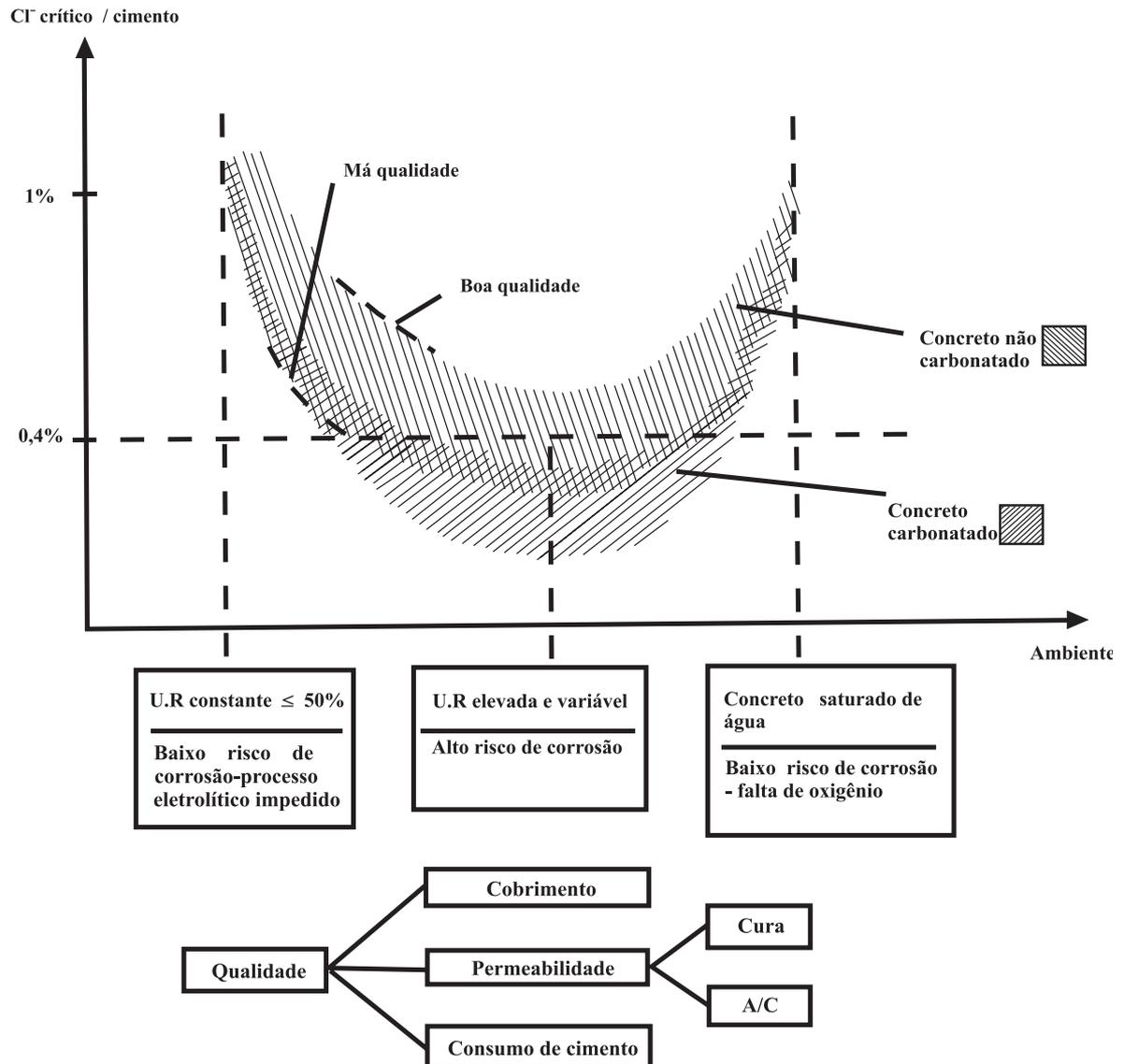


Figura 2.5 – Esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade do ambiente (CEB-FIP, Bulletin 183, 1992).

2.3 VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Como já foi visto, a contaminação por íons cloreto provoca a corrosão das armaduras em estruturas de concreto e, conseqüentemente, diminui a sua vida útil.

O CEB-FIP, Bulletin 213/214 (1993) salienta uma vida útil, considerando procedimentos de manutenção previstos na fase de projeto. Nota-se ainda a tendência atual de uma vida útil de 100 anos ou mais para grandes estruturas. Considera a diferença de vida útil

entre os diversos elementos de uma estrutura, recomendando um projeto de forma a obter-se o menor custo possível em reparos e manutenção.

A ABNT-NBR 6118 (2003) apresenta as seguintes considerações sobre vida útil:

Por vida útil de projeto, entende-se o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que sejam atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, conforme os dois próximos parágrafos, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

O conjunto de projetos, relativos a uma obra, deve orientar-se sob uma estratégia explícita, que facilite procedimentos de inspeção e manutenção preventiva da construção.

Dependendo do porte da construção e da agressividade do meio e de posse das informações dos projetos, dos materiais e produtos utilizados e da execução da obra, deve ser produzido, por profissional habilitado, devidamente contratado pelo contratante, um manual de utilização, inspeção e manutenção. Esse manual deve especificar de forma clara e sucinta, os requisitos básicos para a utilização e a manutenção preventiva, necessárias para garantir a vida útil prevista para a estrutura.

O conceito de vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Dessa forma, determinadas partes das estruturas podem merecer consideração especial com valor de vida útil, diferente do todo.

A durabilidade das estruturas de concreto requer cooperação e esforços, coordenados com todos os envolvidos nos processos de projeto, construção e utilização.

Como modelo de durabilidade, será adotado o apresentado por Tuutti (1980), conforme a Figura 2.6.

Tuutti (1980) descreve que:

- a) **iniciação** é o período em que os agentes agressivos penetram no concreto até atingir a barra de aço e provocar sua despassivação;

- b) **propagação** é o período em que os agentes agressivos provocam uma corrosão aceitável;
- c) **vida útil ou tempo antes de reparo** é a soma dos períodos de iniciação e propagação.

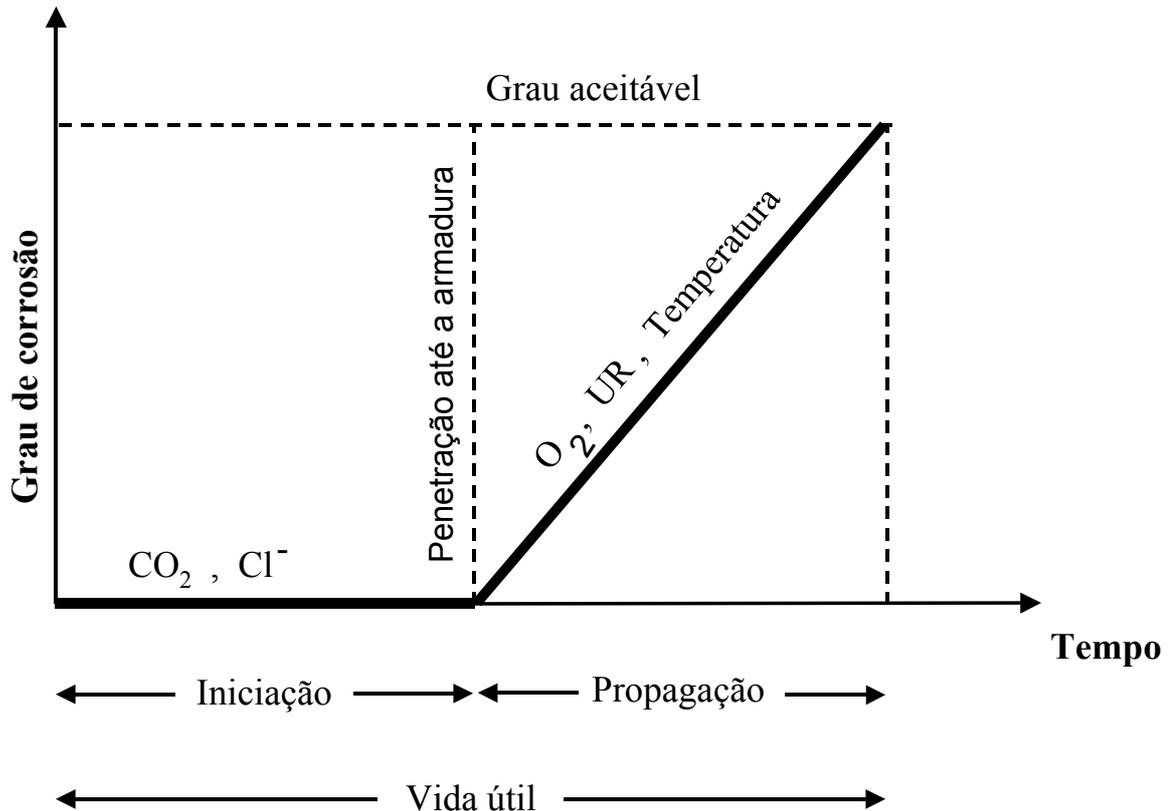


Figura 2.6 – Modelo de vida útil (TUUTTI, 1980).

Helene (1994) conceitua vida útil das estruturas de concreto conforme a Figura 2.7, onde o período de iniciação é o tempo que leva até a despassivação da armadura e corresponde à **vida útil de projeto**. Nesse conceito de vida útil, também é introduzida a idéia de **vida útil de serviço**, sendo que os requisitos para sua definição variam com a necessidade da construção. No caso de uma edificação não poder ter sua fachada afetada na estética, o surgimento de manchas pode indicar a necessidade de uma intervenção e, assim, estabelecer a vida útil. Para outras estruturas, os indicadores podem ser fissuras, destacamentos ou a perda de resistência. A **vida útil residual** é aquela estabelecida a partir de uma vistoria da estrutura,

portanto já com um tempo de serviço, e também é determinada de maneira similar à vida útil de projeto, ou seja, conforme a necessidade da construção.

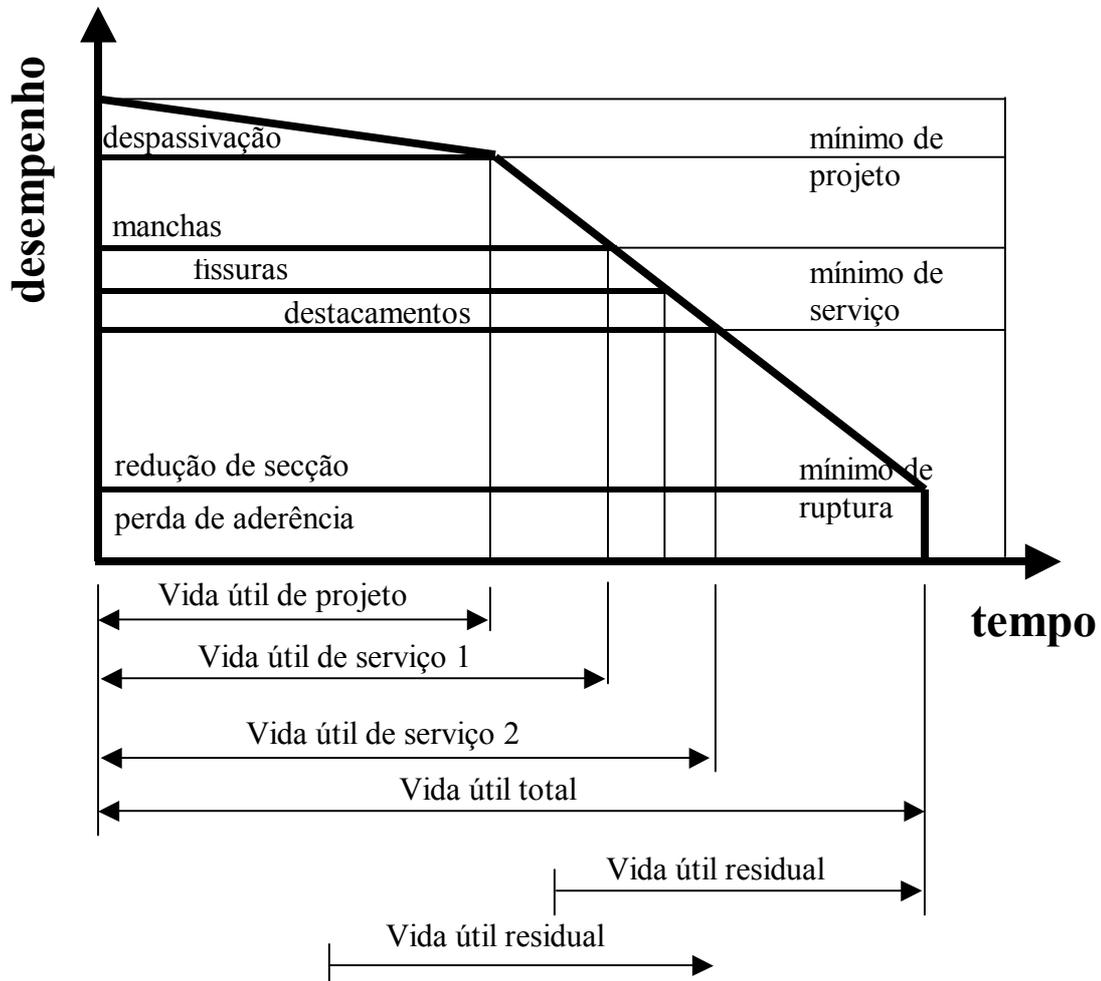


Figura 2.7 – Vida útil tendo por base o fenômeno da corrosão das armaduras em estruturas de concreto (HELENE, 1994).

2.3.1 Exigências de Normas

Para a durabilidade do concreto armado, algumas características são essenciais, como abertura de fissuras, relação a/c, consumo de cimento, tipo de cimento, resistência à compressão e ao cobrimento da armadura.

Algumas exigências de determinadas normas que visam obter um concreto durável em ambiente marítimo, são citadas a seguir.

2.3.1.1 Fissuras

As fissuras podem ocorrer devido (CEB-FIP, BULLETIN 183, 1992):

- a) a movimentos internos do concreto, como, por exemplo, retração por secagem, expansão ou contração, devido à variação de temperatura e retração plástica ou assentamento plástico. A retração plástica é causada pelas tensões capilares, sendo uma propriedade do concreto fresco. Essa ocorre nas primeiras 2-4 horas, após a mistura. No assentamento plástico, devido a forças gravitacionais, partículas do concreto assentam e deslocam água para a superfície, devido ao acréscimo de volume, o concreto assenta-se na forma. Se o assentamento do concreto é restringido pela armadura, fissuras podem ocorrer, seguindo a direção das barras dos estribos ou das armaduras longitudinais;
- b) à expansão do material no interior do concreto, como, por exemplo, a corrosão da barra de aço;
- c) a condições impostas externamente, como, por exemplo, carregamentos ou deformações devido a recalque diferencial das fundações.

Pode-se formar, ainda no concreto, microfissuras atribuídas à não-linearidade do concreto (ACI 224R, 2001).

Fissuras, causadas por movimentos internos do concreto e expansão de material no interior do elemento estrutural, podem ter as seguintes influências:

- a) detalhes construtivos: abruptas mudanças nas dimensões dos elementos de concreto podem favorecer o assentamento plástico, provocando fissuras, ou favorecer a concentração de tensões. A máxima diferença entre a temperatura de início do endurecimento do concreto e a temperatura de uso da estrutura influencia na formação de fissuras. Fissuras por retração plástica ocorrem mais em lajes, e fissuras por assentamento plástico podem ocorrer em elementos

profundos, como, por exemplo, pilares e vigas com maiores alturas (CEB-FIP, BULLETIN 183, 1992). Elementos menores podem sofrer maior retração devido à maior facilidade de secagem (retração por secagem) (ACI 224R, 2001);

b) composição do concreto: o tipo de cimento, tipo e granulometria do agregado, o uso de plastificante ou superplastificante podem evitar o deslocamento de água, evitando fissuras plásticas por assentamento. Por outro lado, aumenta-se o risco de fissuras plásticas por retração, já que a água deslocada repõe a água perdida na evaporação, evitando as tensões capilares (CEB-FIP, BULLETIN 183, 1992). O agregado, no concreto, restringe o grande potencial da pasta de sofrer retração por secagem (ACI 224R, 2001);

c) execução e cura: a qualidade da mão-de-obra e o processo de execução são importantes, pois influenciam na homogeneidade e uniformidade de lançamento do concreto e no posicionamento da armadura. O cobrimento da armadura e a qualidade dessa camada externa do concreto influenciam na resistência à penetração de agentes agressivos, que podem iniciar a corrosão do aço. Essa corrosão forma produtos expansivos que provocam fissuras no concreto (CEB-FIP, BULLETIN 183, 1992).

As fissuras, devido a condições impostas externamente, podem ter suas dimensões previstas na fase de dimensionamento da estrutura.

Algumas recomendações de normas para abertura máxima de fissura em concreto são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Abertura máxima de fissuras segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo (mm).

Norma	Concreto armado	Concreto protendido	Comentários
ABNT-NBR 6118 (2003)	0,3	0,2	--
ACI Committee 224/224R (2001)	0,15	--	Peças tracionadas de concreto armado sujeitas a ciclos de molhagem e secagem ou aspersão de água do mar
CEB-FIP, BULLETIN 213/214 (1993)	0,1		Onde há cargas fletoras (0,2 mm para outros casos)
CPH-EHE (1999)	0,1	Descompressão	Em zona de maré (0,2 mm para demais casos)

Helene (1993) demonstra que especificações de aberturas de fissuras menores nem sempre significam maior segurança. Deve-se analisar também as fórmulas utilizadas nas diversas normas. Por exemplo: a ABNT-NBR 6118 indica valores maiores de aberturas máximas de fissuras em relação a algumas normas estrangeiras, mas a formulação, para calcular essas aberturas, leva a valores maiores que as formulações de normas estrangeiras.

2.3.1.2 Relação água/cimento

A relação a/c é uma das mais importantes características do concreto, devido à grande relação com sua resistência mecânica e sua permeabilidade. A Tabela 2.5 mostra alguns valores de relação a/c indicados por normas.

Tabela 2.5 – Relação água/cimento máxima segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.

Norma		Concreto armado	Concreto protendido	Comentários
ABNT-NBR 6118 (2003)	Submersa	0,65	0,60	--
	Aérea	0,55	0,50	
	Respingos de maré	0,45	0,45	
ACI Committee 318/318R (1996)		0,40		--
CEB-FIP, BULLETIN 213/214 (1993)		0,50		Com geada (0,55 quando não há geada)
CPH-EHE (1999)	Submersa	0,50	0,45	Para adições substituir A/C por $A/(C+KF)$, sendo F = consumo de adição e K = coeficiente de eficácia. Cinza volante $K_{máx.} = 0,3$ (0,5 com comprovação). Por segurança, considerar zona de respingo igual à zona de maré
	Aérea	0,50	0,50	
	Maré	0,45	0,45	

Algumas normas não consideram parte ou o total da pozolana, sendo que outras normas não fazem restrições, dificultando a comparação desse parâmetro entre as normas em vigor.

2.3.1.3 Consumo de cimento

O consumo de cimento indicado por algumas normas é mostrado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Consumo mínimo de cimento (Kg/m^3) segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.

Norma		Consumo mínimo (Kg/m^3)	Comentários
ABNT-NBR (2003)	6118	--	Não apresenta restrições
CEB-FIP, BULLETIN 213/214 (1993)		300	Para adições, substituir C por $(C + \alpha f)$, sendo f = consumo de adição e α = coeficiente de eficácia. Cinza volante - $\alpha_{\text{máx.}} = 0,5$
CPH-EHE (1999)	Submersa	325	Para adições, substituir C por $(C + KF)$, sendo F = consumo de adição e K = coeficiente de eficácia. Cinza volante $K_{\text{máx.}} = 0,3$ (0,5 com comprovação) e consumo mínimo de $250 \text{ Kg}/\text{m}^3$ para concreto armado e $275 \text{ Kg}/\text{m}^3$ para concreto protendido. Por segurança, considerar zona de respingo igual à zona de maré. Consumo máximo de $400 \text{ Kg}/\text{m}^3$
	Aérea	300	
	Maré	350	

Entre as características do concreto, aqui apresentadas, o consumo de cimento é a característica de menor influência, uma vez que é a relação a/c que apresenta grande relação com a porosidade do concreto.

2.3.1.4 Tipo de cimento

A Tabela 2.7 apresenta diversos tipos de cimento recomendados por norma.

Tabela 2.7 – Tipo de cimento recomendado segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.

Norma	Tipo de cimento	Comentários
ABNT-NBR 6118 (2003)	CP III (alto forno)* CP IV (pozolânico)**	e adições de microssílica e cinza de casca de arroz * NBR 5735 (1991) ** NBR 5736 (1991)
ACI Committee 318/318R (1996)	ASTM Tipo II	$C_3A < 8\%$
CEB-FIP, BULLETIN 213/214 (1993)	CE III (alto forno) CE IV (pozolânico)	--

O uso de cimento mais adequado é importante, pois pode corresponder a uma economia na execução de concreto armado, quando se estabelece uma vida útil de projeto. Para ambientes marítimos, alguns concretos beneficiam a manutenção do meio ambiente.

Como exemplo, pode-se mencionar o cimento Portland pozolânico, que aproveita a cinza volante, proveniente de resíduo industrial, e atenua a quantidade de utilização de clínquer. Desta forma, utiliza-se um material que, normalmente, polui o ambiente e reduz-se a extração de minerais, colaborando para um emprego mais racional de suas reservas.

2.3.1.5 Resistência à compressão

As resistências mínimas, recomendadas por algumas normas, são apresentadas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Resistência à compressão mínima (MPa) segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.

Norma		Concreto armado	Concreto protendido	Comentários
ABNT-NBR 6118 (2003)	Submersa	20	25	Os revisores reconhecem que resistência não é o parâmetro fundamental da durabilidade, porém, indiretamente, procuram assegurar vida útil através de uma linguagem bem conhecida no meio técnico
	Aérea	30	35	
	Respingos de maré	40	40	
ACI Committee 318/318R (1996)		50		--
CPH-EHE (1999)	Submersa	30	35	Por segurança, considerar zona de respingo igual à zona de maré
	Aérea	30		
	Maré	35		

A resistência à compressão é uma característica importante para a durabilidade do concreto armado, já que esta tem uma correlação com a permeabilidade do concreto.

2.3.1.6 Cobrimento da armadura

Os cobrimentos de normas e sugestões são apresentadas na Tabela 2.9, onde:

- a) **cobrimento mínimo** = menor valor que deve ser respeitado ao longo de todo o elemento considerado e que se constitui num critério de aceitação;
- b) **cobrimento nominal** = **cobrimento mínimo** acrescido da tolerância de execução (possível erro de execução), garantindo assim o **cobrimento mínimo**.

Tabela 2.9 – Cobrimento (mm) segundo diferentes normas para concreto em ambiente marítimo.

Norma		Cobrimento (mm)	Comentários
ABNT-NBR 6118 (2003)	Submersa	25	Valor nominal para vigas e pilares.
	Aérea	40	Diminuir 5 mm para lajes.
	Respingos de maré	50	Aumentar 5 mm para concreto protendido (mesmo valor para laje, viga e pilar)
ACI Committee 318/318R (1996)		50	Valor nominal
CEB-FIP, BULLETIN 213/214 (1993)		40	Valor mínimo. Acrescentar 5 mm a 10 mm para obter valor nominal
CPH-EHE (1999)	Submersa	35	Valor mínimo para concretagem “in situ”. Para pré-fabricados e lâminas, diminuir 5 mm. Para $f_{ck} \geq 40$ MPa, diminuir 5 mm. Para valor nominal, acrescentar 0 mm para pré-fabricados com controle intenso; 5 mm para concretagem “in situ” com controle intenso e 10 mm para outros casos. Por segurança, considerar zona de respingo igual à zona de maré
	Aérea	35	
	Maré	40	

A vida útil de projeto de uma estrutura é determinada pela agressividade do ambiente, pelo cobrimento da armadura juntamente com a permeabilidade do concreto, que depende das características de execução do concreto (relação a/c, resistência à compressão, tipo de cimento, cura, etc).

2.3.2 Modelos deterministas de transporte de massa no concreto

Os modelos deterministas, para o período de iniciação, são baseados nos mecanismos de transporte de gases, massa e íons através da rede de poros do concreto. A maior parte dos estudos presentes na literatura dedica-se ao transporte de cloretos por difusão. Neste sentido, os modelos mais conhecidos são o modelo geral de difusão, equações (2.1) e (2.2) e o modelo da raiz quadrada do tempo, equação (2.3), descritos a seguir.

As equações matemáticas que expressam o fenômeno são dadas pelas leis da difusão formuladas por Fick. O coeficiente de difusão efetivo, D_{ef} , das substâncias que penetram nos poros do concreto, é calculado através destas equações:

1.^a Lei - Difusão em estado estacionário. Considerando um fluxo constante em relação ao tempo em torno da seção por onde penetra a substância.

$$\mathbf{J} = - \mathbf{D}_{ef} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.1)$$

onde:

\mathbf{J} - fluxo de massa;

\mathbf{D}_{ef} - coeficiente de difusão efetivo;

$\partial C / \partial x$ - gradiente de concentração;

C - concentração de átomos na solução;

x - profundidade considerada.

Logo, o coeficiente de difusão, D_{ef} , pode ser expresso em cm^2/s , conforme análise das unidades mostrada abaixo:

$$\frac{\text{átomos}}{cm^2 \cdot s} = \frac{(cm^2 / s)(\text{átomos} / cm^3)}{cm}$$

2.^a Lei - Difusão em fluxo variável. Considerando um fluxo variável em relação ao tempo e à profundidade de penetração.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \mathbf{D}_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

onde:

t - tempo considerado.

O sinal negativo nas equações (2.1) e (2.2) indica que o fluxo de átomos ocorre no sentido em que diminui o gradiente de concentração.

A equação (2.3) é um modelo muito utilizado para prever o avanço da frente de ataque de um agente agressivo no interior do concreto, como, por exemplo, o CO_2 e Cl^- (ANDRADE, 1992).

$$x = K\sqrt{t} \quad (2.3)$$

onde:

x = profundidade;

K = constante característica de cada material e ambiente;

t = tempo.

A constante K depende, principalmente, da concentração dos íons no meio externo, qualidade do concreto, temperatura e abertura e quantidade de fissuras (ANDRADE, 1992).

Nota-se que a formulação pela lei de Fick, Helene (1994), é função de $t^{1/2}$, sendo que esse pesquisador apresenta um modelo para o fator K . Helene (1994) sugere, ainda, o ábaco da Figura 2.8 para o dimensionamento da espessura de concreto de cobrimento da armadura, para ambiente marítimo, em zona de respingo.

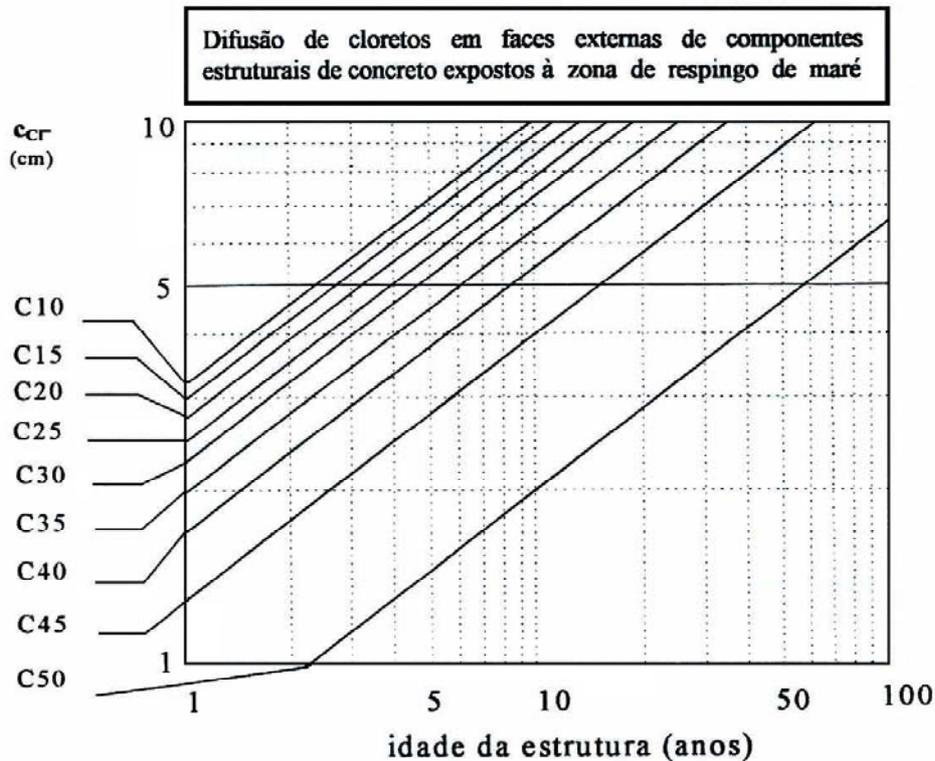


Figura 2.8 – Ábaco para obtenção da espessura de cobrimento às armaduras (C_{Cl}) em função do ambiente, da classe de f_{ck} do concreto (C10 a C50) e da vida útil desejada (1 a 100 anos). Caso sejam utilizadas adições de, pelo menos, 8% de microsilica ou empregados cimentos Portland com teor de $C_3A \geq 12\%$, as espessuras mínimas características de cobrimento à armadura podem ser reduzidas em, pelo menos, 20% (HELENE, 1994).

Prezzi e Monteiro (1996) mostram que o coeficiente de difusão varia em função da porosidade do concreto, portanto com a profundidade em relação à superfície livre do elemento de concreto armado. Logo, deve-se considerar um perfil no qual o coeficiente de difusão varia. Salienta a pesquisa que o fluxo de cloretos é controlado pela concentração desses íons livres nos poros do concreto.

Temperaturas maiores também aumentam o teor de cloretos livres na água de poro, sendo esse efeito maior em concreto executado com cimento, contendo alto teor de C_3A , conforme Roberts (1962), Hussain e Rasheeduzzafar (1993), e baixa concentração de cloretos adicionados durante a mistura (HUSSAIN e RASHEEDUZZAFAR, 1993). Hussain e Rasheeduzzafar (1993) ainda observaram uma diminuição no teor de OH^- com o aumento da temperatura, provocando um aumento da relação Cl^-/OH^- ; conseqüentemente, maior risco de

corrosão. No caso de estruturas expostas ao sol, a temperatura superficial pode ser, significativamente, maior que a temperatura ambiente (NEVILLE, 1995).

Devido a esses vários fatores, segundo Neville (1995), o teor de cloretos fixados na pasta de concreto pode variar de 80% até bem abaixo de 50% em relação aos cloretos totais.

CAPÍTULO 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Para se fazer um levantamento da concentração de cloretos em zona de atmosfera marinha, podem ser seguidas as recomendações da ABNT-NBR 6211 (2001) - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida ou da ASTM G 140 (2002) - *Standard test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method*. Nesta pesquisa, as medições tiveram duração de seis meses, de agosto de 2005 a janeiro de 2006, e foi utilizada a ABNT-NBR 6211 (2001).

3.1.1 Localização e características do ambiente pesquisado

O ambiente pesquisado está na Região Metropolitana da Cidade do Recife. A caracterização do meio ambiente foi feita através de dados bibliográficos e estudos específicos da água do mar e atmosfera do ambiente local.

3.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

3.2.1 Localização do ambiente

A pesquisa do levantamento da concentração de cloretos foi realizada nas proximidades da orla marítima do Bairro de Boa Viagem, uma das regiões mais atraentes para edificações de grande porte, na Cidade do Recife-PE.

3.2.2 Características da água do mar

3.2.2.1 Variação de maré

A Tabela 3.1 mostra o regime de maré mensal medido no Porto do Recife, Estado de Pernambuco, no período de janeiro de 2003 a janeiro de 2006 (MARINHA DO BRASIL, 2006). Cabe salientar que o regime de maré é apresentado a partir do ano de 2003, para se ter um melhor entendimento desse comportamento, com o passar dos anos.

Tabela 3.1 – Maré mínima e máxima mensal no período de jan./2003 a jan./2006, modificado (MARINHA DO BRASIL, 2006).

Média das marés diárias (m)													
	jan.	fev.	mar.	abr.	maio	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.	
2003	mín.	0,45	0,45	0,42	0,43	0,46	0,49	0,51	0,47	0,46	0,45	0,45	0,48
	máx.	2,00	1,98	2,04	2,01	1,99	1,96	1,97	1,92	2,00	1,99	2,00	1,98
2004	mín.	0,49	0,47	0,47	0,45	0,46	0,49	0,47	0,44	0,44	0,47	0,49	0,47
	máx.	1,95	1,99	1,98	1,99	2,00	1,99	2,01	2,01	2,00	1,97	1,97	2,02
2005	mín.	0,49	0,45	0,45	0,46	0,48	0,48	0,48	0,47	0,46	0,47	0,49	0,48
	máx.	1,98	2,02	2,03	2,01	1,99	1,98	1,96	1,97	1,98	1,98	1,97	1,98
2006	mín.	0,45	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	máx.	2,02	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

3.2.2.2 Composição iônica e molecular

A composição iônica e molecular da água do mar do Bairro de Boa Viagem, durante os seis meses de estudo, encontra-se nas Tabelas 3.2 a 3.5.

Tabela 3.2 – Resultados da composição iônica do mar de Boa Viagem.

Data da coleta	31/08/05	29/09/05	31/10/05	30/11/05	29/12/05	31/01/06
Cloretos (mg Cl⁻/L)	18.434,00	18.059,50	20.738,25	20.029,25	21.092,75	20.520,53
Sulfatos (mg SO₄⁻/L)	2.967,04	3.198,84	3.532,36	3.569,72	3.569,72	3.668,88
Cálcio (mg Ca⁺⁺/L)	560,00	640,00	720,00	440,00	480,00	480,96
Magnésio (mg Mg⁺⁺/L)	1.166,40	1.166,40	1.166,40	1.336,50	1.530,90	1.361,36
Sódio (mg Na⁺/L)	9.406,06	9.509,91	10.344,74	10.444,00	11.279,79	11.586,03
Potássio (mg K⁺/L)	534,09	583,81	633,52	623,59	588,70	540,86
Condutividade elétrica (µS)	45.100,00	47.200,00	43.100,00	50.000,00	52.300,00	51.200,00
Salinidade (‰)	35,04	36,82	39,36	39,19	41,14	40,20
pH	7,30	7,50	7,30	7,90	6,90	7,98

Tabela 3.3 – Composição iônica do mar de Boa Viagem (média).

Íons	Média dos meses de estudo
Cloretos (mg Cl⁻/L)	19.812,38
Sulfatos (mg SO₄⁻/L)	3.417,76
Cálcio (mg Ca⁺⁺/L)	553,49
Magnésio (mg Mg⁺⁺/L)	1.287,99
Sódio (mg Na⁺/L)	10.428,42
Potássio (mg K⁺/L)	584,10
Condutividade elétrica (µS)	48.150,00
Salinidade (‰)	38,63
pH	7,48

Tabela 3.4 – Resultados da composição molecular do mar de Boa Viagem.

Data da coleta	31/08/05		29/09/05		31/10/05		30/11/05		29/12/05		31/01/06	
Sal	g/1000mL de água	% em relação ao sal total	g/1000mL de água	% em relação ao sal total	g/1000mL de água	% em relação ao sal total	g/1000mL de água	% em relação ao sal total	g/1000mL de água	% em relação ao sal total	g/1000mL de água	% em relação ao sal total
NaCl	24,93	67,29	25,98	67,92	27,30	66,08	28,58	70,39	29,89	69,54	26,56	65,45
Mg(Cl) ₂	4,16	11,23	3,83	10,01	4,90	11,86	4,19	10,32	4,80	11,17	3,13	7,71
CaSO ₄	0,84	2,27	2,33	6,09	4,87	11,79	3,55	8,74	3,87	9,00	1,78	4,39
CaCl ₂	1,88	5,07	2,78	7,27	2,00	4,84	2,22	5,47	2,42	5,63	1,33	3,28
MgSO ₄	0,56	1,51	1,95	5,10	0,99	2,40	1,33	3,28	1,52	3,54	2,77	6,83
Outros (K ₂ SO ₄ , Ca(HCO ₃) ₂ , etc.)	4,68	12,63	1,38	3,61	1,25	3,03	0,73	1,80	0,48	1,12	5,01	12,34
Sólidos totais	37,05	100	38,25	100	41,31	100	40,60	100	42,98	100	40,58	100

Tabela 3.5 – Composição molecular do mar de Boa Viagem (média).

Sal	Média dos meses de estudo	
	g/1000mL de água	% em relação ao sal total
NaCl	27,21	67,80
Mg(Cl) ₂	4,17	10,39
CaSO ₄	2,87	7,15
CaCl ₂	2,11	5,25
MgSO ₄	1,52	3,78
Outros (K ₂ SO ₄ , Ca(HCO ₃) ₂ , etc.)	2,26	5,63
Sólidos totais	40,13	100,00

3.2.3 Características climatológicas do ambiente

As características climatológicas do ambiente estudado foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET no 3º Distrito de Meteorologia – 3º DISME, localizado em Recife-PE. Esta caracterização será definida através da direção predominante e velocidade do vento, precipitação, umidade relativa, temperatura e insolação, conforme os itens a seguir. Os dados meteorológicos são apresentados a partir do ano de 2003, para se ter um melhor entendimento do comportamento climatológico do ambiente, ao longo dos anos.

3.2.3.1 Direção predominante e velocidade do vento

Tendo em vista que a direção predominante e a velocidade do vento são fatores primordiais, na formação e transporte do aerossol marinho, assunto este já abordado no CAPÍTULO 2, a seguir, nas Tabelas 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9, encontram-se a frequência média por direção e a média mensal da velocidade do vento, no período de janeiro de 2003 a janeiro de 2006.

Tabela 3.6 – Frequência média por direção do vento no ano de 2003 (INMET, 2003-2006).

Vento – Frequência média por direção (2003)									
Mês	Calmo	E	N	NE	NW	S	SE	SW	W
	Freq.								
jan.	--	37,00	7,00	36,00	1,00	3,00	9,00	--	--
fev.	3,00	36,00	--	--	--	6,00	39,00	--	--
mar.	11,00	40,00	1,00	3,00	--	5,00	30,00	2,00	1,00
abr.	7,00	18,00	2,00	5,00	--	18,00	39,00	1,00	--
maio	12,00	23,00	--	10,00	--	12,00	34,00	1,00	1,00
jun.	19,00	11,00	--	--	--	27,00	33,00	--	--
jul.	23,00	7,00	--	--	--	26,00	37,00	--	--
ago.	19,00	16,00	--	--	--	18,00	40,00	--	--
set.	10,00	20,00	--	1,00	--	8,00	50,00	--	--
out.	11,00	34,00	--	--	1,00	2,00	45,00	--	--
nov.	10,00	46,00	4,00	11,00	--	--	18,00	--	--
dez.	9,00	47,00	--	23,00	--	--	11,00	--	--
Resumo	134,00	335,00	14,00	89,00	2,00	125,00	385,00	4,00	2,00

3.2.3.4 Temperatura

A Temperatura tem sua relação direta com o processo de transporte de cloretos no concreto, provocando um aumento da corrosão com o seu acréscimo. Na Tabela 3.12, é mostrada a média mensal compensada da temperatura no período de jan./2003 a jan./2006.

Tabela 3.12 – Média mensal compensada da temperatura no período de jan./2003 a jan./2006 (INMET, 2003-2006).

Temperatura (°C)												
Ano	jan.	fev.	mar.	abr.	maio	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
2003	27,3	26,9	26,6	26,7	26,0	24,3	24,0	24,1	25,1	26,0	26,9	27,3
2004	26,9	26,7	26,9	26,3	25,3	24,4	23,8	23,9	24,9	26,0	26,7	27,1
2005	27,7	27,8	28,2	27,2	25,8	24,9	24,2	24,2	25,2	26,0	26,9	26,7
2006	27,1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

3.2.3.5 Insolação

A insolação é um fator importante para análise da penetração de íons cloreto, em zonas costeiras de clima quente, onde há névoa salina, tendo em vista que a mesma interfere diretamente na umidade relativa, na temperatura e no grau de saturação do concreto. A Tabela 3.13 apresenta o total mensal da insolação, em horas, no período de janeiro de 2003 a janeiro de 2006.

Tabela 3.13 – Total mensal da insolação no período de jan./2003 a jan./2006 (INMET, 2003-2006).

Insolação (h)												
Ano	jan.	fev.	mar.	abr.	maio	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
2003	228,6	175,1	197,9	232,7	212,6	148,1	205,9	234,8	241,0	248,9	265,8	266,7
2004	148,2	185,4	228,6	178,2	166,6	92,6	149,3	225,6	222,8	262,3	255,9	285,5
2005	262,9	214,7	239,3	239,1	161,8	117,0	212,8	181,1	234,3	277,4	270,7	241,1
2006	259,5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

3.2.3.6 Resumo das características climatológicas do ambiente

A Tabela 3.14 apresenta o resumo das características climatológicas do ambiente, no período estudado.

Tabela 3.14 – Resumo dos dados climatológicos no período de estudo, modificado (INMET, 2003-2006).

Mês/ano	Direção predominante do vento		Velocidade do vento (m/s)	Precipitação (mm)	Umidade relativa (%)	Temperatura (°C)	Insolação (h)
	1. ^a	2. ^a					
ago./2005	SE	Calmo	2,0	290,8	84	24,2	181,1
set./2005	SE	E	2,7	45,3	77	25,2	234,3
out./2005	SE	E	2,7	59,7	74	26,0	277,4
nov./2005	E	SE	2,8	8,2	71	26,9	270,7
dez./2005	E	SE	2,7	174,2	73	26,7	241,1
jan./2006	E	SE	2,8	12,3	71	27,1	259,5

3.2.4 Características dos materiais

3.2.4.1 Vela úmida

Segundo a ABNT-NBR 6211 (2001, p. 2), a vela úmida “consiste em um cilindro envolvido com gaze cirúrgica e fixado a um frasco coletor por meio de uma rolha. O cilindro é constituído de material inerte como vidro ou polietileno, de aproximadamente 2,5 cm de diâmetro, sobre o qual é enrolada uma camada dupla de gaze cirúrgica. A área da superfície da gaze exposta à atmosfera deve ser de aproximadamente 100 cm² e cuidadosamente determinada e expressa em metros quadrados (S). O cilindro é introduzido numa rolha de borracha, ficando com uma altura de cerca de 15 cm acima desta. A rolha tem dois tubos de vidro localizados o mais próximo possível do cilindro, pelos quais passam as extremidades da gaze, que devem atingir o fundo do frasco. Estes tubos devem ter formato adequado para que o líquido que desce pela gaze seja drenado, sem perda, para o frasco coletor. O frasco coletor deve ser de vidro, polietileno ou outro material inerte, com aproximadamente 800 mL de capacidade”, conforme Figura 3.1.

“A vela úmida deve ser preparada utilizando luvas de PVC e em ambiente isento de contaminantes. Deve-se também tomar cuidado para que o material utilizado não contamine a solução com cloretos ou com interferentes” (ABNT-NBR 6211, 2001, p. 2).

A ABNT-NBR 6211 (2001, p. 2) descreve ainda, em uma nota, que “não se devem utilizar luvas de látex, pois estas têm teores de cloretos comparáveis aos existentes nas mãos.”

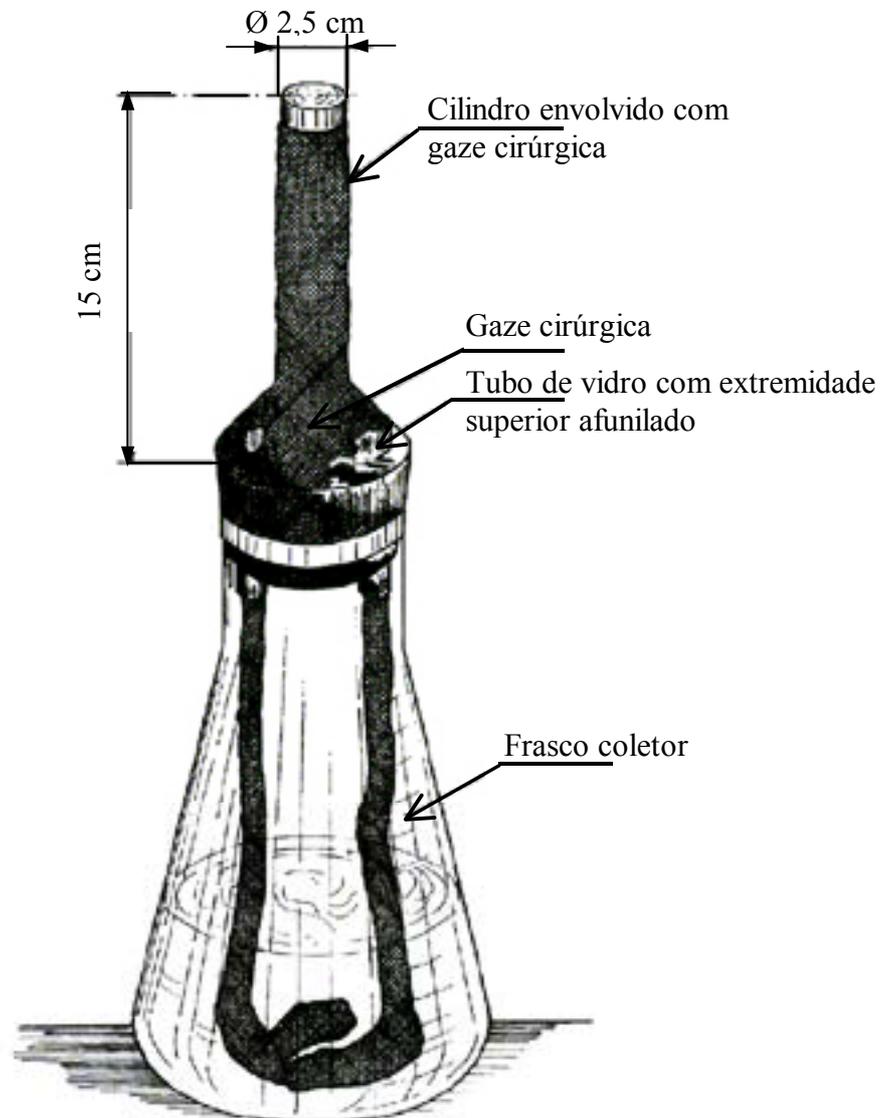


Figura 3.1 – Vela úmida (ABNT-NBR 6211, 2001, p. 5).

Todas as velas úmidas, utilizadas na pesquisa, foram confeccionadas no Laboratório de Química da Universidade Católica de Pernambuco. Foram utilizados tubos de ensaio, com 25x200 mm e 7x100 mm, devidamente cortados com tamanhos adequados, exigidos pela ABNT-NBR 6211 (2001), e fixados na rolha de borracha. Como frascos

coletores foram utilizados Erlenmeyers, de boca larga, com capacidade de 1000 mL, conforme Foto 3.1.

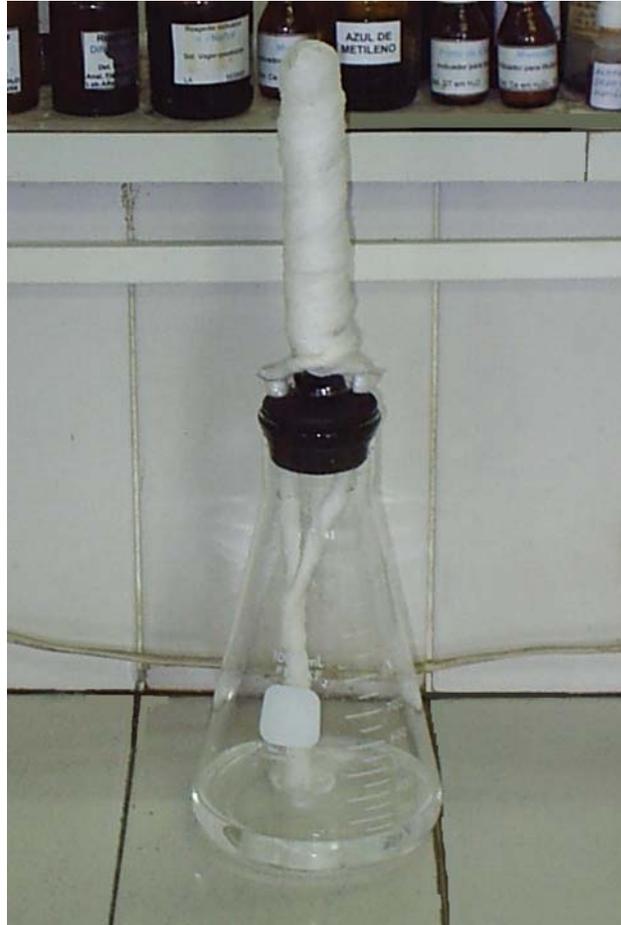


Foto 3.1 – Vela úmida.

3.2.4.2 Suporte, proteção e colocação da vela úmida

A vela úmida deve ser instalada num suporte adequado, a uma altura mínima de 1 m acima do nível do solo e em posição mais alta que todos os obstáculos localizados num raio de 3 m. Também necessita ser protegida por meio de uma cobertura de material inerte e opaco de, no mínimo, 50 cm x 50 cm, como também precisa ser colocada numa posição central e a uma distância de 20 cm do topo da cobertura, como indicado na Figura 3.2 (ABNT-NBR 6211, 2001).

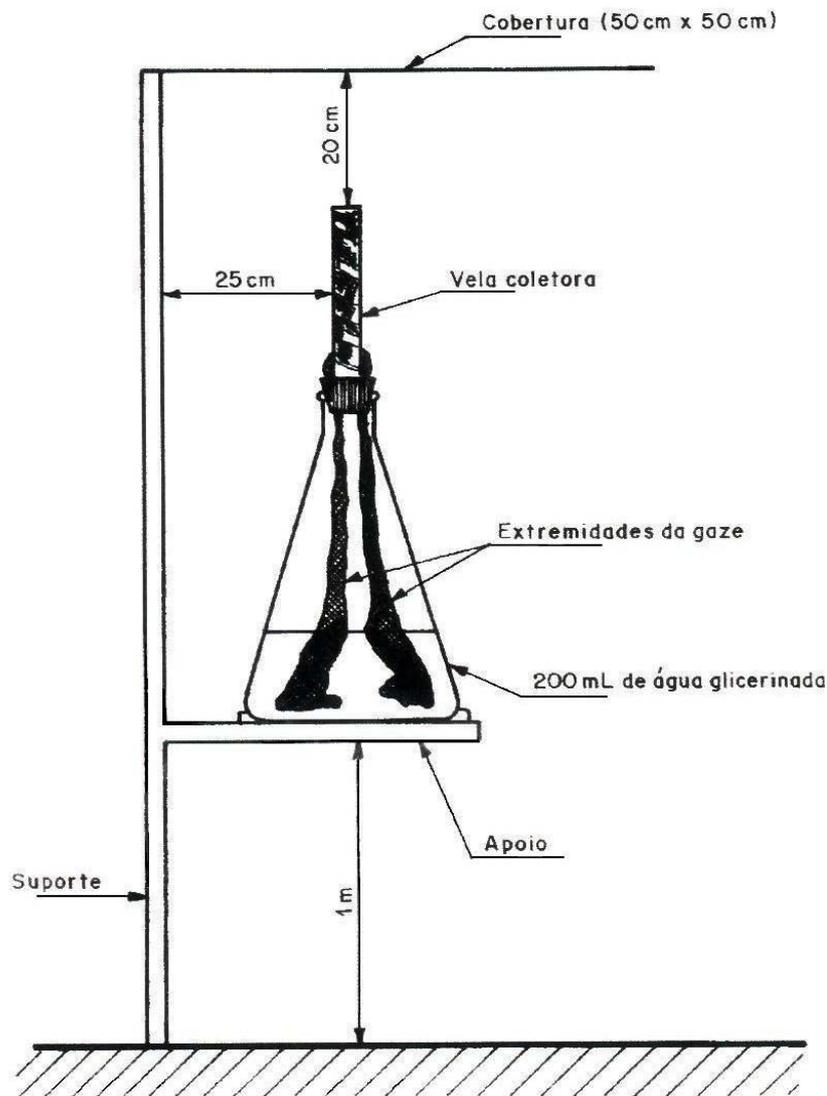


Figura 3.2 – Suporte da vela úmida (ABNT-NBR 6211, 2001, p. 6).

Todo o suporte da vela úmida foi confeccionado em aço, pela Oficina Mecânica da Universidade Católica de Pernambuco. A dimensão da cobertura utilizada foi de 60 cm x 50 cm, por motivo de comodidade e do não-desperdício de material, tendo em vista que a chapa de aço comprada tinha a dimensão de 100 cm x 60 cm.

A Foto 3.2 mostra o suporte com a vela úmida e a indicação da dimensão de sua cobertura.



Foto 3.2 – Suporte da vela úmida com indicação da dimensão da cobertura.

3.2.4.3 Reagentes

Segundo a ABNT-NBR 6211 (2001), os reagentes precisam ser de qualidade para análise (p.a.), isto é, substância para pesquisa, com maior pureza.

A seguir serão listados os reagentes necessários para determinação do teor de cloretos conforme a ABNT-NBR 6211 (2001), a qual ainda salienta que qualquer referência à água deve ser entendida como água destilada ou desmineralizada, isenta de cloretos:

- a) **ácido octanóico** ($\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_6 \text{COOH}$);
- b) **solução 0,05 M (0,05 N) de ácido nítrico**: diluir com água 3 mL de ácido nítrico (HNO_3 d = 1,42) a 1000 mL;
- c) **água glicerizada**: diluir 200 mL de glicerol – $\text{CHOH} (\text{CH}_2\text{OH})_2$ – em 1000 mL de água e adicionar 20 gotas de ácido octanóico como fungicida;
- d) **solução-padrão 0,0125 M (0,025 N) de nitrato mercúrico**: dissolver 4,2830 g de nitrato mercúrico hidratado ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) em 50 mL de água acidificada com 0,5 mL de ácido nítrico (HNO_3 d = 1,42). Diluir a 1000 mL em balão

volumétrico. Filtrar, se necessário, e padronizar em relação à solução-padrão de cloreto de sódio (**NaCl**), de acordo com a próxima alínea;

- e) **solução-padrão 0,00705 M (0,0141 N) de nitrato mercúrico**: dissolver 2,4200 g de nitrato mercúrico hidratado (**Hg(NO₃)₂.H₂O**) em 25 mL de água acidificada com 0,25 mL de ácido nítrico (**HNO₃** d = 1,42). Diluir a 1000 mL em balão volumétrico. Filtrar, se necessário, e padronizar em relação à solução-padrão de cloreto de sódio (**NaCl**) de acordo com a próxima alínea;
- f) **solução-padrão 0,025 M (0,025 N) de cloreto de sódio**: secar o cloreto de sódio (**NaCl**) por 1 h a 600 °C. Dissolver 1,4612 g do sal seco em água e completar a 1000 mL em balão volumétrico;
- g) **solução de indicador misto**: dissolver 0,5 g de difenilcarbazona e 0,05 g de azul-de-bromofenol em 75 mL de etanol (**C₂H₅OH**) a 95% e completar a 100 mL com etanol. Guardar em frasco escuro e descartar após seis meses;
- h) **solução 0,25 M (0,25 N) de hidróxido de sódio**: dissolver 10 g de hidróxido de sódio (**NaOH**) em água e completar a 1000 mL.

De uma maneira geral, dificuldades foram encontradas na compra dos reagentes, devido à não-facilidade de encontrá-los no comércio. O maior contratempo ficou por conta do Nitrato mercúrico, só encontrado no exterior, e do Ácido nítrico, pois foram necessárias as autorizações do Exército, para utilização na Universidade, e da Polícia Federal, para o transporte dos mesmos, uma vez que são reagentes corrosivos e venenosos.

3.2.5 Preparação da vela úmida

A vela úmida foi preparada, conforme descrito na seção 3.2.4.1, e fixada ao frasco coletor, contendo aproximadamente 200 mL de água glicerinada. Segundo a ABNT-NBR 6211 (2001), o volume de água glicerinada pode ser acrescentado em locais onde, devido às condições ambientais, possa haver diminuição expressiva de volume durante o tempo de

exposição. No primeiro mês de estudo, em agosto de 2005, o volume da água glicerinada utilizada foi de 400 mL, para observância desta possível diminuição expressiva do volume; mas, nos meses posteriores, o volume utilizado foi de 200 mL, pois não houve uma diminuição significativa.

Foi preparada uma vela adicional para ser utilizada como ensaio em branco, sendo esta guardada em local isento de cloretos, conforme a ABNT-NBR 6211 (2001).

Antes de executar o experimento, foi feito, no Laboratório de Química, uma calibragem com a vela úmida, utilizando uma quantidade conhecida de cloretos (solução-padrão), confirmando a eficiência do teste descrito na ABNT-NBR 6211 (2001).

3.2.6 Condições de exposição

O monitoramento foi conduzido através de cinco estações, situadas a 7, 100, 160, 230 e 320 m em relação ao mar.

A escolha das distâncias em relação ao mar, para exposição do aparato da vela úmida, baseou-se em estudos publicados, sobre o tema, por Jaegerman (1990), Castro, De Rincón e Pazini (1999, 2001), Costa (2001), Meira e Padaratz (2002), Meira et al. (2003, 2004b), Barbosa et al. (2003) e Nunes et al. (2004), bem como o fator primordial que foi a limitação das áreas disponibilizadas para esta pesquisa.

A Figura 3.3 mostra, de forma esquemática, as zonas de exposição adotadas.



Figura 3.3 – Representação esquemática da distribuição das zonas de exposição do aparato da vela úmida.

Nas Fotos 3.3 a 3.7 são apresentadas as cinco estações de monitoramento, onde a vela úmida, da primeira estação (7 m do mar), ficou a 4 metros acima do nível do solo, pois, foi o ponto mais adequado encontrado e próximo do mar. As velas da segunda e terceira estações, a 100 e 160 m do mar, respectivamente, encontram-se a 1 metro acima do nível do solo, e a quarta (230 m do mar) e quinta (320 m do mar) velas foram colocadas um pouco mais alta, a 2 metros acima do nível do solo, para evitar que moradores do local as tocassem.



Foto 3.3 – Aparato da vela úmida a 7 m do mar.



Foto 3.4 – Aparato da vela úmida a 100 m do mar.



Foto 3.5 – Aparato da vela úmida a 160 m do mar.

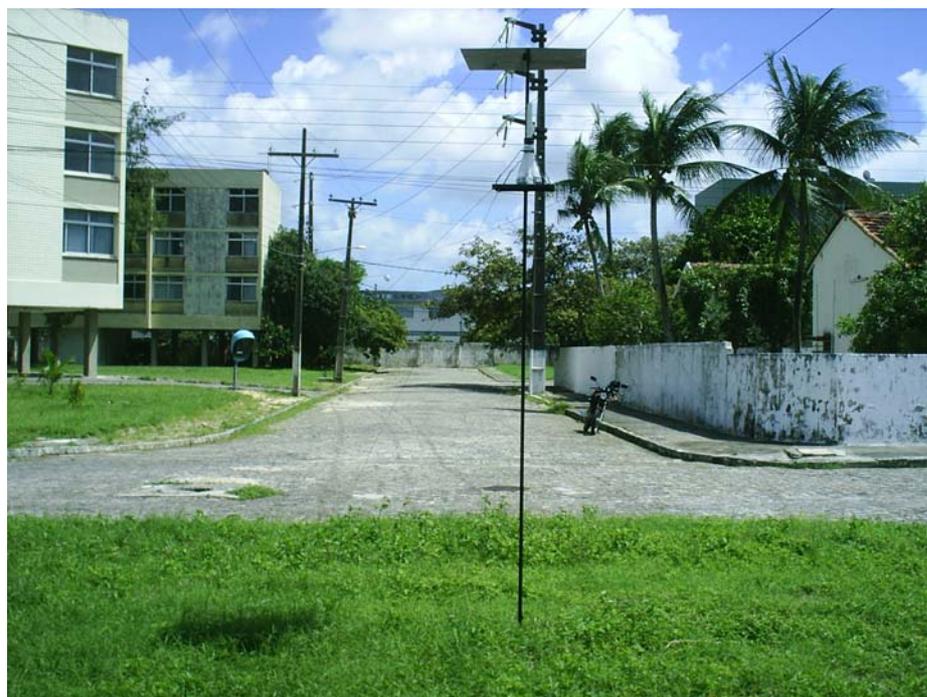


Foto 3.6 – Aparato da vela úmida a 230 m do mar.



Foto 3.7 – Aparato da vela úmida a 320 m do mar.

3.2.7 Procedimento da amostragem

A seguir estão descritos, conforme a ABNT-NBR 6211 (2001), os passos para o procedimento da amostragem, lembrando que qualquer referência à água deve ser entendida como água destilada ou desmineralizada, isenta de cloretos:

- a) instalar a vela úmida numa posição central a uma distância de 20 cm do topo da cobertura, como indicado na Figura 3.2, e deixá-la exposta por um período em torno de 30 dias;
- b) concluído o tempo de exposição, desenrolar a gaze por meio de uma pinça e colocá-la em recipiente adequado, contendo cerca de 200 mL de água;
- c) agitar a solução para que os cloretos retidos na gaze se diluam;
- d) remover a gaze, utilizando pinça, lavando-a com água. Conservar as águas de lavagem;
- e) juntar a solução do frasco coletor às águas de lavagem, assim como a água de lavagem do frasco, e completar a um volume conhecido, anotando-o (V_T);

- f) identificar a amostra, anotando a área da superfície exposta, em metros quadrados (S), o volume total da amostra após diluição, em mililitros (V_T), o local e o tempo da exposição, em dias (t).

Todo o processo da coleta do material está representado nas Fotos 3.8 a 3.10. O processo, para cada estação de monitoramento, inicia-se com a retirada da vela úmida e da solução contida no frasco coletor, colocando-as num recipiente isento de contaminantes, finalizando com três lavagens no frasco coletor, com água desmineralizada, e pondo estas águas de lavagem no mesmo recipiente.



Foto 3.8 – Coleta da vela úmida e da solução do frasco coletor.



Foto 3.9 – Lavagem do frasco coletor com água desmineralizada.



Foto 3.10 – Coleta da água de lavagem do frasco coletor.

Após a coleta do material, foi introduzido 200 mL de água glicerinada e nova vela úmida no frasco coletor, em cada estação de monitoramento, conforme as Fotos 3.11 e 3.12, sendo deixados, assim, os aparatos da vela úmida já prontos para coleta posterior.



Foto 3.11 – Introdução da água glicerinada no frasco coletor.



Foto 3.12 – Instalação da vela úmida no frasco coletor.

Em seguida, todo o material coletado foi levado ao Laboratório de Química, da Universidade Católica de Pernambuco, para se fazer o procedimento de titulação.

Nas Fotos 3.13 a 3.19, é mostrado o procedimento, que se origina, basicamente, com a lavagem dos cilindros e das gazes, das velas úmidas, com água desmineralizada, e a verificação do volume total (V_T), composto pelas soluções dos frascos coletores somadas às águas de lavagem dos frascos, dos cilindros e das gazes de cada estação de monitoramento.

O mesmo procedimento, descrito no parágrafo anterior, foi utilizado na vela adicional, para o ensaio em branco.

As nomenclaturas utilizadas foram:

- a) E_1 , para estação de monitoramento 1 (7 m do mar);
- b) E_2 , para estação de monitoramento 2 (100 m do mar);
- c) E_3 , para estação de monitoramento 3 (160 m do mar);
- d) E_4 , para estação de monitoramento 4 (230 m do mar);
- e) E_5 , para estação de monitoramento 5 (320 m do mar);
- f) BRANCO, para a vela adicional.



Foto 3.13 – Material completo da coleta (vela úmida, solução e águas de lavagem do frasco).



Foto 3.14 – Retirada da gaze para lavagem com água desmineralizada.



Foto 3.15 – Lavagem do cilindro com água desmineralizada.



Foto 3.16 – Lavagem da gaze com água desmineralizada.



Foto 3.17 – Soluções dos frascos coletores somadas às águas de lavagem dos frascos, dos cilindros e das gazes de cada estação de monitoramento.



Foto 3.18 – Colocação da solução com as águas de lavagem na proveta para verificação do volume total.



Foto 3.19 – Verificação do volume total das águas de lavagem.

3.2.8 Procedimento

3.2.8.1 Princípio do método

“O íon cloreto resultante da absorção em água contendo glicerol é titulado com solução diluída de nitrato mercúrico na presença do indicador misto difenilcarbazona e azul-de-bromofenol. O ponto final da titulação é indicado pela formação do complexo mercúrico-difenilcarbazona, de cor azul-violeta, em uma faixa de valores de pH de 2,3 a 2,8” (ABNT-NBR 6211, 2001, p. 3).

3.2.8.2 Interferências

Segundo a ABNT-NBR 6211 (2001), as interferências no procedimento são:

- a) os íons Br^- , F^- , I^- , CN^- , SCN^- , SO_3^{2-} e S^{2-} interferem, pois reagem com nitrato mercúrico;
- b) os íons Fe^{3+} interferem quando presentes em concentrações superiores a 0,01 g/L;
- c) o íon Cu^{2+} não interfere até 0,05 g/L;
- d) os íons Zn^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Cr^{3+} e Cr^{6+} não interferem até 0,10 g/L;
- e) os íons SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} e Al^{3+} não interferem até 1,0 g/L;
- f) os sais quaternários de amônio interferem na faixa de 0,001 g/L a 0,002 g/L.

3.2.8.3 Determinação do teor de cloretos

Os passos, para determinação do teor de cloretos, conforme a ABNT-NBR 6211 (2001), estão descritos a seguir:

- a) tomar uma alíquota que não contenha mais que 20 mg de íon cloreto. Anotar o volume da alíquota (V_a). Diluir a alíquota com água a 50 mL, se necessário;
- b) adicionar de 5 a 10 gotas de indicador misto e agitar o recipiente. Caso, após a adição do indicador, apareça a coloração azul-violeta ou vermelha, adicionar HNO_3 0,05 M, gota a gota, até mudar a coloração para amarela, e adicionar 1 mL de ácido em excesso. Caso, após a adição do indicador, apareça a coloração amarela ou laranja, adicionar, gota a gota, solução de NaOH 0,25 M, até mudança para a cor azul-violeta. Adicionar então HNO_3 0,05 M, gota a gota, até obter-se coloração amarela, e adicionar 1 mL de ácido em excesso;
- c) titular com solução de nitrato mercúrico 0,0125 M até coloração azul-violeta permanente. Anotar o volume de solução gasto, em mililitros (A);
- d) efetuar o ensaio em branco, utilizando a mesma solução-padrão de nitrato mercúrico utilizado para titular a amostra. Anotar o volume de solução gasto, em mililitros (B).

Nas Fotos 3.20 a 3.25 estão representados os passos para determinação do teor de cloretos.



Foto 3.20 – Tomada da alíquota com 50 mL para titulação.



Foto 3.21 – Adição do indicador misto difenilcarbazona e azul-de-bromofenol.



Foto 3.22 – Início da acidificação com ácido nítrico.



Foto 3.23 – Final da acidificação com ácido nítrico.



Foto 3.24 – Início da titulação.



Foto 3.25 – Final da titulação.

Em uma nota, a ABNT-NBR 6211 (2001, p. 3) descreve, ainda, que “se o volume da amostra contiver menos que 2,5 mg de íon cloreto, a titulação final tanto da amostra como

do branco deverá ser feita utilizando a solução-padrão 0,00705 M de nitrato mercúrico, usando microbureta.”

3.2.9 Resultados

Os resultados foram expressos em massa de cloreto por unidade de área e por unidade de tempo. O início e o término do ensaio e a localidade da exposição foram especificados, segundo a ABNT-NBR 6211 (2001).

A determinação do teor de cloretos foi dada pela seguinte equação, conforme ABNT-NBR 6211 (2001):

$$\text{Cloreto}(\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})) = \frac{2(A - B) \cdot M \cdot 35,5 \cdot V_T}{V_a \cdot S \cdot t} \quad (4.1)$$

onde:

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

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

M: concentração de solução-padrão de nitrato mercúrico, em molaridade;

V_T: volume total da amostra após a diluição, em mililitros;

V_a: volume de alíquota, em mililitros;

S: área da gaze exposta, em metros quadrados;

t: tempo de exposição, em dias.

Os resultados da determinação do teor de cloretos, nos meses de agosto de 2005 a janeiro de 2006, em cada estação de monitoramento, são apresentados nas Tabelas 3.15 a 3.20.

A concentração de solução-padrão de nitrato mercúrico que é 0,0125 M (Molar), foi multiplicada pelo fator de correção $f = 1,0638$, ficando a molaridade real de 0,0133 M.

Tabela 3.15 – Determinação do teor de cloretos no mês de agosto (01/08/05 a 31/08/05).

Estação de coleta	V _T (mL)	S (m ²)	Titulação Hg(NO ₃) ₂ .H ₂ O				t (dias)	Cloreto (mg/(m ² .d))
			V _a (mL)	M	A (mL)	B (mL)		
BRANCO	710,0	0,012193	50,0	0,0133	--	0,15	30	--
E ₁ (7 m)	1120,0	0,012586			18,90			1050,39
E ₂ (100 m)	1310,0	0,012488			6,30			406,14
E ₃ (160 m)	1125,0	0,013371			3,00			151,00
E ₄ (230 m)	757,0	0,013764			1,50			46,74
E ₅ (320 m)	830,0	0,011310			1,30			53,13

Tabela 3.16 – Determinação do teor de cloretos no mês de setembro (31/08/05 a 29/09/05).

Estação de coleta	V _T (mL)	S (m ²)	Titulação Hg(NO ₃) ₂ .H ₂ O				t (dias)	Cloreto (mg/(m ² .d))
			V _a (mL)	M	A (mL)	B (mL)		
BRANCO	760,0	0,012979	50,00	0,0133	--	0,38	29	--
E ₁ (7 m)	600,0	0,012586			22,22			678,04
E ₂ (100 m)	655,0	0,012586			11,30			370,10
E ₃ (160 m)	730,0	0,012743			3,80			127,59
E ₄ (230 m)	820,0	0,012429			1,22			36,09
E ₅ (320 m)	740,0	0,013371			1,57			42,89

Tabela 3.17 – Determinação do teor de cloretos no mês de outubro (29/09/05 a 31/10/05).

Estação de coleta	V _T (mL)	S (m ²)	Titulação Hg(NO ₃) ₂ .H ₂ O				t (dias)	Cloreto (mg/(m ² .d))
			V _a (mL)	M	A (mL)	B (mL)		
BRANCO	480,0	0,012973	50,0	0,0133	--	0,23	32	--
E ₁ (7 m)	635,0	0,012586			16,50			484,41
E ₂ (100 m)	725,0	0,012586			10,70			355,91
E ₃ (160 m)	715,0	0,012586			3,55			111,30
E ₄ (230 m)	580,0	0,012973			1,43			31,66
E ₅ (320 m)	510,0	0,013371			1,97			39,18

Tabela 3.18 – Determinação do teor de cloretos no mês de novembro (31/10/05 a 30/11/05).

Estação de coleta	V _T (mL)	S (m ²)	Titulação Hg(NO ₃) ₂ .H ₂ O				t (dias)	Cloreto (mg/(m ² .d))
			V _a (mL)	M	A (mL)	B (mL)		
BRANCO	430,0	0,012586	50,0	0,0133	--	0,20	30	--
E ₁ (7 m)	650,0	0,012586			10,43			332,60
E ₂ (100 m)	645,0	0,012586			14,75			469,41
E ₃ (160 m)	720,0	0,013371			4,80			155,94
E ₄ (230 m)	550,0	0,012586			1,65			52,22
E ₅ (320 m)	595,0	0,012973			1,92			49,66

Tabela 3.19 – Determinação do teor de cloretos no mês de dezembro (30/11/05 a 29/12/05).

Estação de coleta	V _T (mL)	S (m ²)	Titulação Hg(NO ₃) ₂ .H ₂ O				t (dias)	Cloreto (mg/(m ² .d))
			V _a (mL)	M	A (mL)	B (mL)		
BRANCO	580,0	0,012586	50,0	0,0133	--	0,23	29	--
E₁ (7 m)	560,0	0,013371			14,71			394,94
E₂ (100 m)	765,0	0,013371			11,05			403,15
E₃ (160 m)	860,0	0,012973			3,62			146,35
E₄ (230 m)	685,0	0,012586			1,40			41,47
E₅ (320 m)	630,0	0,013371			1,59			41,73

Tabela 3.20 – Determinação do teor de cloretos no mês de janeiro (29/12/05 a 31/01/06).

Estação de coleta	V _T (mL)	S (m ²)	Titulação Hg(NO ₃) ₂ .H ₂ O				t (dias)	Cloreto (mg/(m ² .d))
			V _a (mL)	M	A (mL)	B (mL)		
BRANCO	445,0	0,014157	50,0	0,0133	--	0,24	33	--
E₁ (7 m)	560,0	0,012586			15,40			386,03
E₂ (100 m)	665,0	0,012973			12,29			353,50
E₃ (160 m)	600,0	0,013371			7,18			178,23
E₄ (230 m)	560,0	0,012586			1,67			36,41
E₅ (320 m)	600,0	0,013371			1,71			37,75

Na Tabela 3.21, é mostrado o resumo da deposição de cloretos em cada estação de monitoramento, no período de estudo.

Tabela 3.21 – Resumo da deposição de cloretos em cada estação de monitoramento no período de estudo.

Estação de coleta	Concentração de cloretos (mg/m ² .dia)						Média (ago./2005-jan./2006)
	ago./2005	set./2005	out./2005	nov./2005	dez./2005	jan./2006	
E₁ (7 m)	1050,39	678,04	484,41	332,60	394,94	386,03	554,40
E₂ (100 m)	406,14	370,10	355,91	469,41	403,15	353,50	393,04
E₃ (160 m)	151,00	127,59	111,30	155,94	146,35	178,23	145,07
E₄ (230 m)	46,74	36,09	31,66	52,22	41,47	36,41	40,76
E₅ (320 m)	53,13	42,89	39,18	49,66	41,73	37,75	44,06

A título de comparação, titulações foram feitas, com a mesma amostragem, pelo método de Mohr, Greenberg (1992), em paralelo ao método da ABNT-NBR 6211 (2001), para determinação de cloretos, e foram verificados resultados semelhantes.

CAPÍTULO 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR

A maré mínima e máxima mensal (Tabela 3.1), observada na Cidade do Recife, apresenta-se com seus valores iguais a 0,42 m e 2,04 m, ao longo do tempo.

A composição iônica do mar de Boa Viagem (Tabela 3.3), região da pesquisa, encontra-se dentro do apresentado pela DIN 4030 (1991), na Tabela 2.1, tendo um diferencial nos íons sulfato, cálcio e potássio, que trouxeram valores mais elevados, 22%, 38% e 46%, respectivamente.

A salinidade encontrada (Tabela 3.3) na água do mar apresenta-se com um valor próximo do citado por Mehta e Monteiro (1994).

O pH, apontado na Tabela 3.3, da água do mar, situa-se dentro do intervalo fornecido por Mehta e Monteiro (1994).

A composição molecular do mar de Boa Viagem (Tabela 3.5), confrontada com os valores expostos, na Tabela 2.2, por Forschhammer (s.d. apud BICZÓK, 1972), exhibe valores bem mais elevados na concentração de CaCl_2 e CaSO_4 , respectivamente, sendo válido salientar que o cloreto de cálcio, conforme Andrade e Page (1986), é mais agressivo no processo de corrosão de armaduras, se comparado com o cloreto de sódio, para uma mesma quantidade de cloretos originados dos mesmos. O MgSO_4 apresentou-se 69% com menor concentração. Observa-se, ainda, que o sal com maior concentração é o NaCl , seguido, com percentuais bem menores, pelo $\text{Mg}(\text{Cl})_2$, CaSO_4 , CaCl_2 e MgSO_4 .

4.2 CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA DO AMBIENTE

4.2.1 Comportamento da umidade relativa

A umidade relativa medida, ao longo do tempo, na região pesquisada, tem um comportamento pouco variável, com a maioria das suas medidas entre 70 e 90%, podendo ser observado na Tabela 3.11. O seu comportamento acompanha o período de incidência de chuvas (Tabela 3.10), quando a umidade relativa assume os maiores valores.

4.2.2 Comportamento da temperatura

Ao longo dos anos, na região do estudo, o comportamento da temperatura média apresentou-se bem estável, com uma variação relativamente pequena, em torno de 24 e 28 °C. Nos meses da pesquisa, agosto de 2005 a janeiro de 2006, esta variação foi ainda menor, por ter sido iniciada no último mês de inverno, e o restante da pesquisa, toda no verão, conforme Tabela 3.12.

4.2.3 Comportamento da insolação

O comportamento da insolação, ao longo do tempo, na região da pesquisa, apresentou-se com uma variação por volta de 100 e 300 h (Tabela 3.13), podendo os maiores valores ser observados entre os meses de setembro a março.

4.3 COMPORTAMENTO DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS

4.3.1 Efeito da distância em relação ao mar

A diminuição na deposição de cloretos, em cada estação de monitoramento, à medida que existe um distanciamento do mar, comportou-se de maneira evidente (Figuras 4.1 a 4.7) e confirma o descrito na seção 2.1.1.1.3.

O modelo que melhor se ajustou aos resultados obtidos foi o exponencial, do tipo $y = ae^{bx}$, onde, y é a deposição de cloretos (Dep.) do aerosol marinho, e x é a distância em relação ao mar (dist.), confirmando o descrito por Morcillo et al. (1999) e Meira (2004a).

Nas Figuras 4.1 a 4.7, é mostrada, através de diagramas de dispersão com linha de tendência, a relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, em cada mês estudado, como também a média desses meses. Na Figura 4.8, é apontado o intervalo de confiança da deposição, nos meses de estudo.

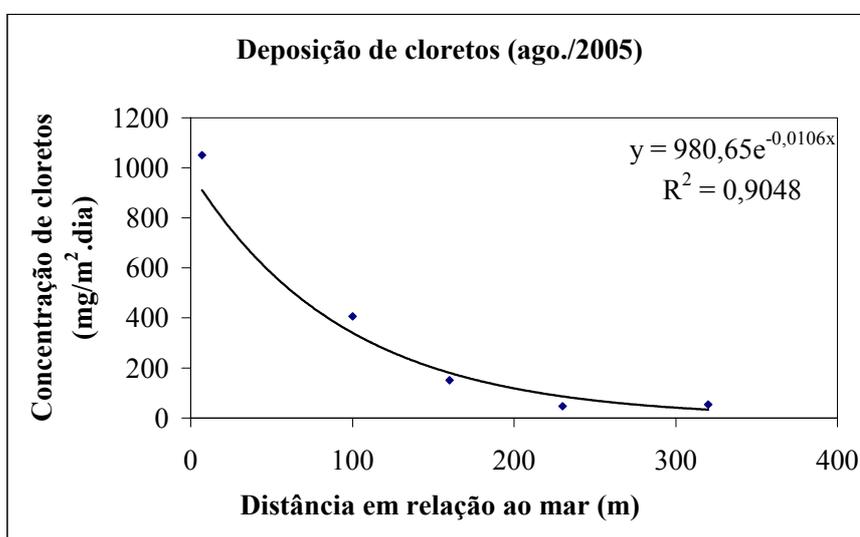


Figura 4.1 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de ago./2005.

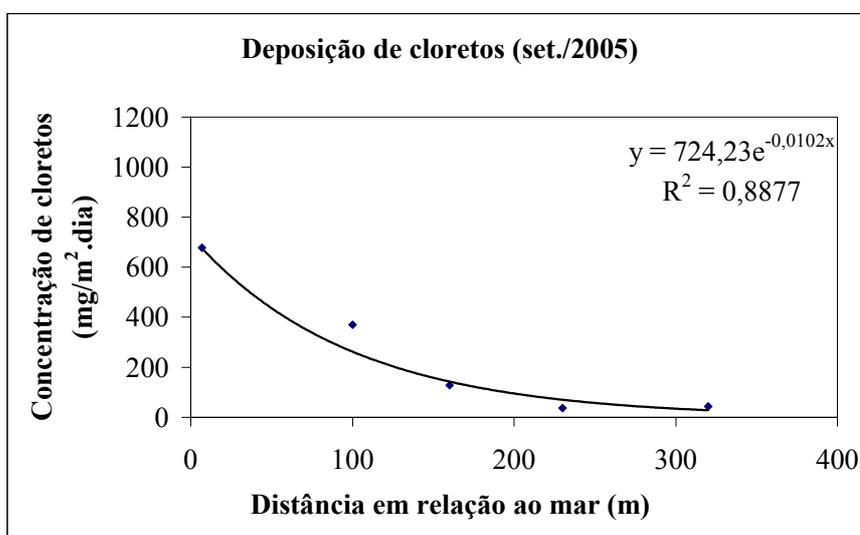


Figura 4.2 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de set./2005.

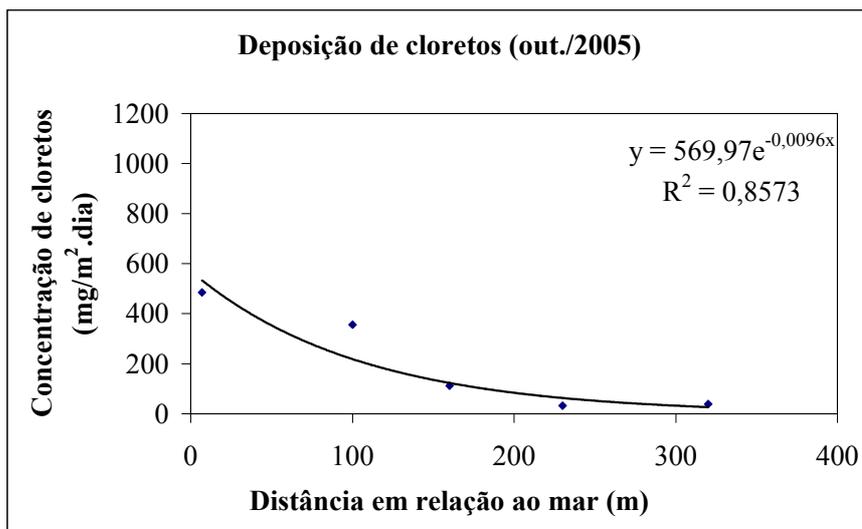


Figura 4.3 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de out./2005.

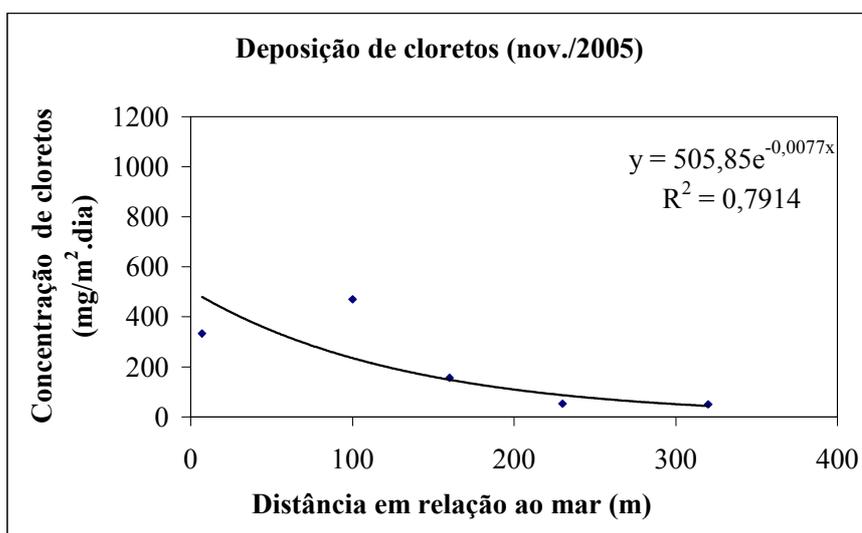


Figura 4.4 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de nov./2005.

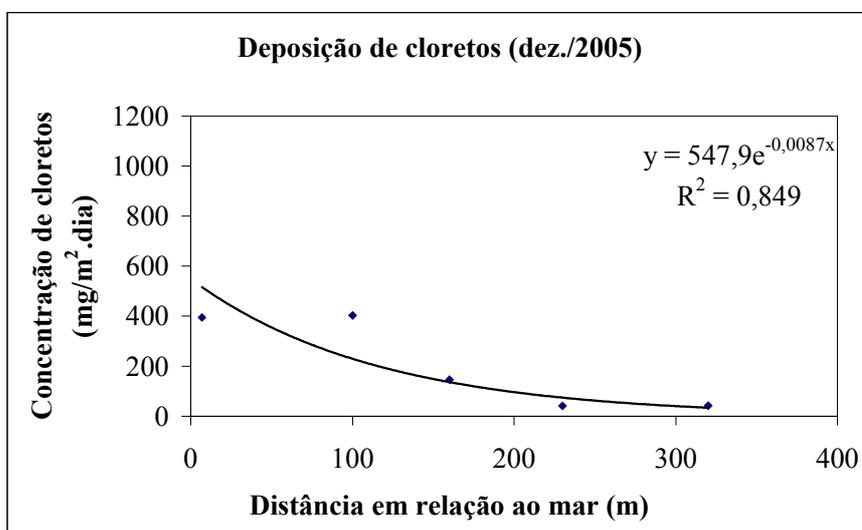


Figura 4.5 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de dez./2005.

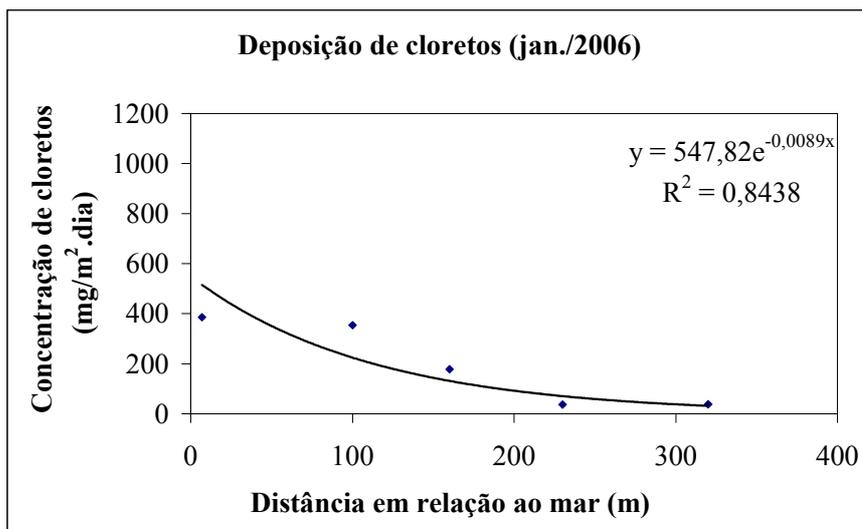


Figura 4.6 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no mês de jan./2006.

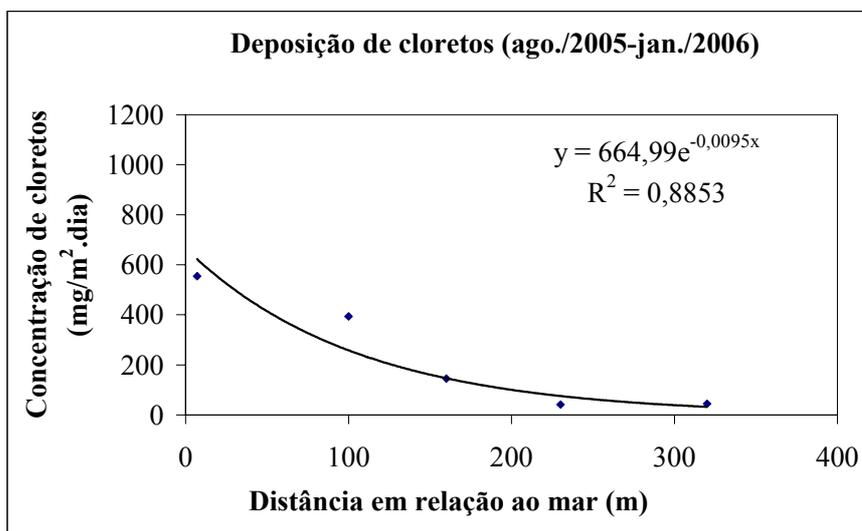


Figura 4.7 – Relação entre a deposição média de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de ago./2005 a jan./2006.

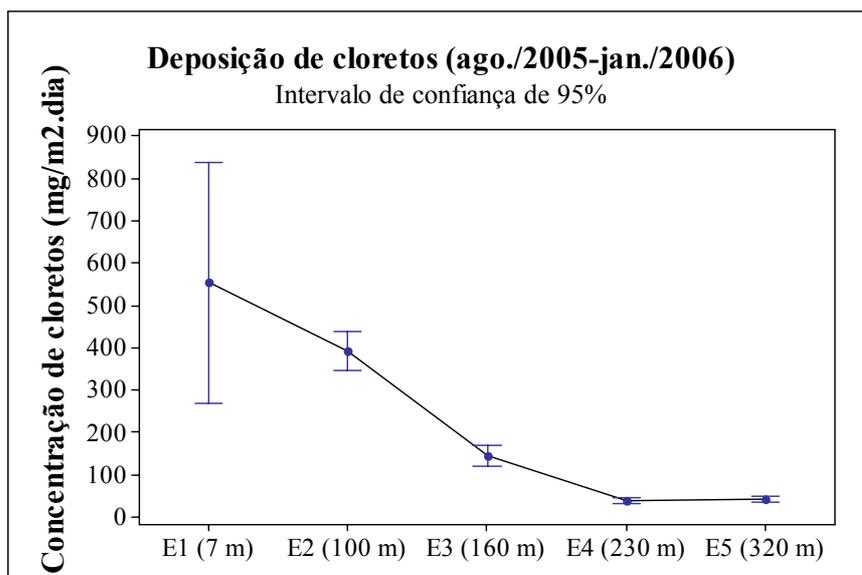


Figura 4.8 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de ago./2005 a jan./2006, com intervalo de confiança de 95%.

A relação entre a deposição média de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de ago./2005 a jan./2006 (Figura 4.7), traz, como resultado do ajuste da curva, um coeficiente de determinação $R^2 = 0,8853$, significando que 88,53% da variabilidade em y é explicada pela regressão, e como equação, $y = 664,99e^{-0,0095x}$.

O modelo ajustado ($y = ae^{bx} \cdot \varepsilon$) foi linearizado através do transformador cartesiano

$\ln y = \ln a + bx$, onde:

- a) $\ln y = Y$;
- b) $x = X$;
- c) $\ln a = \beta_0$;
- d) $b = \beta_1$.

Logo, o modelo referente ficou definido como $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \ln \varepsilon$, e para retrocálculo, $a = e^{\beta_0}$ e $b = \beta_1$. Os parâmetros do modelo foram estimados, usando o método dos mínimos quadrados (MONTGOMERY, PECK e VINING, 2001).

A análise de variância (Tabela 4.1) mostra que o teste foi significativo, existe regressão, e o modelo explica 88,5% (R^2) da variabilidade em Y, tendo como equação de regressão $Y = 6,50 - 0,00947 X$.

Tabela 4.1 – Análise de variância.

	G.L.	S.Q.	M.Q.	F
Regressão	1	5,1518	5,1518	23,15
Resíduo	3	0,6677	0,2226	--
Total	4	5,8195	--	--

Na Figura 4.9, é mostrado o modelo linearizado, e, na Tabela 4.2, é feita uma predição do modelo.

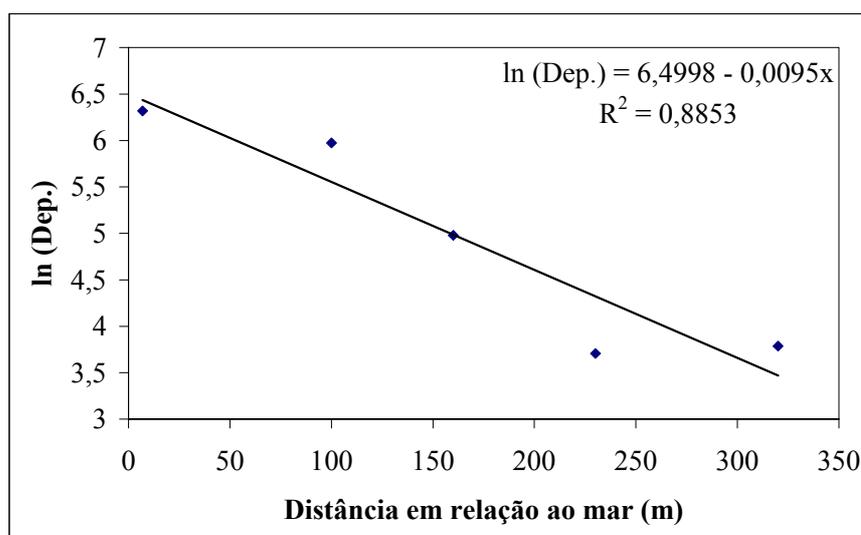


Figura 4.9 – Modelo linearizado.

Tabela 4.2 – Predição do modelo.

Distância em relação ao mar (m)	Deposição de cloretos (mg/m².dia)
7	622,48
100	258,01
160	146,17
230	75,33
320	32,12
400	15,06
500	5,84
600	2,27
700	0,88
800	0,34
900	0,13
1000	0,05
1100	0,02
1200	0,008
1300	0,003
1400	0,001
1500	0,0005

4.3.2 Efeito da direção predominante e velocidade do vento

O vento, na região do estudo, ao longo dos anos, apresentou-se com uma maior frequência nas direções leste e sudeste (Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8). A sua velocidade comportou-se entre 1,5 e 2,8 m/s, tendo alcançado os seus valores máximos entre os meses de setembro e fevereiro (Tabela 3.9).

Não se pôde observar, com clareza, o quanto a velocidade do vento interfere na deposição de cloretos, conforme descrito na seção 2.1.1.1.1, pois, nos meses da pesquisa, houve pouca variabilidade nos valores da velocidade (Tabela 3.14).

Na Figura 4.10, é apontada a relação entre a deposição de cloretos e a velocidade do vento, em cada estação de monitoramento, nos meses da pesquisa.

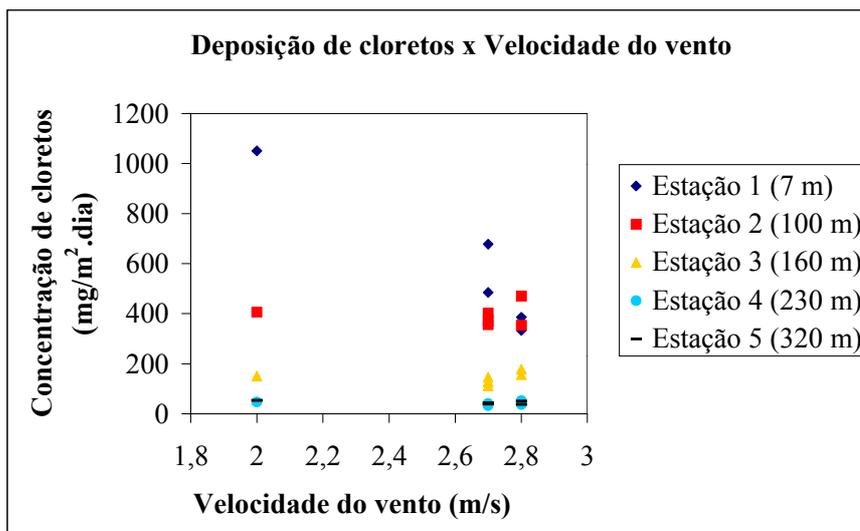


Figura 4.10 – Relação entre a deposição de cloretos e a velocidade do vento.

Na seção anterior (4.3.1), foi mostrado que existe uma diminuição na deposição de cloretos à medida que se distancia do mar, contudo, na 5.^a estação de monitoramento (320 m), esta deposição foi superior à da 4.^a estação (230 m), em cinco dos seis meses de estudo (Tabela 3.21). Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que há uma canalização na direção do vento, condição esta não-existente nas outras estações de monitoramento. Este comportamento vem reforçar o quanto é importante a direção predominante do vento. A canalização é mostrada na Figura 4.11 e na Foto 4.1 a seguir.

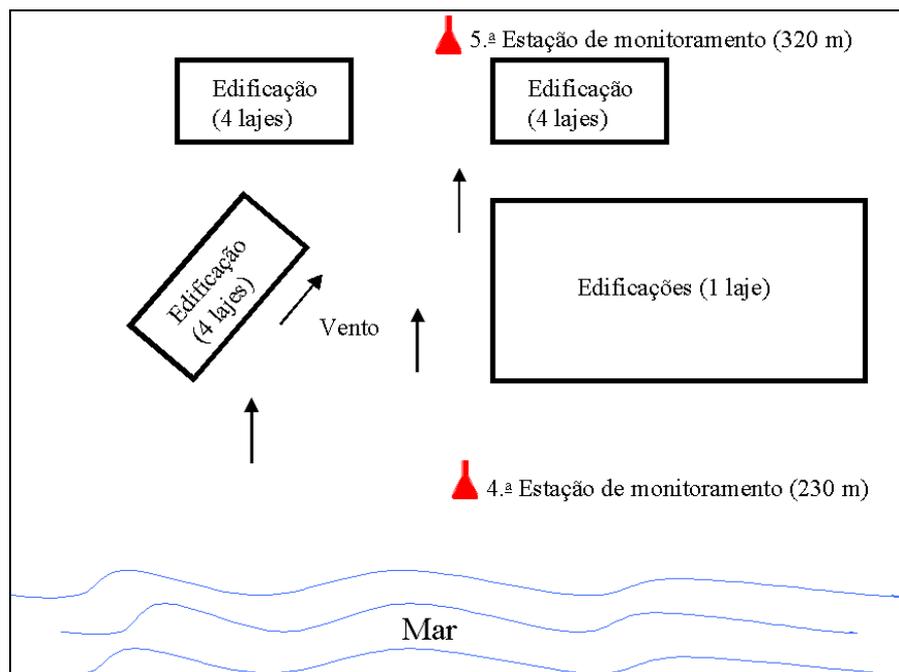


Figura 4.11 – Esquema da canalização do vento na 5.^a estação de monitoramento.



Foto 4.1 – Efeito canalização do vento.

4.3.3 Efeito da precipitação

Ao longo do tempo, na região da pesquisa, as precipitações (Tabela 3.10) concentraram-se no período de março a agosto (inverno), chegando a valores médios por volta de 300 mm mensais.

Quanto a alguma interferência que a precipitação pudesse vir acarretar na deposição de cloretos, não se pôde analisar com mais profundidade, uma vez que os meses de estudo recaíram no período de verão, convergindo, assim, para pouca variabilidade nos valores das precipitações mensais. Nos meses de setembro, outubro e novembro, é que se pôde notar, com mais clareza, a influência da precipitação na deposição dos cloretos,

analisando as Tabelas 3.14 e 3.21. E neste caso, quando a precipitação assumiu o maior valor, menor foi a deposição de cloretos. Este comportamento pode ser explicado, pois a precipitação facilita a deposição dos sais antecipadamente, com o distanciamento do mar.

Na Figura 4.12, é mostrada a relação entre a deposição de cloretos e a precipitação, em cada estação de monitoramento, no período estudado.

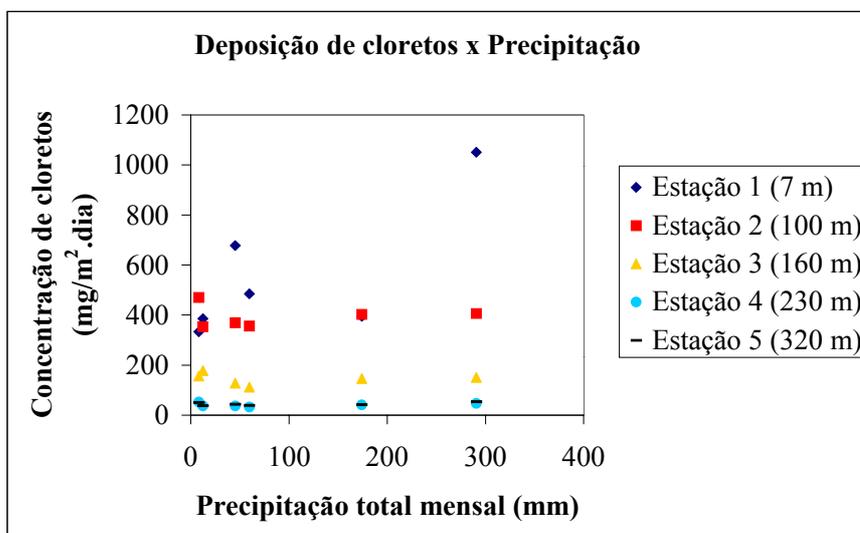


Figura 4.12 – Relação entre a deposição de cloretos e a precipitação.

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Dentro do objetivo da pesquisa, que consiste em avaliar o nível de deposição de cloretos, na orla marítima do Bairro de Boa Viagem, Recife-PE, em função de sua distância em relação ao mar, empregando o método da vela úmida, tendo como apoio a caracterização climatológica do ambiente, são apresentadas as seguintes conclusões:

- a) a deposição de cloretos decresce à medida que há um distanciamento em relação ao mar, numa relação exponencial, do tipo $y = ae^{-bx}$, onde, y é a deposição de cloretos, expressa em $\text{mg/m}^2.\text{dia}$, e x é a distância em relação ao mar, confirmando o descrito por Morcillo et al. (1999) e Meira (2004a);
- b) a deposição de cloretos, conforme predição do modelo (Tabela 4.2), dá-se, de modo significativo, nos primeiros 400 m e atinge valores ínfimos a partir dos 700 m do mar;
- c) existe a necessidade de analisar, com mais profundidade, a interferência que a velocidade e direção do vento e a precipitação exercem na deposição de cloretos, uma vez que houve pouca variabilidade dos mesmos, nos valores mensais obtidos;
- d) espera-se poder ter contribuído para que novos estudos sejam realizados e novas exigências sejam impostas às estruturas de concreto.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do estudo sobre a disseminação de íons cloreto, em orla marítima, com o distanciamento do mar, sugere-se alguns assuntos para futuras pesquisas, que seriam enriquecedores para um melhor conhecimento do tema:

- a) estudar o comportamento do aerosol marinho em ambientes, onde a velocidade e direção do vento e a precipitação alcancem variados valores, de forma a obter boas relações com a deposição de cloretos;
- b) estudar a influência da altura na deposição de íons cloreto;
- c) analisar o efeito barreira (obstáculos) na deposição de cloretos;
- d) realizar pesquisas em outros ambientes da costa marítima brasileira, de modo a permitir a formação de um banco de dados, com o qual seja possível mapear toda a incidência de cloretos com a distância ao mar.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. D. **Manual de tecnologia do concreto**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 1982.

AMBLER, H. R.; BAIN, A. A. J. Corrosion of metals in the tropics. **J. appl. Chem.**, p. 437-467, 1955.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 224R** (2001). Control de la fisuración en estructuras de hormigón. Informado por el Comité ACI 224.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318R** (1996). Code interpretation of building code requirements for reinforced concrete – ACI Committee 318/318R. In: ACI MANUAL OF CONCRETE PRACTICE – Part 3. Detroit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1152** (1990). standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concret. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia (USA).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G-140** (1996). standard test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia (USA).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G-140** (2002). standard test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia (USA).

ANDRADE, J. J. de O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. 1997. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ANDRADE, M. C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Pini, 1992.

ANDRADE, M. C.; PAGE, C. L. Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts: a study of cation specific effects. **British Corrosion Journal**, v. 21, n. 1, p. 49-53, 1986.

ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. 1994. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

ARYA, C.; BUENFELD, N. R.; NEWMAN, J. B. Factors influencing chloride-binding in concrete. *CEMENT AND CONCRETE RESEARCH*, v. 20, p. 291-300, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Versão corrigida, março de 2004. Rio de Janeiro, 2003.

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

BAKKER, R. F. M. Initiation priod. In: *CORROSION OF STEEL IN CONCRETE – REPORT OF THE TECHNICAL COMMITTEE 60-CSC-RILEM*, Editor Peter Schiessl, Ed. Chapman & Hall, 1988, p. 22-55.

BARBOSA, P.; GRULLÓN, M.; MEDEIROS, M.; PEREIRA, F.; HELENE, P. Estudio de caso de una estructura de concreto de 30 años situada en ambiente marino: efecto de la altura y el posicionamiento de columnas en la concentración de iones cloruro. *.Net*, jun. 2003. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. Disponível em: <http://www2.furg.br/jornal/semana/noticias/27_06_03_workshop.htm>. Acesso em: 02 fev. 2005.

BAUER, E.; HELENE, P. R. L. Investigação comparativa da influência da escória de alto-forno na corrosão das armaduras. In: *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES: DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES AND PROTECTION SYSTEMS*, s. ed., 1996, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: jun. 1996. p. 433-444.

BICZÓK, I. **Corrosion y protección del hormigón**. Tradução Emilio J. Dócon Asensi. Bilbao, Ediciones Urno, 1972.

BLANCHARD, D. C.; CIPRIANO, R. J. The vertical distribution of the concentration of sea salt in the marine atmosphere near Hawaii. **Tellus**, v. 36B, p. 118-125, 1984.

BURY, M. R. C.; DOMONE, P. L. The role of research in the design of concrete offshore structures. In: ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY, v. 1, 1974, p. 155-168, New Jersey: Institute of Electronics Engineers, 1974.

BYFORS, K. **Chloride – initiated reinforcement corrosion: chloride binding**. Stockholm: CBI (report 1:90), 1990. 121 p.

CABRERA, J. G. **Corrosion measurements on reinforcement in silica fume concrete**. Trabalho apresentado a I Jornadas iberoamericanas de durabilidad de la armadura, Cartagena de Índias, 2000. Não publicado.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. Tradução e adaptação M. Celeste Marcondes et alii, coordenação técnica L.A. Falcão Bauer. São Paulo: Pini, 1988.

CARMONA, A.; MAREGA, A. Retrospectiva da patologia no Brasil – estudo estatístico. Colloquia 88, Jornada en Español y Portugués sobre Estructuras y Materials. Madrid, v. 6, p. 101-123, maio 1988.

CASTRO, P.; DE RINCON, O. T.; PAZINI, E. Chloride penetration profiles in marini environments. In: II INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1999, Gramado: **ACI SP-186**, 1999, p. 371-389.

CASTRO, P.; DE RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**, v. 31, p. 529-537, 2001.

CHANDRA, S.; CEDERWALL, D.; NILSSON, I. H. E. Durability problems in Swedish concrete bridges – case studies. In: P. K. MEHTA SYMPOSIUM ON DURABILITY OF CONCRETE. (1994: Nice). **Proceedings...** Nice: ACI, 1994, p. 223-241.

COLLEPARDI, M. A.; MARCIALIS, A.; TURRIZIANI, R. Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 55, n. 10, p. 533-535, 1972.

COMISSION PEMANENTE DEL HORMIGÓN – **Instrucción de hormigón estructural – EHE**, 1999.

COMITÉ EURO – INTERNATIONAL DU BÉTON. **Durability of concrete structures- design guide. Bulletin D'INFORMAÇÃO 183**. Lausanne: Thomas Telford, 1992.

COMITÉ EURO – INTERNATIONAL DU BÉTON. **Durability of concrete structures. Workshop Report. Bulletin D'INFORMAÇÃO 152**. Copenhagen: May 1983.

COMITÉ EURO – INTERNATIONAL DU BÉTON. **FIB Model Code 1990 (Design Code). Bulletin D'INFORMAÇÃO 213/214**. Lausanne: Thomas Telford, 1993.

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

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. 1988. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN-4030 Part. 1** (1991). Assessment of water, soil and gases for their aggressiveness to concrete: principles and limiting values.

DHIR, R. K.; JONES, M. R.; McCARTHY, M. J. **PFA concrete: Chloride ingress and corrosion in carbonated cover**. Proc. Instn Civ. Engrs Structs e Bldgs, May, p. 167-172, 1993.

ERIKSSON, E. The yearly circulation of chloride and sulfur in nature: meteorological, geochemical and pedological implications. Part 1. **Tellus**. v. 2, n. 4, p. 375-403, Nov. 1959.

FELIÚ, S.; MORCILLO, M.; CHICO, B. Effect of distance from sea on atmospheric corrosion rate. **Corrosion**, v. 55, n. 9, p. 883-891, 1999.

FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. R. L. Assim caminha a corrosão. **Téchne**, São Paulo, v. 10, p. 28-33, maio/jun. 1994.

FITZGERALD, J. W. Marine aerosols: a review. **Atmospheric Environment**, v. 25A, n. 3/4, p. 533-545, 1991.

GJØRV, O. E. Steel corrosion in concrete structures exposed to Norwegian marine environment. In: P. K. MEHTA SYMPOSIUM ON DURABILITY OF CONCRETE. (Edited by Khayat and Aïctin, 1994: Nice-France). **Proceedings**... Nice: 1994, p. 243-261.

GOÑI, S.; ANDRADE, C. Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**, v. 20, p. 525-539, 1990.

GOÑI, S.; MORAGUES, A.; ANDRADE, C. Influencia de la conductividad y fuerza iónica de soluciones sintéticas que simulan la fase acuosa del hormonigón en el fenómeno de la corrosión de armaduras. **Materiales de Construcción**, v. 39, n. 11 215, jul. agosto-sept., 1989, p. 19-28.

GREENBERG, A. E. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 18. ed. Washington: American public health association, v. 1, 1992.

GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. 2000. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GUSTAFSSON, M. E. R.; FRANZÉN, L. G. Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden. **Atmospheric Environment**, n. 30, p. 977-989, June 1996.

HADLEY, H. M. **Concreto em água do mar – necessária revisão de ponto de vista**. São Paulo: ABCP, 1948.

HAUSMANN, D. A. Steel corrosion in concrete: how does it occur? **Materials Protection**, v. 6, Nov. 1967, p. 19-23.

HELENE, P.R.L. **Contribuição à normalização: A resistência sob carga mantida e a idade de estimativa da resistência característica; Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado.** São Paulo, 1994. (Monografias. EPUSP).

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. 231 f. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P.R.L. Corrosão das armaduras em concreto armado. In: APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO CONCRETO, 4., p. 1-44, 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SIMPATCON, 1981.

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

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini, 1992.

HUSSAIN, S. E.; RASHEEDUZZAFAR. Effect of temperature on pore solution composition in plain cements. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, v. 23, p. 1357-1368. USA: Pergamon Press, Lt, 1993.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA-INMET. 3º Distrito de Meteorologia-3º DISME. Seção de Observação e Meteorologia Aplicada-SEOMA. Banco de Dados Meteorológicos, 2003-2006.

ISAIA, G. C.; HELENE, P. R. L. Durabilidade de concreto de alto desempenho com pozolanas. In: SEMINÁRIO NORIE-UFRGS: QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: s. ed., dez. 1993, p. 13-33.

JAEGERMANN, C. Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to Mediterranean sea climate. **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 4, p. 333-339, July/Aug. 1990.

JONES, M. R.; MCCARTHY, M. J.; DHIR, R. K. **Chloride ingress and reinforcement corrosion in carbonated and sulphated concrete.** SWAMY, R. N. ed. Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. Proceedings. Sheffield, p. 365-376: Sheffield Academic Press, 1994.

KAYYALI, O. A.; HAQUE, M. N. Effect of carbonation on the chloride concentration in pore solution of mortars with and without fly ash. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**, v. 18, p. 636-648, 1988.

KRÖPP, J.; HILSDORF, H. K.; GRUBE, H.; ANDRADE, C.; NILSSON, L. O. Transport mechanisms and definitions. In: KRÖPP, J.; HILSDORF, H. K. (Ed.). **Performance criteria for concrete durability** (report 12-RILEM). London: E & FN Spon, 1995. p. 4-14.

LAMBERT, P.; PAGE C. L.; VASSIE, P. R. W. Investigations of reinforcement corrosion-electrochemical monitoring of steel in chloride contaminated concrete. **Materials and Structures**, v. 24, p. 351-358, 1991.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. Great Britain, Edward Arnould Ltda, 1970.

LIAUW, C. T. Influence of seawater on reinforced concrete buildings, **Build. Sci.**, v. 9, p. 125-130, Great Britain, 1974.

LÓPEZ, W.; GONZÁLES, J. A. Influence of degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**, v. 23, p. 368-376. USA: Pergamon Press, Lt, 1993.

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

MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Factors influencing chloride-induced corrosion of reinforcement in concrete. **Materials and Structures**, v. 25, p. 404-411, 1992.

MARINHA DO BRASIL – DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO – DHN. **.Net**. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br.htm>>. Acesso em: 03 fev. 2006.

MEIRA, G. R.; **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. 2004a. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004a.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; ANDRADE, M. C. Agressividade por cloretos em estruturas de concreto em ambientes de atmosfera marinha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45., 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: IBRACON, 2003.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; ANDRADE, M. C.; BORBA JÚNIOR, J. C. Penetração de cloretos em estruturas de concreto armado em zona de atmosfera marinha no Nordeste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON-Volume VI-Projeto de Estruturas de Concreto, 2004b. p. 1079-1089.

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

MEHTA, P. K. Durability of concrete – fifty years of progress ? In: Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto, Seminário NORIE-UFRS, Porto Alegre, 1993. **Anais...** Porto Alegre, s. ed., dez. 1993. Anexo.

MEHTA, P. K. Durability of concrete in marine environment – a review. In: PERFORMANCE OF CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENT, **ACI SP-65**, p. 1-20, 1980.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloretos**. 1996. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to linear regression analysis**. 3. ed. New York: John Willey & Sons, 2001.

MORCILLO, M.; CHICO, B.; MARIACA, L.; OTERO, E. Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site. **Corrosion Science**, n. 42, p. 91-104, 2000.

MORCILLO, M.; CHICO, B.; OTERO, E.; MARIACA, L. Effect of marine aerosol on atmospheric corrosion. **Materials Performance**, v. 38, p. 72-77, Apr. 1999.

MORCILLO, M. Fundamentos de la corrosión atmosférica de metales. Mapas de corrosividad atmosférica. In: CORROSIÓN Y PROTECCIÓN DE METALES EN LAS ATMÓSFERAS DE IBEROAMÉRICA – Proyecto Mycat – Programa CYTED. Madrid: CYTED, 1998. p. 1-52.

MOSKVIN, V.; IVANOV, F.; ALEKSEYEV, S.; GUZEYEV, E. **Concrete and reinforced concrete deterioration and protection**. Tradução V. Kolykhmatov. V. Moskvina, 1980.

NEVILLE, A. M. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. **Materials and Structures**, v. 28, p. 63-73. London, 1995.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso. São Paulo: Pini, 1982.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NINCE, A. A.; CLÍMACO, J. C. T. S. Levantamento de dados sobre deterioração de estruturas na região centro-oeste do Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1996. p. 414-424.

NUNES, J. L. O.; GUIMARÃES, A. T. C.; SILVEIRA, B. P.; GUIMARÃES, D. L. C.; OLIVEIRA, M. T.; RODRIGUES, N. D. Zona de névoa: Intensidade do ataque de cloretos em função da distância do concreto em relação à água do mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON-Volume III-Obras de Saneamento em Concreto, 2004. p. 1-11.

O'DOWD, C. D.; SMITH, M. H.; CONSTERDINE, I. A.; LOWE, J. A. Marine aerosol, sea-salt, and the marine sulphur cycle: a short review. **Atmospheric Environment**, v. 31, n. 1, p. 73-80, 1997.

OLLIVIER, J. P. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil: Durability of concrete - BT/PCC/192**. São Paulo, 1998.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**, v. 16, p. 79-86. USA: Pergamon Press, Lt, 1986.

PETELSKI, T.; CHOMKA, M. Marine aerosol fluxes in the coastal zone. **J. Aerosol Sci.**, v. 28, sup. 1, p. S105-S106, 1997.

PETELSKI, T.; CHOMKA, M. Sea salt emission from the coastal zone. **Oceanologia**, v. 42, n. 4, p. 399-410, 2000.

PFEIFER, D. W.; LANDGREN, J. R.; PERENCHIN, W. Concrete, chlorides, cover and corrosion. **PCI Journal**, v. 31, n. 4, p. 42-53, 1986.

PIAZZOLA, J.; DESPIAU, S. Contribution of marine aerosols in the particle size distributions observed in Mediterranean coastal zone. **Atmospheric Environment**, v. 18, p. 2991-3009, 1997.

POURBAIX, M. **Curso sobre corrosão eletroquímica**. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Industrial, 1961.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M. Application of reliability analysis to estimate the service life of lightweight high-strength concrete subjected to corrosion. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES: DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES AND PROTECTION SYSTEMS, s. ed., 1996, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: jun. 1996. p. 354-366.

PRUDÊNCIO JR., L. R. Durabilidade de concreto frente ao ataque de cloretos e sulfatos. In: SEMINÁRIO NORIE-UFRGS: QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: s. ed., dez. 1993, p. 1-12.

RASHEEDUZZAFAR. Influence of cement composition on concrete durability. **ACI Materials Journal**, v. 89, Nov./Dec. USA, ACI, 1992.

RASHEEDUZZAFAR.; AL-SAADOUN, S. S.; AL-GAHTANI, A. S.; DAKHIL, F. H. Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**, v. 20, p. 723-738, 1990.

ROBERTS, M. H. Effect of calcium chloride on the durability of pre-tensioned wire in prestressed concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 14, n. 42, p. 143-154, Nov. 1962.

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

SPIEL, D. E.; LEEUW, G. Formation and production of sea spray aerosol. **J. Aerosol Sci.**, v. 27, s. 1, p. S65-S66, 1996.

STEINOUR, H. H. **Influence of the cement on the corrosion behavior of steel in concrete**. Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, Skokie, Illinois, May 1964.

SURYAVANSHI, A.K.; SWAMY, R.N. Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**, v.26, n.5, p.729-741, May 1996.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Academic Press Limited, 1992.

TAYLOR, N. J.; WU, J. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. C5, p. 7355-7360, 1992.

THOMAS, M. D. A.; MATTHEWS, J. D. Carbonation of fly ash concrete. **Magazine of Concrete Research**. n. 160, p. 217-228, Sept. 1992.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. 1982. 469 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockolm, 1982.

TUUTTI, K. Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel. In: **PERFORMANCE OF CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENT, ACI SP-65**, p. 223-237, 1980.

VILLAVERDE, A.; GIUGLIANI, E.; VERÇOSA, E. J.; RECENA, F. A. P.; SOLANO, R. S. Avaliação estrutural - Subestação Rio Grande 2 – convênio PUCRS e CEEE. In: **REUNIÃO DO IBRACON-REIBRAC: MANUTENÇÃO E CONTROLE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**, 36., 1994, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: s. ed., set. 1994, p. 213-225.

WOODCOCK, A. H. Salt nuclei in marine air as a function of altitude and wind force. **Journal of Meteorology**, v. 10, p. 362-371, 1953.

ZEZZA, F.; MACRI, F. Marine aerosol and stone decay. **The Science of the Total Environment**, v. 167, p. 123-143, 1995.