

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ CARLOS BORBA JÚNIOR

**AGRESSIVIDADE AMBIENTAL EM ZONA DE ATMOSFERA
MARINHA: ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS E SUA
CONCENTRAÇÃO EM CONCRETOS NA REGIÃO SUDESTE**

Vitória
2011

JOSÉ CARLOS BORBA JÚNIOR

**AGRESSIVIDADE AMBIENTAL EM ZONA DE ATMOSFERA
MARINHA: ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS E SUA
CONCENTRAÇÃO EM CONCRETOS NA REGIÃO SUDESTE**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal do Espírito
Santo como parte dos requisitos para a
obtenção do título de mestre em Engenharia
Civil.

Área de concentração: construção civil.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Calmon
Nogueira da Gama

Co-orientador: Prof. Dr. Gibson Rocha Meira.

Vitória
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

B726a Borba Júnior, José Carlos, 1981-
Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha :
estudo da deposição de cloretos e sua concentração em
concretos na região sudeste / José Carlos Borba Júnior. – 2011.
150 f. : il.

Orientador: João Luiz Calmon Nogueira da Gama.
Coorientador: Gibson Rocha Meira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Concreto. 2. Sal. 3. Climatologia. I. Gama, João Luiz
Calmon Nogueira da. II. Meira, Gibson Rocha. III. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

JOSÉ CARLOS BORBA JÚNIOR

**AGRESSIVIDADE AMBIENTAL EM ZONA DE ATMOSFERA
MARINHA: ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS E SUA
CONCENTRAÇÃO EM CONCRETOS NA REGIÃO SUDESTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 25 de março de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Departamento de Engenharia Civil – UFES
Orientador

Prof. Dr. Gibson Rocha Meira
Departamento de Construção Civil – IFPB
Co-orientador

Profa. Dra. Desilvia Machado Louzada
Coordenação de Construção Civil – IFES
Examinador externo

Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Departamento de Engenharia Civil – UFES
Examinador interno

Dedico esse trabalho à minha mãe, pelo apoio, mesmo sem colher os frutos que ela desejava.

À minha amada Jacqueline pela força e incentivo nos momentos mais difíceis.

Aos meus mestres que contribuíram para a construção desse saber.

Agradecimentos

Ao final de todo trabalho, é praxe agradecer aqueles que contribuíram e se desculpar por alguns que foram esquecidos. Porém, essas linhas que escrevo são para nomear aqueles que contribuíram para esse trabalho e mesmo a minha fraca memória consegue listar os principais personagens dessa história.

Penso que seria injusto prestigiar alguns em detrimento de outros, listando seus nomes em ordem de importância, por isso resolvi listá-los em ordem cronológica, conforme foram surgindo em minha vida .

Em primeiro lugar, minha mãe, Hilda dos Santos Borba, que sempre foi um exemplo de vida para mim, com seu senso de justiça e sua maneira simples de ver as coisas. Às vezes penso que ela mais perdeu que ganhou com essa minha caminhada desde João Pessoa até Vitória para realizar uma antiga meta de vida. Porém, creio que um dia ainda poderei compensá-la de alguma forma.

À Deus, que sempre esteve em todos os momentos de minha vida, me conduzindo e sempre colocando bons espíritos em meu caminho.

Ao meu tio, Belmiro Fernandes Borba Filho, pelo apoio financeiro aos meus estudos e pelo carinho com que sempre me recebeu em sua casa em Recife.

Ao professor Gibson Rocha Meira, meu mestre, a quem atribuo meu interesse pelo conhecimento científico.

Ao professor João Luiz Calmon, que me recebeu em Vitória como seu filho e que brigou por esse trabalho com toda sua força.

Aos meus colegas de mestrado, Marcelo Ricardo Soares Meneguelli e Marcela Giacometti Avelar, pelas boas risadas que demos junto e pela amizade que perdura até os dias de hoje. Marcelo, inclusive, foi um grande contribuinte dessa dissertação, com suas idéias criativas e com sua imensa vontade de trabalhar e fazer as coisas acontecerem.

À Capes e ao CNPQ, pela concessão de bolsa para custeio do mestrado.

À todos do LEMAC, onde, mais que a realização de uma pesquisa, consegui conquistar boas amizades. Em especial ao técnico de laboratório Carlos Maria Izoton, pessoa de honestidade rara e imensa disposição para ajudar aos outros. Também, ao professor Fernando Avancini Tristão, homem com vontade de trabalhar que chega a cansar à todos em sua volta.

Ao pessoal da Infraero – Aeroporto de Vitória – que permitiram o uso do terreno para exposição, nas pessoas de José Cassemiro Resende, Gerente de segurança; Paulo Cesar Santos Martins, Gerente de operações e Silvério Gonçalves, Superintendente do Aeroporto.

Ao pessoal da Cesan, que possibilitaram o acesso ao terreno do aeroporto, nas pessoas do engenheiro Fernando Baptista e da engenheira Marina de Oliveira Polese.

Ao professor Pedro Sá e ao Sr. Geraldo, proprietário do terreno em Manguinhos, que possibilitou acesso e uso do terreno para as medidas mais próximas ao mar.

À todas as empresas que colaboraram cedendo material para pesquisa: Cimento MIZU e BASF aditivos.

Ao Laboratório de Caracterização Ambiental de Resíduos (Lacar), na pessoa do professor Florindo dos Santos Braga e ao Laboratório de Saneamento (Labsan), na pessoa do professor Sérgio Túlio Alves Cassini, pelo espaço cedido para realização das análises de cloretos.

À minha amada esposa Jacqueline Kelly Almeida Cunha, que soube incentivar, dar carinho, apoiar, cobrar, brigar, enfim, me deu todo o amor que precisei para concluir esse trabalho.

“Se vi mais longe foi por estar de pé, sobre os ombros de gigantes”

Sir Isaac Newton

RESUMO

Estruturas de concreto construídas próximas ao mar sofrem com a agressividade ambiental causada pelo aerossol marinho. O aerossol marinho é uma névoa de água salgada formada pela quebra de ondas do mar e pela fricção do vento na superfície da água. A quantidade de sal presente no aerossol é maior quanto mais fortes forem os ventos da região e quanto menor for a distância da costa. Esse aerossol é transportado pelo vento em direção ao continente, depositando-se sobre a superfície das estruturas de concreto. Os cloretos precipitados penetram no concreto por absorção e difusão iônica, podem causar a corrosão das armaduras caso sua concentração seja elevada. Esse trabalho visa medir a concentração de cloretos no aerossol marinho e correlacioná-la com a concentração de cloretos no concreto. Para tal, foram selecionados cinco pontos de exposição natural para medição da névoa salina dos quais três foram utilizados também para exposição do concreto à agressividade ambiental. Os pontos estão situados na região metropolitana da grande Vitória a 10, 65, 120, 240 e 520 metros distância ao mar, sendo os três mais distantes usados para a exposição dos concretos. A medição de cloretos no aerossol marinho foi feita através do ensaio da vela úmida. Medidas climatológicas também foram obtidas para caracterizar a região de estudo. Os concretos estudados foram moldados em corpos de prova prismáticos de concreto com diferentes traços, variando a relação água/cimento: 0,65, 0,55 e 0,45. Após 6 e 10 meses, foram tiradas amostras do concreto para determinação do teor de cloretos. Os resultados indicam que uma fraca relação entre a deposição de cloretos na atmosfera e a concentração de cloretos no concreto para a região de estudo. A deposição de cloretos, por sua vez, apresentou baixa correlação com o regime dos ventos. De toda forma, é possível estabelecer um comportamento da agressividade ambiental de acordo com as determinações obtidas.

Palavras-chave: Deposição de cloretos, zona de atmosfera marinha, aerossol marinho, climatologia, regime de ventos, durabilidade de estruturas, concreto, concentração superficial de cloretos, concentração de cloretos em concreto.

ABSTRACT

The concrete structures that are built close to the sea suffer the environmental aggression caused by the marine aerosol. The marine aerosol is a sea salt airborne formed by the ocean waves movement and by the friction of the wind against the surface of the ocean water. The quantity of salt found in the aerosol is bigger the more the winds of the region are and the less the distance from the coast is. That aerosol is transported by the wind towards the continent, and then it is deposited on the concrete surface structures. The chloride that is deposited enters into the concrete by an absorption and ionic diffusion, and may cause the corrosion of the framework. This work aims to measure the concentration of chlorides in the marine aerosol and associate it with the concentration of chloride in the concrete. To do that, five natural exposition point were selected to measure the sea salt airborne, being three of them used to expose the concrete to the environmental aggression. The points are located in the metropolitan region of Vitoria city at 60, 65, 120, 240 and 520 meters away from the sea, being the three farthest ones used to expose the concretes. The chloride measurements found in the marine aerosol was carried out by using the wet candle test. Climate measures were also taken to characterize the region under analyses. The analyzed concretes were modeled on concrete prism test specimens with different traces, varying the relation water/cement: 0,65, 055 e 0,45. After 6 and 20 months, samples of the concretes were taken to determine the chloride tenor. The results indicate a fragile relation between the deposition of chlorides in the atmosphere and the concentration of chlorides in the concrete for the analyzed region. The deposition of chlorides, in its turn, presented low correlation with the rate flow of the winds. Anyway, it is possible to establish a behavior of the environmental aggressiveness according to the obtained determinations.

Key words: chloride deposition; marine atmosphere zone; marine aerosol; climatology; rate of wind flow; structure durability; concrete; superficial concentration of chlorides; chloride concentration in concrete.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1.1 – CURVA DA JUREMA EM VITÓRIA (A); PRAIA DA COSTA EM VILA VELHA (B) – ALTA DENSIDADE DE EDIFÍCIOS À BEIRA-MAR. FOTOGRAFIAS: KADIDJA FERNANDES E FERNANDO FILHO, RESPECTIVAMENTE..... | 22 |
| FIGURA 1.2 – MAPA DA CIDADE DE VITÓRIA E PARTE DA REGIÃO METROPOLITANA. | 23 |
| FIGURA 2.1: ZONAS DE AGRESSIVIDADE AO CONCRETO | 31 |
| FIGURA 2.2: CONCENTRAÇÃO SALINA NAS DIFERENTES ZONAS (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996 – ADAPTADO)..... | 33 |
| FIGURA 2.3: RELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE DE PARTÍCULAS NA ATMOSFERA E TAMANHO DAS PARTÍCULAS (LIN <i>ET AL.</i> , 2007 – ADAPTADO). | 35 |
| FIGURA 2.4: RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DO VENTO E CONCENTRAÇÃO SALINA DE DIVERSOS ESTUDOS (MEIRA <i>ET AL.</i> , 2006, P. 5597 - ADAPTADO). | 36 |
| FIGURA 2.5: MODELO DE DEPOSIÇÃO DE CLORETOS (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996 - ADAPTADO)..... | 37 |
| FIGURA 2.6: RELAÇÃO ENTRE SALINIDADE E FORÇA DO VENTO (MORCILLO <i>ET AL.</i> , 2000 – ADAPTADO)..... | 38 |
| FIGURA 2.7: EFEITO DO DISTANCIAMENTO DO MAR NA CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA. | 39 |
| FIGURA 2.8: CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO E DA DISTÂNCIA AO MAR (CHOMKA; PETELSKI, 2001 – ADAPTADO). | 41 |
| FIGURA 2.9: DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS NA ATMOSFERA (PETELSKI; CHOMKA, 1998)..... | 41 |
| FIGURA 3.1: DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO TERMO DINÂMICO DO AÇO (POURBAIX, 1987)..... | 45 |
| FIGURA 3.2: CRESCIMENTO DA CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL COM O TEMPO, DE ACORDO COM A ZONA DE AGRESSIVIDADE (COSTA; APPLETON, 1999 - ADAPTADO). | 48 |
| FIGURA 3.3: PERFIS DE CLORETOS: (A) VARIAÇÃO COM A ZONA DE EXPOSIÇÃO; (B) COM A RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO (SANDBERG; TANG; ANDERSEN, 1998 - ADAPTADO). | 49 |
| FIGURA 3.4: VALORES DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE ACORDO COM A ZONA DE AGRESSIVIDADE, SEGUNDO VÁRIOS AUTORES..... | 52 |
| FIGURA 3.5: PERFIS DE CLORETOS PARA DIFERENTES RELAÇÕES A/C (MEIRA <i>ET AL.</i> , 2007B, P271 - ADAPTADO)..... | 53 |
| FIGURA 3.6: EFEITO DA CURA NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS PARA DIFERENTES RELAÇÕES A/C (JAERGEMANN, 1990). | 56 |
| FIGURA 3.7: EFEITO DA ABERTURA E DA PROFUNDIDADE E FISSURAS NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS (DE SCHUTTER, 1999). | 57 |
| FIGURA 3.8: REDE DE POROS DE CONCRETO EM DIFERENTES GS (GUIMARÃES, 2000). | 60 |
| FIGURA 3.9: POROSIDADE DO CONCRETO NÃO CARBONATADO (A); POROSIDADE DO CONCRETO CARBONATADO (B) (NGALA; PAGE, 1997). | 61 |
| FIGURA 4.1: FLUXOGRAMA GERAL DA PESQUISA. | 70 |
| FIGURA 4.2: ORGANOGRAMA DA EXPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS. | 71 |
| FIGURA 4.3: LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS NO TRABALHO (FOTOGRAFIA: GOOGLE MAPS, 2010)..... | 73 |
| FIGURA 4.4: ESQUEMA DE MONTAGEM DA VELA ÚMIDA, COM MEDIDAS EM MILÍMETRO (A) (ASTM, 2002). APARATO DE VELA ÚMIDA, EXPOSTO A 520M DE DISTÂNCIA DO MAR (B)..... | 76 |
| FIGURA 4.5: PONTO DE EXPOSIÇÃO A 70M DO MAR, PRESENÇA DE OBSTÁCULOS NA POR TRÁS DO APARATO..... | 78 |
| FIGURA 4.6: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE EXPOSIÇÃO UTILIZADOS NA PESQUISA. SITUAÇÃO NA GRANDE VITÓRIA (A); PONTOS LOCALIZADOS NO AEROPORTO (B); PONTO DE EXPOSIÇÃO EM MANGUINHOS (C). | 80 |
| FIGURA 4.7: CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS. | 83 |
| FIGURA 4.8: SEGREGAÇÃO DOS AGREGADOS E TEXTURA ÁSPERA (A); ESPALHAMENTO DO CONCRETO POR EXCESSO DE PLASTICIDADE (B)..... | 85 |
| FIGURA 4.9: FLUXOGRAMA DA DOSAGEM E PRODUÇÃO DO CONCRETO. | 86 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 4.10: FORMAS METÁLICAS PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA..... | 87 |
| FIGURA 4.11: EXPOSIÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO, PRÓXIMO AO APARATO DE VELA ÚMIDA. | 88 |
| FIGURA 4.12: RASPAGEM DO CONCRETO PARA RETIRADA DE AMOSTRA SUPERFICIAL. | 90 |
| FIGURA 4.13: PROTEÇÃO DOS CP ANTES DO CORTE (A); CORTE COM DISCO DIAMANTADO (B); CP APÓS CORTE E SECAGEM (C)..... | 91 |
| FIGURA 5.1: NORMAL CLIMATOLÓGICA NA CIDADE DE VITÓRIA (A) TEMPERATURA MÉDIA; (B) TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA ABSOLUTA (INMET, 2009)..... | 96 |
| FIGURA 5.2: NORMAL CLIMATOLÓGICA DE UMIDADE RELATIVA DO AR NA CIDADE DE VITÓRIA (INMET, 2009)..... | 96 |
| FIGURA 5.3: NORMAL CLIMATOLÓGICA DE PRECIPITAÇÃO NA CIDADE DE VITÓRIA (INMET, 2009). | 97 |
| FIGURA 5.4: TEMPERATURAS OBTIDAS NO PERÍODO DE ESTUDO. (A) MÉDIAS DIÁRIAS; (B) MÉDIAS, MÁXIMAS E MÍNIMAS MENSAS..... | 98 |
| FIGURA 5.5: UMIDADE RELATIVA DO AR OBTIDAS NO PERÍODO DE ESTUDO. (A) MÉDIAS DIÁRIAS; (B) MÉDIAS, MÁXIMAS E MÍNIMAS MENSAS..... | 99 |
| FIGURA 5.6: PRECIPITAÇÃO MEDIDA DURANTE O PERÍODO DE ESTUDO..... | 100 |
| FIGURA 5.7: VELOCIDADE MÉDIA DIÁRIA DOS VENTOS E DAS RAJADAS DE VENTO DURANTE O PERÍODO DE ESTUDO..... | 101 |
| FIGURA 5.8: VELOCIDADE MÉDIA MENSAL DOS VENTOS: TODOS OS VENTOS, APENAS AQUELES ACIMA DE 3 M/S E VENTOS MARINHOS. | 104 |
| FIGURA 5.9: FV PARA TODOS OS VENTOS, VENTOS ACIMA DE 3 M/S E VENTOS MARINHOS..... | 105 |
| FIGURA 5.10: DEPOSIÇÃO MENSAL DE CLORETOS, EM TODOS OS PONTOS DE EXPOSIÇÃO..... | 106 |
| FIGURA 5.11: DEPOSIÇÃO MENSAL DE CLORETOS, PONTOS DE EXPOSIÇÃO LOCALIZADOS EM MANGUINHOS. | 107 |
| FIGURA 5.12: DEPOSIÇÃO MENSAL DE CLORETOS, PONTOS DE EXPOSIÇÃO LOCALIZADOS NO AEROPORTO..... | 108 |
| FIGURA 5.13: VALORES MÉDIO DE DEPOSIÇÃO E INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AO MAR. | 109 |
| FIGURA 5.14: DEPOSIÇÃO DE CLORETOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AO MAR..... | 110 |
| FIGURA 5.15: DEPOSIÇÃO DE CLORETOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AO MAR EM DIFERENTES REGIÕES. | 111 |
| FIGURA 5.16: DEPOSIÇÃO DE CLORETOS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DOS VENTOS ACIMA DE 3 M/S. EXPOSIÇÃO EM MANGUINHOS..... | 112 |
| FIGURA 5.17: DEPOSIÇÃO DE CLORETOS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DOS VENTOS ACIMA DE 3 M/S. EXPOSIÇÃO NO AEROPORTO. | 113 |
| FIGURA 5.18: SOBREPOSIÇÃO DE RESULTADOS DE DEPOSIÇÃO (10M), FV MARINHO E FV ACIMA DE 3 M/S..... | 113 |
| FIGURA 5.19: CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS, CONCRETO T45..... | 116 |
| FIGURA 5.20: CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS, CONCRETO T55..... | 117 |
| FIGURA 5.21: CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS, CONCRETO T65..... | 117 |
| FIGURA 5.22: PERFIS DE CLORETOS EM CONCRETO, T45. | 118 |
| FIGURA 5.23: PERFIS DE CLORETOS EM CONCRETO, T55. | 119 |
| FIGURA 5.24: PERFIS DE CLORETOS EM CONCRETO, T65. | 119 |
| FIGURA 5.25: CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE CLORETOS NO CONCRETO EM FUNÇÃO DA DEPOSIÇÃO ACUMULADA DE CLORETOS NA ATMOSFERA. | 122 |
| FIGURA 5.26: EXTRAPOLAÇÃO DOS VALORES DE CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EM FUNÇÃO DA DEPOSIÇÃO ACUMULADA..... | 124 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| QUADRO 2.1: FAIXAS DE AGRESSIVIDADE DO AEROSSOL MARINHO (MEIRA, 2004, P. 324)..... | 32 |
| QUADRO 2.2: VALORES DE VELOCIDADE CRÍTICA..... | 38 |
| QUADRO 2.3: VALORES DE DEPOSIÇÃO DE CLORETOS EM DIVERSOS ESTUDOS REALIZADOS NO BRASIL..... | 42 |
| QUADRO 3.1: MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CLORETOS NO CONCRETO..... | 46 |
| QUADRO 3.2: DIMINUIÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO AO LONGO DO TEMPO – EXPOSIÇÃO A 10M DO MAR (MEIRA, 2004). | 51 |
| QUADRO 3.3: COEFICIENTE DE DIFUSÃO EM DIFERENTES PASTAS DE RELAÇÃO A/C 0,5 (PAGE; SHORT; EL TARRAS, 1981). | 55 |
| QUADRO 3.4: AUMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO COM A TEMPERATURA (PAGE; SHORT; EL TARRAS, 1981)..... | 58 |
| QUADRO 4.1: LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS NO TRABALHO ATRAVÉS DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS. | 72 |
| QUADRO 4.2: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE EXPOSIÇÃO PARA MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS NA ATMOSFERA. | 79 |
| QUADRO 4.3: PREVISÃO DA RETIRADA DE CP PARA MEDIDA DE CONCENTRAÇÃO DE Cl^- | 89 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| TABELA 4.1: MEDIDAS INICIAIS DE DEPOSIÇÃO DE CLORETOS. | 77 |
| TABELA 4.2: CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DURANTE O PERÍODO DE ESTUDO. | 79 |
| TABELA 4.3: CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO CP III 40 UTILIZADO NA PESQUISA. | 81 |
| TABELA 4.4: CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS. | 83 |
| TABELA 4.5: PROPRIEDADES FÍSICAS DO ADITIVO GLENIUM 51, FORNECIDAS PELO FABRICANTE (BASF, 2007). | 84 |
| TABELA 4.6: TRAÇOS INICIAIS DE DOSAGEM DO CONCRETO UTILIZADO NA PESQUISA. | 85 |
| TABELA 4.7: CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS UTILIZADOS NA PESQUISA. | 92 |
| TABELA 5.1: DIREÇÃO PREDOMINANTE DOS VENTOS DURANTE O PERÍODO DE ESTUDO. | 102 |
| TABELA 5.2: PROPORÇÃO DE VENTOS COM VELOCIDADE ACIMA DE 3 M/S E DOS VENTOS PROVENIENTES DO MAR, EM MANGUINHOS E NO AEROPORTO. | 103 |
| TABELA 5.3: DEPOSIÇÃO MÉDIA E DEPOSIÇÃO ACUMULADA EM CADA PONTO DE EXPOSIÇÃO. | 108 |
| TABELA 5.4: CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS UTILIZADOS NA PESQUISA – ESTADO FRESCO. | 114 |
| TABELA 5.5: CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS UTILIZADOS NA PESQUISA – ESTADO ENDURECIDO. | 115 |
| TABELA 5.6: VALORES DA FUNÇÃO DE DEPOSIÇÃO ACUMULADA <i>VERSUS</i> CONCENTRAÇÃO MÉDIA. | 121 |
| TABELA 5.7: VALORES DA FUNÇÃO DE DEPOSIÇÃO ACUMULADA <i>VERSUS</i> CONCENTRAÇÃO MÁXIMA. | 123 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*.
- CAD – Concreto de Alto Desempenho.
- CP – Corpos de Prova.
- CPIIF – Cimento Portland composto com fíler calcário.
- CPIII40 – Cimento Portland com escória de alto forno, com resistência à compressão de 40 MPa aos 28 dias.
- CPIV-RS – Cimento Portland pozolânico resistente à sulfatos.
- ENE – Leste-Nordeste, direção compreendida entre o sentido leste e o nordeste.
- GS – Grau de Saturação.
- IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.
- LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção.
- NBR – Norma Brasileira
- NBR NM – Norma Mercosul.
- REDEMET – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica
- TUP – Traço Unitário em Peso.
- Ufes – Universidade Federal do Espírito Santo.
- UR – Umidade Relativa do ar
- VU – Vela Úmida.
- ZAM – Zona de Atmosfera Marinha.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a/c – água/cimento.
- a/agl – água/aglomerante.
- $^{\circ}C$ – graus Celsius.
- C – Coulomb, unidade de carga elétrica.
- C_3A – aluminato tricálcico, componente do cimento.
- Cl^{-} – íon cloreto.
- D_{ac} – deposição acumulada de cloretos.
- cm^2/s – centímetro quadrado por segundo.
- C_s – Concentração superficial de cloretos.
- C_{max} – Concentração máxima de cloretos no concreto.
- C_{tot} – Concentração média de cloretos, após exposição.
- C_{tot0} – Concentração média de cloretos, antes da exposição.
- ϕ – diâmetro.
- $^{\circ}$ – graus, indica ângulo ou direção.
- HNO_3 – ácido nítrico.
- h – hora.
- hPa – hetopascal, unidade de pressão atmosférica.
- H_2SO_4 – ácido sulfúrico.
- kg/m^3 - quilograma por metro cúbico.
- $kJ.m^2$ - quilo Joule vezes metro quadrado, unidade de radiação solar.
- nm – nanômetro.
- μm – micrometro.
- mm – milímetro.
- m – metro.
- m^2 - metro quadrado.
- m/s – metro por segundo.
- mg – miligrama.
- ml – mililitro.
- MPa – mega Pascal.
- N – número de mol.
- Na – cátion sódio.
- $NaCl$ – cloreto de sódio.

- NaNO_3 – Nitrato de sódio.
- Na_2SO_4 – sulfato de sódio.
- pH – concentração de íon Hidrogênio.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| RESUMO | 0 |
| ABSTRACT | 9 |
| LISTA DE FIGURAS | 10 |
| LISTA DE QUADROS | 12 |
| LISTA DE TABELAS | 13 |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS | 14 |
| LISTA DE SÍMBOLOS | 15 |
| 1 INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA | 21 |
| 1.2 PERGUNTAS DA PESQUISA | 25 |
| 1.2.1 Perguntas relacionadas aos parâmetros climáticos | 25 |
| 1.2.2 Perguntas relacionadas ao concreto estudado | 25 |
| 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA | 26 |
| 1.3.1 Objetivos específicos | 26 |
| 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 27 |
| 2 DEPOSIÇÃO DE CLORETOS EM ZONA DE ATMOSFERA MARINHA | 29 |
| 2.1 ASPECTOS GERAIS | 30 |
| 2.2 FORMAÇÃO DO AEROSSOL | 32 |
| 2.3 REGIME DOS VENTOS | 34 |
| 2.4 DISTÂNCIA AO MAR | 39 |
| 2.5 ALTITUDE | 40 |
| 2.6 ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS NO BRASIL | 42 |
| 3 PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETO | 44 |
| 3.1 ASPECTOS GERAIS | 45 |
| 3.2 PARÂMETROS RELATIVOS AO INGRESSO DE CLORETOS | 47 |
| 3.2.1 Concentração superficial (C_s) | 47 |
| 3.2.2 Concentração total e perfis de cloretos | 49 |
| 3.2.3 Coeficiente de difusão | 50 |
| 3.3 INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS | 52 |
| 3.3.1 Relação água/cimento | 52 |
| 3.3.2 Tipo e consumo de cimento | 53 |
| 3.3.3 Uso de adições | 54 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.3.4 | Processo de cura | 55 |
| 3.3.5 | Presença de fissuras | 56 |
| 3.4 | INFLUÊNCIA DO AMBIENTE | 57 |
| 3.4.1 | Temperatura | 58 |
| 3.4.2 | Grau de Saturação (GS) | 58 |
| 3.4.3 | Carbonatação | 60 |
| 4 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 62 |
| 4.1 | VARIÁVEIS DA PESQUISA | 63 |
| 4.1.1 | Variáveis independentes | 63 |
| 4.1.2 | Variáveis dependentes | 65 |
| 4.1.3 | Variáveis de Controle | 68 |
| 4.1.4 | Visão geral da pesquisa | 69 |
| 4.2 | MONITORAMENTO AMBIENTAL | 72 |
| 4.2.1 | Medidas climatológicas | 72 |
| 4.2.2 | Monitoramento da deposição de cloretos | 75 |
| 4.2.3 | Escolha dos pontos de exposição | 76 |
| 4.3 | CONCRETOS ESTUDADOS | 80 |
| 4.3.1 | Materiais | 81 |
| 4.3.2 | Dosagem e produção do concreto | 84 |
| 4.4 | AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS EM ZONA DE ATMOSFERA MARINHA | 87 |
| 4.4.1 | Amostragem do concreto para determinação de cloretos | 89 |
| 4.5 | CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO | 92 |
| 5 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 94 |
| 5.1 | COMPORTAMENTO CLIMÁTICO | 95 |
| 5.1.1 | Temperatura | 97 |
| 5.1.2 | Umidade Relativa | 98 |
| 5.1.3 | Precipitação | 99 |
| 5.1.4 | Velocidade e direção dos ventos | 100 |
| 5.2 | DEPOSIÇÃO DE CLORETOS | 105 |
| 5.2.1 | Influência da distância ao mar | 108 |
| 5.2.2 | Influência do regime dos ventos | 111 |
| 5.3 | CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO | 114 |
| 5.3.1 | Estado fresco | 114 |
| 5.3.2 | Estado endurecido | 114 |
| 5.4 | CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS | 115 |
| 5.5 | PERFIS DE CLORETOS DOS CONCRETOS EXPOSTOS | 118 |
| 5.5.1 | Concentração média de cloretos no concreto e sua relação com a deposição de cloretos na atmosfera. | 120 |
| 5.5.2 | Concentração máxima de cloretos no concreto e sua relação com a deposição de cloretos na atmosfera. | 123 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 126 |
| 6.1 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 127 |

| | | |
|-----|--|------------|
| 6.2 | DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA | 129 |
| 6.3 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 129 |
| | BIBLIOGRAFIA | 131 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 131 |
| | NORMAS TÉCNICAS REFERENCIADAS | 136 |
| | BIBLIOGRAFIA CONSULTADA | 139 |
| | NORMAS TÉCNICAS CONSULTADAS | 139 |
| | APÊNDICES | 141 |
| | APÊNDICE A: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO | 142 |
| | APÊNDICE B: DEPOSIÇÃO ACUMULADA DE CLORETOS | 146 |
| | ANEXOS | 148 |
| | ANEXO A: TABELA DE DIREÇÃO DOS VENTOS | 149 |

1 INTRODUÇÃO

Esse trabalho faz parte de um projeto integrado sobre o estudo da deposição de cloretos em zona de atmosfera marinha e sua relação com a penetração de cloretos no concreto. Esse projeto tem um objetivo maior que é o de caracterizar essa zona de agressividade em diversos pontos do litoral brasileiro e verificar como as características de cada ambiente influem no comportamento do concreto armado em relação à durabilidade.

Neste capítulo, aborda-se alguns aspectos ligados à durabilidade das estruturas de concreto armado, observando os fatores econômicos e sociais e a importância do tema discutido. Também serão apresentados os objetivos da pesquisa e a estrutura da dissertação.

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado parte da definição do meio ambiente em que essa estrutura está inserida. A norma brasileira que trata do projeto das estruturas de concreto, NBR 6118 (ABNT, 2007), divide a agressividade ambiental em quatro classes e determina parâmetros de projeto a serem obedecidos em cada uma dessas regiões, como cobrimento mínimo e resistência mecânica característica. Dentre essas regiões definidas pela NBR 6118 (ABNT, 2007), o ambiente marinho é classificado como agressividade forte, com risco grande de deterioração da estrutura.

O ambiente marinho é caracterizado por ter uma atmosfera com forte presença de cloretos nas faixas mais próximas ao mar e uma diminuição dessa concentração com o afastamento da costa. Tal ambiente é chamado de Zona de Solo por Swamy, Hamada e Laiw (1994) como uma região que não recebe diretamente os respingos provenientes do mar, mas sofre ação do aerossol marinho desprendido no movimento das ondas e levado ao continente pelo vento.

Estes cloretos presentes na atmosfera se depositam na superfície das estruturas de concreto e são transportadas para o interior das estruturas através da sua rede de poros. As formas de transporte dos cloretos em concreto serão discutidas no capítulo 3. Ao chegarem à região adjacente da armadura, se acumulam até atingir quantidade suficiente para provocar a corrosão do aço, determinando o fim da vida útil de projeto (TUUTTI, 1982). Dessa forma, o estudo da concentração de cloretos na atmosfera pode servir como indicativo da quantidade de cloretos no concreto, prevendo, indiretamente, a vida útil das estruturas.

Nas cidades litorâneas brasileiras de médio e grande porte há, em geral, uma grande densidade de edifícios em ambiente marinho (Figura 1.1). Os problemas de corrosão são comuns nesses prédios. Em pesquisa realizada por Carmona e

Marega (1988¹ *apud* MEIRA, 2004) em São Paulo, detectou-se que 30% dos problemas em edifícios são relativos à corrosão.

Não raro, acidentes estruturais envolvendo corrosão de estruturas em ambiente marinho são divulgados. Após breve pesquisa na rede mundial dos computadores, é possível encontrar algumas manchetes de notícias relacionadas ao tema:

- “Desabamento de marquise de hotel mata duas pessoas e deixa feridos no Rio” (FOLHA ONLINE, 2007)
- “Parapeito de prédio no centro de Vitória² desmorona na manhã de sábado” (FOLHA VITÓRIA, 2009).
- “Marquise em ponto de ônibus desaba e uma pessoa fica ferida em Vitória” (GAZETA ONLINE, 2007).



Figura 1.1 – curva da Jurema em Vitória (a); Praia da Costa em Vila Velha (b) – alta densidade de edifícios à beira-mar. Fotografias: Kadidja Fernandes e Fernando Filho, respectivamente.

A cidade de Vitória é cercada pela baía de mesmo nome, que percorre parte da sua Região Metropolitana (Figura 1.2). A baía de Vitória aumenta a área de ambiente marinho da cidade, tornando-a ainda mais suscetível à degradação das estruturas de concreto. Segundo dados da prefeitura (PMV, 2009) são quase 100 prédios que necessitam de manutenção corretiva no centro da cidade, pois estão pondo em risco os pedestres que transitam em suas calçadas. Em pesquisa realizada nos prédios

¹ CARMONA, A.; MAREGA, A. Retrospectiva da patologia no Brasil – estudo estatístico. In: Colloquia’88 – Jornada en español y português sobre estructuras y materiales, 1988, Madrid - Espanha. **Anais...** Madrid: Colloquia, 1988. p. 101-123.

² O centro da cidade de Vitória fica na região portuária, à beira da baía de Vitória.

da Praia do Canto os problemas relacionados à corrosão equivalem a 23% das patologias ocorridas na estrutura dos edifícios (GRIJÓ; NOGUEIRA; REGIANI, 2007). O mais preocupante é que, segundo esses autores, a ocorrência da corrosão se dá na faixa de idade entre 5 a 10 anos na maioria dos casos, tempo bem menor que os 25 anos, no mínimo, de vida útil impostos pela NBR 15575 (ABNT, 2010) para o sistema estrutural de edifícios de até cinco andares³.

A pouca durabilidade das estruturas causa três tipos de problemas: econômico, ambiental e social. O primeiro, diz respeito aos custos envolvidos na manutenção ou na recuperação das estruturas degradadas. Esses custos nem sempre são contabilizados no orçamento da obra e aumentam exponencialmente com o tempo. Sitter⁴ (1983 *apud* ANDRADE, 2005a) diz que o custo de uma falha de construção aumenta em cinco vezes com o tempo de intervenção – a chamada Lei dos Cinco. Esse autor diz que a cada unidade monetária gasta na fase de projeto e execução (\$ 1,00) equivale a \$5,00 gastos na fase de manutenção, \$ 25,00 com pequenos reparos e um custo de \$125,00 para renovação ou recuperação. Portanto, quanto menor for o tempo de intervenção, menor também será o seu custo.



Figura 1.2 – mapa da cidade de Vitória e parte da Região Metropolitana.

³ A NBR 15575 determina o tempo mínimo de 25 anos, mas é aceito no meio técnico e científico que a estrutura dos edifícios tenha, ao menos, 50 anos de vida útil.

⁴ SITTER, W. R. **Costs for service life optimization the “law of fives”**. Comitê Euro-International du Beton – CEB. Technical report. Copenhagen, Denmark, n. 152, p. 131 – 134, 1983.

O custo ambiental da baixa durabilidade se deve ao fato que será preciso retirar matérias-primas de jazidas naturais antes do necessário, acarretando em maior custo ambiental. Já o impacto social pode ser considerado pela inacessibilidade à serviços, como no caso de uma ruína de uma ponte ou de um prédio público: caso a estrutura esteja comprometida, essas obras já não podem mais cumprir suas funções. Caso a obra seja residencial há o custo social da perda de habitação para as famílias atingidas. Em nosso país, onde o *déficit* habitacional é grande, essa é uma perda a ser considerada.

Portanto, estudos ligados à durabilidade de estruturas são importantes sob vários aspectos. No Brasil, desde a década de 90, vários trabalhos sobre durabilidade foram desenvolvidos pelo meio científico. Andrade (2005b) enumera três razões principais para a ampliação da discussão do tema: aumento do emprego do concreto em ambientes agressivos, elevados custos de construção e manutenção de estruturas e desenvolvimento contínuo dos materiais empregados, os quais ainda não têm dados disponíveis suficientes sobre seu desempenho ao longo do tempo.

Neste cenário, as pesquisas realizadas que tratam da vida útil geralmente são feitas em laboratório, para acelerar as condições ambientais. Ainda são poucas as pesquisas que estudam o comportamento dos materiais expostos à ação natural do meio ambiente, como a atmosfera marinha.

Os estudos realizados por Meira (2004) foram os primeiros a discutirem o problema da durabilidade das estruturas de concreto armado em zona de atmosfera marinha de forma mais aprofundada, na cidade de João Pessoa. Porém, devido à imensidão territorial de nosso país, estudos semelhantes se fazem necessários nas diversas regiões, pois seus resultados dependem das características climáticas de cada local de estudo. Trabalhos semelhantes ao de Meira (2004) vêm sendo desenvolvidos em Pernambuco e no Rio Grande do Sul, o litoral da região sudeste ainda não foi, até o momento, contemplado com pesquisas em ambiente natural sobre a agressividade marinha.

1.2 PERGUNTAS DA PESQUISA

Algumas perguntas específicas sobre a finalidade do projeto e que serão respondidas ao longo do trabalho, foram desenvolvidas com a finalidade de conduzir a um melhor planejamento da pesquisa. Essas perguntas estão agrupadas em relação aos parâmetros climáticos e ao concreto estudado na pesquisa.

1.2.1 Perguntas relacionadas aos parâmetros climáticos

P_{clim1} – qual a quantidade de cloretos presentes na atmosfera da grande Vitória a cada dia?

P_{clim2} – é possível estabelecer uma relação matemática entre essa quantidade medida e a distância em relação ao mar?

P_{clim3} – qual a influência da velocidade do vento nas medidas de deposição de cloretos?

1.2.2 Perguntas relacionadas ao concreto estudado

P_{CONC1} – qual a influencia do relação água/cimento na concentração de cloretos no concreto?

P_{CONC2} – como se comportará a concentração superficial (C_s) de cloretos no concreto ao longo do tempo?

P_{CONC3} – qual a relação entre a C_s e a precipitação pluviométrica?

P_{CONC4} – há relação entre a deposição de cloretos na atmosfera e a concentração total de cloretos no concreto?

P_{CONC5} – é possível utilizar a equação proposta por Meira (2004) para estabelecer a relação dita acima?

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral dessa pesquisa é caracterizar a presença de cloretos em ambientes de atmosfera marinha na região metropolitana da grande Vitória e verificar a sua influência na quantidade total de cloretos presentes em concretos.

1.3.1 Objetivos específicos

1. Quanto à deposição de cloretos, verificar sua relação com as seguintes variáveis:
 - a. a distância em relação ao mar;
 - b. o regime dos ventos, principal variável climatológica que influenciará nos resultados;
2. Quanto aos concretos analisados, verificar sua relação com as seguintes variáveis:
 - a. estudar a influência da variação da relação água/ cimento na quantidade total de cloretos no concreto;
 - b. estudar a concentração superficial de cloretos no concreto ao longo do tempo;
 - c. confrontar a concentração superficial de cloretos no concreto com os parâmetros ambientais, sobretudo precipitação;
 - d. estudar a relação entre a concentração de cloretos na atmosfera e a concentração total de cloretos nos concretos estudados, ao final do projeto;
3. Verificar a validade da equação proposta por Meira (2004) para prever a quantidade total de cloretos no concreto a partir da deposição de cloretos na atmosfera, equação essa válida para as condições ambientais da região litorânea do nordeste brasileiro.
4. Comparar os resultados de deposição de cloretos obtidos nessa pesquisa com os resultados de outros trabalhos feitos em diferentes regiões do Brasil.
5. Gerar conhecimento a fim de se propor construções mais duráveis e, por conseguinte, mais econômicas em Zona de Atmosfera Marinha (ZAM).
6. Ampliar a pesquisa e o desenvolvimento de um estado da arte mais amplo sobre o assunto, considerando os parâmetros ambientais locais.
7. Contribuir com o desenvolvimento da pesquisa e geração de trabalhos com a finalidade de atender ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esse presente trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos, além dos anexos e referências bibliográficas. A seguir será apresentada uma sucinta descrição a respeito do conteúdo de cada capítulo.

No capítulo 1 é dada uma breve introdução dos macro-temas tratados na dissertação, como a justificativa e importância do trabalho, além dos objetivos e apresentação da estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura sobre deposição de cloretos em zona de atmosfera marinha, seus mecanismos de formação e os parâmetros que influem em seu comportamento. Também será feita uma breve revisão dos estudos de aerossol marinho realizados no Brasil.

O Capítulo 3 dá continuidade à revisão bibliográfica, abordando agora o tema penetração de cloretos em concreto. Uma análise sobre os mecanismos de transporte de cloretos em concreto e dos fatores que contribuem para esse transporte é feita com base em estudos realizados no mundo. Também será feita uma breve consideração de como a presença de cloretos atua na durabilidade das estruturas de concreto armado.

O Capítulo 4 trata da metodologia do programa experimental, onde estão descritas as variáveis, os materiais empregados, os concretos e os corpos de prova adotados nesta pesquisa, além dos métodos utilizados para a obtenção dos resultados, visando atingir os objetivos propostos.

No Capítulo 5 estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Inicialmente são abordados os resultados relativos aos parâmetros ambientais, ou seja, o comportamento do meio ambiente durante o período de estudo. Em seguida é apresentada uma breve caracterização dos concretos utilizados no trabalho e posteriormente são mostrados e discutidos os resultados da concentração de cloretos ao longo do tempo, bem como suas correlações com os demais parâmetros.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões a que se chegou neste programa experimental. Também são traçadas considerações a respeito do estudo e feitas sugestões para futuras pesquisas que venham a contribuir e ampliar o conhecimento principalmente no estudo da durabilidade de concretos em zona de atmosfera marinha.

Ao final do trabalho segue-se a lista completa das referências bibliográficas, da bibliografia consultada e das normas técnicas utilizadas no trabalho.

2 DEPOSIÇÃO DE CLORETOS EM ZONA DE ATMOSFERA MARINHA

A deposição de cloretos é o depósito de partículas de íons cloreto presentes na atmosfera, nas superfícies situadas em zona de atmosfera marinha. O estudo da deposição compreende o entendimento de seus mecanismos de formação e dos fatores que influenciam em seu comportamento.

Neste capítulo, aborda-se o tema com base em trabalhos realizados em vários lugares do mundo e nas pesquisas já realizadas no Brasil.

2.1 ASPECTOS GERAIS

O aerossol marinho é a névoa formada de água mais partículas de sal geradas no mar e transportada para o continente pela ação do vento. O comportamento do aerossol é fartamente estudado por pesquisadores em todo o mundo, entretanto, grande parte desses estudos é voltada ao tema “poluição do ar”. Como exemplo, pode-se citar os trabalhos de McKay *et al.* (1994), Yin *et al.* (2005) e Lee e Moon (2006). Esses dois últimos, realizados na China, fazem parte de uma série de estudos de pesquisadores chineses sobre o comportamento da poluição do ar antes das Olimpíadas de Pequim, realizadas em agosto de 2008. Tais estudos são importantes do ponto de vista do comportamento da distribuição das partículas, mas tratam a presença de cloretos de forma secundária, pois o objetivo principal é observar o comportamento das partículas de poluição.

O aerossol marinho é uma das fontes naturais de cloretos para o ataque nas estruturas de concreto armado. Em estudo realizado na China, Wu, Tie e Deng (2006) concluíram que a taxa de íons cloretos, em números equivalentes por metro cúbico, varia entre 2 e 15% do total de partículas presentes na atmosfera, dependendo do ambiente.

Os ambientes marinhos podem ser divididos em zonas de agressividade ao concreto, conforme a posição em que a estrutura está localizada. Swammy, Hamada e Laiw (1994) classificaram cinco zonas distintas de agressividade, de acordo com a presença de cloretos no concreto (Figura 2.1).

- Zona submersa: o concreto fica sempre abaixo do nível do mar e a fonte de cloretos é a própria água. Apresenta maior concentração de cloretos, mas a pouca presença de oxigênio não permite a corrosão.
- Zona de flutuação: o concreto fica num local intermediário, entre os níveis máximos e mínimos do mar, sofrendo ciclos de molhagem e secagem de acordo com a maré. Há alta concentração de cloretos e presença de oxigênio. É a mais agressiva das zonas.
- Zona de respingo: o concreto fica acima do nível do mar e bem próximo desse, e recebe os respingos do movimento da maré. É a segunda região mais agressiva.
- Zona de spray: o concreto fica hora em zona de respingo, quando os ventos estão fortes, hora em zona de solo, com os ventos fracos.

- Zona de solo: o concreto recebe apenas a névoa formada pelo aerossol marinho. Ela inicia na faixa de 10 a 20m de distância ao mar.

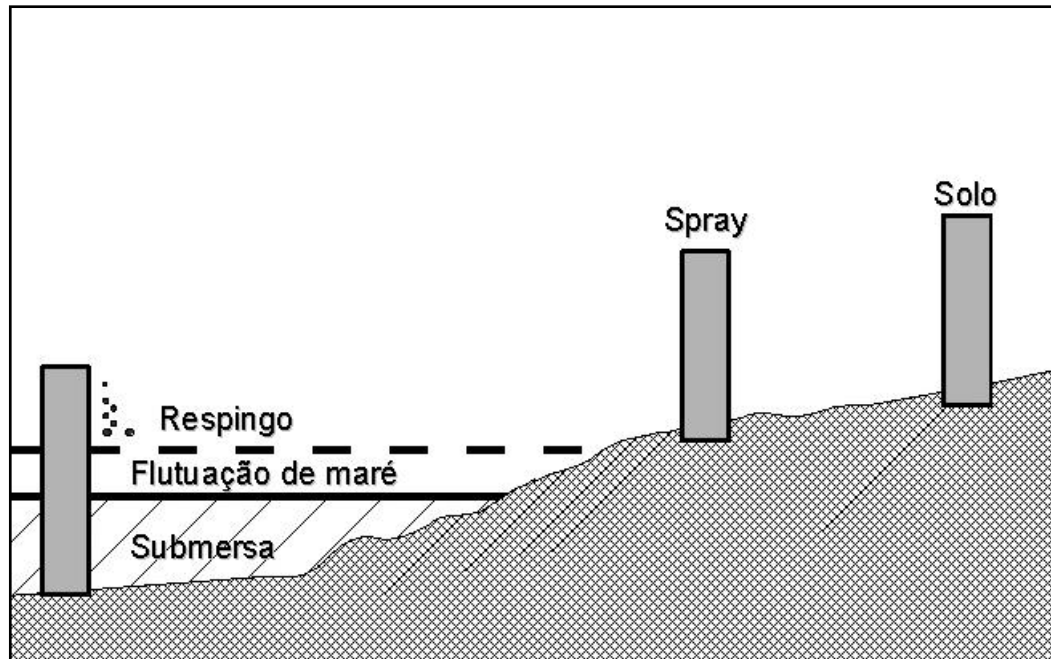


Figura 2.1: zonas de agressividade ao concreto

Tang e Andersen (2000) também sugeriram uma divisão para as faixas de agressividade marinha. Esses autores classificaram as regiões como zona submersa, zona de respingo e zona de atmosfera (equivalente à zona de solo da definição anterior). A NBR 6118 (ABNT, 2007) tem uma classificação semelhante, dividindo as faixas de agressividade marinha em submersa, ambiente marinho e respingo de maré. Nesse trabalho, adota-se a classificação de Swammy, Hamada e Laiw. (1994), com a ressalva de que a zona de solo se chamará “Zona de Atmosfera Marinha”, expressão mais utilizada pelo meio científico brasileiro.

Meira (2004) ressalta a importância do estudo das microrregiões de agressividade e divide a agressividade da Zona de Atmosfera Marinha (ZAM) em três microrregiões, conforme o Quadro 2.1. Essa classificação foi feita para uma região com ventos de baixa intensidade – até 5 m/s – o que diminui a presença salina na atmosfera.

Morcillo *et al.* (2000), em estudo realizado em região de maior intensidade de ventos – com velocidades de até 18 m/s – e, portanto, de maior presença salina, consideraram como agressividade baixa os valores de deposição abaixo de 100 mgCl⁻/m².dia e agressividade elevada partir de 400 mgCl⁻/m².dia. Esse fato ilustra a

importância do comportamento ambiental das micro-regiões na consideração da agressividade.

| Faixas de agressividade | | Distâncias aproximadas para o local de estudo (m) |
|-------------------------|--|---|
| Nível de agressividade | Deposição média (mgCl/m ² .dia) | |
| Elevada | Acima de 100 | Até 100 |
| Moderada | Entre 10 e 100 | Entre 100 e 750 |
| Mínima | Menor que 10 | Acima de 750 |

Quadro 2.1: faixas de agressividade do aerossol marinho (MEIRA, 2004, p. 324).

2.2 FORMAÇÃO DO AEROSSOL

O aerossol marinho é formado, principalmente, na zona de surfe, zona do mar próximo à costa onde ocorre a quebra de ondas (McKAY *et al.*, 1994). Nessa zona, são formadas bolhas pelo aprisionamento do ar na superfície da água com o movimento da quebra de ondas. A agitação da superfície do mar pelo vento também gera bolhas de ar que explodem e formam gotículas de sal, que podem ser em forma de jorro, filme ou espuma (FITZGERALD, 1991; O'DOWD *et al.*, 1997). Dessa forma, locais de mar agitado geram maior quantidade de aerossol e a concentração salina na ZAM também aumentará. Porém, regiões de mar aberto contribuem para a formação do aerossol, embora de forma menor.

Outra forma importante de contribuição, pois gera partículas de maior tamanho, é o efeito da produção de gotas a partir da agitação das cristas das ondas, que são levadas ao continente pelo vento (FITZGERALD, 1991; TAYLOR; WU, 1992). Uma terceira via de formação do aerossol é a evaporação de água do mar, que carrega consigo partículas de sal. Essa última é a parcela de menor contribuição e o efeito mecânico é predominante na geração da névoa.

Após a geração das gotas, estas entram em equilíbrio com o ambiente e, dependendo das condições climáticas, assumem forma de partículas salinas ou soluções salinas de diferentes concentrações. Entre 70 e 74% de umidade relativa, as gotículas supersaturadas se tornam sólidas (ZEZZA; MACRI, 1995).

Após a sua geração, o aerossol marinho é transportado em direção ao continente. A quebra de ondas produz um fluxo de ar turbulento vertical, responsável pela concentração atmosférica no mar. O fluxo horizontal do ar, porém, é o principal responsável pelo transporte das partículas do aerossol (PETELSKI; CHOMKA, 1997). Conforme o afastamento do mar ocorre uma diminuição da concentração salina (PETELSKI; CHOMKA, 1997; GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996). A Figura 2.1 mostra esse comportamento combinado: na zona costeira a inclinação da reta da função velocidade *versus* concentração é maior, enquanto que no continente essa mesma inclinação diminui com o distanciamento ao mar.

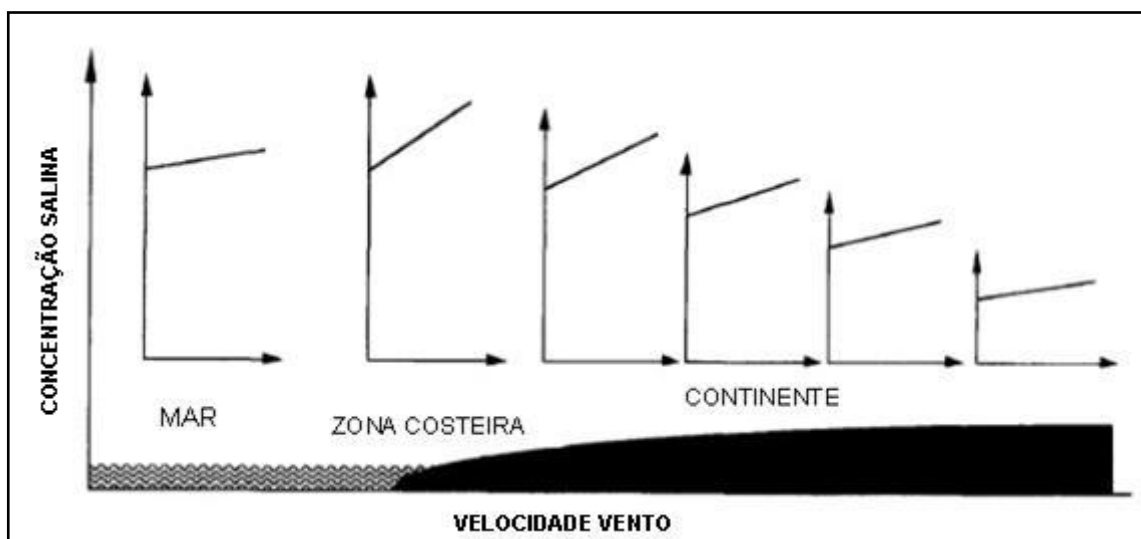


Figura 2.2: concentração salina nas diferentes zonas (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996 – adaptado).

Em áreas marinhas, as partículas de NaCl dominam a concentração da atmosfera. Em condições normais, a relação Cl^-/Na^+ é em torno de 1,15 (MARTENS *et al.*, 1973⁵ *apud* WU; TIE; DENG, 2006). Segundo os mesmos autores, há várias formas de separar os dois íons, porém as mais aceitas são as que consideram a atuação do ácido nítrico (HNO_3) e do ácido sulfúrico (H_2SO_4):



⁵ Martens, C.; Wesolowski, J.; Harriss, R.; Kaifer, R. Chlorine Loss from Puerto Rican and San Francisco Bay Area Marine Aerosols. **Journal of Geophysical Research**, 78 (36) p. 8778–8792. 1973.



O aerossol marinho é formado de um amplo espectro de tamanho de partículas. As partículas maiores passam menos tempo no ar, aparecem em menor quantidade e dominam a concentração (McKAY *et al.*, 1994). Segundo o mesmo autor, essas partículas têm tempo de residência no ar de 1 e 65 segundos.

Quanto ao tamanho, as partículas são classificadas em dois grupos: partículas depositáveis com diâmetro acima de 10 μm e partículas flutuantes com $\phi < 10 \mu\text{m}$ (AMBLER; BAIN, 1955). Segundo Morcillo *et al.* (2000), o diâmetro das partículas do aerossol mede entre 0,1 e 400 μm .

Em pesquisa realizada na China, Lin *et al.* (2007) mediram a concentração das partículas de diâmetro entre 15 e 600 nm e observou que o número de partículas na atmosfera aumenta com o diâmetro das partículas até certo valor de diâmetro, próximo aos 100 nm e decresce a partir desse valor (Figura 2.3). Esses resultados foram obtidos para valores de diâmetro de partículas abaixo de 0,6 μm e corroboram os resultados encontrados em estudos anteriores (AMBLER; BAIN, 1955; MORCILLO *et al.*, 2000) para diâmetros acima de 0,1 μm .

2.3 REGIME DOS VENTOS

O processo de formação do aerossol, descrito no item anterior, explica a relação entre a velocidade do vento e a concentração de sais no aerossol.

Estudos realizados desde a década de 50 mostram que a concentração salina cresce exponencialmente com a velocidade dos ventos. O primeiro deles foi apresentado por Woodcock (1953), seguindo-se outros, como os trabalhos de Lovett (1978), Taylor e Wu (1992) e Gustafsson e Franzén (1996). Segundo Lovett (1978) esse comportamento se deve ao fato de que o aumento da velocidade do vento provoca um incremento na quantidade de partículas no aerossol e facilita a geração de maior tamanho e maior massa. McDonald, Unni e Duce (1982) falam sobre a maior participação das partículas maiores no espectro que compõe o aerossol com o

aumento da força dos ventos. Ou seja, o aumento da velocidade dos ventos faz com que um número maior da quantidade de partículas de todos os tamanhos componham o aerossol e, em especial, possibilita que as partículas maiores possam ter uma maior participação.

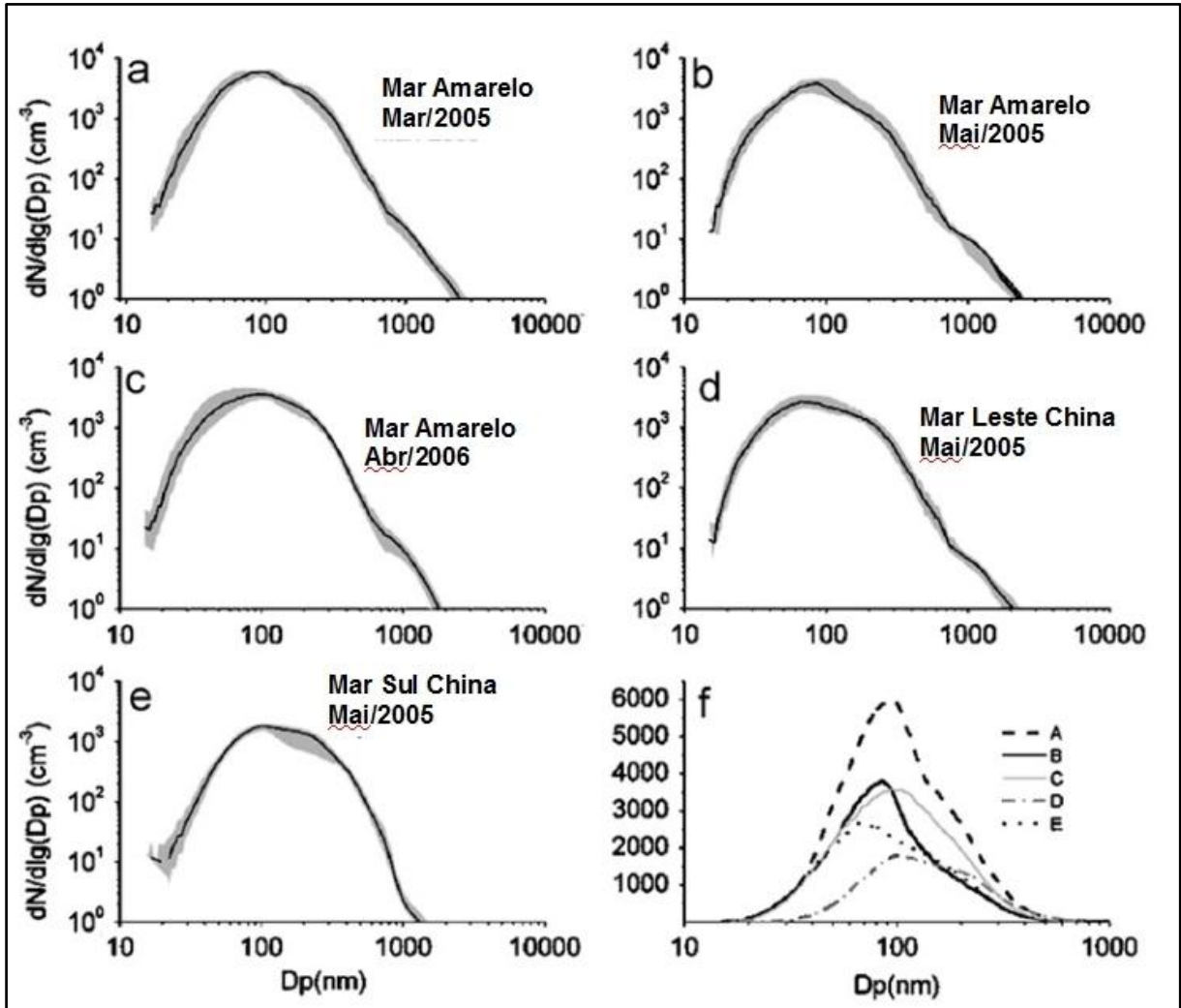


Figura 2.3: relação entre quantidade de partículas na atmosfera e tamanho das partículas (LIN *et al.*, 2007 – adaptado).

A Figura 2.4 mostra os resultados de alguns desses estudos que relacionam concentração salina *versus* velocidade do vento. Segundo vários autores (TAYLOR; WU, 1992; McKAY *et al.*, 1994; GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996), essa relação segue a seguinte função empírica:

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

(Equação 3)

Onde:

- s – concentração salina no aerossol;
- v – velocidade do vento;
- A, B – constantes que dependem do ambiente.

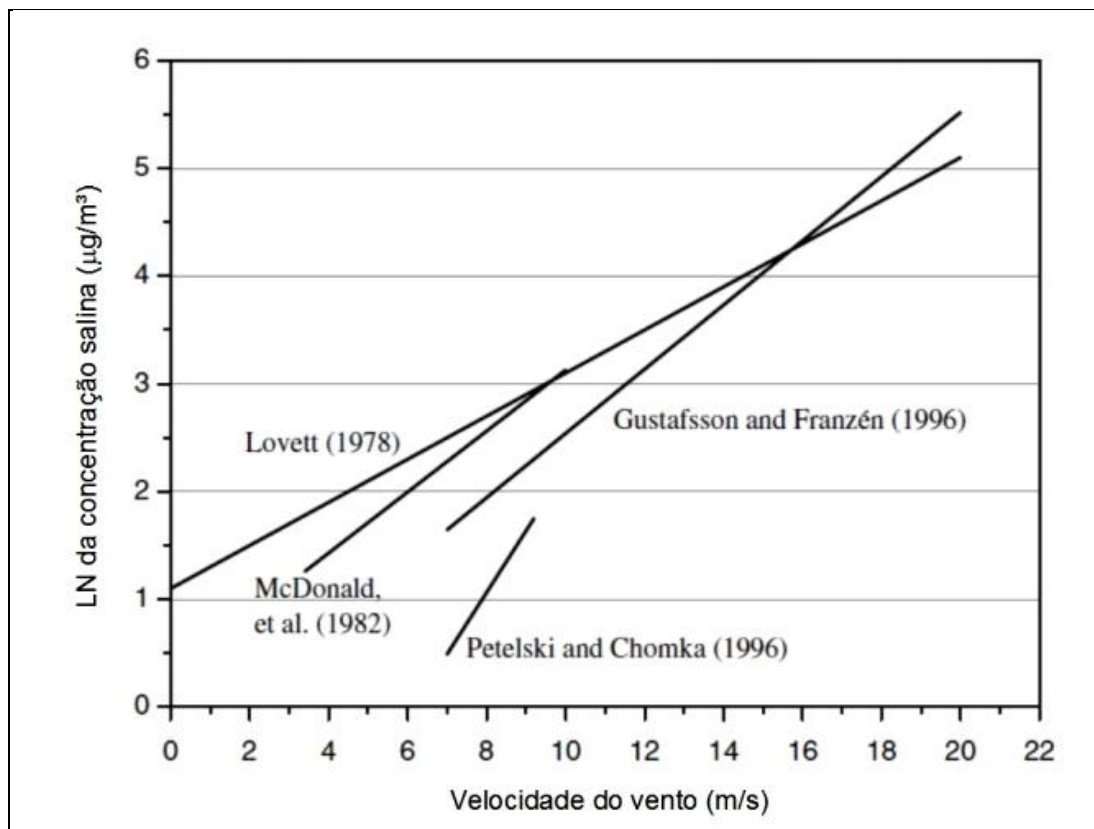


Figura 2.4: relação entre velocidade do vento e concentração salina de diversos estudos (Meira *et al.*, 2006, p. 5597 - adaptado).

Quando o aerossol chega ao continente, o vento continua influenciando a concentração salina. Quanto maior a intensidade do vento, mais partículas grandes serão carregadas a distâncias maiores da costa antes de se depositarem. Conforme já dito, as partículas de maior diâmetro têm mais participação na concentração de cloretos na atmosfera. A Figura 2.5 exemplifica o comportamento da deposição em relação ao vento e com o afastamento da costa.

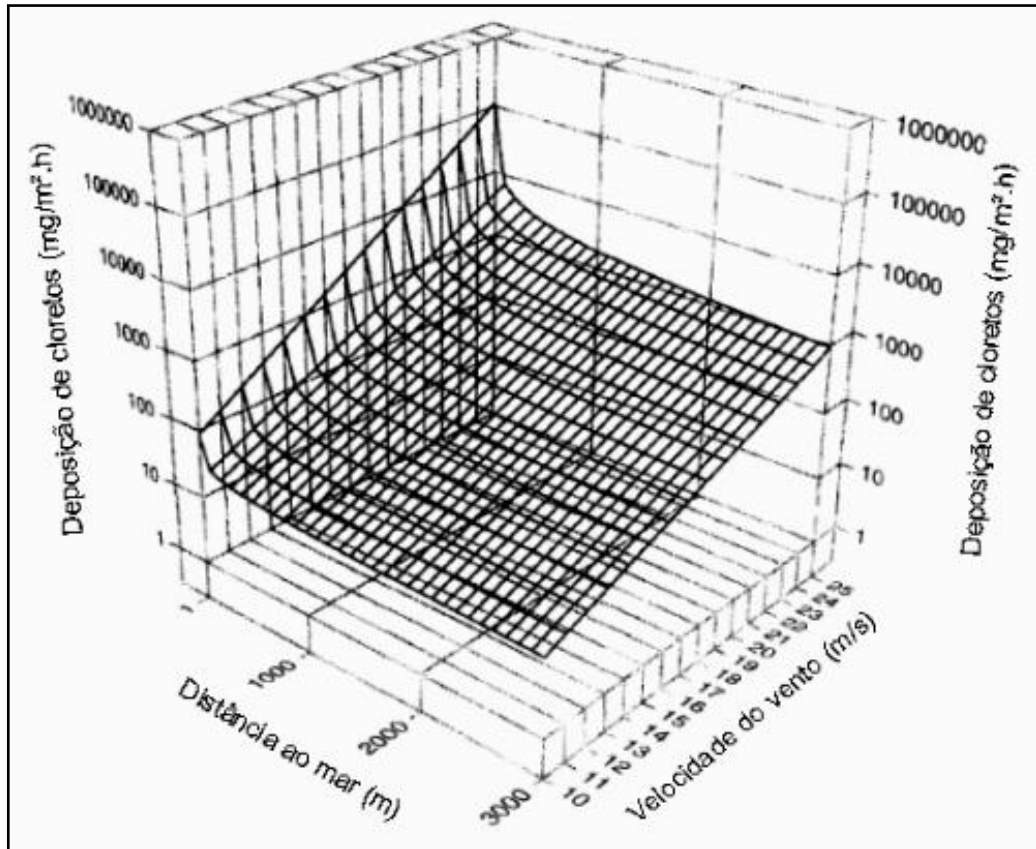


Figura 2.5: modelo de deposição de cloretos (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996 - adaptado).

Outro aspecto a ser considerado em relação ao regime dos ventos é a sua direção. Morcillo *et al.* (2000) ressalta que os ventos provenientes do mar são quem atuam no aumento da concentração na névoa. Dessa forma, ventos que se originam no continente podem ser desconsiderados na composição da relação deposição *versus* regime dos ventos. O mesmo autor ainda cita a importância de outro parâmetro, a “força do vento⁶”, nessa composição de relações. De acordo com a Figura 2.6 (a), a força do vento calculada para todas as direções apresenta seus maiores valores nos meses de agosto/1994 e janeiro/1995, porém o mesmo não ocorre com a salinidade. Já na Figura 2.6 (b) os picos de salinidade ocorrem nos mesmos meses dos picos da força do vento na direção ENE – ventos marinhos, direção leste-nordeste ($67,5^\circ$ com o Norte).

⁶ A força do vento é o produto da velocidade de cada vento ocorrido com o tempo de permanência desses no ar

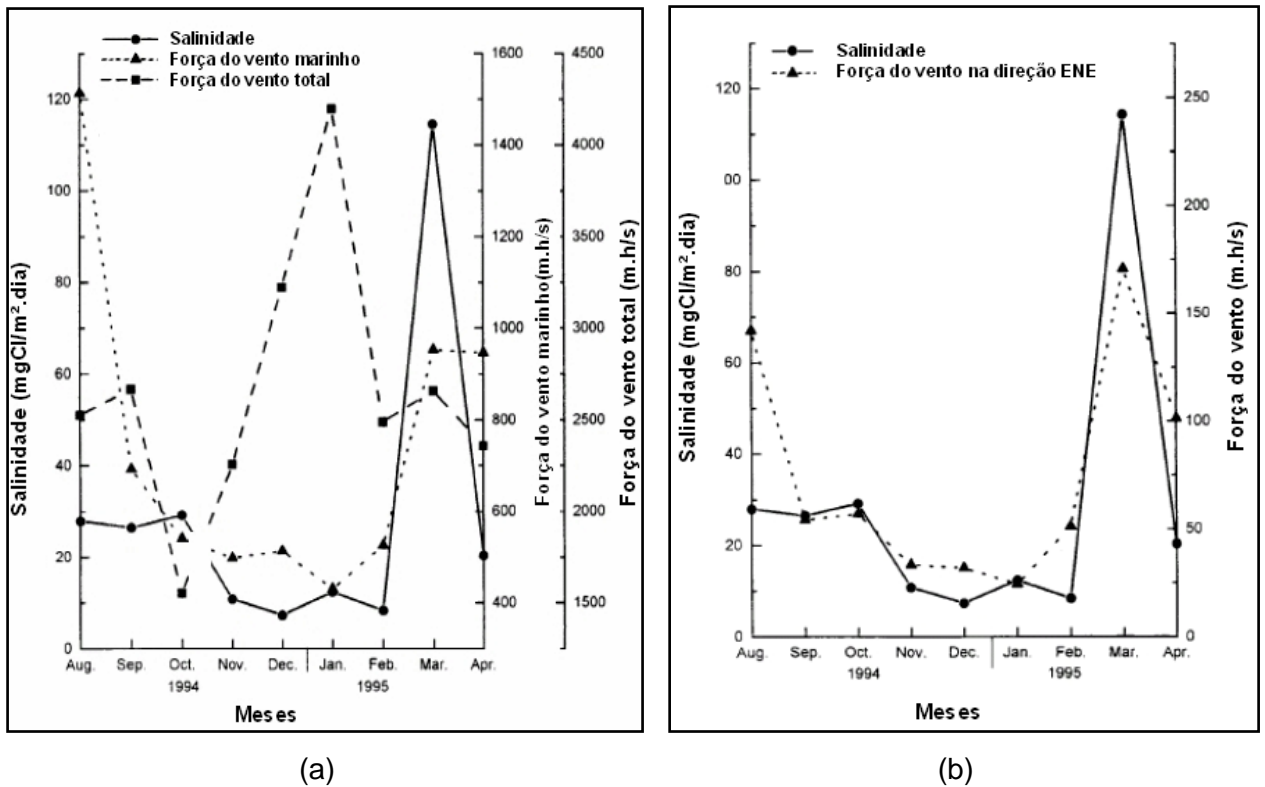


Figura 2.6: relação entre salinidade e força do vento (MORCILLO *et al.*, 2000 – adaptado)

Além de todos os aspectos já citados, muitos autores discutem o valor de uma velocidade crítica dos ventos, a partir da qual a geração e o transporte de partículas maiores ocorreriam, ocasionando uma maior concentração salina na atmosfera. O Quadro 2.2 mostra os valores de velocidade crítica nas pesquisas realizadas até esse momento. O valor de 3 m/s é o mais aceito no meio científico e servirá de referência para esse trabalho.

| Autor(es) | Velocidade crítica |
|--|--------------------|
| Spiel e Leew (1996) | 7 – 11 m/s |
| Piazzola e Despiou (1997) | > 5m/s |
| Fitzgerald (1991) O'Dowd <i>et al.</i> (1996) Morcillo <i>et al.</i> (2000) Meira (2007a) | > 3m/s |

Quadro 2.2: valores de velocidade crítica.

2.4 DISTÂNCIA AO MAR

Um importante aspecto relatado por Gustafsson e Franzén (1996) é que a influência do vento na concentração salina diminui a medida que se afasta do mar. No mar, as partículas são formadas e se depositam continuamente. Esse ciclo não permite a diminuição da concentração de cloretos na atmosfera. Na costa, há uma grande concentração de cloretos na atmosfera, mas a ação da gravidade sobre as partículas faz com que elas logo se depositem. Com o aumento da velocidade do vento, estas partículas podem chegar mais longe, mas o efeito gravimétrico é dominante. Além disso, obstáculos presentes no caminho das partículas podem barrar o seu transporte, sobretudo em zonas urbanas.

A Figura 2.7 mostra os resultados colhidos em trabalhos realizados em diferentes partes do mundo. A concentração nas distâncias mais próximas ao mar varia de acordo com o local, pois essa primeira concentração é mais dependente dos parâmetros climáticos, como agitação do mar e velocidade do vento. Na faixa dos 200 metros, a deposição de cloretos sofre forte diminuição em todos os resultados apresentados. Nesse ponto, grande número das partículas maiores já se depositou ou foram impedidas de entrar no continente por obstáculos.

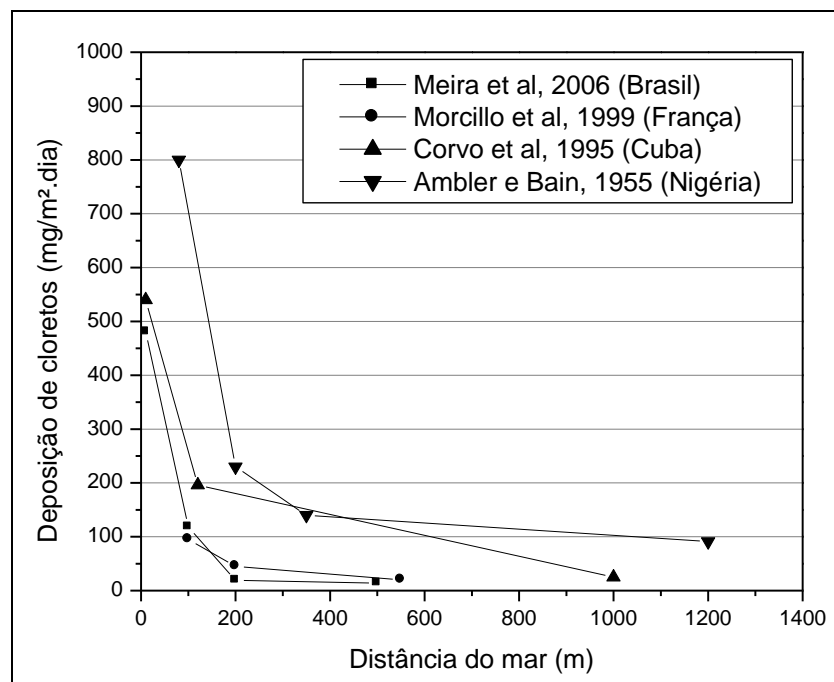


Figura 2.7: efeito do distanciamento do mar na concentração atmosférica.

Como visto, a relação deposição *versus* distância não é linear, mas é notável a diminuição da névoa marinha com o afastamento do mar. Alguns autores (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996; LEE; MOON, 2006; MEIRA *et al.*, 2006) buscam uma relação matemática para esse comportamento e indicam que a relação segue a seguinte função empírica:

$$Dep = A.dist^B \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

- Dep – deposição salina do aerossol;
- dist – distância em relação ao mar;
- A, B – constantes que dependem do ambiente.

Outra forma de ver a redução da concentração salina com o distanciamento do mar é através da observação do tamanho das partículas de aerossol e a sua concentração. Conforme já comentado, as partículas maiores contribuem mais para a concentração de cloretos na atmosfera e há uma redução da quantidade de partículas maiores com o afastamento da costa (Figura 2.8).

2.5 ALTITUDE

O aerossol marinho também tem a sua distribuição vertical. A concentração reduz com a altitude, redução essa que se acentua na linha fronteira entre o mar e o continente (BLANCHARD; CIPRIANO, 1984). As partículas maiores, por sofrerem a ação da gravidade, não alcançam grandes alturas. Esses autores estudaram essa variação entre 14 e 620m do mar e notaram uma redução de até sete vezes em relação ao valor de menor altitude. Em estudo realizado por Petelski e Chomka (1998), medindo concentração em altitudes menores – até 6m acima do mar – foi detectada uma maior quantidade de partículas na altura de três metros, conforme visto na Figura 2.9.

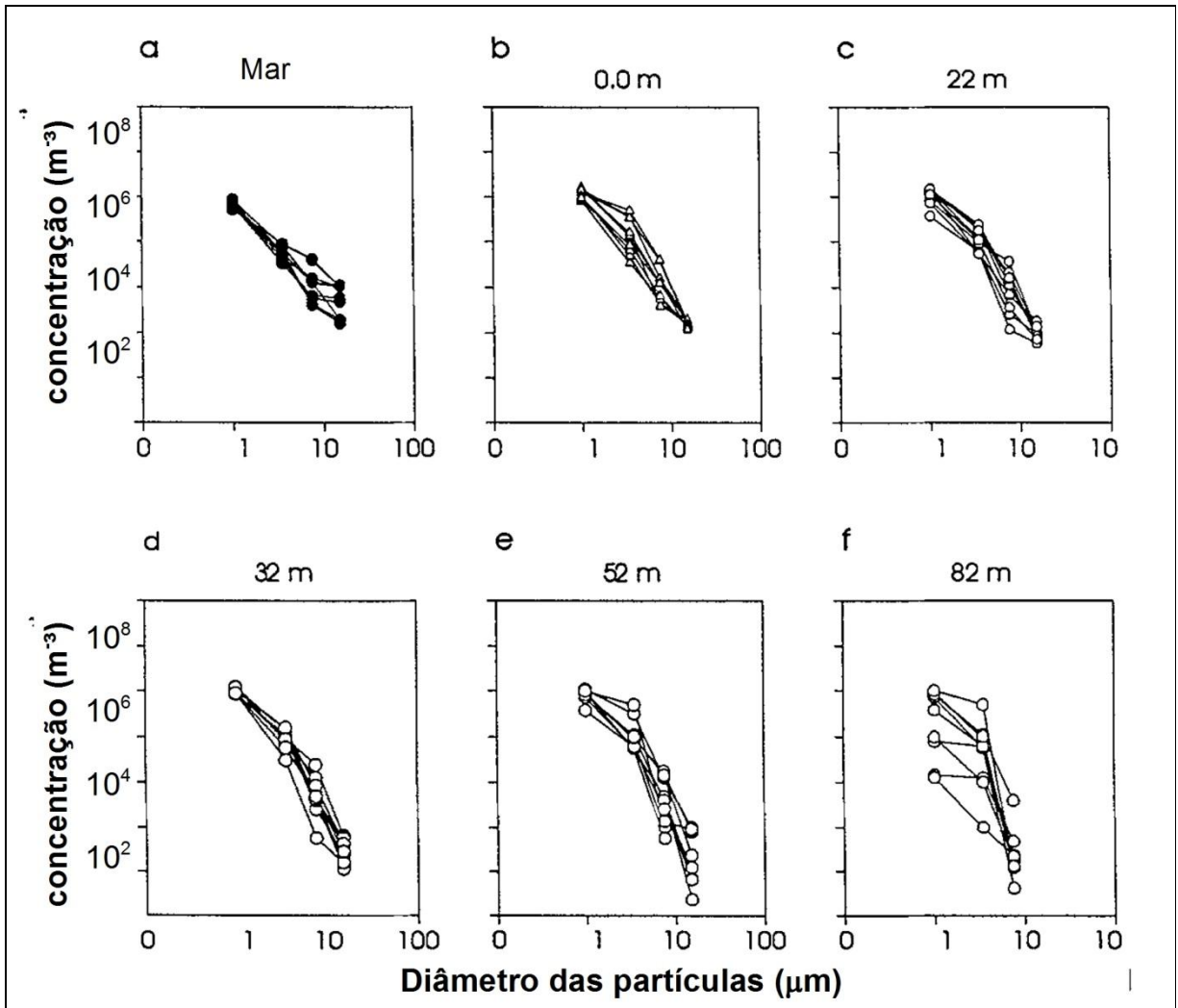


Figura 2.8: concentração de partículas em função do diâmetro e da distância ao mar (CHOMKA; PETELSKI, 2001 – adaptado).

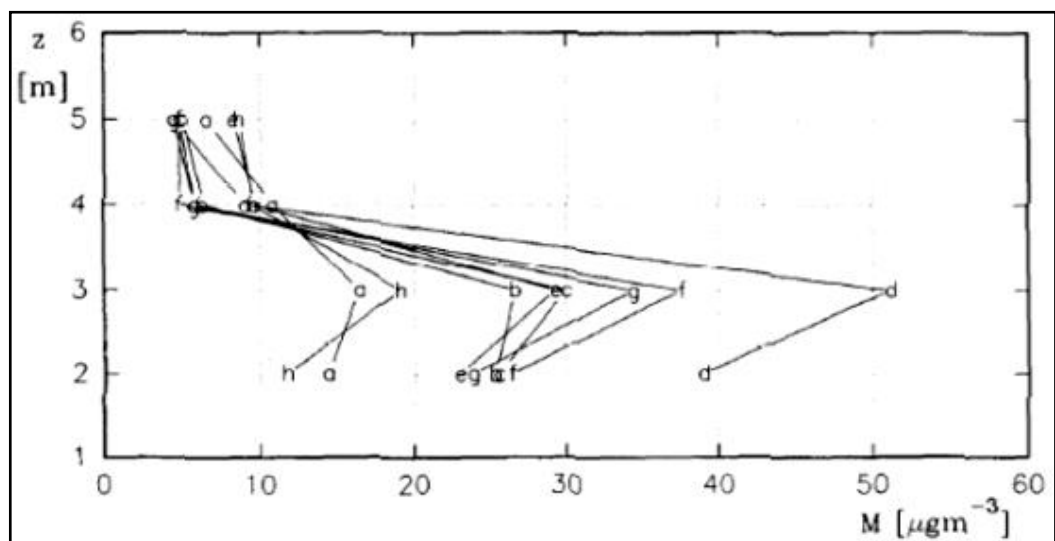


Figura 2.9: distribuição vertical da concentração de cloretos na atmosfera (PETELSKI; CHOMKA, 1998).

2.6 ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS NO BRASIL

Em Albuquerque e Otoch (2005) é citado o primeiro trabalho que se tem registro sobre deposição de cloretos no Brasil, realizado na cidade de Fortaleza no início da década de 90. No entanto, a partir da mudança da NBR 6118 (ABNT, 2007)⁷ é que o estudo da caracterização dos diversos ambientes agressivos despertou o interesse técnico e científico.

O artigo publicado por Meira e Padaratz (2002) foi o primeiro a tratar sobre a deposição de cloretos em ZAM no Brasil após a nova NBR 6118 (ABNT, 2007). Esse estudo fez parte da Tese de Doutorado em Engenharia Civil do prof. Gibson Rocha Meira pela Universidade Federal de Santa Catarina, a qual avaliou a agressividade de cloretos em ZAM ao concreto armado na cidade de João Pessoa.

Devido ao Brasil ser um país de dimensões continentais, com diferentes climas em suas diversas regiões, outros estudos se seguiram ao de Meira e Padaratz (2002). O Quadro 2.3 resume os valores médios encontrados em alguns dos estudos já realizados no país.

| Pontes <i>et al.</i> , 2006 (Recife, PE) | | Meira <i>et al.</i> , 2006 (João Pessoa, PB) | | Garcia, Padaratz e Spoganicz, 2007 (Florianópolis, SC) | |
|---|---|---|---|---|---|
| Dist. ao mar (m) | Dep. Cl ⁻ (mg/m ² .d) | Dist. ao mar (m) | Dep. Cl ⁻ (mg/m ² .d) | Dist. ao mar (m) | Dep. Cl ⁻ (mg/m ² .d) |
| 7 | 554,4 | 10 | 480,3 | 10 | 1.096,0 |
| 100 | 393,0 | 100 | 117,6 | 100 | 11,5 |
| 160 | 145,1 | 200 | 19,0 | 200 | 21,1 |
| 230 | 40,8 | 500 | 13,8 | 400 | 15,0 |
| 320 | 44,1 | - | - | 600 | 6,5 |
| - | - | - | - | 1.000 | 23,7 |

Quadro 2.3: valores de deposição de cloretos em diversos estudos realizados no Brasil.

De forma geral, os dados mostram uma alta concentração de cloretos nos primeiros metros e uma forte redução dessa concentração na faixa dos 200m do mar. Essa

⁷ A Norma é do ano de 2007, mas a partir de 2001 foi feita uma consulta nacional pela ABNT solicitando sugestões para a elaboração da versão final da Norma e em 2003 foi publicada sua primeira versão oficial.

redução fica em torno de dez a cinco vezes o valor inicial. Também é possível observar uma variação dos valores da concentração na faixa mais próxima ao mar em função da região, enquanto que no Nordeste a concentração inicial fica em torno de 500 mg/m².dia, na região Sul esse valor médio é de cerca de 1.000 mg/m².dia. Apesar de esses dados terem alta variabilidade – o que é intrínseco a parâmetros ambientais – essas médias podem fornecer uma boa idéia de como esses valores podem ser diferentes de acordo com o ambiente.

Observando os dados de forma particular, no nordeste é observada uma diferença de concentração entre os dados de João Pessoa e Recife na faixa dos 100m de distância. Isso provavelmente se deve ao fato da intensidade de ondas serem maior na região de exposição do Recife, ocasionando uma maior geração de partículas de aerossol marinho ou porque a exposição foi feita em um corredor de ventilação, que facilita o transporte de partículas. Em João Pessoa, a exposição é feita em local de mar aberto, onde uma formação de corais próximo à costa diminui a formação de ondas. Nos dados da região sul, há uma incoerência nos pontos a 100 e 600m do mar, a qual é justificada pela presença de obstáculos no local de exposição (GARCIA; PADARATZ; SPOGANICZ, 2007).

As diferenças encontradas dentre as regiões vêm a legitimar a necessidade de realização de mais estudos do tipo. Além disso, ainda não foi publicado nenhum estudo sobre deposição de cloretos na região sudeste.

3 PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETO

A forte presença de construções em regiões litorâneas tornou o problema da corrosão por cloretos de armaduras de concreto um problema cotidiano, gerando vários estudos sobre o tema. Nenhuma outra forma de agressividade ao concreto é tão estudado pelo meio técnico e científico quanto a corrosão das armaduras por ataque de cloretos.

Nesse item, será feita uma breve explanação dos mecanismos que a governam e discutido alguns fatores que influem no transporte de cloretos no concreto.

3.1 ASPECTOS GERAIS

O concreto armado é o material mais utilizado para estrutura de edifícios, pois combina as características de dois materiais: a resistência mecânica do aço e a durabilidade e o baixo custo do concreto. Nessa composição, o concreto protege o aço contra a corrosão em duas frentes: envolvendo-o em uma barreira física, que evita o contato direto do metal com os agentes agressivos e conferindo proteção química, devido à formação da película passivadora que protege o aço.

A película passivadora é formada por uma fina camada de óxidos que se aderem ao aço, conferindo proteção à corrosão (POURBAIX, 1987). De acordo com Hausman (1967⁸ *apud* MEIRA, 2004) a formação dessa película está relacionada com a alta alcalinidade da solução aquosa dos poros do concreto, com pH em torno de 13 a 14. Pourbaix (1987) construiu um diagrama de equilíbrio termodinâmico (Figura 3.1) para cada tipo de metal o qual mostra que para altos valores de pH do meio e um certo valor de potencial eletroquímico o aço fica passivo à corrosão.

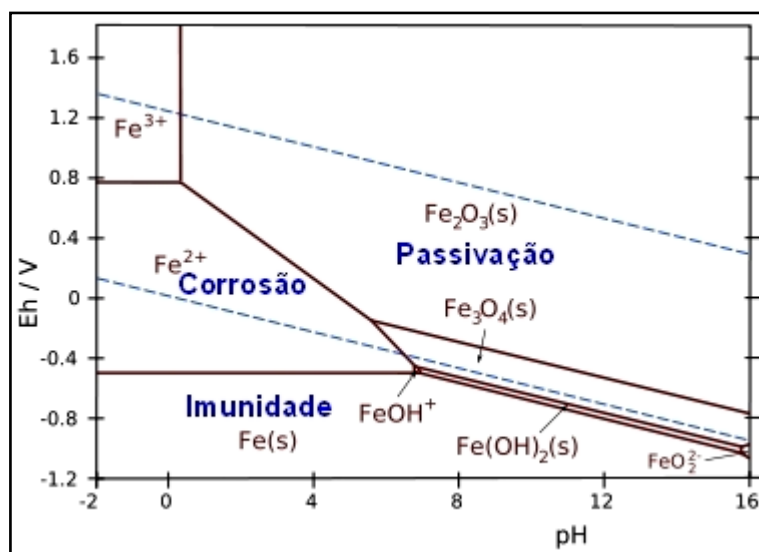


Figura 3.1: Diagrama de equilíbrio termo dinâmico do aço (POURBAIX, 1987).

Após a perda da camada passivadora, ocorre a corrosão. Em concreto, essa perda pode ocorrer de duas formas: redução do pH do concreto a níveis críticos, abaixo de 9, causado pela ação da carbonatação ou pela presença de um agente despассивador,

⁸ HAUSSMAN, D. A. Steel corrosion in concrete: how does it occur? **Materials Protection**, p19-23, 1967.

como o íon cloreto (Cl^-), em quantidade suficiente para romper a película protetora (GONZÁLEZ *et al.*, 1996).

Segundo Tuutti (1982), o tempo decorrido até que a camada passivadora seja vencida corresponde à fase de iniciação da corrosão, determinando, assim, o fim da vida útil da estrutura. Nessa fase inicial, a agressividade do ambiente e as características do concreto é quem vão determinar a decorrência desse tempo. Após a despassivação do aço, ocorre a fase de propagação, onde as reações de corrosão se desenvolvem.

Os cloretos presentes na atmosfera, estudados no capítulo anterior, formam um ambiente agressivo ao concreto. Após se depositarem na superfície, penetram nas estruturas de concreto armado e são transportados pelo seu interior até atingir o aço da armadura. Os mecanismos de transporte de cloretos no concreto são vários, mas pode ser sintetizados em dois: absorção e difusão (CASCUDO, 1997). O primeiro atua na face externa do concreto, assim que as partículas de cloretos encostam-se à superfície do concreto. Já a difusão é mais pronunciada no interior do concreto. Além desses dois, pode-se citar ainda a permeabilidade e a migração iônica. O Quadro 3.1 mostra os principais mecanismos de transporte de cloretos no concreto.

| Mecanismo de transporte | Definição | Atuação |
|-------------------------|--|--------------------------|
| Absorção | O concreto sorve a água contaminada com cloretos em contato com a sua superfície por tensão capilar. | Face externa do concreto |
| Difusão iônica | A diferença de concentração de íons cloretos entre uma região de maior concentração (próximo à superfície) e outra de menor concentração (mais interna) provocam o movimento dos íons. | Interior do concreto |
| Permeabilidade | Transporte de líquidos e gases que ocorre em função da diferença de pressão entre os poros do concreto. | Concreto submerso |
| Migração iônica | Movimento dos íons Cl^- através da ação de campos elétricos. Esses campos são provocados por diferença de potencial e, portanto, não é um processo natural. | - |

Quadro 3.1: mecanismos de transporte de cloretos no concreto.

Ao se encontrar com a armadura, os cloretos ainda não provocam a corrosão. Essa corrosão só ocorre quando a quantidade de cloretos presentes atinge o valor crítico. Esse valor não é consenso entre o meio científico, pois depende de vários fatores, como a dosagem dos concretos, o tipo de cimento, as adições, a temperatura ambiente e a qualidade da capa de cobertura do aço. De forma conservadora, algumas normas

(DURAR, 1997) adotam o valor de 0,4% em relação à massa de cimento como teor crítico de cloretos para despassivação da armadura. Sobre o limite crítico de cloretos, mais pesquisas devem ser realizadas, principalmente para os cimentos nacionais.

3.2 PARÂMETROS RELATIVOS AO INGRESSO DE CLORETOS

Nesse item, far-se-á uma breve explanação sobre alguns parâmetros relativos ao ingresso de cloretos que são obtidos em pesquisas que tratam do transporte de cloretos no concreto. Esses parâmetros são a concentração superficial, a concentração total e os perfis de cloretos e o coeficiente de difusão.

3.2.1 Concentração superficial (C_s)

A concentração superficial de cloretos é um importante parâmetro visto que o seu valor desencadeia o transporte de cloretos no concreto. Os íons Cl^- se fixam na superfície do concreto e são transportados ao seu interior, conforme já comentado. É a concentração superficial, portanto, quem alimenta o transporte de cloretos no concreto.

Costa e Appleton (1999) realizaram um estudo expondo vários tipos de concretos em diferentes condições de agressividade ambiental. O valor de C_s encontrado variou de acordo com o ambiente, e foi maior, em ordem decrescente, na zona de flutuação de maré, cais do porto, zona de *spray* e atmosfera marinha (Figura 3.2). Essa ordem reflete a maior oferta de cloretos em cada ambiente. Os autores também relataram que a C_s cresce com o passar do tempo, mas esse aumento apresenta uma tendência de ser atenuado até que chegue a um valor máximo de concentração. Andrade, Sagrera e Sanjuán (2000) concordam com esse pensamento de que a C_s cresce até atingir um ponto máximo, variando pouco ao atingir esse valor. Apesar dos resultados obtidos pelos autores citados, essa conclusão ainda gera certa controvérsia, pois há poucos estudos sobre o tema.

No Brasil, Guimarães, Castro e Nunes (2007) estudaram a relação da C_s com o distanciamento ao mar. Os autores concluíram que a concentração superficial diminui com o afastamento da costa. Na distância de 630 metros do mar, a C_s encontrada foi

de 0,6% em relação à massa de cimento, cinco vezes menor que a concentração à beira mar, de 3,1%.

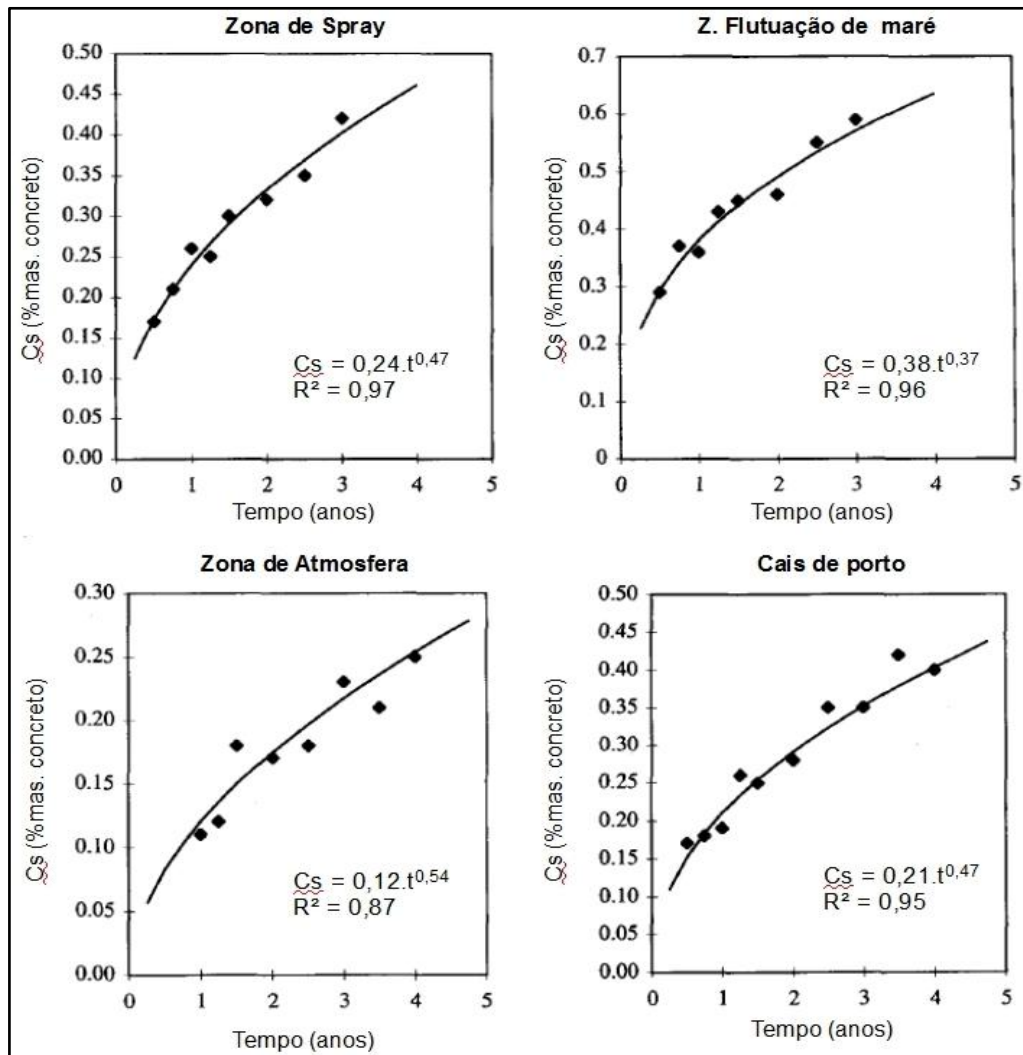


Figura 3.2: crescimento da concentração superficial com o tempo, de acordo com a zona de agressividade (COSTA; APPLETON, 1999 - adaptado).

A ocorrência de chuva, no entanto, pode alterar o crescimento da concentração superficial com o tempo, principalmente para intervalos curtos de exposição. Meira (2004) expôs seis tipos de concretos em ZAM e mediu a C_s após seis, dez quatorze e dezoito meses. Entre os dados de 14 e 18 meses, encontrou-se uma redução na C_s medida para todos os traços estudados, que se justifica pelo período de chuvas na região de exposição durante esse intervalo de tempo.

3.2.2 Concentração total e perfis de cloretos

A concentração superficial está relacionada com a absorção do concreto e suas propriedades na zona de pele. Os perfis de cloreto, no entanto, estão relacionados à difusividade do cloreto em concreto. A quantidade de cloretos em diferentes profundidades do concreto determina o perfil de concentração de cloretos. O perfil de cloretos apresenta duas regiões: a zona de pele, de pouca profundidade, onde a concentração de cloretos aumenta com a distância da superfície de concreto até atingir um pico e uma zona em que a concentração começa a decrescer. Esse pico do perfil muda de posição de acordo com a agressividade do ambiente, com as características do material e com o tempo de exposição. Segundo Costa e Appleton (1999), quanto maior a agressividade do ambiente maior será a progressão dos perfis com o passar do tempo.

Assim como na concentração superficial, as zonas agressivas de maior oferta de cloretos apresentam os maiores valores de concentração total: zona submersa, zona de flutuação de maré, zona de respingo e Zona de Atmosfera Marinha. A zona submersa, porém, é a de menor risco para corrosão devido à ausência de oxigênio. A Figura 3.3 (a) mostra a variação da concentração de cloretos com a agressividade ambiental, utilizando o mesmo tipo de concreto e exposto por longo período – mais de cinco anos – em três diferentes ambientes (SANDBERG; TANG; ANDERSEN, 1998).

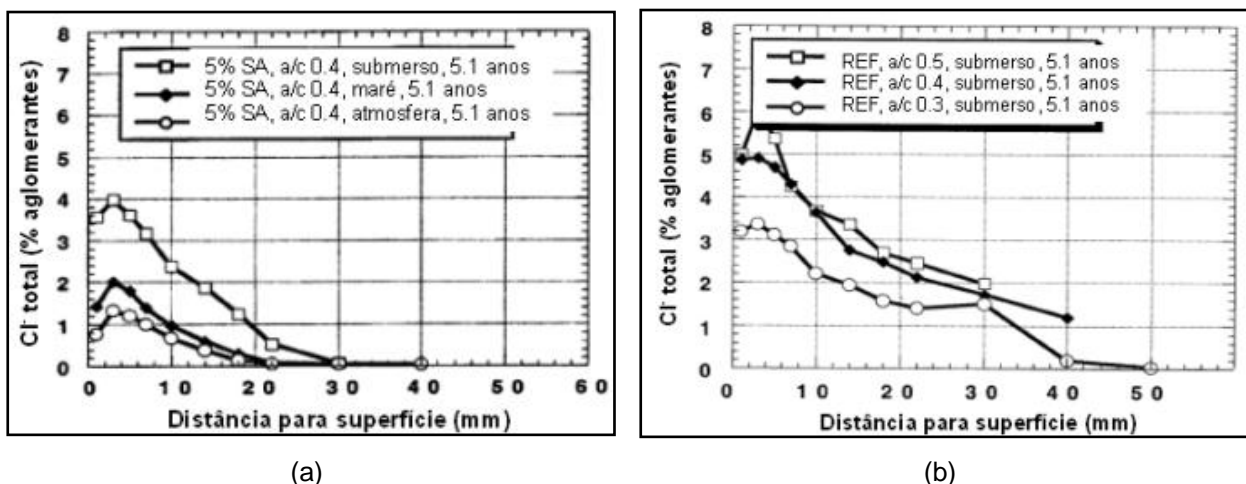


Figura 3.3: Perfis de cloretos: (a) variação com a zona de exposição; (b) com a relação água/cimento (SANDBERG; TANG; ANDERSEN, 1998 - adaptado).

Em ZAM, a quantidade de cloretos no concreto varia com a presença deles na atmosfera e, por conseguinte, com todos aqueles parâmetros discutidos no Capítulo 2, como distância a mar e regime dos ventos. Com o objetivo de prever a concentração de cloretos no concreto a partir da salinidade atmosférica, Meira (2007b) propõe a Equação 5, que relaciona esses dois parâmetros. Essa equação apresentou excelente correlação entre os parâmetros, mas ainda deve ser testada em outras condições de exposição.

$$C_{tot} = C_{tot0} + k_{cl} \cdot \sqrt{Dac} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

- C_{tot} – Concentração total de cloretos no concreto (% massa cimento);
- C_{tot0} – Concentração inicial de cloretos no concreto (% massa cimento);
- k_{cl} – coeficiente que depende do material e do ambiente;
- Dac – Deposição acumulada de cloretos ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$).

Além da agressividade ambiente, as características do material também influem na formação dos perfis de cloretos. A Figura 3.3 (b) mostra um perfil em que a concentração total varia com a relação água/cimento (SANDBERG; TANG; ANDERSEN, 1998), para concretos em uma mesma região de agressividade e com mais de cinco anos de exposição. Outros parâmetros, como presença de fissuras, tipo de cimento e uso de adições também podem implicar em outras distribuições de cloretos no concreto.

3.2.3 Coeficiente de difusão

O coeficiente de difusão é o parâmetro que mede a intensidade do transporte de cloretos no interior do concreto por difusão. Costa e Appleton (1999) lembram que em seu valor está implícita a atuação de outros mecanismos de transporte e a fixação de cloretos na matriz de concreto, devendo, portanto, ser tratado como um Coeficiente de Difusão Aparente.

Vários autores relatam que o coeficiente de difusão diminui com o passar do tempo (SANDBERG; TANG; ANDERSEN, 1998; COSTA; APPLETON, 1999; TANG;

ANDERSEN, 2000). De acordo com Costa e Appleton (1999) esse comportamento é justificado de três formas: a hidratação do cimento, que reduz a porosidade do concreto (primeiras idades); a formação do hidróxido de magnésio e do carbonato de cálcio na superfície do concreto, que reduzem a penetração de cloretos e, por fim, a combinação dos íons presentes na águas do mar com os produtos de hidratação do cimento.

Nos estudos de Costa e Appleton (1999), os valores do coeficiente de difusão em concretos de relação $a/c = 0,5$ expostos em zona de spray foram de $9,5 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ aos 10 meses e de $3 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ após 40 meses. Meira (2004) expondo concretos em ZAM, observou uma flutuação dos valores ao longo do tempo, mas a diminuição do coeficiente de difusão entre a primeira e a última idade foi mantida em todos os concretos expostos (Quadro 3.2).

| Concreto | Coef. Difusão ($\times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$) | | | |
|-------------------------|--|-----|-----|-----|
| | Idade (meses) | | | |
| | 6 | 10 | 14 | 18 |
| a/c 0,50; Cimento CPIIF | 8,6 | 3,8 | 3,9 | 6,0 |
| a/c 0,57; Cimento CPIIF | 7,8 | 5,0 | 5,1 | 3,8 |
| a/c 0,65; Cimento CPIIF | 12,1 | 5,0 | 5,1 | 5,1 |
| a/c 0,50; Cimento CPIV | 9,2 | 4,2 | 3,7 | 3,8 |
| a/c 0,57; Cimento CPIV | 9,0 | 5,0 | 3,9 | 3,8 |
| a/c 0,65; Cimento CPIV | 7,8 | 6,8 | 4,3 | 4,4 |

Quadro 3.2: diminuição do coeficiente de difusão ao longo do tempo – exposição a 10m do mar (MEIRA, 2004).

O coeficiente de difusão, assim como os parâmetros anteriores, é influenciado pela agressividade ambiente. A Figura 3.4 mostra a variação do coeficiente com a zona de exposição, baseada no estudo de alguns autores. Em locais de maior oferta de cloretos, o coeficiente se apresenta maior.

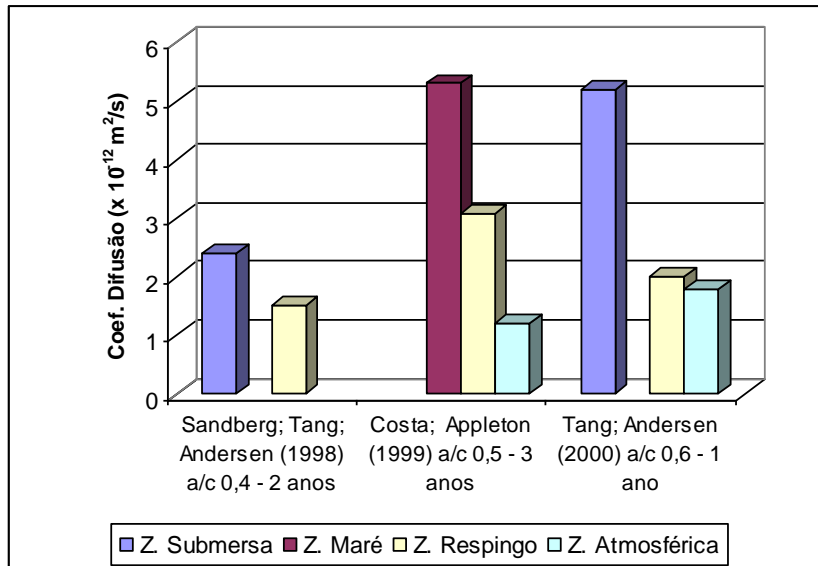


Figura 3.4: valores do coeficiente de difusão de acordo com a zona de agressividade, segundo vários autores.

3.3 INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS

3.3.1 Relação água/cimento

A relação água/cimento (a/c) é importante parâmetro no estudo da durabilidade, pois ela está relacionada à dificuldade do cloreto penetrar no concreto. Para altas relações a/c (acima de 0,6) teremos um concreto mais poroso e, portanto, mais susceptível aos agentes agressivos. Para concretos de baixa relação a/c, como os concretos de alto desempenho, a atuação do ataque de cloretos é diminuída, devido à baixa porosidade (CASCUDO, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Meira *et al.* (2007b) expôs em ZAM três concretos comuns com diferentes relações a/c por 18 meses e obteve os perfis de cloretos mostrados na Figura 3.5. O concreto com maior quantidade de água no traço (a/c 0,65) apresentou maior pico de concentração de cloretos e maior profundidade de penetração. Por se tratar de concretos convencionais, esse fato pode ser atribuído à maior porosidade do concreto, que facilita a penetração de cloretos.

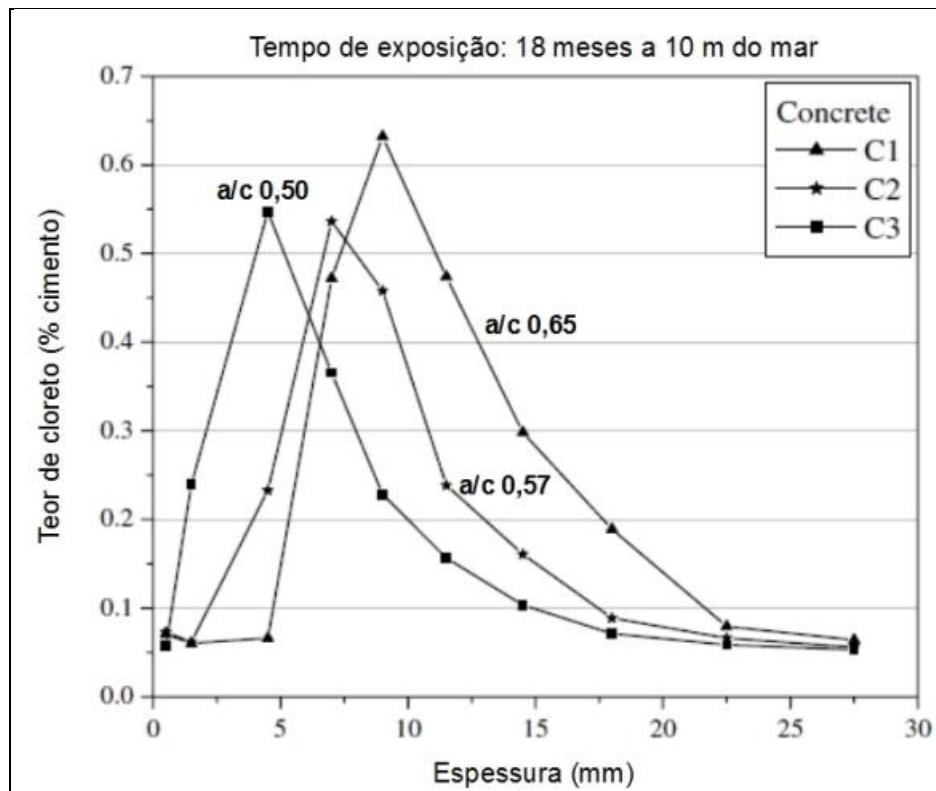


Figura 3.5: perfis de cloretos para diferentes relações a/c (MEIRA *et al.*, 2007b, p271 - adaptado).

Comportamento semelhante é notado em estudos que comparam o desempenho em relação à penetração de cloretos entre os Concretos de Alto Desempenho (CAD) e concretos convencionais. Al-Khaja (1996) verificou que a concentração de cloretos em relação à massa de cimento em concretos convencionais (a/c 0,48) é na ordem de duas vezes maior que no CAD (a/c 0,39).

3.3.2 Tipo e consumo de cimento

No que se refere ao cimento, ele influencia de duas formas no transporte de cloretos: a capacidade de fixação de íons Cl^- na matriz do concreto e a dificuldade oferecida da movimentação de cloretos no interior do concreto. O consumo de cimento atua nessas duas vias, pois um alto consumo diminui a porosidade da matriz de concreto bem como aumenta a quantidade de clínquer por metro cúbico de concreto, gerando, assim, uma maior capacidade de fixar cloretos.

A quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) presente no cimento é o principal parâmetro que rege a fixação de cloretos no concreto, pois sua maior presença favorece essa

fixação. Al-Khaja (1997) observou que os cimentos Portland comuns têm melhor desempenho ao ataque de cloretos que os cimentos Portland resistentes ao sulfato, de baixo teor de C_3A . Nesse estudo, foi encontrado um teor de cloretos livres 92% maior em um concreto com cimento resistente a sulfatos ($C_3A = 2,8\%$) em comparação a um concreto com cimento Portland comum ($C_3A = 10\%$).

Em estudo realizado com cimentos nacionais, Padilha *et al.* (2007) adicionou diferentes teores de cloretos totais durante a mistura do concreto e avaliou o desempenho dos cimentos tipo CPIIF e CPIV-RS com pozolana natural, mais pobre em C_3A . Através da técnica de determinação da corrosão por medidas de potencial, foi verificado que um maior teor de cloretos é necessário para provocar a despassivação das armaduras nos concretos com cimento CPIIF.

3.3.3 Uso de adições

Em concretos comuns, as adições vêm associadas ao cimento Portland. No Brasil, são aceitas três adições ao cimento, de acordo com o tipo: fíler calcário, escória de alto forno e pozolana. Os fatores que levam ao uso dessas adições no cimento são econômicos e ambientais. Econômico, pois a adição substitui uma parcela do clínquer Portland, diminuindo os custos com sua queima e moagem e ambiental, pois diminui a quantidade de matéria-prima a ser extraída de jazidas naturais, minimizando os impactos da produção de cimento (BAUER, 2008). As adições influenciam nas propriedades do cimento, como tempo de pega e calor de hidratação e, conseqüentemente, essas características do concreto também são alteradas.

Em relação à penetração de cloretos, as adições contribuem com duas frentes. A princípio, por ter grãos de pequenas dimensões, o efeito de empacotamento dificulta o transporte dos cloretos, preenchendo os poros vazios (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Além disso, alguns tipos de adição que contêm alumina aumentam a capacidade de fixação de cloretos, diminuindo a oferta de cloretos livres na matriz (DELAGRAVE *et al.*, 1997; LARSEN, 1998). Exemplos dessas adições são a escória de alto forno e a cinza volante.

Para estudar o efeito das adições, Page, Short e El Tarras (1981) confeccionaram quatro tipos de pastas, utilizando cimento Portland comum, cimento resistente a

sulfatos, cimento com 65% de escória de alto forno e cimento com 30% de adição de cinza volante. Para cada pasta, foi medido o coeficiente de difusão de cloretos. O Quadro 3.3 mostra os resultados obtidos pelos autores. O efeito combinado da diminuição da porosidade e da maior capacidade de fixação de cloretos devido à contribuição da alumina foi determinante no melhor desempenho dos cimentos com cinza e escória.

| Tipo de cimento | Coef. Difusão x 10⁻⁹ (cm²/s) |
|----------------------------|---|
| Portland comum | 44,7 |
| Cimento com 30% de cinza | 14,7 |
| Cimento com 65% de escória | 4,1 |
| Resistente a sulfatos | 100 |

Quadro 3.3: coeficiente de difusão em diferentes pastas de relação a/c 0,5 (PAGE; SHORT; EL TARRAS, 1981).

Mesmo mantendo a relação água/aglomerantes, a presença de adições melhora o desempenho do concreto à penetração de cloretos. Tamini, Abdalla e Sakka (2008), mantendo a mesma proporção a/agl, fizeram dois tipos de concreto: um CAD, com adição de escória de alto forno e um comum, sem adição. A absorção capilar inicial (até 2 horas) do CAD foi duas vezes menor que a do concreto comum, enquanto que o concreto convencional apresentou concentração de cloretos até três vezes maior que o CAD. Isso pode ser atribuído à melhor aderência da interface pasta-agregados dos concretos com adição de escória.

3.3.4 Processo de cura

O processo de cura influencia a porosidade do concreto na sua região exterior, ou seja, está relacionado com a absorção. Deste modo, um concreto que passou por uma melhor cura apresenta menor quantidade de cloretos em sua superfície que um concreto cuja cura foi mal feita. No interior do concreto, no entanto, essa diferença é pouco significativa visto que o coeficiente de difusão é menos afetado pela zona de pele do concreto.

Jaergemann (1990) evidenciou esse comportamento, ao comparar a penetração de cloretos em concretos curados por tempos distintos. Após um ano de idade, o concreto

submetido à cura de apenas um dia apresenta penetração de cloretos de quase o dobro do concreto curado por sete dias. Passados três anos, a diferença de penetração devida à cura se torna menor (Figura 3.6). A saturação de cloretos na zona de pele faz com que o limite crítico de cloretos para despassivação seja atingido nas regiões internas do concreto (ANDRADE; ALONSO, 1997).

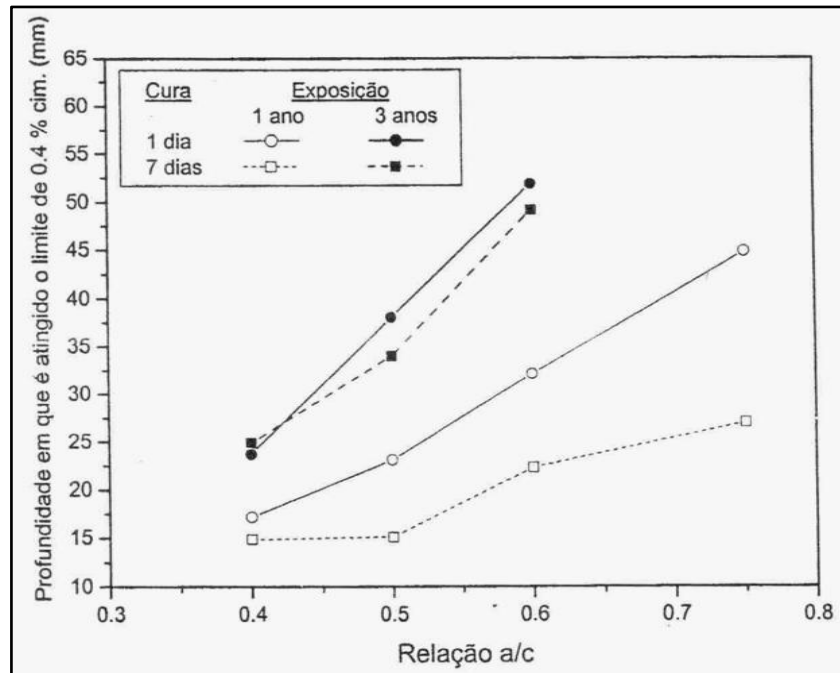


Figura 3.6: efeito da cura na penetração de cloretos para diferentes relações a/c (JAERGEMANN, 1990).

3.3.5 Presença de fissuras

A ocorrência de fissuras constitui um caminho que facilita a penetração de íons cloretos. Mangat e Gurusamy (1987) verificaram um aumento da presença de cloretos nas vizinhanças de onde ocorria a fissura. Esses mesmos autores também concluíram que esse aumento era muito pequeno quando as fissuras tinham abertura menor que 0,2 mm. Esse valor é o mesmo sugerido pela NBR 6118 (ABNT, 2007) como limite de fissuração do concreto em regiões com armaduras ativas.

De Schutter (1999) variou a abertura e a profundidade das fissuras em corpos de prova de concreto e mediu as concentrações de cloretos (Figura 3.7). Os resultados ratificam as conclusões de Mangat e Gurusamy (1987) mostrando uma elevação da concentração de cloretos nas adjacências da fissura.

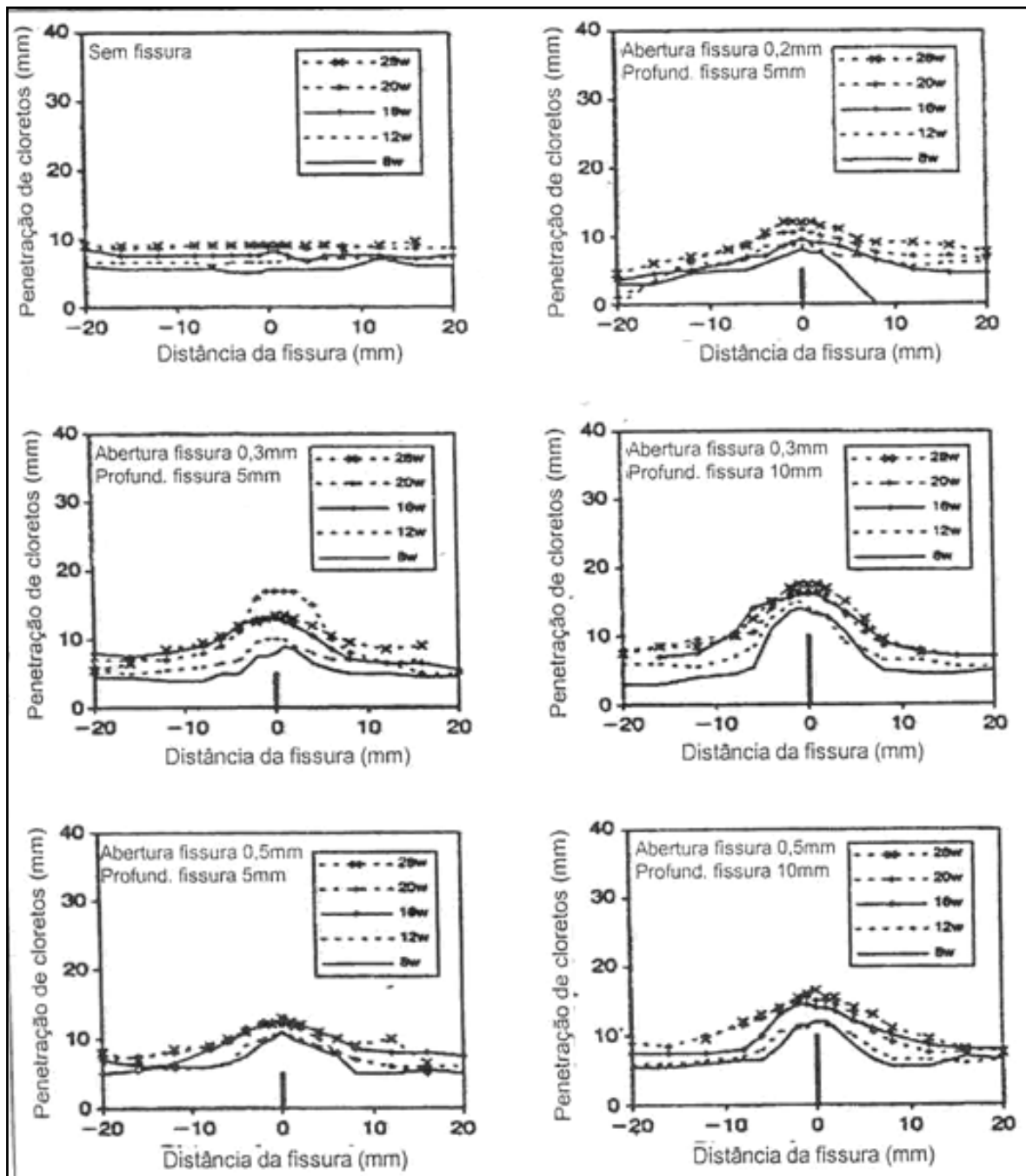


Figura 3.7: efeito da abertura e da profundidade e fissuras na penetração de cloretos (DE SCHUTTER, 1999).

3.4 INFLUÊNCIA DO AMBIENTE

Os diversos ambientes agressivos ao concreto foram vistos no item 3.1. Nesta parte, verifica-se como os parâmetros ambientais podem influir na penetração de cloretos.

3.4.1 Temperatura

A temperatura é um conhecido acelerador de reações químicas e influencia de forma importante a difusão de íons (VAN VLACK, 1985), pois o aumento da temperatura implica num maior coeficiente de difusão. Na região da Grande Vitória, as temperaturas podem variar de 20 a 35 °C durante o mesmo dia, o que pode provocar alguma mudança no coeficiente de difusão.

Estudando a variação da temperatura no incremento do coeficiente de difusão, Page, Short e El Tarras (1981) confeccionaram pastas de cimento de diferentes relações a/c. A uma temperatura de 7 °C, o coeficiente de difusão tem um valor de seis a nove vezes menor que 44 °C (Quadro 3.4).

| Temperatura (°C) | Coeficiente de difusão ($\times 10^{-9}$ cm ² /s) | | |
|---------------------|---|---------|---------|
| | a/c 0,4 | a/c 0,5 | a/c 0,6 |
| 7 | 11,0 | 20,7 | 51,9 |
| 14,5 | 12,7 | 23,6 | 84,6 |
| 25 | 26,0 | 44,7 | 123,5 |
| 35 | 44,7 | 94,8 | 165,2 |
| 44 | 84,0 | 183,6 | 318,2 |

Quadro 3.4: aumento do coeficiente de difusão com a temperatura (PAGE; SHORT; EL TARRAS, 1981).

Al-Khaja (1997) também observou o incremento da concentração de cloretos com o aumento da temperatura em corpos de prova de concreto. Esse efeito foi melhor observado no concreto convencional feito com cimento Portland comum, onde o pico da concentração de cloretos na temperatura de 45 °C foi o dobro do pico de cloretos aos 20 °C. Nos concretos de alto desempenho, esse aumento foi verificado, porém de forma mais suave.

3.4.2 Grau de Saturação (GS)

O grau de saturação do concreto é a relação entre a umidade e a absorção total do concreto. Este parâmetro é útil para avaliar a quantidade de água nos poros do

concreto, pois varia com a condição de clima e do meio ambiente em que o concreto está inserido.

A maior ou menor presença de água nos poros do concreto está relacionada com a umidade relativa do ar. Segundo Saetta, Scotta e Vitaliani (1993) quando a Umidade Relativa (UR) fica abaixo de 75% a difusão de íons sofre uma queda acentuada. A UR, no entanto, varia de forma significativa ao longo do dia, enquanto que o GS é mais estável, pois o concreto absorve água de forma mais rápida que perde. Dessa forma, o GS é mais confiável quando do estudo das propriedades do concreto relativas ao ambiente. De toda maneira, os estudos de Meira (2004) mostram boa correlação entre UR e GS – sempre acima de 80%.

Segundo Guimarães (2000) quando o GS diminui até 85% toda a rede de poros passa a ter apenas água adsorvida. Então, os íons têm que percorrer um caminho maior para poder avançar no concreto, conforme Figura 3.8. A melhor condição para a difusão de cloretos é quando o Grau de Saturação é de 100%.

Nielsen e Geiker (2003) estudando a difusividade de cloretos em diferentes condições de saturação observaram uma queda no coeficiente de $12,9$ a $2,7 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ quando o GS caiu de 100% para 66%. Da mesma forma, Almenar⁹ (2000 *apud* MEIRA, 2004) variou o GS entre 70 e 33 % e observou uma queda no coeficiente de difusão de $9,9$ a $0,2 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$.

⁹ ALMENAR, G. V. **Ingreso de cloruros en hormigón: método de análisis, detección no destructiva y modelización del transporte tras um aporte inicial limitado**. Alicante: Universidad de Alicante, 2000. (Tesis Doctoral).

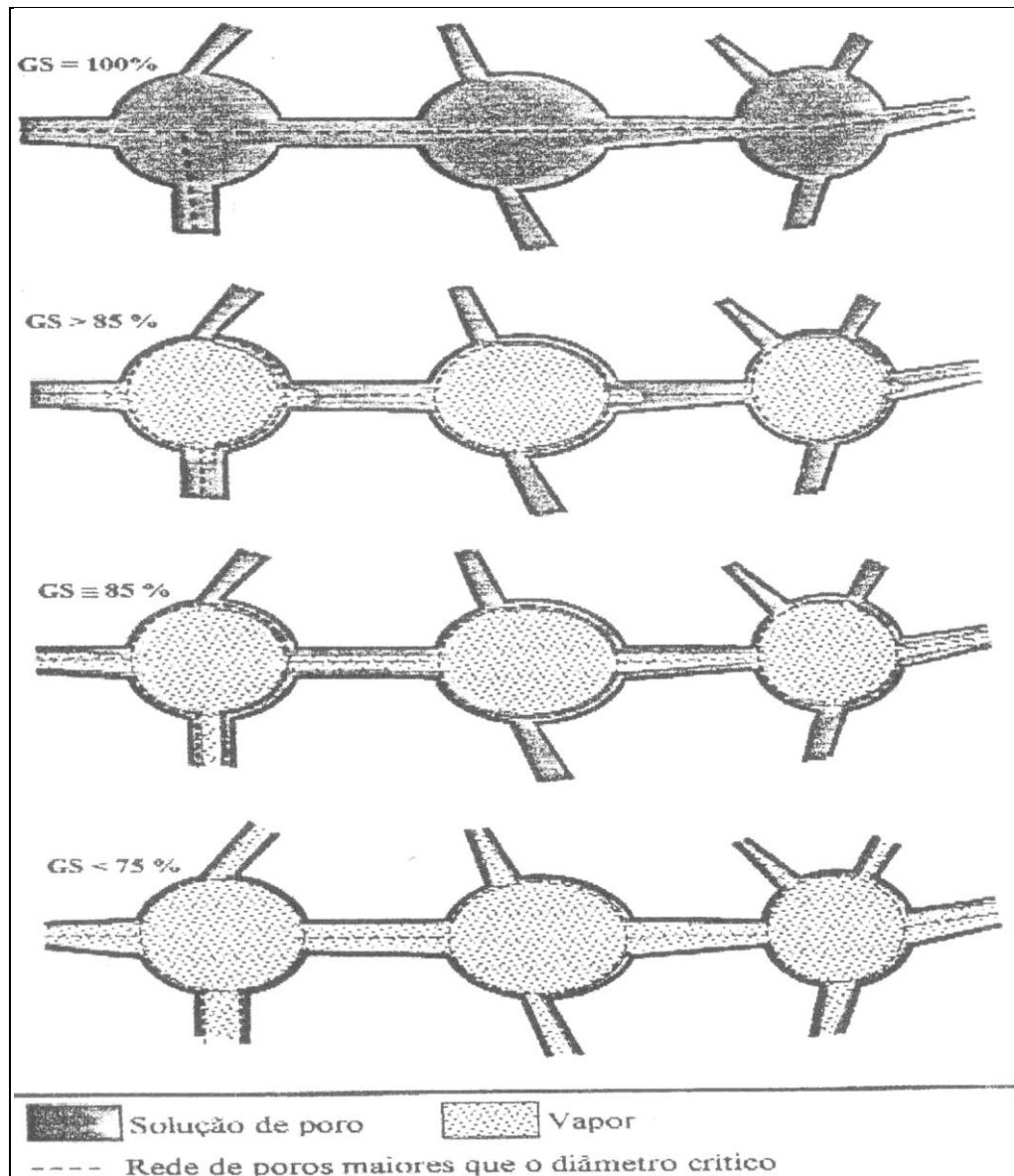


Figura 3.8: rede de poros de concreto em diferentes GS (GUIMARÃES, 2000).

3.4.3 Carbonatação

A carbonatação age de formas antagônicas no concreto quanto à penetração de cloretos. Jones, McCarthy e Dhir (1994) observaram uma menor resistência à penetração de cloretos em concretos parcialmente carbonatados, inclusive abrandando o efeito benéfico da adição de cinza volante. Tuutti (1982) justifica esse comportamento dizendo que o concreto carbonatado não pode fixar tantos cloretos como o concreto não carbonatado. Esse fato pode ser atribuído à formação do composto carbo-

aluminato de cálcio hidratado que compete com a formação dos cloreto-aluminatos, facilitando o ingresso de cloretos (BYFORS, 1990¹⁰ *apud* MEIRA, 2004).

O outro aspecto da carbonatação é a diminuição dos poros do concreto carbonatado, o que dificulta o transporte dos cloretos. A formação do carbonato de cálcio no concreto ocupa um volume maior que os hidróxidos que lhe dão origem. No entanto, o efeito maléfico da menor fixação de cloretos é mais pronunciado (NGALA; PAGE, 1997). A Figura 3.9 mostra a que a porosidade do concreto não carbonatado é maior que a do concreto carbonatado para todas as relações a/c estudadas.

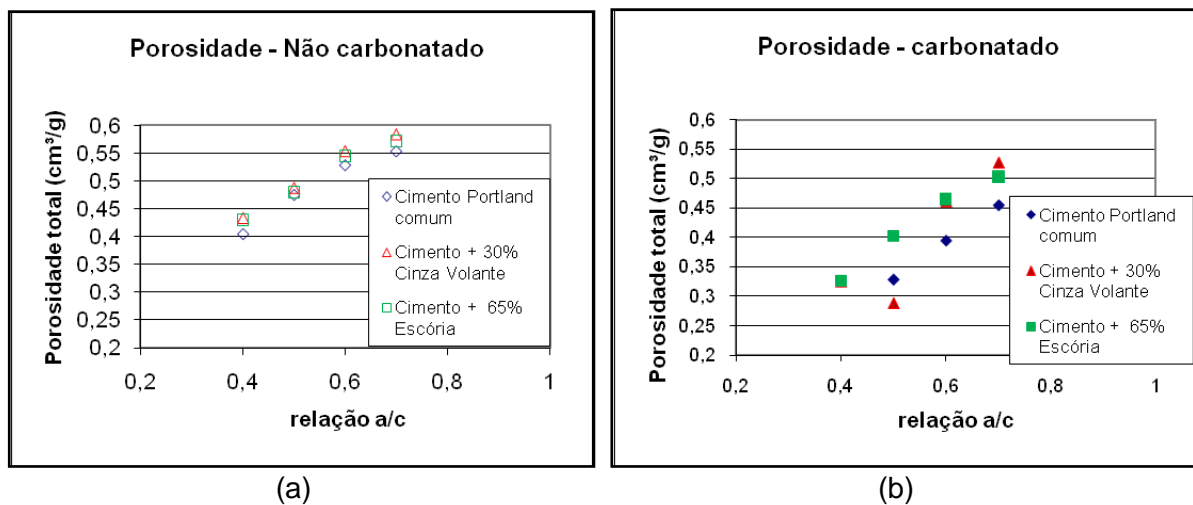


Figura 3.9: porosidade do concreto não carbonatado (a); porosidade do concreto carbonatado (b) (NGALA; PAGE, 1997).

A carbonatação é influenciada pelo Grau de Saturação do concreto. Meira *et al.* (2005) analisaram concretos com diferentes relações a/c e verificaram o comportamento da carbonatação com o GS. Os resultados mostraram que a partir de um GS de 70% a carbonatação tende a diminuir. A saturação dos poros que provoca a diminuição da oferta de oxigênio, necessária para a reação de carbonatação. No mesmo sentido, Yoon, Çopuroğlu e Park (2007) expuseram corpos de prova de concreto em local abrigado da chuva e em local desprotegido. A carbonatação do concreto exposto à chuva foi duas vezes menor que a do concreto protegido. A maior presença de água nos poros dos concretos expostos acarretou esse comportamento.

¹⁰ BYFORS, K. **Chloride – initiated reinforcement corrosion: chloride binding**. Stockholm: CBI (Report 1:90), 1990. 121 p.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os procedimentos experimentais deste trabalho foram realizados com o intuito de caracterizar e medir a deposição de cloretos em zona de atmosfera marinha na região da grande Vitória e estabelecer uma relação dessa deposição com a concentração de cloretos no concreto.

Toda a pesquisa foi feita com base em parâmetros naturais, medindo a concentração de cloretos na atmosfera em pontos de exposição localizados próximos ao mar e expondo concretos ao ataque de cloretos presentes na atmosfera. Esse procedimento visa à aproximação dos resultados colhidos com a realidade.

A determinação de cloretos na atmosfera foi obtida pelo ensaio da Vela Úmida, em cinco pontos de exposição localizados na grande Vitória. De forma simultânea, foram monitorados os parâmetros climatológicos da região, com base nas medidas obtidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia. Os ensaios de laboratório para determinação de cloretos foram realizados no Laboratório de Caracterização de Resíduos do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes).

Os concretos utilizados na pesquisa foram produzidos e moldados no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção Civil, também localizado na Ufes. Os materiais utilizados nos traços foram escolhidos levando em consideração aqueles mais comuns na região. A caracterização do concreto foi feita no mesmo local da produção, através de ensaios de caracterização no estado fresco e endurecido, absorção e penetrabilidade induzida de cloretos.

4.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA

Nessa dissertação, usou-se três tipos de variáveis, segundo a classificação de Lakatos e Marconi (2000): variáveis independentes, variáveis dependentes e variáveis de controle.

4.1.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes são aquelas que vão causar ou alterar os resultados de outras variáveis ou que podem ser manipuladas (LAKATOS E MARCONI, 2000). A sua definição é importante para explicar ou justificar os comportamentos dos resultados que serão colhidos no experimento.

4.1.1.1 *Distância em relação ao mar*

A distância em relação ao mar é um importante fator na determinação da deposição de cloretos, formando faixas de menor agressividade conforme o afastamento da costa. A névoa salina gerada no mar é carregada pelo vento, mas as partículas de sal tendem a se depositar nas distâncias mais curtas, até cerca de 200 metros (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996; MEIRA *et al.*, 2006).

Foram escolhidas cinco distâncias em relação ao mar para pontos de exposição: 10, 65, 120, 240 e 520 metros. Os pontos a 10 e 65 metros foram localizados na praia de Manguinhos, município de Serra. Esses pontos serão usados apenas para a medida da deposição de cloretos. As demais distâncias foram locadas na área do sítio do Aeroporto de Vitória, praia de Camburi, e receberam os aparatos para determinação da concentração de cloretos na atmosfera e mais os corpos de prova de concreto para exposição natural à salinidade.

A escolha dos pontos de exposição ocorreu com o intuito de encontrar a melhor forma de equacionar a disponibilidade dos terrenos e o atendimento aos objetivos do trabalho. Tomando a referência de 200 metros do mar, quando a salinidade atmosférica diminui, definiu-se fragmentar mais os pontos abaixo dessa distância ou em seu entorno (10, 65, 120 e 240 m) e estabelecer apenas um ponto de distância maior (520 m). O terreno em Manguinhos, que comportou os pontos de 10 e 65 metros era

particular e os donos não cederam permissão para expor os corpos de prova de concreto.

4.1.1.2 Relação água/cimento

A relação água/cimento determina a qualidade do concreto em vários aspectos, pois influencia na trabalhabilidade e na massa específica quando fresco e na porosidade, na durabilidade e na resistência mecânica, quando endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Dessa forma, a escolha de traços de concreto com diferentes relações a/c (água/cimento) fornece ao trabalho uma variedade de concretos para serem avaliados quanto à penetração de cloretos.

Para a determinação dos traços, partiu-se da maior relação a/c permitida pela NBR 6118 (ABNT, 2007) que é de 0,55 em ambiente marinho e definiu-se um traço mais forte, com a/c 0,45 e um traço mais fraco, de a/c 0,65 ficando, assim, três concretos: T45, T55 e T65. O traço mais fraco está em desacordo com as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2007), que determina uma a/c máxima de 0,60, mas ele foi escolhido por representar relações a/c usadas cotidianamente antes da norma, além de servir para avaliar o comportamento de um concreto com maior porosidade. De forma análoga, o traço T45 foi definido para se testar o comportamento de um concreto com baixa porosidade em relação à agressividade marinha natural.

4.1.1.3 Parâmetros ambientais

Os parâmetros ambientais serão considerados variáveis independentes quando do estudo da concentração de cloretos em concreto. Serão considerados:

- Taxa de deposição de cloretos na névoa salina.
- Comportamento climático:
 - umidade relativa;
 - temperatura ambiente;
 - precipitação pluviométrica;
 - velocidade dos ventos;
 - direção dos ventos.

No estudo da deposição de cloretos em atmosfera marinha, essas mesmas variáveis são consideradas dependentes. Os critérios para a determinação dessas variáveis serão vistos no item 4.1.2.1.

4.1.2 Variáveis dependentes

São as variáveis que dependem dos procedimentos de investigação e têm o intuito de responder às perguntas do trabalho (LAKATOS E MARCONI, 2000). De forma simples, são aquelas variáveis cujos resultados são apenas medidos ou registrados, não havendo possibilidade de controle.

Com base nos estudos realizados para o referencial teórico dessa dissertação, dividiram-se as variáveis dependentes em dois grupos: parâmetros ambientais e comportamento do concreto em zona de atmosfera marinha.

4.1.2.1 *Parâmetros ambientais*

Serão, nesse estudo, variáveis dependentes relativas aos parâmetros ambientais:

- Taxa de deposição de cloretos na névoa salina.
- Comportamento climático:
 - umidade relativa;
 - temperatura ambiente;
 - precipitação pluviométrica;
 - velocidade dos ventos;
 - direção dos ventos.

A taxa de deposição de cloretos na névoa salina é uma das formas de medir a concentração de cloretos na atmosfera. Os cloretos presentes no ar se depositam por ação da gravidade e vão se acumulando nas superfícies (McKAY *et al.*, 1994; PETELSKI; CHOMKA, 1997). Estudos que tratam de corrosão metálica em ambiente natural partem dessa medida para avaliar a agressividade do ambiente e o comportamento da corrosão.

A taxa de deposição foi determinada em todos os pontos de exposição através de aparatos colocados para a realização do ensaio da Vela Úmida (ASTM G-140, 2002). A escolha desse método é justificada por ser o mesmo utilizado internacionalmente, bem

como no trabalho de Meira (2004), quando avaliou a taxa de deposição de cloretos na cidade de João Pessoa, de forma a se aproximar aos resultados alcançados pelo autor. Além disso, trata-se de um método utilizado por vários autores que avaliaram a deposição de cloretos.

Em relação ao comportamento climático, os parâmetros escolhidos têm a finalidade principal de caracterizar a climatologia da região durante o período de estudo. Por se tratar de um estudo com exposição natural, é importante o conhecimento dessas medidas, pois elas podem justificar comportamentos encontrados. As determinações de clima foram obtidas através de uma estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e de uma estação meteorológica localizada no Aeroporto de Vitória, que faz parte da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET).

A velocidade e a direção dos ventos cumprem papéis mais importantes na análise da climatologia. Vários autores reportam a forte influência do regime dos ventos sobre a taxa de deposição de cloretos (LOVETT, 1978; FITZGERALD, 1991; MORCILLO *et al.*, 2000). Além do regime dos ventos, a umidade relativa também modifica o comportamento da deposição de cloretos, mas como efeito de segunda ordem.

Outro parâmetro observado com atenção foi a precipitação pluviométrica, pois o excesso de chuva provoca uma lavagem na superfície de concreto, diminuindo a concentração superficial de cloretos (MEIRA, 2004). Esse efeito é mais observado em tempos curtos de exposição natural do concreto, o que se aplica a esse trabalho.

4.1.2.2 Avaliação dos concretos em Zona de Atmosfera Marinha

As estruturas de concretos em Zona de Atmosfera Marinha (ZAM) estão expostas ao ataque de cloretos presentes na névoa salina. Esses cloretos se depositam na superfície do concreto e são transportados para o seu interior por difusão iônica e por absorção capilar (CASCUDO, 1997).

Para avaliar a quantidade de cloretos no concreto submetido à exposição natural, foram expostos pelo menos dois Corpos de Prova (CP) de cada traço nos pontos de exposição a 120, 240 e 520 metros do mar. Nesses concretos, foram determinados como variáveis dependentes:

- teor de cloretos totais na superfície do concreto;

- teor de cloretos totais no interior do concreto (perfis);
- profundidade de carbonatação.

A determinação do teor de cloretos na superfície do concreto serve como parâmetro para o ingresso de cloretos. Esse teor tem o objetivo de mostrar a oferta de íons Cl^- na superfície do concreto, que irão desencadear o transporte (ANDRADE; SAGRERA; SANJUÁN, 2000).

Para medir a concentração superficial, foram feitas duas determinações de teor de cloretos na superfície, para todos os concretos analisados. A primeira foi realizada após 6 meses de exposição dos CP e outra após 10 meses de exposição. O curto tempo de exposição dos CP foi devido ao tempo para conclusão da pesquisa de mestrado. O espaçamento entre medidas de quatro meses foi escolhido para avaliar o efeito da precipitação nas medidas de concentração superficial, pois entre as duas determinações ocorre o período de chuva na região estudada. A análise química para determinação de cloretos foi feita no Laboratório de Pesquisa em Materiais e Resíduos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) e no laboratório de Engenharia Eletroquímica da Universidade Federal de Campina Grande, pelo método da titulação potenciométrica.

Após o ingresso no concreto, as concentrações de cloretos se alteram com a distância para a superfície do CP, formando perfis de concentração (SANDBERG; TANG; ANDERSEN, 1998). O teor de cloretos no interior do concreto é a quantidade de íons Cl^- em cada ponto determinado. Essa quantidade, após atingir um determinado valor, provoca a corrosão das armaduras contidas nas estruturas de concreto.

Para a medida da concentração total de cloretos, foram usados os mesmos CP expostos para a determinação da concentração superficial. As determinações dos perfis foram realizadas somente aos 10 meses, para que os resultados obtidos fossem relativos a um maior tempo de exposição à agressividade. O procedimento para análise química de cloretos foi o mesmo da concentração superficial.

A determinação de cloretos totais é a soma dos cloretos combinados com os cloretos livres. Apenas os cloretos livres participam na corrosão metálica, mas sua determinação utiliza uma metodologia que requer recursos mais complexos. Além disso, os cloretos combinados podem se tornar livres, dependendo de fatores como carbonatação e grau de saturação do concreto. A determinação de cloretos totais é

mais simples e é utilizada amplamente, tanto nos trabalhos de diversos autores como nas exigências de norma.

4.1.3 Variáveis de Controle

Segundo Lakatos e Marconi (2000), as variáveis de controle são um tipo especial de variáveis independentes sobre as quais o autor tem domínio. A definição das variáveis de controle é importante para diminuir a abrangência do estudo. Nesse trabalho, as variáveis de controle dizem respeito ao concreto:

- tipos de agregados;
- tipo de cimento;
- condições de cura.

Os agregados têm a finalidade de reduzir a retração do concreto, além de contribuir com a trabalhabilidade, de acordo com a forma dos grãos e o teor de finos (BAUER, 2008). Foram mantidas iguais a procedência, a litologia e a granulometria dos agregados utilizados nos traços de concreto.

O agregado miúdo utilizado é do tipo areia lavada de rio. Antes do uso, passou por um peneiramento para separar os grãos maiores que 4,8 mm. Como agregado graúdo, foi selecionada brita nº 1, de dimensão máxima dos grãos de 19 mm. Todo o material estava armazenado em baias a céu aberto no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção Civil (LEMAC) do Centro Tecnológica da Ufes.

O tipo de cimento influencia no transporte de cloretos no interior do concreto, dificultando-o de acordo com sua finura e ainda contribui para a fixação de cloretos na matriz cimentícia, através da combinação dos íons Cl^- com os produtos do clínquer e de algumas adições (AL-KHAJA, 1997).

Toda a pesquisa foi realizada com cimento tipo CPIII40 fornecido pelo fabricante da marca MIZU¹¹ e do mesmo lote. Escolheu-se o CPIII40 porque é o cimento mais utilizado nas obras da grande Vitória (PACHECO, 2006).

¹¹ Cimento proveniente da Fábrica da Mizu localizada em Vitória.

O tipo de cura do concreto contribui negativamente para a absorção de água e para o aparecimento de fissuras de retração. Concretos com maior tempo de cura tendem a apresentar menores teores de cloretos, principalmente após curtos períodos de exposição (JAERGEMANN, 1990). Nos concretos utilizados, a cura foi feita em câmara úmida por período mínimo de quatorze dias, para todos os CP empregados.

4.1.4 Visão geral da pesquisa

Para facilitar a visualização do programa experimental, foi elaborado o fluxograma que pode ser visto na Figura 4.1. Esse fluxograma mostra como as etapas da pesquisa ocorrem de forma simultânea, envolvendo o monitoramento do ambiente estudado e a exposição dos concretos à agressividade natural.

Na Figura 4.2, pode ser visto um organograma que apresenta esquematicamente a avaliação dos concretos em ZAM. São mostrados os traços utilizados na pesquisa, diferenciados pela relação água/cimento, como cada traço será caracterizado e em quais distâncias ao mar eles estarão expostos.

Maiores detalhes sobre as metodologias usadas nessa dissertação são apresentadas nos itens a seguir.

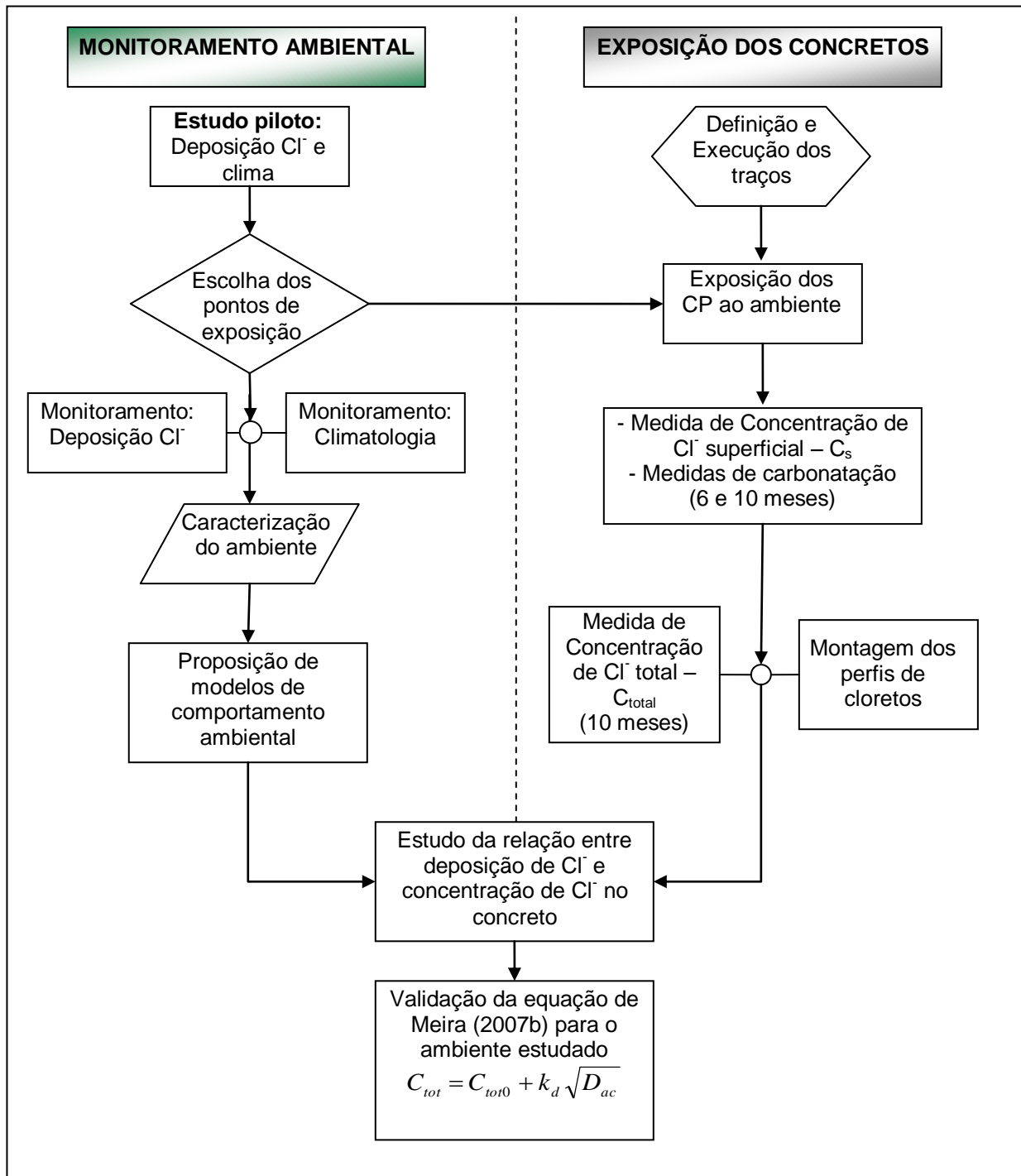


Figura 4.1: fluxograma geral da pesquisa.

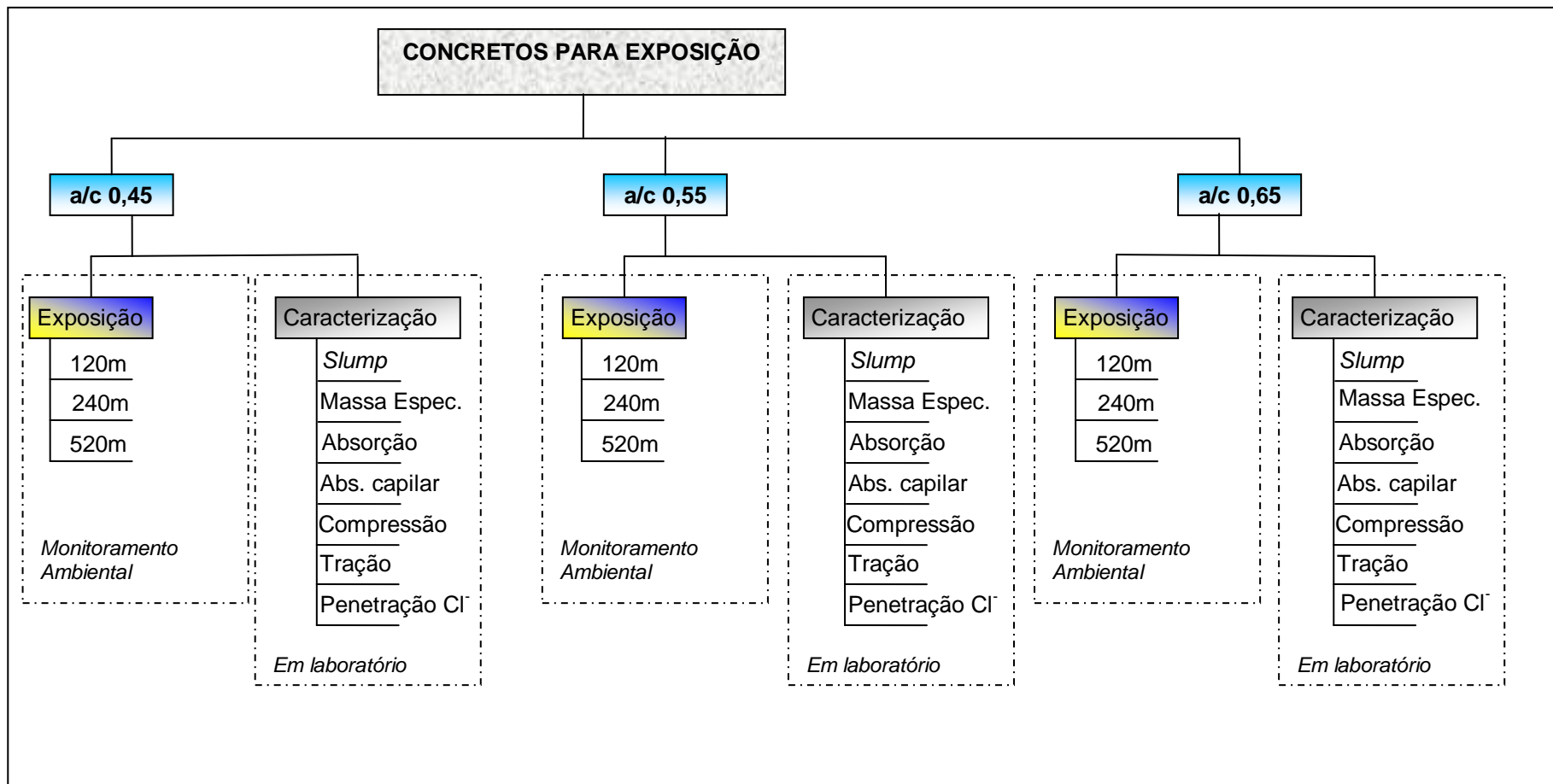


Figura 4.2: organograma da exposição e caracterização dos concretos.

4.2 MONITORAMENTO AMBIENTAL

O monitoramento do ambiente de estudo foi feito em duas frentes, através da caracterização do clima e da determinação da taxa de cloretos na atmosfera durante o período de estudo. O comportamento das medidas ambientais influencia fortemente os resultados encontrados, uma vez que toda a avaliação teve como base a exposição dos concretos às condições naturais.

4.2.1 Medidas climatológicas

As medidas climatológicas do ambiente estudado foram obtidas através dos dados colhidos em duas estações meteorológicas, uma localizada no Aeroporto de Vitória, pertencente à REDEMET e outra localizada no centro de Vitória, que pertence ao INMET. O Quadro 4.1 e a Figura 4.3 mostram a localização das estações citadas.

| Estação | Coordenada geográfica | |
|---------|-----------------------|------------------|
| | Latitude | Longitude |
| INMET | 20° 18' 56,16" S | 40° 19' 01,92" W |
| REDEMET | 20° 15' 20,96" S | 40° 17' 16,72" W |

Quadro 4.1: localização das estações meteorológicas utilizadas no trabalho através de coordenadas geográficas.

A Estação INMET é do tipo superfície automática, pois realiza medições minuto a minuto e as registra a cada hora, através de uma unidade de memória central (INMET, 2009). Os dados registrados ficam disponíveis por até três meses no sítio do INMET da rede mundial de computadores. Nessa estação, podem-se obter os seguintes parâmetros, a cada hora:

- temperatura média, máxima e mínima (°C);
- umidade relativa do ar média, máxima e mínima (%);
- ponto de orvalho, médio, máximo e mínimo (°C);
- pressão atmosférica média, máxima e mínima (hPa);
- velocidade média e velocidade de rajada do vento (m/s);
- direção do vento (°)

- radiação solar (kJ.m^2)
- precipitação pluviométrica (mm).

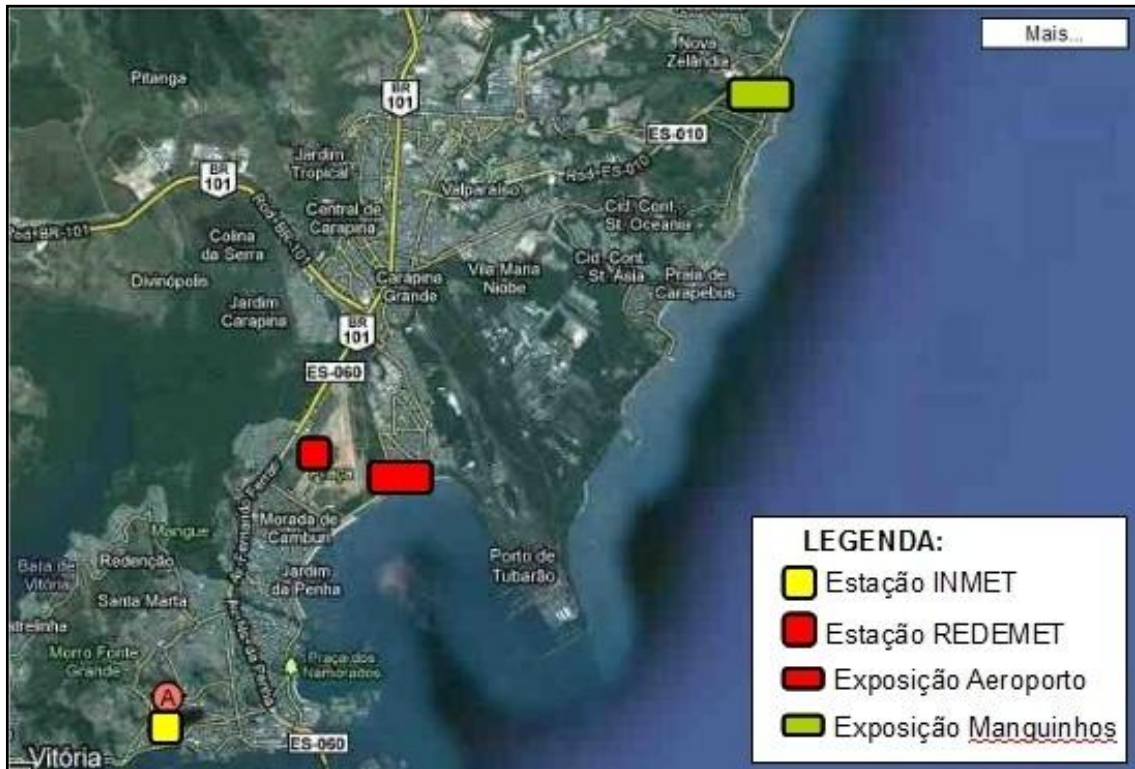


Figura 4.3: localização das estações meteorológicas utilizadas no trabalho (Fotografia: GOOGLE MAPS, 2010).

Os dados registrados no sítio do INMET foram acessados e guardados em uma planilha eletrônica, de acordo com o tempo de exposição do ensaio de Vela Úmida (VU). Foram registradas data e hora de início de exposição da VU, quando o aparato era colocado em cada ponto, e data e hora de fim de ensaio de VU, na retirada do aparato. Para fins de caracterização climatológica, foi considerado apenas o intervalo de tempo entre a colocação da primeira VU e a retirada da última VU.

Os dados da Estação REDEMET foram utilizados de forma secundária, quando houve alterações significativas nos resultados de deposição de cloretos. Nessa estação, são obtidas medidas instantâneas a cada hora e registradas na rede mundial de computadores através de gráficos, por até 4 dias. Dessa forma, é possível obter os seguintes parâmetros:

- temperatura do ar e ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$);
- pressão atmosférica (hPa);

- visibilidade (m);
- direção do vento (°);
- velocidade dos ventos (nós).

Os gráficos registrados foram acessados a cada três dias e guardados em unidades de memória de computador. Depois, os resultados dos gráficos foram transferidos para uma planilha eletrônica, onde foi feita a conversão da velocidade de vento em nós para metros por segundo.

Para esse estudo, foram consideradas apenas as medidas de temperatura, umidade relativa, precipitação, velocidade e direção dos ventos.

No que se refere à velocidade e direção de ventos, cabe aqui fazer uma explanação melhor, posto que esses sejam os parâmetros climáticos mais importantes no transporte de cloretos em ZAM. Foi calculada a média durante o período de exposição da vela úmida de três formas distintas: média aritmética de todo o período (Equação 6); média de todo o período considerando apenas os ventos acima de 3 m/s (Equação 7); e médias de todo o período considerando apenas os ventos provenientes do mar (Equação 8). As equações para obter esses parâmetros são descritas a seguir:

$$v_t = \frac{\sum v}{n} \quad (\text{Equação 6})$$

$$v_3 = \frac{\sum_{v>3} v}{n_3} \quad (\text{Equação 7})$$

$$v_{mar} = \frac{\sum_{v,mar} v}{n_{mar}} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

$\sum v$ – soma da velocidade dos ventos durante o período de exposição;

n – n° total de horas de exposição;

$\sum_{v>3} v$ - soma da velocidade dos ventos acima de 3m/s, durante o tempo de exposição;

n_3 – nº de horas de ocorrência de ventos acima de 3m/s;

$\sum_{v;mar} v$ - soma da velocidade dos ventos provenientes do mar;

n_{mar} - nº de horas de ocorrência de ventos provenientes do mar.

Foram considerados ventos provenientes do mar, de acordo com a disposição do terreno, aqueles gerados com as seguintes direções:

- Mangueiros: S, SSE, SE, ESE, E, ENE, NE, NNE, N (entre 0° e 180°)
- Aeroporto: E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W (entre 90° e 270°)

4.2.2 Monitoramento da deposição de cloretos

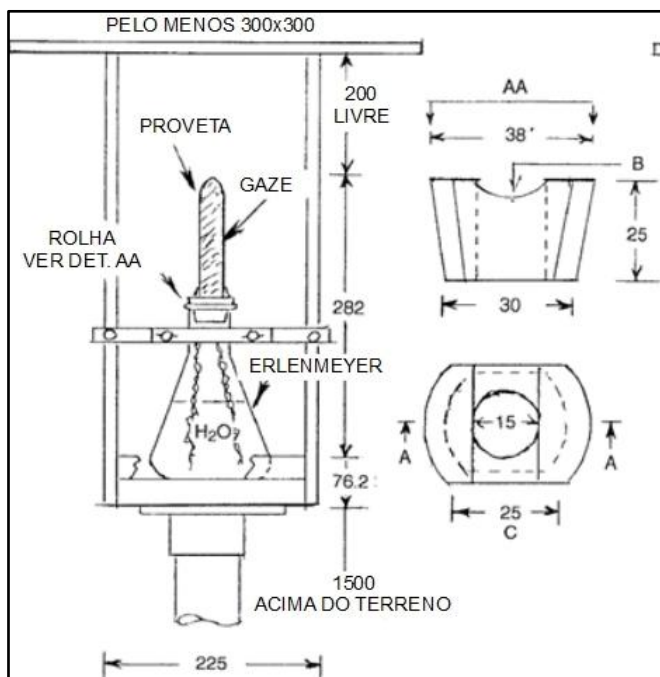
A determinação da deposição de cloretos na atmosfera foi feita através do ensaio Vela Úmida, conforme definido na norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) G140 (ASTM, 2002). Cada ponto de exposição recebeu um aparato para a realização do ensaio. O ensaio da Vela Úmida é realizado em três etapas: montagem do aparato, exposição da VU e análise química para determinação de cloretos.

Para a montagem da VU, é enrolada uma gaze cirúrgica em um cilindro de polietileno. O cilindro é fixo em uma rolha de borracha que por sua vez é presa a um frasco de Erlenmeyer cheio com água destilada e deionizada. A gaze deve ter as pontas soltas e estendidas até que fique em contato com a água no frasco (Figura 4.4a). Todo o procedimento foi feito com parcimônia, evitando o risco de contaminação.

O princípio do ensaio é que os íons cloretos presentes no ar aderem à superfície da gaze e depois são transportados para a água no frasco de Erlenmeyer por difusão iônica.

Após a montagem de todas as Velas Úmidas, elas foram transportadas em um recipiente plástico até a colocação nos aparatos localizados nos pontos de exposição. A Figura 4.4b mostra um dos aparatos expostos. Durante a exposição, a cada três dias, o frasco de Erlenmeyer de cada VU era novamente preenchido com

água destilada e deionizada. Após o tempo mínimo de 21 dias, eram retiradas todas as VU e levadas ao laboratório para determinação de cloretos.



(a)

(b)

Figura 4.4: esquema de montagem da vela úmida, com medidas em milímetro (a) (ASTM, 2002). Aparato de vela úmida, exposto a 520m de distância do mar (b).

A análise de cloretos é feita em todas as Velas Úmidas recolhidas, separadas por ponto de exposição. Antes da determinação, é necessário desenrolar a gaze da VU e colocá-la em um béquer de 1000 ml. A água do frasco de Erlenmeyer também deve ser derramada nesse béquer. Deve-se lavar o interior do Erlenmeyer e o cilindro, escorrendo a água de lavagem para o mesmo béquer. Essa amostra deve ficar reservada por 24 horas. A determinação da quantidade de cloretos foi feita pelo método de Mohr (volumetria) com solução de Nitrato de Prata a 0,01N e o procedimento é descrito em Lessa (1984).

4.2.3 Escolha dos pontos de exposição

Antes de iniciar a exposição dos CP de concreto, foram realizadas duas medidas de deposição de cloretos pelo ensaio da Vela Úmida. Essas medidas serviram como

referência para definir os pontos de exposição e para verificar o comportamento da névoa salina frente aos parâmetros de clima.

As medidas de deposição foram realizadas em duas datas: uma entre os dias 19 de novembro e 10 de dezembro de 2007 e outra entre os dias 18 de fevereiro e 10 de março de 2008. Foi respeitado o tempo mínimo de 21 dias de exposição da VU, segundo exigência da norma ASTM G140 (ASTM, 2002). Os resultados da deposição de cloretos podem ser vistos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: medidas iniciais de deposição de cloretos.

| Distância ao mar (m) | Deposição de cloretos (mg/m ² .dia) | |
|-------------------------|--|--------------|
| | Out-Nov/2007 | Fev-Mar/2008 |
| 5-10 [*] | 770,68 | 256,50 |
| 70-65 ^{**} | 69,91 | 39,76 |
| 120 | 134,19 | 116,06 |
| 240 | 53,88 | 32,55 |
| 520 | 7,29 | 3,64 |

* Na primeira medida, esse ponto de exposição estava a 5m do mar.
 ** Na primeira medida, esse ponto estava a 70m do mar.

Conforme mostrado na Tabela 4.1, o ponto a 70m (ou 65m) apresentou resultado incompatível com o esperado, ocorrendo concentração menor no ponto a 120m do mar. Esse fato pode ser atribuído aos obstáculos na parte anterior ao ponto, isto é, por trás do aparato de vela úmida (Figura 4.5). A primeira solução adotada foi afastar o aparato dos obstáculos, passando o ponto a ficar a 65m de distância pro mar. Esse recurso não surtiu efeito e, na segunda medida, realizada em março de 2008, o ponto voltou a apresentar concentrações abaixo do esperado. A partir de então, resolveu-se descartar os resultados desse ponto para a pesquisa, mas as medições continuaram sendo feitas com o intuito de acompanhar seu comportamento frente aos parâmetros climáticos.

Outro ponto deslocado foi o mais próximo ao mar. A primeira medida, tomada a 5m do mar, deu um valor elevado, típico de Zona de Spray. Além disso, na retirada da VU desse ponto, notou-se que a areia estava úmida, como ocorre em Zona de Spray quando a maré está alta. Essa zona é importantíssima no estudo da durabilidade de concretos, mas não é objeto desse trabalho. Assim sendo, escolheu-se deslocar tal

ponto para 10m do mar, evitando o respingo da água do mar durante a maré alta. Esse fato, juntamente com o relatado do ponto a 70m, corrobora a importância da escolha dos pontos de exposição quando se realiza um estudo desse tipo.

Um estudo das medidas climáticas também foi realizado, com a finalidade de caracterizar o ambiente do local pesquisado. Os resultados são apresentados na Tabela 4.2. Os dados climáticos aqui apresentados foram fornecidos pela Estação INMET.



Figura 4.5: ponto de exposição a 70m do mar, presença de obstáculos na por trás do aparato.

É possível notar uma diminuição na velocidade média dos ventos entre o primeiro e o segundo período de exposição. Esse fato explica a diminuição ocorrida nos valores de deposição de cloretos em todos os pontos, inclusive os mais distantes do mar – 120 m, 240 m e 520 m. Além da maior média de velocidade, os ventos da primeira medida ocorreram de direção predominante marinha, o que também contribui para os valores mais altos de deposição.

Como destaque secundário, observou-se um aumento na precipitação pluviométrica e na umidade relativa do ar entre os meses de fevereiro e março, comportamento típico na região de estudo, de clima tropical.

Tabela 4.2: caracterização climática durante o período de estudo.

| | Regime dos ventos | | | Temp. (°C) | | | UR (%) | | | Chuva (mm) |
|--------------|------------------------------|------------------------------------|------|------------|------|-------|--------|-----|-------|------------|
| | Vel. média (v_t - m/s) | Direção predominante ¹² | | | | | | | | |
| | | 1ª | 2ª | Máx | Mín | Média | Máx | Mín | Média | |
| Out-Nov 2007 | 2,42 | N-NE | N | 33,7 | 17,8 | 25,3 | 95 | 26 | 74,1 | 45,6 |
| Fev-Mar 2008 | 1,67 | NW | W-NW | 34,6 | 19,8 | 26,1 | 95 | 42 | 79,3 | 162,0 |

Esse estudo piloto cumpriu com seu objetivo de definição dos pontos de exposição e avaliação do comportamento da deposição de cloretos frente ao clima. Os pontos ficaram definidos a 10 metros do mar, na praia de Manguinhos e 120 metros, 240 metros e 520 metros, no Aeroporto. A localização dos pontos pode ser vista na Figura 4.6. As coordenadas geográficas de cada ponto são vistas no Quadro 4.2.

| Distância ao mar (m) | Coordenada geográfica |
|----------------------|-----------------------------------|
| 10 | 20° 11' 10,87" S 40° 11' 27,81" W |
| 120 | 20° 16' 02,82" S 40° 16' 18,06" W |
| 240 | 20° 15' 56,70" S 40° 16' 15,97" W |
| 520 | 20° 15' 48,25" S 40° 16' 18,99" W |

Quadro 4.2: localização dos pontos de exposição para medição da concentração de cloretos na atmosfera.

¹² A nomenclatura da direção dos ventos pode ser encontrada no ANEXO A.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6: Localização dos pontos de exposição utilizados na pesquisa. Situação na Grande Vitória (a); pontos localizados no Aeroporto (b); ponto de exposição em Manguinhos (c).

4.3 CONCRETOS ESTUDADOS

Os concretos estudados foram produzidos no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção (LEMAC) da Ufes. Os materiais utilizados foram armazenados de

forma controlada, de modo a garantir suas características até a produção do concreto.

Os traços foram escolhidos com o intuito de retratar os concretos utilizados na Grande Vitória. Nesta seção, aborda-se a caracterização dos materiais que compõem os concretos e como foi realizada a dosagem dos traços utilizados na pesquisa.

4.3.1 Materiais

4.3.1.1 *Cimento Portland*

O cimento utilizado na pesquisa é do tipo CPIII40, fornecido pelo fabricante MIZU. Esse cimento é composto de 25 % a 65 % de clínquer e gesso e recebe adições 35 a 70% de escória granulada de alto forno e até 5% de fíler calcário, de acordo com a NBR 5735 (ABNT, 1991). Os resultados da caracterização do cimento são vistos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: caracterização do cimento CPIII40 utilizado na pesquisa.

| Determinações – CPIII40 | | Valores | Método de ensaio | Exigências de norma |
|--|---|---------|------------------|---------------------|
| | Massa específica (g/cm ³) | 2,95 | NBR NM 23 | N. E. |
| | Área específica Blaine (cm ² /g) | 4380 | NBR NM 76 | N. E. |
| | Resíduo na peneira 75 µm (%) | 0,52 | NBR 11579 | ≤ 8,0% |
| | Resíduo na peneira 45 µm (%) | 1,50 | NBR 12826 | N. E. |
| Propriedades físicas e mecânicas | Expansibilidade a frio (mm) | 0,0 | NBR 11582 | ≤ 5 |
| | Expansibilidade a quente (mm) | 0,0 | | |
| | Resistência à compressão - 3 dias (MPa) | 20,1 | NBR 7215 | ≥ 12,0 |
| | Resistência à compressão - 7 dias (MPa) | 32,7 | | ≥ 23,0 |
| | Resistência à compressão - 28 dias (MPa) | 50,2 | | ≥ 40,0 |
| Resistência à compressão - 91 dias (MPa) | 62,5 | ≥ 48,0 | | |
| Consistência normal e tempo de pega | Água da pasta (%) | 34,0 | NBR NM 43 | N. E. |
| | Início de pega (h:min) | 2:20 | NBR NM 65 | ≥ 1h |
| | Fim de pega (h:min) | 5:40 | | ≤ 10h |

N. E.: Não especificado.

(...)

Tabela 4.3: caracterização do cimento CP1140 utilizado na pesquisa (continuação).

| Determinações – CP1140 | | Valores | Método de ensaio | Exigências de norma |
|---------------------------------|---|-----------|------------------|---------------------|
| Propriedades químicas | Perda ao fogo (%) | 2,41 | NBR NM 18 | ≤ 4,5 |
| | Resíduo insolúvel (%) | 0,63 | NBR NM 15 | ≤ 1,5 |
| | Anidrido sulfúrico (SO ₃) (%) | 2,27 | NBR NM 16 | ≤ 4,0 |
| | Anidrido carbônico (CO ₂) (%) | 1,12 | NBR NM 20 | ≤ 3,0 |
| | Enxofre (S) (%) | 0,23 | NBR NM 19 | ≤ 1,0 |
| | Óxido de magnésio (MgO) (%) | 5,02 | NBR NM 14 | N. E. |
| | Dióxido de silício (SiO ₂) (%) | 26,54 | | N. E. |
| | Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃) (%) | 1,95 | NBR 7215 | N. E. |
| | Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) (%) | 8,65 | | N. E. |
| | Óxido de cálcio (CaO) (%) | 51,94 | | N. E. |
| Óxido de cálcio livre (CaO) (%) | 0,88 | NBR NM 12 | N. E. | |

N. E.: Não especificado.

4.3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados estavam armazenados em baias, separando os agregados miúdos dos graúdos. Como agregado miúdo, foi utilizado areia lavada de rio após passar por peneiramento em malha de abertura 4,8 mm para separação de grãos maiores. Foi usada brita de petrologia granítica com diâmetro máximo de 19 mm como agregado graúdo.

A caracterização dos agregados utilizados é vista na Tabela 4.4. As curvas granulométricas dos agregados podem ser vista na Figura 4.7. A amostragem dos agregados foi feita de acordo com a NBR NM 26 (ABNT, 2001) e os procedimentos para a redução de amostra de campo para ser usada em laboratório seguiu as determinações da NBR NM 27 (ABNT, 2000).

Tabela 4.4: caracterização dos agregados.

| Determinação | Areia | Brita 19 mm | Método |
|--|---------|-------------|------------|
| Massa específica real (g/cm ³) | 2,65 | - | NBR NM 52 |
| | - | 2,75 | NBR NM 53 |
| Massa específica aparente (g/cm ³) | 1,42 | 1,57 | NBR NM 45 |
| Material fino menor que 75 µm (%) | 1,7 | 0,4 | NBR NM 46 |
| Impurezas orgânicas (cor da solução) | + clara | - | NBR NM 49 |
| Torrões de argila e materiais friáveis (%) | 0,85 | - | NBR 7218 |
| Absorção de água (%) | 0,23 | - | NBR NM 30 |
| | - | 0,36 | NBR NM 53 |
| Módulo de finura | 1,96 | 5,97 | NBR NM 248 |
| Dimensão máxima característica (mm) | 2,4 | 19 | |

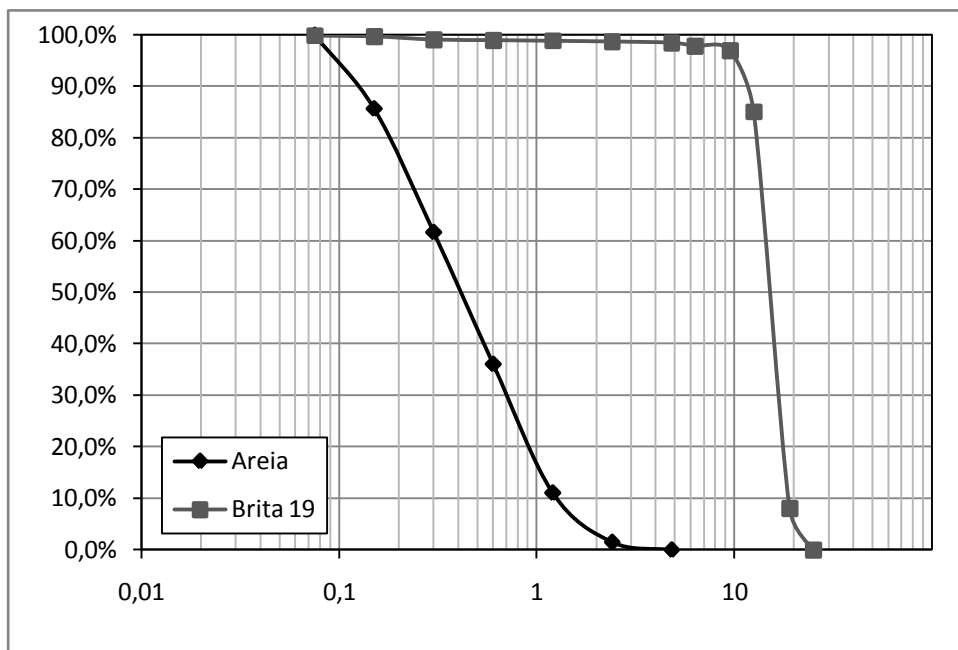


Figura 4.7: curva granulométrica dos agregados.

4.3.1.3 Água e aditivo

A água utilizada na mistura foi obtida na rede de abastecimento da concessionária local. Por ser uma água potável, que recebe tratamento, não é necessário fazer ensaios de caracterização, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007).

Para atingir a trabalhabilidade requerida no traço de relação água/cimento 0,45, foi utilizado aditivo químico superplastificante de terceira geração, à base de éter

carboxílico, fornecido pela empresa Basf, de nome comercial Glenium 51. Suas características foram fornecidas pela empresa e estão listadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: propriedades físicas do aditivo Glenium 51, fornecidas pelo fabricante (BASF, 2007).

| Determinação | Valor |
|--------------------------------|--------------|
| Aparência | Cor bege |
| pH | 6 |
| Densidade (g/cm ³) | 1,069 |
| Teor de sólidos (%) | 28,9 |
| Viscosidade (cps) | 95 - 160 |

4.3.2 Dosagem e produção do concreto

Foram produzidos três diferentes traços de concreto, usando o mesmo tipo de cimento e os mesmos agregados, variando apenas a relação água/cimento (relação a/c). Dessa forma, teremos três diferentes concretos: T45 – a/c 0,45; T55 – a/c 0,55; e T65 – a/c 0,65.

A dosagem dos concretos foi feita de acordo com o método prático de Helene e Terzian (1993). Inicialmente, foram obtidos traços levando em conta o teor de argamassa de 50%, relação cimento: agregados 1:5 e as relações a/c já descritas. Com o traço inicial, partiu-se para a produção do concreto objetivando alcançar uma consistência de 80 ± 10 mm, obtida pelo ensaio do abatimento do tronco de cone segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Além da consistência, foram observadas a textura do concreto fresco e a ocorrência de segregação ou exsudação (Figura 4.8).

Dessa forma, os traços obtidos para cada tipo de concreto sofreram alterações de sua composição ao longo da produção. Como exemplo, o concreto T45 teve que receber aditivo plastificante, pois não foi possível chegar à consistência requerida apenas modificando as quantidades de materiais. O objetivo inicial era que nenhum traço recebesse plastificante, para manter a igualdade da pasta. Os traços finais de cada concreto podem ser vistos na Tabela 4.6.



(a)

(b)

Figura 4.8: segregação dos agregados e textura áspera (a); espalhamento do concreto por excesso de plasticidade (b).

Tabela 4.6: traços finais da dosagem do concreto utilizado na pesquisa.

| Concreto | Rel. a/c | Consumo de cimento (kg/m ³) | Teor de argamassa | Teor de aditivo (massa) | Traço em massa |
|----------|----------|---|-------------------|-------------------------|------------------|
| T45 | 0,45 | 352,7 | 45,5% | 0,23% | 1:1,84:3,40:0,45 |
| T55 | 0,55 | 363,1 | 45,0% | - | 1:1,83:3,46:0,55 |
| T65 | 0,65 | 322,0 | 50,2% | - | 1:2,47:3,44:0,65 |

Quando o concreto não atendia às propriedades visuais e à consistência no estado fresco, eram adicionados mais materiais – pasta ou agregados – de acordo com o comportamento. A Figura 4.9 mostra o fluxograma da dosagem e produção do concreto.

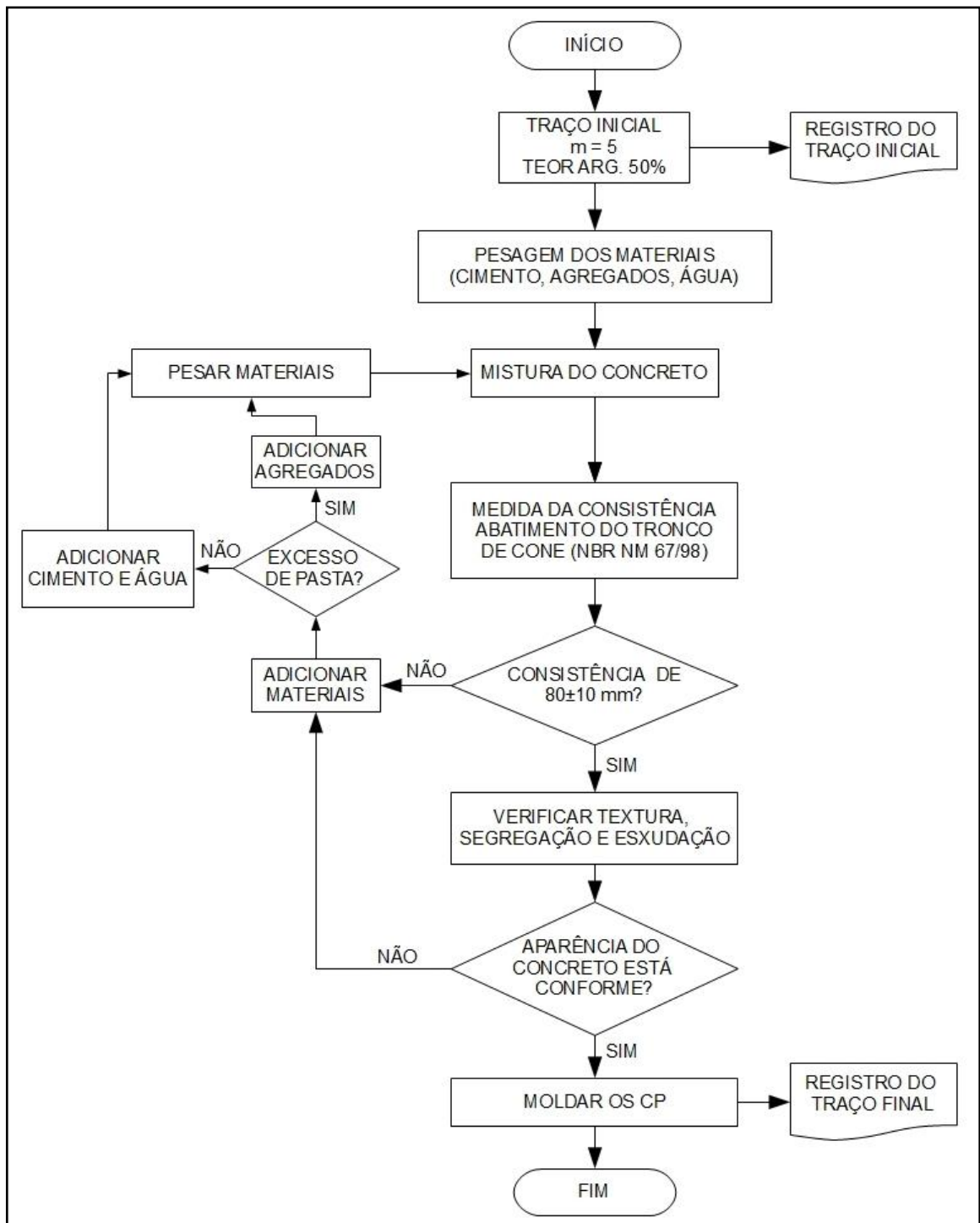


Figura 4.9: fluxograma da dosagem e produção do concreto.

Após a verificação da consistência e dos aspectos visuais, o concreto foi lançado em formas metálicas para moldagem dos corpos de prova. O lançamento foi feito em camadas e o concreto foi adensado com vibrador de agulha. Após 24 ± 2 h os CP foram desmoldados e colocados em câmara úmida para cura durante 14 dias.

Durante o lançamento do concreto, foi retirada uma parte para realização do ensaio de massa específica no estado fresco, de acordo com a NBR NM 47 (ABNT, 2002). Para exposição à agressividade ambiente, moldaram-se 7 CP prismáticos de 10 cm x 10 cm x 30 cm, sendo dois para cada ponto de exposição e um para reserva. Para os ensaios de caracterização do concreto, utilizaram-se CP cilíndricos de 10 cm x 20 cm. Foram confeccionados 15 CP cilíndricos, sendo três para cada ensaio. A Figura 4.10 mostra o conjunto de formas prontas para receber o concreto.



Figura 4.10: formas metálicas para moldagem dos corpos de prova.

4.4 AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS EM ZONA DE ATMOSFERA MARINHA

Após o período de cura, os CP prismáticos foram colocados em ambiente marinho e sujeitos à agressividade natural. Os locais de exposição foram os mesmos definidos no item 4.2.3, próximos aos aparatos de Vela Úmida. Foram colocados dois CP de cada traço nos pontos a 240 e 520 metros do mar. No ponto aos 120 metros, o concreto T65 teve três corpos de prova expostos, pois ocorreu um acidente com um dos CP e lançou-se mão do testemunho de reserva.

Em cada ponto de exposição, foram fixados ao chão caibros de madeira com seção 3 cm x 7 cm, que serviram de suporte para sustentação dos CP. Cada CP foi furado transversalmente com broca de vídea de diâmetro 16 mm e atravessado por uma barra de aço de ϕ 12,5 mm. O conjunto dos seis CP furados – dois de cada traço – e atravessados pela barra foi apoiado sobre os caibros fixos no chão (Figura 4.11). Para melhor estabilidade, foi colocada uma haste de madeira para apoiar a curvatura da barra de aço e os caibros foram amarrados com fita plástica.



Figura 4.11: exposição dos corpos de prova de concreto, próximo ao aparato de vela úmida.

Todos os elementos receberam proteção para resistir às intempéries. Os CP receberam pintura com hidrofugante à base de silicone nas faces laterais, superior e inferior, para garantir o transporte de cloretos em uma única direção. A barra de aço exposta recebeu proteção contra corrosão com vaselina industrial. Todos os caibros de madeira foram pintados com esmalte sintético.

A exposição de todos os corpos de prova ocorreu no mesmo dia, no mês de abril de 2008. Após cada período de exposição, os CP foram recolhidos e levados ao laboratório, de onde se extraiu uma amostra em pó para medir a concentração de cloretos no concreto. Neste trabalho, foram feitas dois tipos de medidas:

concentração superficial de cloretos e concentração total de cloretos, em perfis (Quadro 4.3).

| Mês | Atividade | Profundidade da amostra | Tempo de exposição |
|--------------|---|-------------------------|--------------------|
| Abril/08 | Exposição CP | - | - |
| Outubro/08 | Concentração superficial de Cl ⁻ | 1 a 2 mm | 6 meses |
| Fevereiro/09 | Concentração superficial de Cl ⁻ | 1 a 2 mm | 10 meses |
| | Concentração total de Cl ⁻ | Até 23 mm | |

Quadro 4.3: previsão da retirada de CP para medida de concentração de Cl⁻

4.4.1 Amostragem do concreto para determinação de cloretos

A amostragem do concreto ocorreu de duas formas distintas: aos seis meses de exposição, apenas a amostragem para a determinação da concentração superficial e aos 10 meses de exposição onde ocorreu também a amostragem para determinação dos perfis de cloretos e do teor total de cloretos no concreto.

Para a amostragem da concentração superficial de cloretos, foi retirada uma fina camada da face anterior do CP, que ficava exposta de frente para o mar. Para isso, utilizou-se um disco abrasivo de carbetto de silício adaptado a uma máquina furadeira. O disco era encostado à face do CP e raspava o concreto da superfície (Figura 4.12) para um recipiente. De lá, era guardado em sacos plásticos identificados por tempo de exposição, tipo de medida, distância ao mar e tipo de concreto.

A raspagem do concreto foi feita em faixas, iniciando da parte mais baixa do CP, até que a amostra tivesse peso acima de 10 gramas. De acordo com a norma ASTM C1152, esse valor é suficiente para a determinação do teor de cloretos em concreto (ASTM, 2003).

Após a extração da primeira amostra superficial, aos seis meses de exposição, os CP foram devolvidos para os pontos de exposição, onde ficaram por mais quatro meses. Antes disso, a parte raspada para a amostra superficial foi retirada, com uso de disco diamantado. Para tal, protegeram-se os CP com saco e fita plástica, a fim

de evitar a perda de cloretos por lavagem durante o corte (Figura 4.13). Os CP cortados serviram, ainda, para medida de carbonatação em cada idade.

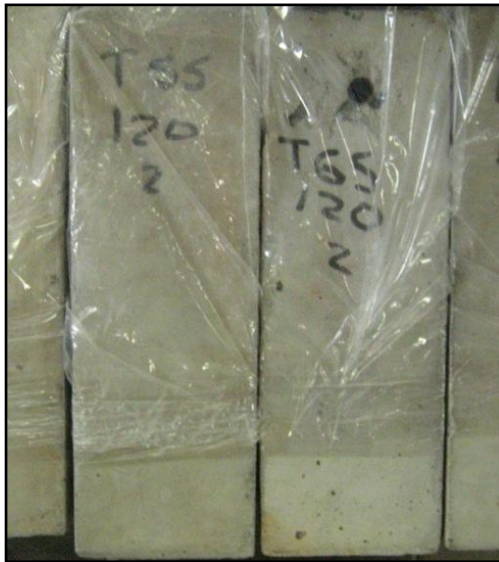


Figura 4.12: raspagem do concreto para retirada de amostra superficial.

Após dez meses de exposição, foram feitas as amostragens de concreto para concentração superficial e para a concentração de cloretos em perfis. Para concentração superficial, a extração do pó foi feita de forma análoga à amostra colhida aos seis meses.

Para a determinação dos perfis de cloretos, foram extraídas amostras em pó da face anterior dos CP em 5 camadas: 0-3 mm; 3-8 mm; 8-13mm; 13-18 mm; 18-23 mm. Para tal, foi utilizada uma máquina furadeira de bancada com broca de vídea de ϕ 16 mm.

Os CP foram colocados na bancada e perfurados pela broca até que atingisse a profundidade desejada. Para controle de profundidade, utilizou-se uma escala disponível na própria máquina. O pó formado era recolhido para um saco plástico e identificado por profundidade da camada, tempo de exposição, tipo de medida, distância ao mar e tipo de concreto.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.13: proteção dos CP antes do corte (a); corte com disco diamantado (b); CP após corte e secagem (c).

Os sacos com todas as amostras identificadas foram embalados e enviados de forma segura para o professor Gibson Rocha Meira, para determinação do teor de cloretos nas amostras, nas dependências do IFPB (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba). O método para determinação é conhecido como titulação potenciométrica e é descrito na norma ASTM C1152 (ASTM, 2003).

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

A caracterização do concreto foi realizada com o intuito de verificar suas propriedades de forma a explicar ou justificar o comportamento observado quanto à penetração de cloretos. Parte do concreto dosado foi utilizado para realizar os ensaios no estado fresco e no estado endurecido. Todos os ensaios foram realizados nas dependências do LEMAC, no Centro Tecnológico da Ufes.

No estado fresco, foi determinada a consistência, pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e a massa específica, seguindo os métodos da NBR NM 47 (ABNT, 2002). A Tabela 4.7 mostra os resultados encontrados dessas determinações.

No estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (ensaio de Lobo Carneiro), absorção de água por imersão, absorção por capilaridade e penetração de íons cloretos. Para cada tipo de concreto, foram moldados no mínimo 15 corpos de prova cilíndricos, com dimensões 10 cm x 20 cm, ficando três para cada ensaio. Os resultados com a caracterização completa do concreto podem ser vistos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: caracterização dos concretos utilizados na pesquisa.

| Determinações | | Traço | Valores | Método de ensaio |
|---------------|--|-------|---------|------------------|
| Estado fresco | Massa específica (kg/m ³) | T45 | 2316,0 | NBR NM 47 |
| | | T55 | 2485,5 | |
| | | T65 | 2411,5 | |
| | Abatimento do tronco de cone – medido (mm) | T45 | 80 | NBR NM 67 |
| | | T55 | 75 | |
| | | T65 | 70 | |

(...)

Tabela 4.7: caracterização dos concretos utilizados na pesquisa (continuação).

| Determinações | | Traço | Valores | Método de ensaio | |
|-------------------|---|-------|---------------------|------------------|--|
| Estado endurecido | Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) | T45 | 47,4 | NBR NM 101 | |
| | | T55 | 34,5 | | |
| | | T65 | 26,4 | | |
| | Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | T45 | 4,0 | NBR 7222 | |
| | | T55 | 3,6 | | |
| | | T65 | 3,1 | | |
| | Absorção por imersão (%) | T45 | 3,47 | NBR 9778 | |
| | | T55 | 4,69 | | |
| | | T65 | 2,23 | | |
| | Absorção capilar – 72h (g/cm ²) | T45 | 0,43 | NBR 9779 | |
| | | T55 | 0,78 | | |
| | | T65 | 0,45 | | |
| | Penetração de íons cloretos (C) | T45 | 540,5 ¹ | ASTM C 1202 | |
| | | T55 | 1609,5 ² | | |
| | | T65 | 2469,5 ³ | | |
| | 1 – penetrabilidade muito baixa | | | | |
| | 2 – penetrabilidade baixa | | | | |
| | 3 – penetrabilidade moderada | | | | |

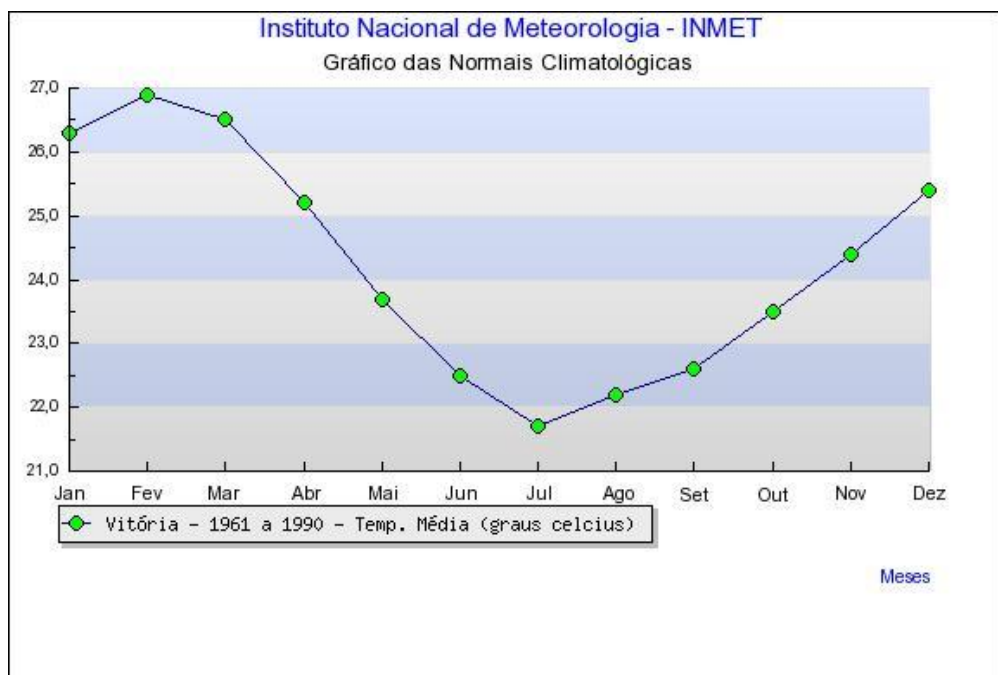
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos pelo programa experimental são apresentados e discutidos no presente capítulo. Na primeira seção, mostra-se o comportamento do clima durante o tempo de estudo, de acordo com as medidas obtidas através do INMET, de temperatura, umidade relativa, precipitação e velocidade e direção dos ventos. O clima se apresenta tipicamente tropical, valores altos de temperatura, umidade relativa e precipitação nos meses de verão e uma diminuição desses valores nos meses de inverno. Os valores da deposição de cloretos pelo método da vela úmida são vistos na segunda seção, além das relações da deposição com o regime dos ventos e com a distância ao mar. A deposição aumenta com a proximidade do mar e com o aumento da velocidade dos ventos e a ocorrência de ventos provenientes do mar. Na terceira seção, apresenta-se a caracterização dos concretos utilizados na pesquisa e a influência da relação a/c nos resultados encontrados no estado fresco e no estado endurecido. A quarta seção mostra os valores obtidos da concentração superficial de cloretos nos concretos expostos, nas idades de 6 e 10 meses. A concentração superficial diminuiu entre as duas medidas, pois nesse intervalo ocorreu o período de chuvas na região. As concentrações de cloretos nas camadas internas do concreto são vistas na quinta seção, onde são traçados os perfis de cloretos. Os concretos com maior relação a/c apresentam as maiores concentrações, com exceção do traço com a/c 0,65 que por ser mais poroso sofreu mais o efeito de lavagem por chuva mesmo nas camadas mais profundas.

5.1 COMPORTAMENTO CLIMÁTICO

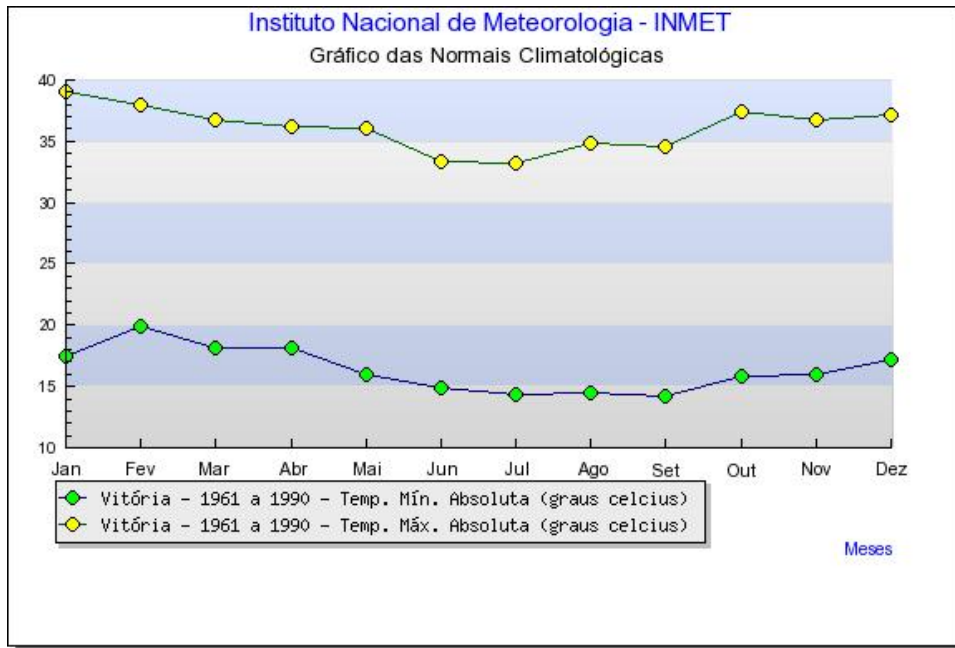
A região de Vitória é caracterizada por um clima tropical quente e úmido, com períodos característicos de chuvas. A temperatura média é sempre acima de 20 °C, podendo chegar a 13 °C no inverno e passar de 37 °C nos meses de verão. A umidade relativa é alta durante todo o ano, sempre acima de 70% mas pode ser baixa no inverno, entre os meses de junho a agosto. O período chuvoso ocorre principalmente no verão, entre os meses de outubro e março, devido à formação de frentes quentes.

As figuras 5.1 a 5.3 mostram os gráficos das normais climatológicas¹³ da cidade de Vitória entre os anos de 1961 a 1990 obtidas no sítio do INMET (INMET, 2009) na rede mundial de computadores.



(a)

¹³ As normais climatológicas são médias calculadas com base em uma série de dados meteorológicos obedecendo a critérios recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Essas médias referem-se a períodos padronizados de 30 (trinta) anos. No Brasil, esses períodos são de 1931 a 1960 e de 1961 a 1990 (INMET, 2009).



(b)

Figura 5.1¹⁴: normal climatológica na cidade de Vitória (a) temperatura média; (b) temperatura máxima e mínima absoluta (INMET, 2009).

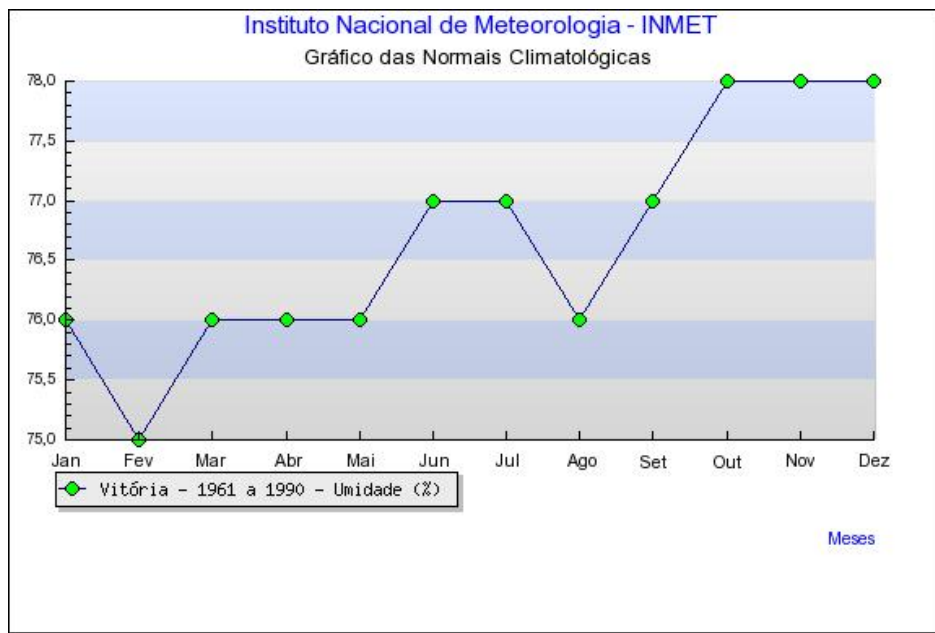


Figura 5.2: normal climatológica de umidade relativa do ar na cidade de Vitória (INMET, 2009).

¹⁴ Existe um erro claro de escrita na figura, que diz que a temperatura está em graus celcius. Obviamente, a unidade referida trata-se de graus Celsius.

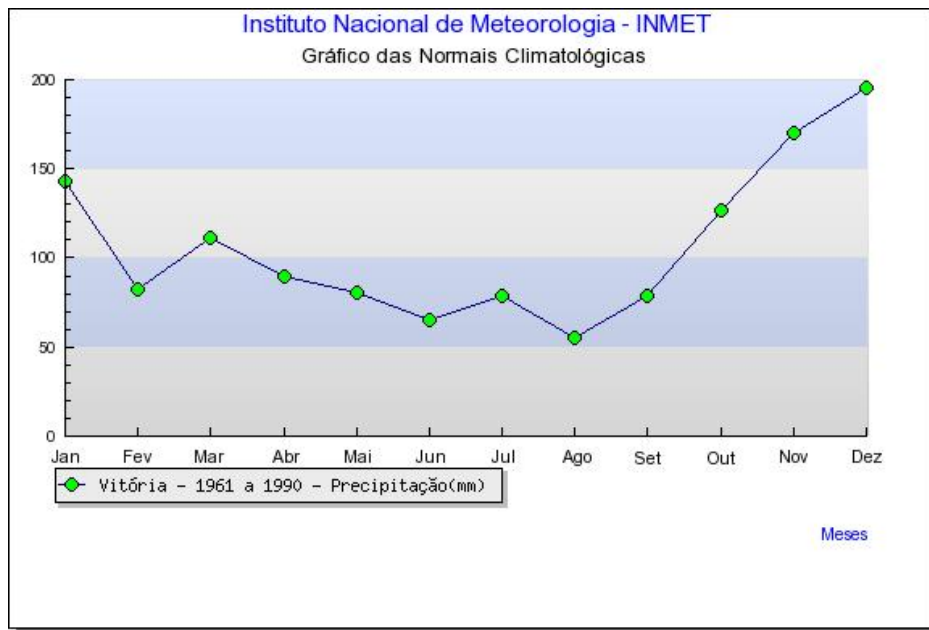


Figura 5.3: normal climatológica de precipitação na cidade de Vitória (INMET, 2009).

Nos itens abaixo, serão apresentados os valores obtidos pelo acompanhamento dos dados do INMET no período de estudo. O acompanhamento sofreu um intervalo nos meses de janeiro e fevereiro de 2008, período que foram feitas algumas modificações no estudo e a análise dos resultados do estudo piloto para a definição dos pontos de exposição.

5.1.1 Temperatura

O comportamento cíclico da temperatura, apresentado na Figura 5.1, pode ser observado durante o período de estudo. De forma semelhante, há um período de temperaturas altas e outro de temperaturas mais amenas.

As médias diárias se apresentaram mais altas entre dezembro de 2007 até abril de 2008, sempre acima de 25 °C. Entre maio e outubro, há um período frio, com temperaturas médias entre 20 °C e 25 °C, seguido de uma nova estação quente (Figura 5.4a).

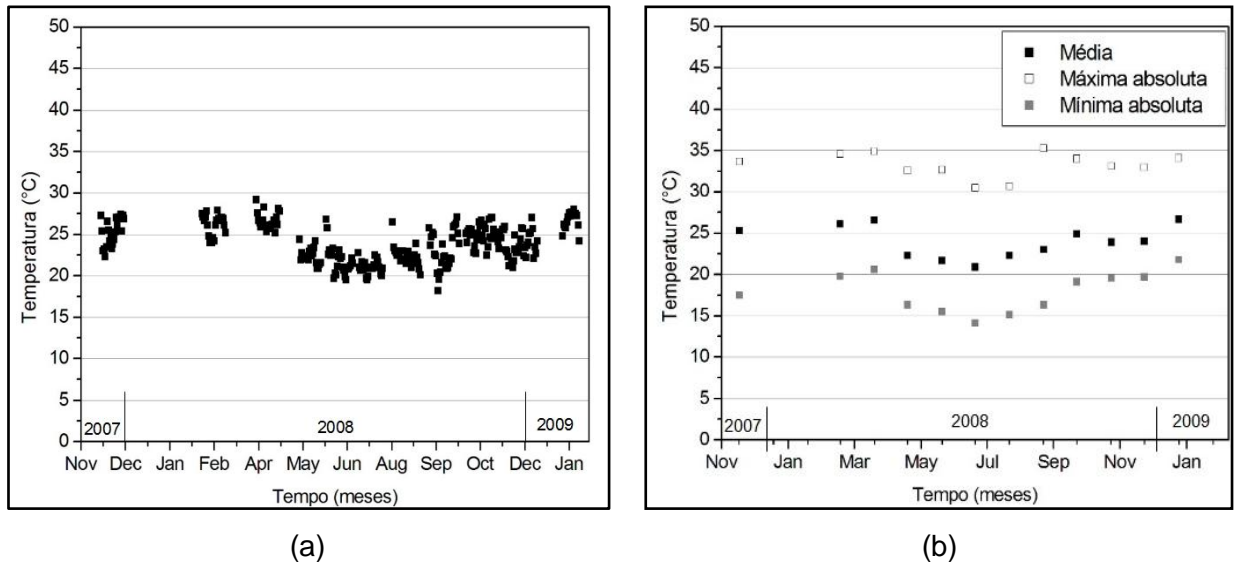


Figura 5.4: temperaturas obtidas no período de estudo. (a) Médias diárias; (b) médias, máximas e mínimas mensais.

A Figura 5.4b mostra as temperaturas médias mensais no período de estudo, juntamente com as temperaturas máximas absolutas e mínimas absolutas de cada mês. As temperaturas mais baixas ocorreram entre junho e setembro, com mínima abaixo de 15°C. Os meses de março, abril e dezembro de 2008 além de janeiro de 2009 apresentaram as temperaturas mais altas, chegando a 35 °C.

5.1.2 Umidade Relativa

A Umidade Relativa (UR) também apresentou comportamento semelhante às normais climatológicas do INMET, com valores médios mensais entre 70 e 80%.

Na Figura 5.5a, podemos observar que a umidade relativa média diária se encontra entre 60 e 90%, o que caracteriza o clima úmido de Vitória. A UR mais alta foi encontrada no mês de novembro, chegando a ultrapassar os 90%, enquanto que os valores mais baixos se encontram no mês de julho, com valores diários de UR na casa dos 60%.

Observando os valores absolutos, a UR mínima decresce de março até junho, onde chega a estar abaixo de 30% e volta a aumentar até o final do ano. Esse período de baixa UR caracteriza um período de seca nos meses mais frios. A UR máxima

absoluta se situa sempre acima dos 95%, valor obtido nos dias de chuva (Figura 5.5b).

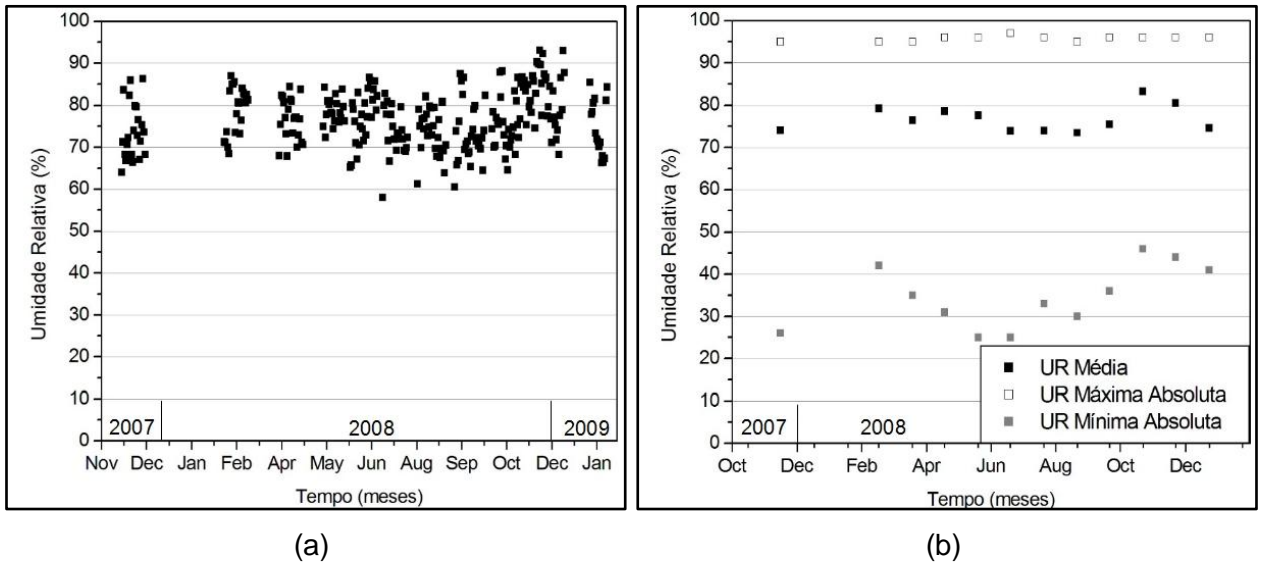


Figura 5.5: umidade relativa do ar obtidas no período de estudo. (a) Médias diárias; (b) médias, máximas e mínimas mensais.

5.1.3 Precipitação

De acordo com as normais climatológicas do INMET (Figura 5.3), a cidade de Vitória tem um período de chuva bem distribuído durante o ano, com chuvas mais fortes nos meses de verão. Durante o período de estudo, a ocorrência de chuvas fugiu um pouco desse comportamento, porém, ocorreram chuvas em todos os meses do período de estudo.

As maiores chuvas do período ocorreram no final de 2008 e início de 2009. O mês de novembro de 2008 apresentou o maior índice pluviométrico, com 521,2mm sendo quase três vezes maior que a normal climatológica. Na seqüência, as maiores chuvas ocorreram em dezembro de 2008 e janeiro de 2009, com precipitação de 147,8 mm e 99,8 mm, respectivamente (Figura 5.6). Porém, esses valores de janeiro e dezembro estão abaixo da média esperada. Entre abril e outubro de 2008, há um período de estiagem, com chuvas abaixo do esperado pelas normais climatológicas do INMET (Figura 5.6).

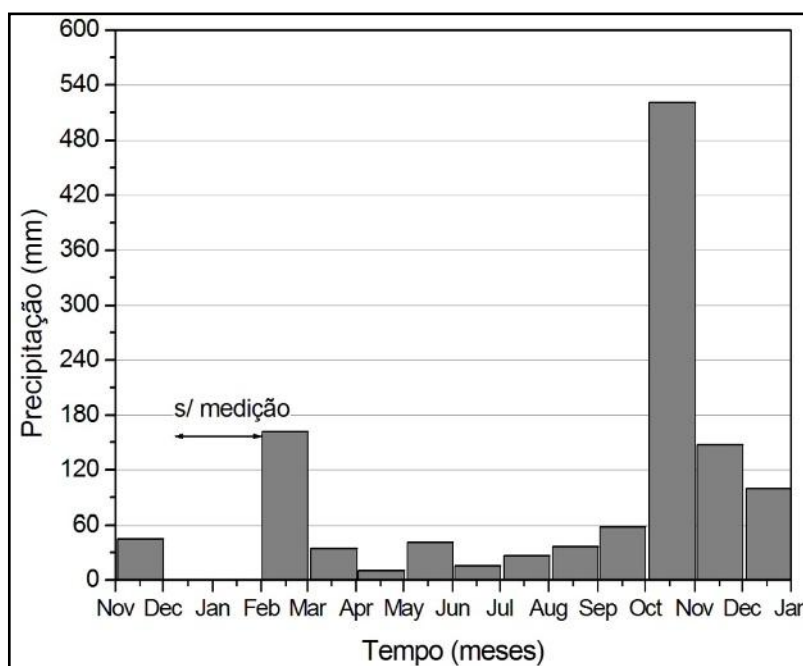


Figura 5.6: precipitação medida durante o período de estudo.

5.1.4 Velocidade e direção dos ventos

O conhecimento do regime dos ventos é de importância fundamental para o cumprimento dos objetivos da pesquisa. O INMET dispõe duas medidas de vento: os ventos médios e as rajadas de vento, com ocorrência de até 3 segundos. Não há normal climatológica para as medidas de vento.

No período de estudo, os ventos se mantiveram fracos, com velocidade entre 1 e 3 m/s. Nos meses de dezembro de 2007 e setembro e outubro de 2008, ocorreram os picos das médias de ventos registradas, acima de 3 m/s, porém nunca maior que 4m/s o que ainda os caracteriza como fracos (Figura 5.7). As rajadas de vento tiveram uma maior variabilidade de resultados, com valores diários entre 3 e 10 m/s, que também pode ser visto na Figura 5.7.

Os resultados da direção predominante dos ventos podem ser vistos na Tabela 5.1. Entre os meses de setembro a janeiro há uma predominância dos ventos entre as direções norte e nordeste e nos demais meses há uma tendência de predominância entre as direções oeste e noroeste. A proporção dos ventos predominantes em relação ao total varia entre 30 e 50% e sobre esses resultados não há como estabelecer um comportamento.

A nomenclatura dada à direção dos ventos depende de seu ângulo com a direção Norte e pode ser encontrada no Anexo A.

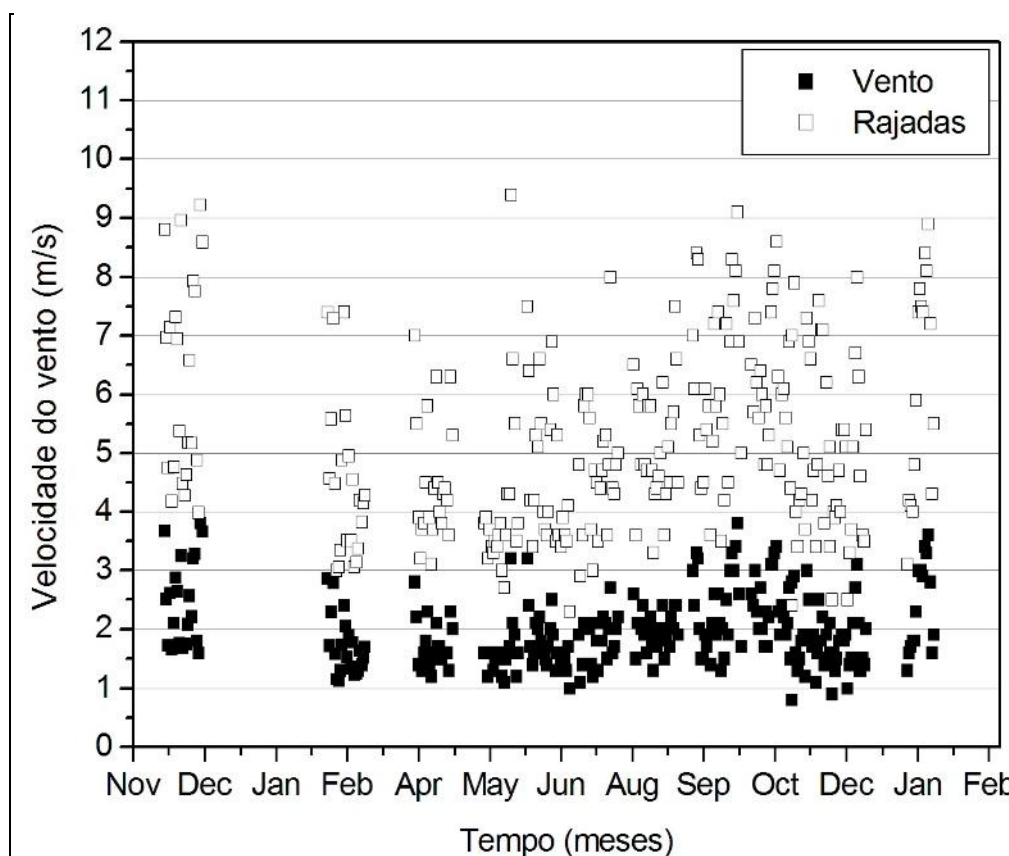


Figura 5.7: velocidade média diária dos ventos e das rajadas de vento durante o período de estudo.

No regime dos ventos, é importante analisar dois resultados: a ocorrência de ventos com velocidade acima de 3 m/s e dos ventos provenientes do mar. A velocidade de 3 m/s é considerada como crítica para a maior oferta de aerossol marinho na atmosfera, segundo vários autores (FITZGERALD, 1991; O'DOWD *et al.*, 1996; MEIRA *et al.*, 2007a). Os ventos marinhos são importantes pois são gerados no mar e transportam para o continente as partículas de sal. Dessa forma, ventos formados no continente com direção ao mar não contribuem para a presença de aerossol na atmosfera.

A Tabela 5.2 mostra a proporção de cada um desses ventos, ou seja, qual a porcentagem de cada tipo de vento – marinho ou acima de 3 m/s – foi registrada durante o período de estudo. Devido à exposição ser feita em dois terrenos diferentes – Manguinhos e Aeroporto – a ocorrência de ventos marinhos muda com

o local de exposição. Nota-se que os ventos com velocidade acima de 3 m/s compõem uma baixa proporção em relação ao total. Sobre os ventos marinhos, os de Manguinhos são sempre mais freqüentes que o terreno do aeroporto – a exceção do mês de maio. Isso pode ser explicado pela posição geográfica dos dois terrenos em relação ao mar.

Tabela 5.1: direção predominante dos ventos durante o período de estudo.

| Mês | Direção Predominante | | | Ocorrência das Dir. Pred. (%) |
|--------|----------------------|-----|-----|-------------------------------|
| | 1ª | 2ª | 3ª | |
| Dez/07 | NNE | N | NE | 47,4 |
| Mar/08 | NW | WNW | ESE | 38,0 |
| Abr/08 | NW | WNW | N | 36,3 |
| Mai/08 | NW | WNW | SSW | 43,0 |
| Jun/08 | WNW | NNW | NW | 42,0 |
| Jul/08 | NW | SSW | WNW | 34,8 |
| Ago/08 | NW | NE | NNE | 36,1 |
| Set/08 | NNE | S | N | 40,1 |
| Out/08 | NNE | N | NE | 37,3 |
| Nov/08 | NNE | S | N | 33,3 |
| Dez/08 | NNE | ESE | NW | 28,5 |
| Jan/09 | N | NNE | NE | 54,4 |

De forma análoga, é possível calcular as velocidades médias mensais de cada tipo de vento, de acordo com as Equações 9, 10 e 11. Os resultados podem ser vistos na Figura 5.8.

$$v_t = \frac{\sum v}{n} \quad (\text{Equação 9})$$

$$v_3 = \frac{\sum_{v>3} v}{n_3} \quad (\text{Equação 10})$$

$$v_{mar} = \frac{\sum_{v;mar} v}{n_{mar}} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$\sum v$ – soma da velocidade dos ventos durante o período de exposição;

n – nº total de horas de exposição;

$\sum_{v>3} v$ - soma da velocidade dos ventos acima de 3m/s, durante o tempo de exposição;

n_3 – nº de horas de ocorrência de ventos acima de 3m/s;

$\sum_{v;mar} v$ - soma da velocidade dos ventos provenientes do mar;

n_{mar} - nº de horas de ocorrência de ventos provenientes do mar.

Tabela 5.2: proporção de ventos com velocidade acima de 3 m/s e dos ventos provenientes do mar, em Manguinhos e no Aeroporto.

| | Ocorrência de ventos | | |
|--------|----------------------|------------------|-----------------|
| | $V \geq 3$ m/s | Marinhos – Mang. | Marinhos - Aero |
| Dez/07 | 30,3% | 73,8% | 34,0% |
| Mar/08 | 11,1% | 50,5% | 38,6% |
| Abr/08 | 10,4% | 52,0% | 34,3% |
| Mai/08 | 6,3% | 41,3% | 43,6% |
| Jun/08 | 11,2% | 41,5% | 35,4% |
| Jul/08 | 14,2% | 50,6% | 40,3% |
| Ago/08 | 20,0% | 55,3% | 34,8% |
| Set/08 | 26,3% | 65,4% | 47,0% |
| Out/08 | 30,2% | 67,5% | 40,9% |
| Nov/08 | 16,1% | 67,7% | 47,4% |
| Dez/08 | 10,7% | 62,7% | 50,5% |
| Jan/09 | 34,6% | 73,7% | 19,3% |

É possível notar que a evolução das médias ao longo do tempo não é igual. Como exemplo, no mês de outubro há o pico na média dos ventos acima de 3 m/s, mas nos demais tipos de ventos o pico ocorre em outros meses. É válido lembrar que os ventos gerados são os mesmos, eles apenas receberam um tratamento matemático

diferente para o cálculo das médias e atuam de forma distinta em cada ponto de exposição.

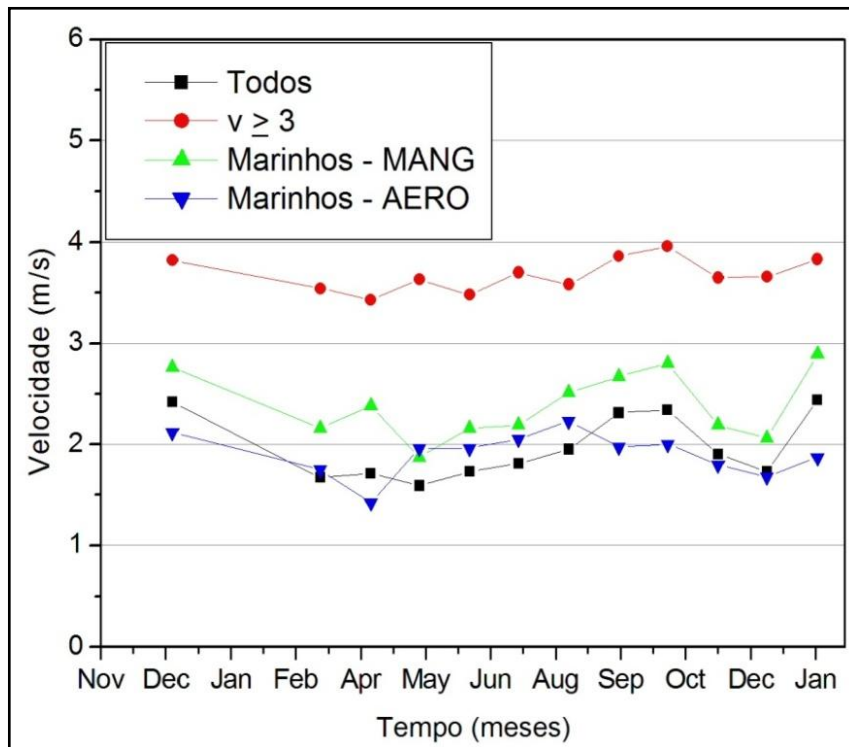


Figura 5.8: velocidade média mensal dos ventos: todos os ventos, apenas aqueles acima de 3 m/s e ventos marinhos.

Nos trabalhos de Morcillo *et al.* (2000) é descrita a Força do Vento (FV), cujo valor é o resultado da multiplicação da velocidade do vento pelo seu tempo de permanência no ar. De forma semelhante, neste trabalho calculou-se a FV através da Equação 12. Ou seja, o valor de FV de Morcillo *et al.* (2000) dividido pelo tempo total. Os resultados são vistos na Figura 5.9.

$$FV_i = \frac{\sum v_i \cdot t_i}{t} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

FV_i – Força do Vento para um determinado tipo de vento. Exemplo, FV para ventos acima de 3 m/s;

v_i – velocidade do vento tipo;

t_i – tempo de permanência do vento tipo;

t – tempo total de exposição.

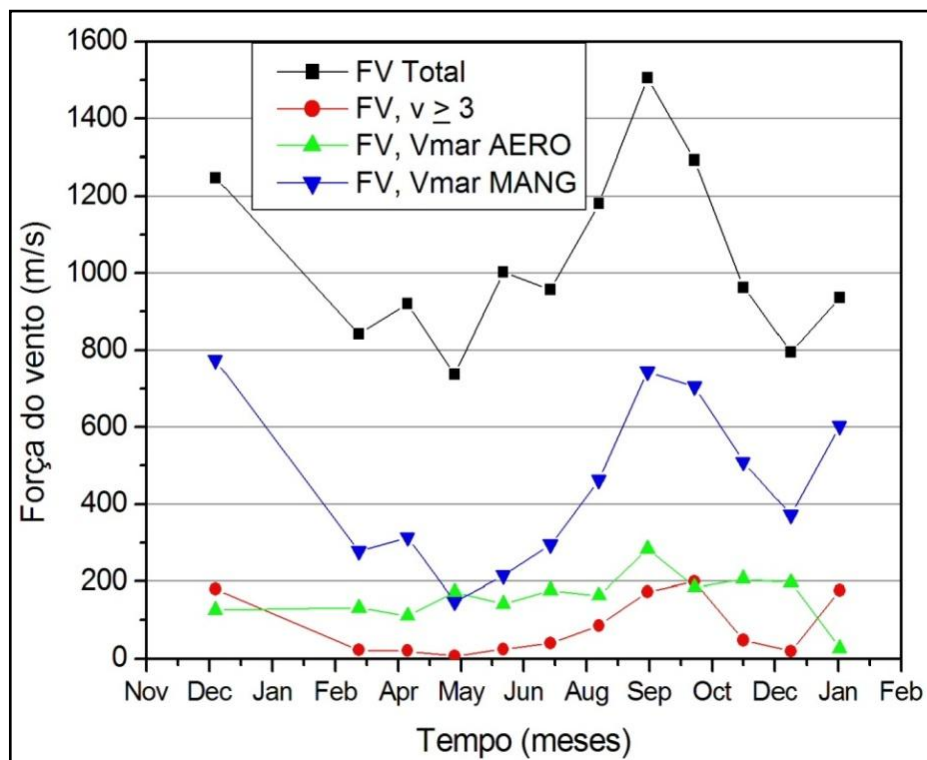


Figura 5.9: FV para todos os ventos, ventos acima de 3 m/s e ventos marinhos.

A FV dos ventos totais teve evolução ao longo do tempo semelhante à dos ventos marinhos de Manguinhos, com pico no mês de setembro de 2008. Os ventos marinhos do Aeroporto apresentaram comportamento distinto dos anteriores e menor valor de FV. Isso pode ser explicado pela posição geográfica da Estação Aeroporto e a menor ocorrência desse tipo de vento e relação aos anteriores. Os ventos acima de 3m/s apresentaram os menores valores de FV, pois são os ventos que ocorrem em menor frequência.

5.2 DEPOSIÇÃO DE CLORETOS

A deposição de cloretos foi medida mensalmente, com os valores apresentando alta variabilidade. Os pontos de exposição mais próximos ao mar apresentaram as maiores taxas de deposição, devido à maior oferta de cloretos na atmosfera. A Figura 5.10 mostra os resultados obtidos em todos os pontos de exposição.

A única exceção é o ponto situado a 65 metros do mar, que apresentou valores de concentração de Cl^- menores que os obtidos no ponto aos 120 metros. Isso pode ser

explicado pela presença de obstáculos¹⁵ por trás da exposição aos 65 metros, o que impede a circulação do vento pelo ponto e diminui a presença de cloretos no local. Esse fato ilustra a importância do conhecimento dos micro-ambientes nesse tipo de estudo, bem como a escolha de pontos adequados para a medida da deposição de cloretos.

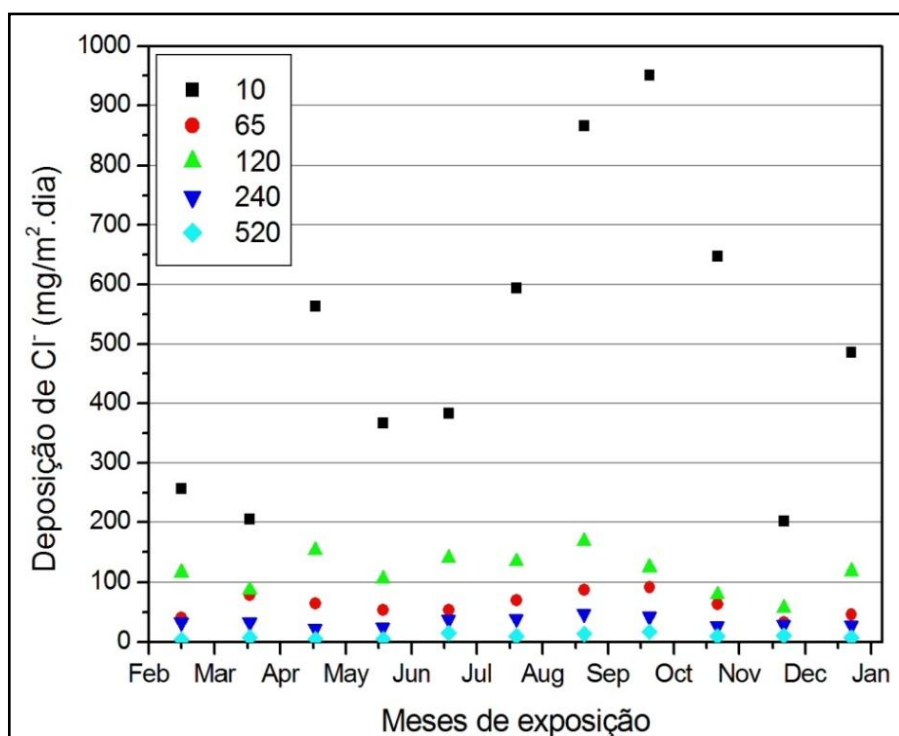


Figura 5.10: deposição mensal de cloretos, em todos os pontos de exposição.

Analisando de forma separada cada estação de exposição – Manguinhos e Aeroporto – é possível adequar a escala de valores para uma melhor análise. Em Manguinhos, os maiores valores de concentração de cloretos ocorrem nos meses com maior intensidade de ventos marinhos e maior frequência de ventos com velocidade acima de 3 m/s (Figura 5.11), entre agosto e outubro de 2008. Isso corrobora os resultados encontrados por outros autores (MORCILLO *et al.*, 2000; MEIRA *et al.*, 2006).

A Figura 5.12 mostra os valores de deposição de cloretos dos pontos de exposição mais distantes ao mar, na Estação Aeroporto. Em uma escala mais adequada, é possível notar a alta variabilidade da deposição de cloretos, mas também aqui se nota os picos de concentração entre agosto e outubro de 2008. Ao mesmo tempo,

¹⁵ Ver item 4.2.3 Escolha dos pontos de exposição, página 76.

se observa uma forte diminuição na concentração a partir dos 200 metros para o mar, resultado semelhante ao encontrado por vários autores (MEIRA *et al.*, 2006; GARCIA; PADARATZ; SPOGANICZ, 2007).

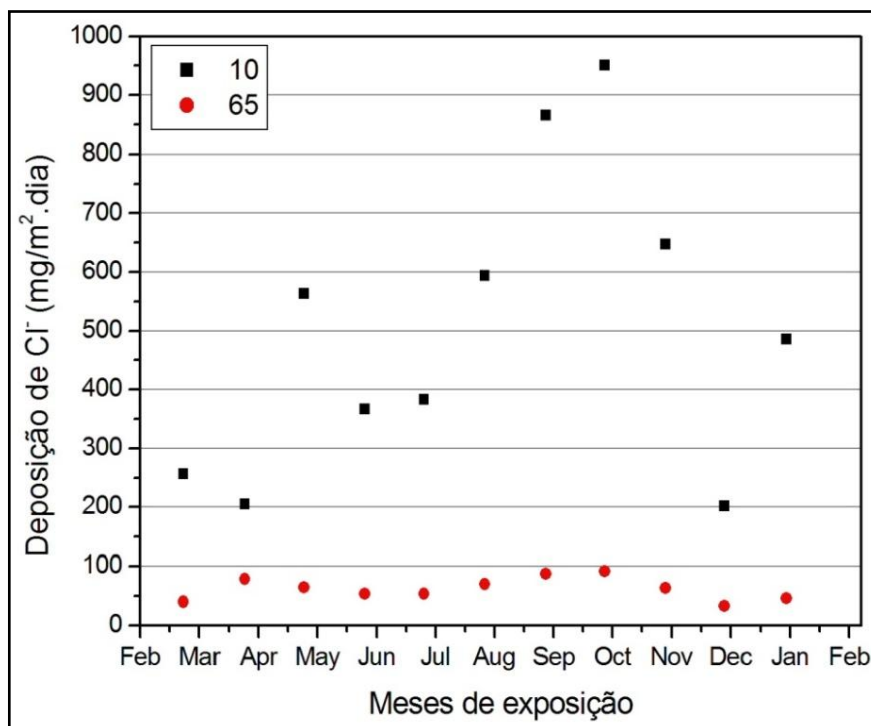


Figura 5.11: deposição mensal de cloretos, pontos de exposição localizados em Manguinhos.

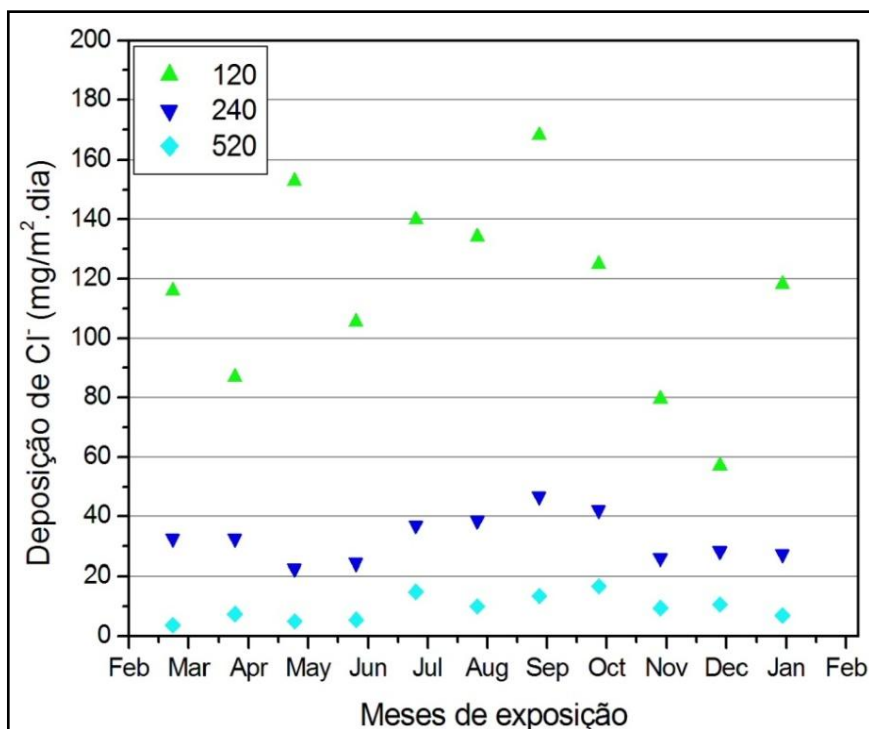


Figura 5.12: deposição mensal de cloretos, pontos de exposição localizados no Aeroporto.

A Tabela 5.3 mostra os valores médios de deposição de cloretos e a deposição acumulada de cloretos para cada ponto de exposição. Os valores indicam uma baixa oferta de cloretos na atmosfera na região de Vitória, que pode ser explicado pela baixa intensidade dos ventos. A deposição média é calculada pela média aritmética dos valores de deposição de cada mês. A deposição acumulada é a soma mês a mês de todos os valores de deposição, multiplicados pelo tempo de exposição de 30 dias.

Tabela 5.3: deposição média e deposição acumulada em cada ponto de exposição.

| Distância ao mar (m) | Deposição média (mg/m ² .dia) | Desvio Padrão (mg/m ² .dia) | Deposição acumulada após 11 meses (g/m ²) |
|----------------------|--|--|---|
| 10 | 502,08 | 252,47 | 165,69 |
| 65 | 62,16 | 19,04 | 20,51 |
| 120 | 116,65 | 32,87 | 38,49 |
| 240 | 32,60 | 7,74 | 10,76 |
| 520 | 9,40 | 4,24 | 3,10 |

5.2.1 Influência da distância ao mar

Na medida em que se afasta do mar, ocorre a diminuição da oferta de cloretos na atmosfera. Essa diminuição tem duas causas principais: a deposição das partículas maiores de sal nas faixas mais próximas à costa pelo efeito gravimétrico e a presença de obstáculos no caminho percorrido pelos ventos (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996; CHOMKA; PETELSKI, 2001).

A Figura 5.13 mostra os resultados da deposição de cloretos em cada ponto de exposição, a partir de sua média e intervalo de confiança a 95%. Quanto mais se aproxima do mar, maior é a deposição média e seus resultados são mais variáveis. A exceção, conforme já explicado, é o ponto a 65 metros do mar. A maior oferta de cloretos e a relação direta com a intensidade dos ventos explica a alta variabilidade dos resultados mais próximos da costa.

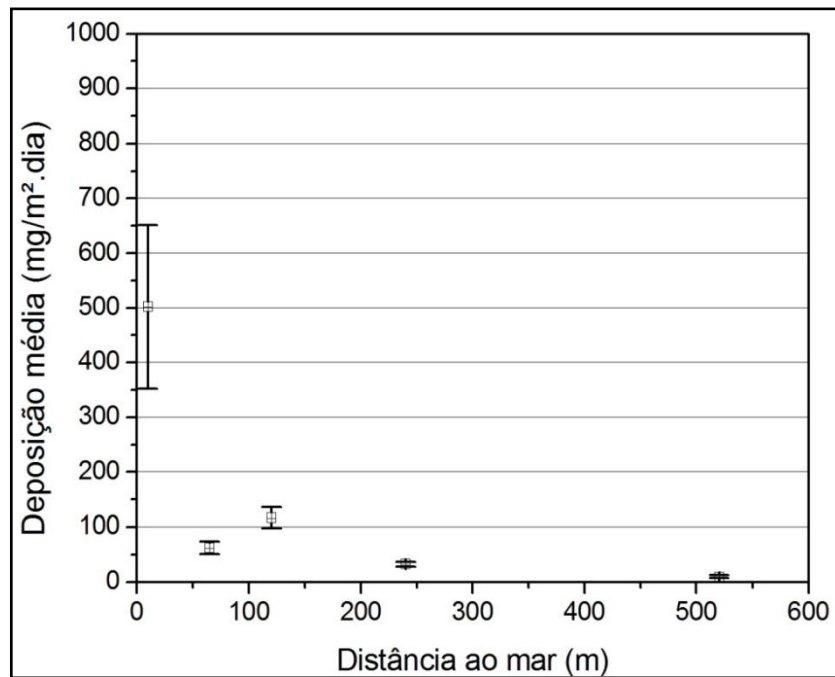


Figura 5.13: valores médio de deposição e intervalo de confiança de 95% em função da distância ao mar.

O comportamento da deposição de cloretos em função da distância ao mar pode ser obtida através de uma equação exponencial (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996; LEE; MOON, 2006; MEIRA *et al.*, 2006):

$$Dep = A.e^{B.x} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

- Dep = deposição de cloretos, em mg/m².dia;
- x – distância ao mar, em metros;
- A; B – constantes que dependem das condições ambientes.

Dessa forma, foi gerada a Figura 5.14 a partir da função exponencial da Equação 13, estabelecendo o comportamento da deposição de cloretos em função da distância na região da Grande Vitória. Os valores obtidos levaram em consideração todos os resultados de deposição em cada ponto e apresentaram boa correlação.

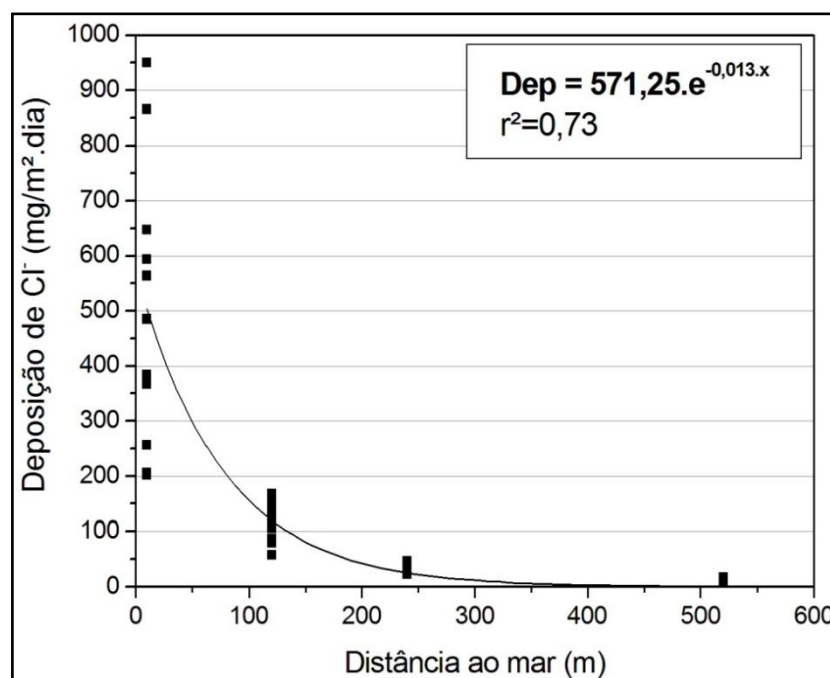


Figura 5.14: deposição de cloretos em função da distância ao mar.

Comparando o resultado obtido em Vitória com os resultados obtidos em outras regiões do país, é possível estabelecer algumas relações (Figura 5.15). O comportamento da deposição em função da distância ao mar no sudeste é semelhante ao comportamento obtido no nordeste por Meira *et al.* (2006). Ambas as regiões foram caracterizadas pelos fracos ventos durante o período de estudo. No entanto, a região Sul apresentou uma forte deposição nas faixas mais próximas do mar e uma forte queda após os primeiros metros da costa (GARCIA; PADARATZ; SPOGANICZ, 2007). A região Sul tem por característica fortes ventos em alguns períodos, o que pode ter causado a maior deposição. Os autores atribuem a queda abrupta nos primeiros metros à presença de obstáculos do ponto de exposição a 100 metros do mar. Todos os trabalhos utilizaram o método da vela úmida nessa determinação.

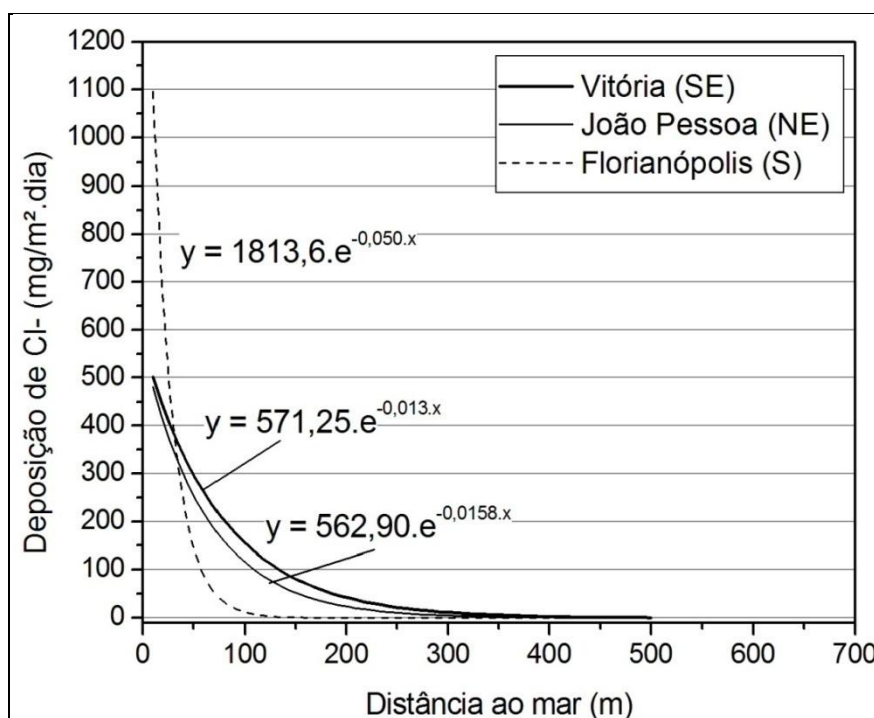


Figura 5.15: deposição de cloretos em função da distância ao mar em diferentes regiões.

5.2.2 Influência do regime dos ventos

Os ventos atuam diretamente no transporte de partículas de sal. Dessa forma, é possível estabelecer uma relação entre a deposição de cloretos e a intensidade dos ventos (FITZGERALD, 1991; MEIRA *et al.*, 2007a). A relação entre deposição e velocidade dos ventos é sempre descrita como uma função exponencial. Neste trabalho, para determinar essa relação, utilizou-se da velocidade dos ventos acima de 3 m/s – considerada como velocidade crítica – e a Equação 14, descrita em Meira *et al.* (2007a):

$$Dep = A + B.e^{(C.v_3)} \quad \text{(Equação 14)}$$

Onde:

- Dep – Deposição de cloretos, em mg/m².dia;
- v₃ – velocidade média dos ventos acima de 3 m/s;
- A; B; C – parâmetros da equação, dependem do local de exposição.

Dessa forma, foram plotados os gráficos de velocidade do vento *versus* deposição de cloretos vistos na Figura 5.17. Os gráficos mostram uma baixa correlação entre as variáveis, à exceção do ponto a 10 metros do mar. A maior oferta de cloretos nesse ponto facilita a análise da influência do vento. No ponto a 65 metros, devido aos obstáculos na parte posterior da estação de exposição, observa-se pouca influência do vento na deposição (Figura 5.16).

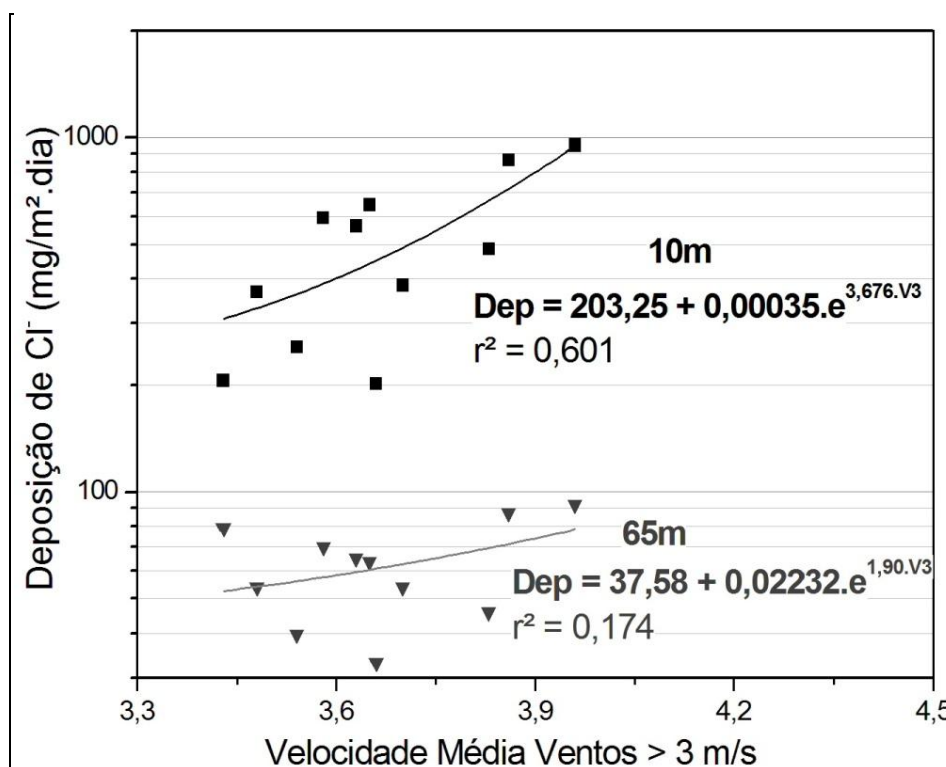


Figura 5.16: deposição de cloretos em função da velocidade dos ventos acima de 3 m/s. Exposição em Manguinhos.

Nos pontos mais distantes do mar, manteve-se a baixa correlação entre os parâmetros (Figura 5.17). Foram feitas correlações para a Equação 14 para as outras modalidades de vento – ventos marinhos e ventos totais – mas a correlação pobre foi mantida.

De acordo com Morcillo *et al.* (2000), a deposição sofre influência da presença de ventos marinhos, isto é, aqueles de direção proveniente do mar. A Figura 5.18 mostra a sobreposição dos resultados de deposição de cloretos, a 10 metros do mar, força dos ventos acima de 3m/s (FV3) e força dos ventos marinhos (FVmar). É possível notar o crescimento da deposição com o aumento de ambos os parâmetros, tanto FV3 como FVmar. Os picos de deposição, ocorridos entre agosto e outubro,

coincidem com os picos de FVmar e FV3, demonstrando a pujança da relação ente os parâmetros.

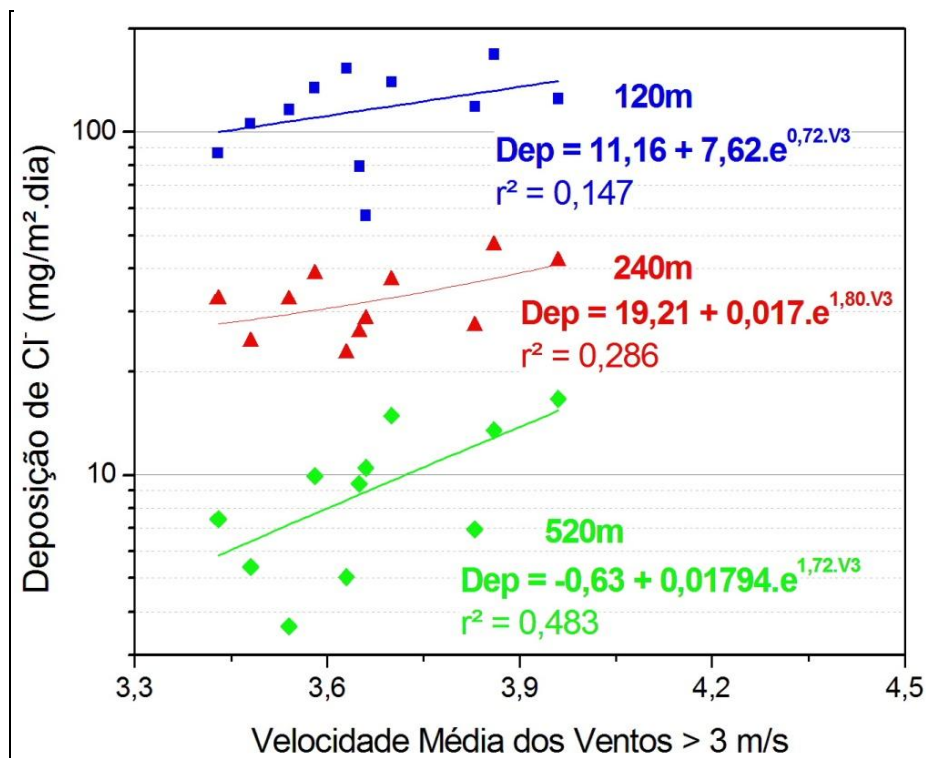


Figura 5.17: deposição de cloretos em função da velocidade dos ventos acima de 3 m/s. Exposição no Aeroporto.

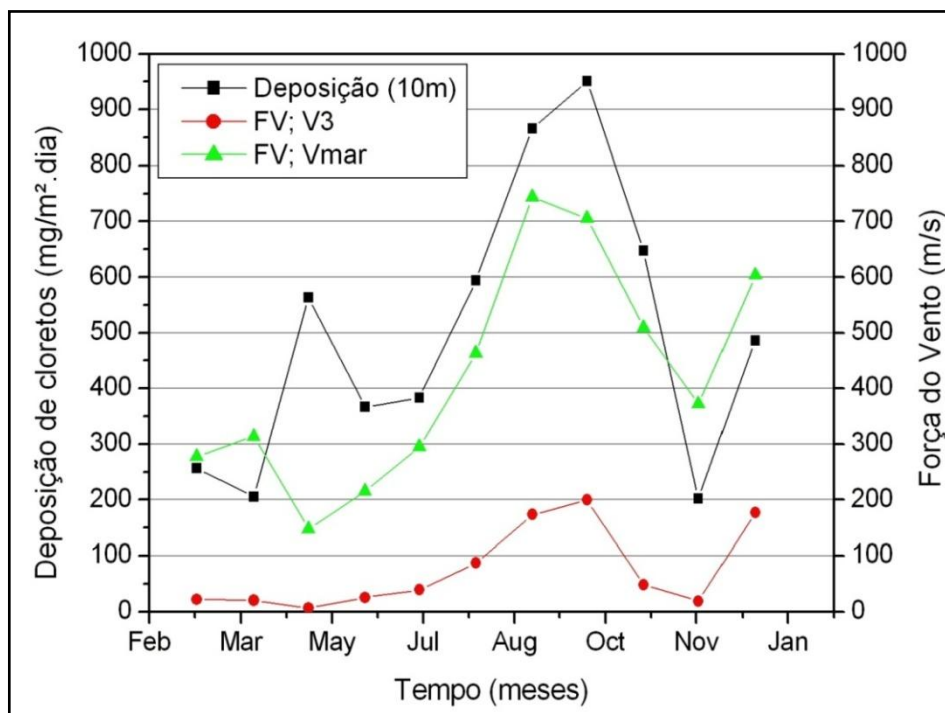


Figura 5.18: sobreposição de resultados de deposição (10m), FV marinho e FV acima de 3 m/s.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

5.3.1 Estado fresco

Os resultados dos ensaios em concreto no estado fresco são vistos na Tabela 5.4. O abatimento do tronco de cone ficou dentro do intervalo especificado, 80 ± 10 mm. O concreto T45 precisou de aditivo plastificante para obter essa trabalhabilidade. Devido ao uso de aditivo, o concreto T45 apresentou o menor valor de massa específica.

Tabela 5.4: caracterização dos concretos utilizados na pesquisa – estado fresco.

| Determinações | Traço | Valores | Método de ensaio |
|--|-------|---------|------------------|
| Massa específica (kg/m ³) | T45 | 2316,0 | NBR NM 47 |
| | T55 | 2485,5 | |
| | T65 | 2411,5 | |
| Abatimento do tronco de cone medido (mm) | T45 | 80 | NBR NM 67 |
| | T55 | 75 | |
| | T65 | 70 | |

5.3.2 Estado endurecido

Os resultados da caracterização do concreto no estado endurecido são vistos na Tabela 5.5. A resistência mecânica – tração e compressão – aumentou com a diminuição da relação água/cimento, devido à maior porosidade dos concretos com teor de água elevado.

Os valores de absorção apresentaram comportamento imprevisto. O concreto T65, com maior teor de água, apresentou o menor valor de absorção por imersão e uma baixa absorção por ascensão capilar. Algum erro ocorrido nos procedimentos de ensaio causou tal resultado.

O ensaio de penetração de íons cloretos, realizado aos 90 dias de idade, apresentou valores de penetrabilidade moderada a muito baixa. Mais uma vez, a maior

porosidade dos concretos com elevada relação a/c prevaleceu no comportamento dos resultados.

Tabela 5.5: caracterização dos concretos utilizados na pesquisa – estado endurecido.

| Determinações | Traço | Média | Desvio-Padrão | Método de ensaio |
|---|-------|---------------------|---------------|------------------|
| Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) | T45 | 47,4 | 1,89 | NBR NM 101 |
| | T55 | 34,5 | 0,87 | |
| | T65 | 26,4 | 0,59 | |
| Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (MPa) | T45 | 4,0 | 0,11 | NBR 7222 |
| | T55 | 3,6 | 0,10 | |
| | T65 | 3,1 | 0,24 | |
| Absorção por imersão (%) | T45 | 3,47 | 0,10 | NBR 9778 |
| | T55 | 4,69 | 0,47 | |
| | T65 | 2,23 | 0,02 | |
| Absorção capilar – 72h (g/cm ²) | T45 | 0,43 | 0,02 | NBR 9779 |
| | T55 | 0,78 | 0,09 | |
| | T65 | 0,45 | 0,03 | |
| Penetração de íons cloretos (C) | T45 | 540,5 ¹ | 36,1 | ASTM C 1202 |
| | T55 | 1609,5 ² | 218,5 | |
| | T65 | 2469,5 ³ | 480,3 | |
| 1 – penetrabilidade muito baixa | | | | |
| 2 – penetrabilidade baixa | | | | |
| 3 – penetrabilidade moderada | | | | |

Todos os valores dos ensaios em concreto estão no Apêndice A.

5.4 CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS

A concentração superficial de cloretos foi determinada aos 6 e 10 meses, para cada tipo de concreto, nos pontos a 120 m, 240 m e 520m. Os teores encontrados são muito baixos, devido ao pouco tempo de exposição e à baixa oferta de cloretos na atmosfera (Figura 5.19 a Figura 5.21).

O concreto T45 apresentou os menores valores de concentração superficial (C_s), enquanto que as maiores concentrações foram obtidas no concreto T65. O maior teor de vazios nos concretos com alta relação a/c determina esse comportamento. A C_s apresenta uma tendência de aumento nos valores com a aproximação do mar, que é a fonte geradora dos cloretos na atmosfera.

Pode ser observada uma queda nos valores de C_s com o tempo em todos os resultados obtidos. Esse fato pode ser atribuído ao período de chuvas na região, que ocorreu entre as medidas de 6 e 10 meses. Para esclarecer esse fato, o volume de chuva acumulado entre abril e outubro – até 6 meses de exposição – foi de 167,6 mm. Entre novembro e fevereiro – 6 a 10 meses – o volume de chuva no período foi de 827 mm. O alto valor de precipitação pode ter causado uma lavagem na superfície do concreto, que carrega consigo as partículas de cloreto.

Essa queda é mais acentuada nos concretos mais porosos e mais próximos ao mar. A maior porosidade aumenta a interação do meio com o concreto, facilitando o efeito de lavagem. A proximidade do mar aumenta a quantidade de cloretos no concreto e a possibilidade de carregamento de cloretos pela água da chuva.

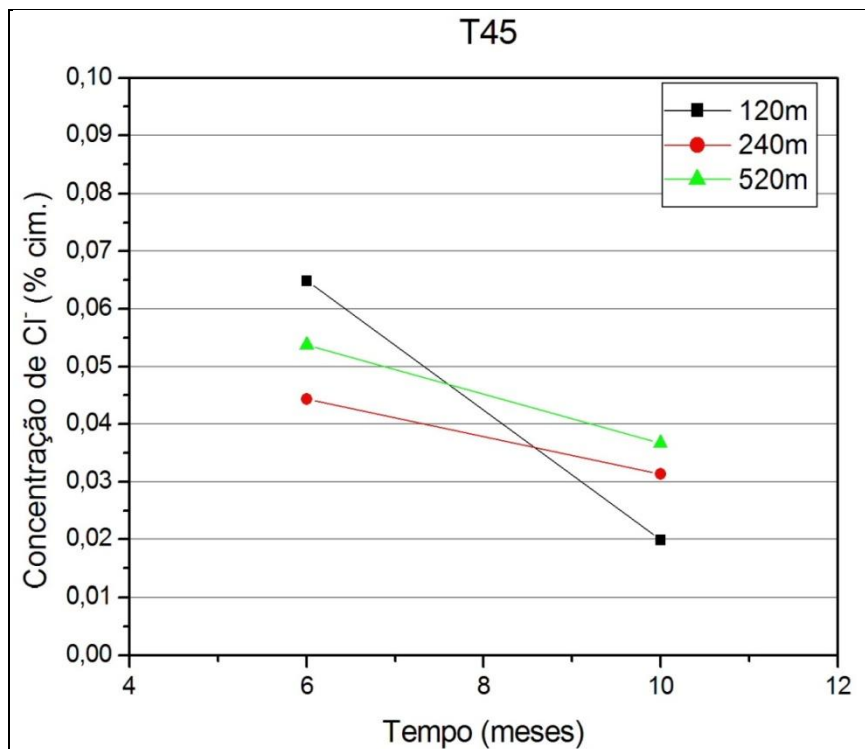


Figura 5.19: concentração superficial de cloretos, concreto T45.

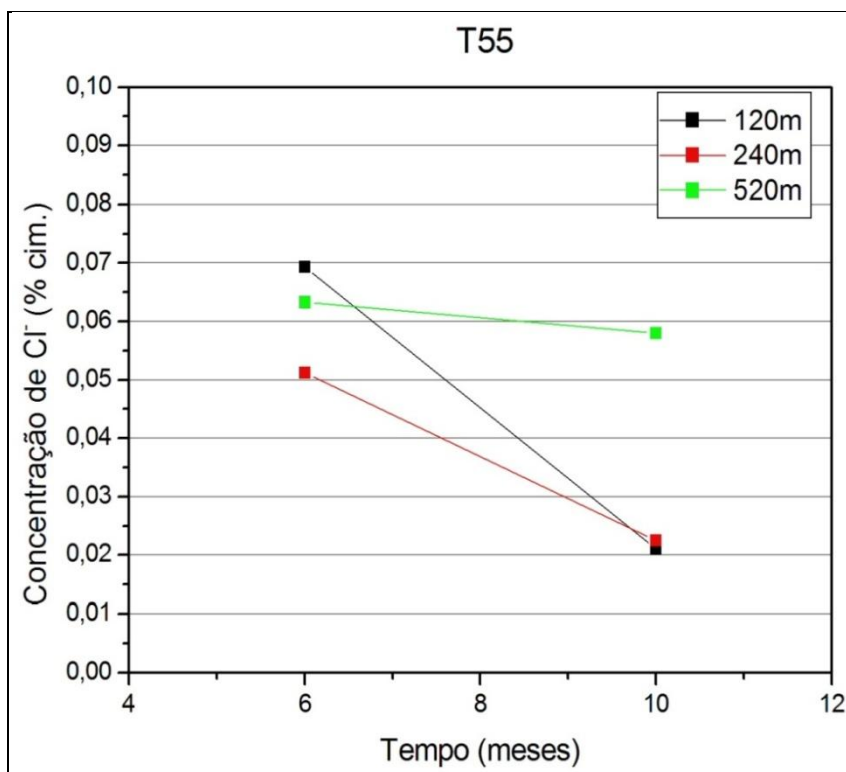


Figura 5.20: concentração superficial de cloretos, concreto T55.

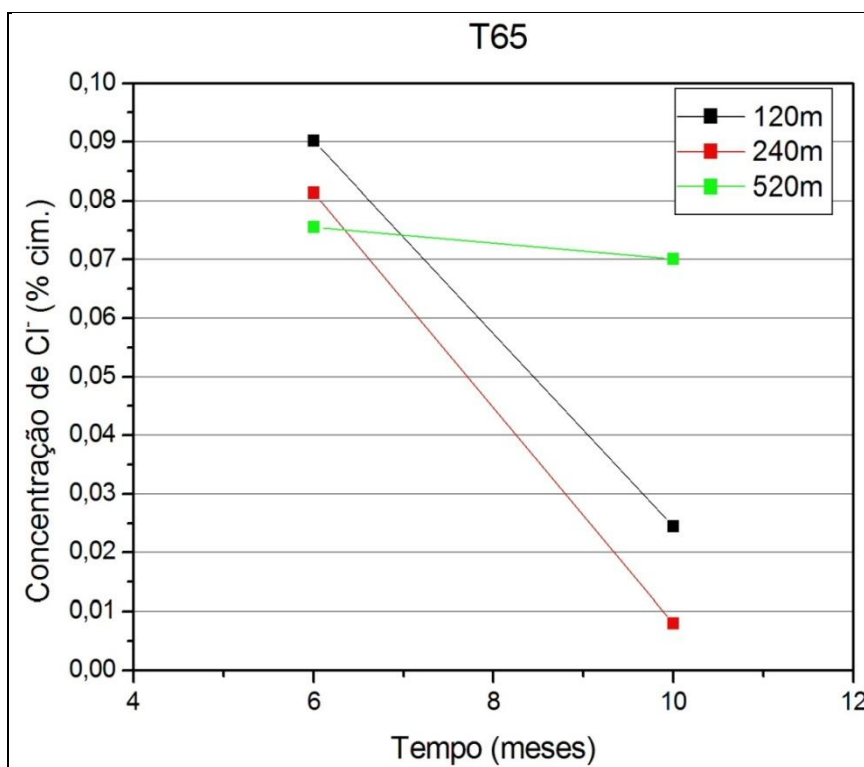


Figura 5.21: concentração superficial de cloretos, concreto T65.

5.5 PERFIS DE CLORETOS DOS CONCRETOS EXPOSTOS

Os resultados de concentração de cloretos no interior do concreto foram obtidos através de perfis, vistos na Figura 5.22 a Figura 5.24. Os perfis de cloretos têm por característica o aumento de concentração até atingir um pico, próximo da superfície, após o qual os valores decrescem.

A parte crescente dos perfis é chamada de Zona de Pele, região superficial do concreto que sofre com os efeitos da interação com o ambiente. A partir do pico, a diminuição da concentração é causada pela dificuldade do cloreto em penetrar no concreto através de sua rede de poros.

Os perfis obtidos apresentam valores de concentração muito próximos, devido ao pouco tempo de exposição e à baixa oferta de cloretos na atmosfera nos pontos localizados no Aeroporto.

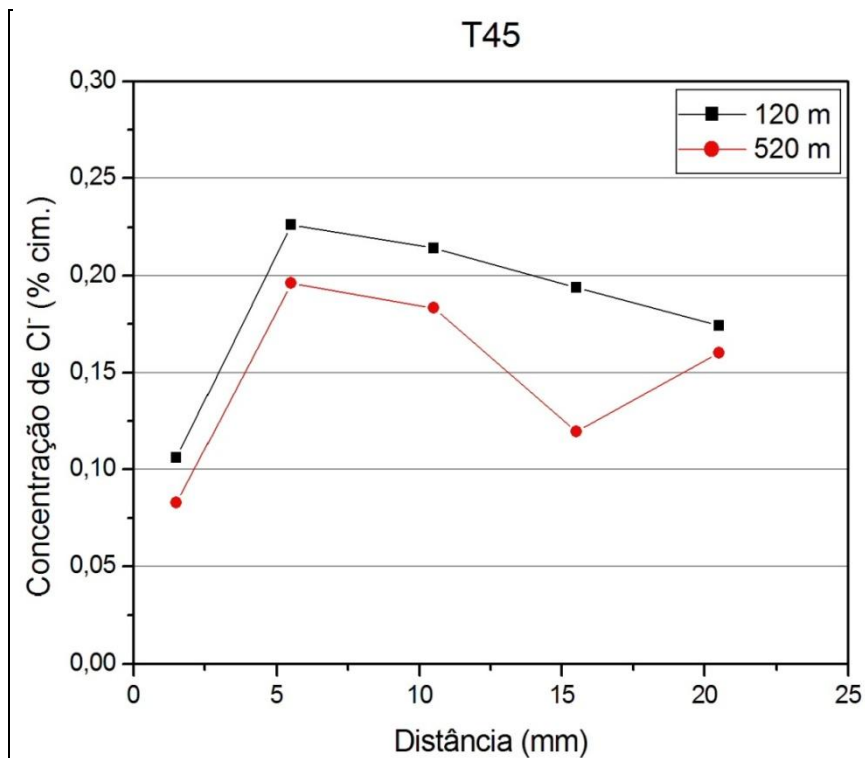


Figura 5.22: perfis de cloretos em concreto T45 aos 10 meses.

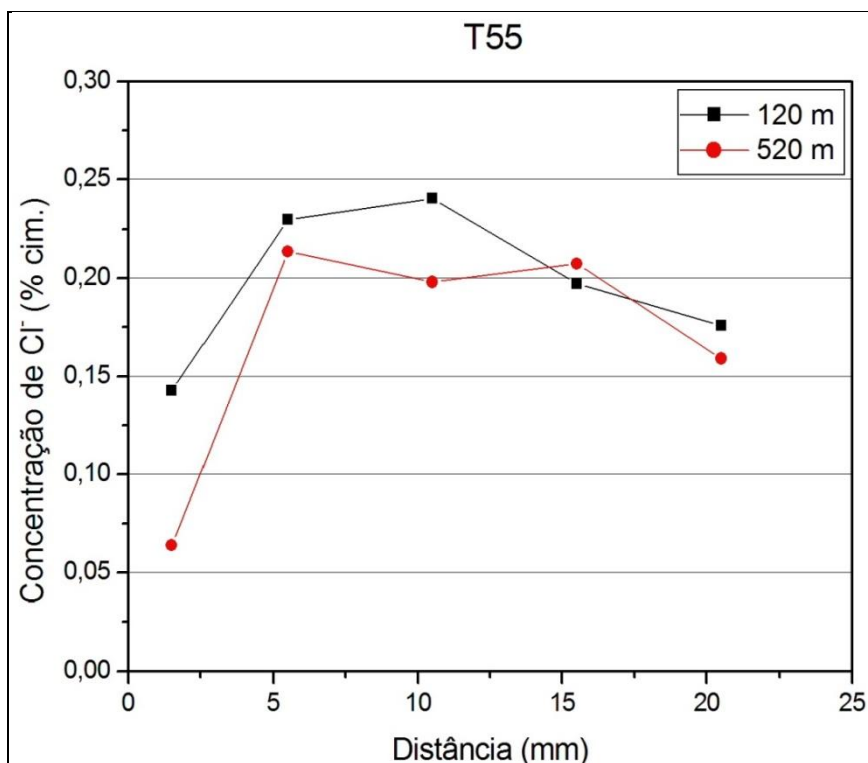


Figura 5.23: perfis de cloretos em concreto T55 aos 10 meses.

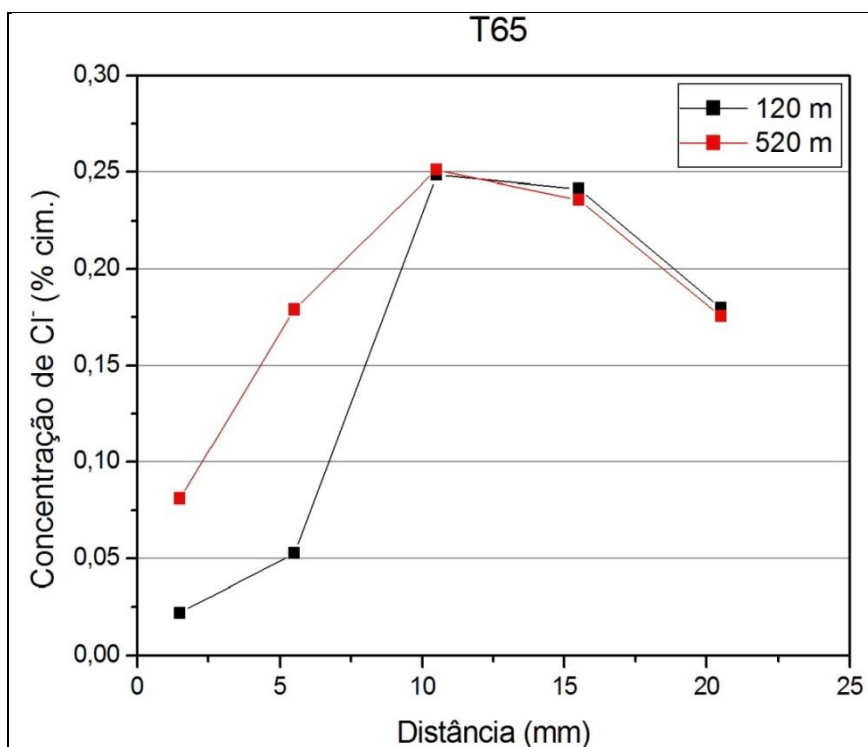


Figura 5.24: perfis de cloretos em concreto T65 aos 10 meses.

Nos concretos T45 e T55 é observada uma tendência da diminuição da concentração de cloretos com o afastamento do mar. Os concretos expostos a 520

metros ainda sobre os concretos mais compactos, é possível notar que o pico da concentração de cloretos ocorre entre 5,5 mm e 10,5 mm da face exterior do concreto. Alguns estudos mostram que a tendência é que o pico se desloque ao interior do concreto com o passar do tempo (SANDBERG; TANG; ANDERSEN, 1998; COSTA; APPLETON, 1999; MEIRA *et al*, 2007b). Apesar dos resultados obtidos, é necessário considerar o pouco tempo de exposição dos concretos antes de estabelecer um comportamento.

O concreto T65, devido à sua maior porosidade e interação com o meio, apresentou picos de concentração aos 10,5 mm e com valores semelhantes para as duas distâncias ao mar. Entre 0 e 10,5 mm, a interação com o meio prevaleceu e a concentração de cloretos não apresentou um comportamento adequado. Na parte mais interior do concreto – a partir do pico de concentração – a maior proximidade do mar não gerou uma maior concentração de cloretos, com valores bem semelhantes aos 120 e 520 metros.

5.5.1 Concentração média de cloretos no concreto e sua relação com a deposição de cloretos na atmosfera.

Os cloretos presentes na atmosfera se depositam na superfície das estruturas de concreto. Com o acúmulo dessa deposição e pelo efeito da difusão iônica e da absorção capilar, os cloretos se deslocam para o interior do concreto, formando os perfis vistos no item anterior. Dessa forma, quanto maior a deposição acumulada, maior é a quantidade de cloretos no concreto. Meira *et al.* (2007b) relaciona esses dois parâmetros através da Equação 15:

$$C_{tot} = C_{tot0} + k_d \cdot \sqrt{D_{ac}} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

- C_{tot} – Concentração média de cloretos no concreto (% massa cimento);
- C_{tot0} – Concentração inicial de cloretos no concreto (% massa cimento);
- k_d – coeficiente que depende do material e do ambiente;
- D_{ac} – Deposição acumulada de cloretos (g/m^2).

Nesse estudo, a adequação da Equação de Meira aos parâmetros locais está apresentada na Tabela 5.6. Os valores obtidos mostram um cenário de agressividade maior que os estudos obtidos em João Pessoa. Cabe esclarecer que esse comportamento foi obtido a partir de dados de apenas dois pontos de exposição, o que empobrece a análise. Além da pouquíssima quantidade de dados, os valores de C_{tot0} foram considerados como 0,05 % em relação à massa de cimento, pois sua quantificação não foi feita a tempo de fechamento dessa dissertação.

Os valores da Tabela 5.6 mostram um crescimento do coeficiente k_d com o aumento da relação água cimento. A maior porosidade dos concretos com maior teor de água de amassamento facilita a entrada de cloretos no interior do concreto. A exceção desse comportamento é o concreto T65, que sofreu com a maior interação com o meio e o efeito de lavagem, reduzindo seus valores de C_{tot} . Esses dados, apesar de apresentarem apenas uma tendência, precisam de mais tempo de análise para poder consolidar os resultados.

Tabela 5.6: valores da função de deposição acumulada *versus* concentração média.

| | C_{tot0} (% cim.) | k_d | Função |
|-----|---------------------|---------|---|
| T45 | 0,05 | 0,02401 | $C_{tot} = 0,05 + 0,02401\sqrt{D_{ac}}$ |
| T55 | 0,05 | 0,02699 | $C_{tot} = 0,05 + 0,02699\sqrt{D_{ac}}$ |
| T65 | 0,05 | 0,02045 | $C_{tot} = 0,05 + 0,02045\sqrt{D_{ac}}$ |

A Figura 5.25 mostra o gráfico da extrapolação das funções da Tabela 5.6 para valores de deposição acumulada além das obtidas no período de estudo. As linhas verticais traçadas no gráfico mostram a interseção da deposição acumulada aos 10 m e 120 m, durante o período de estudo, com as curvas de C_{tot} em função de D_{ac} para cada tipo de concreto. A forma de cálculo e obtenção da deposição acumulada está descrita no Apêndice B.

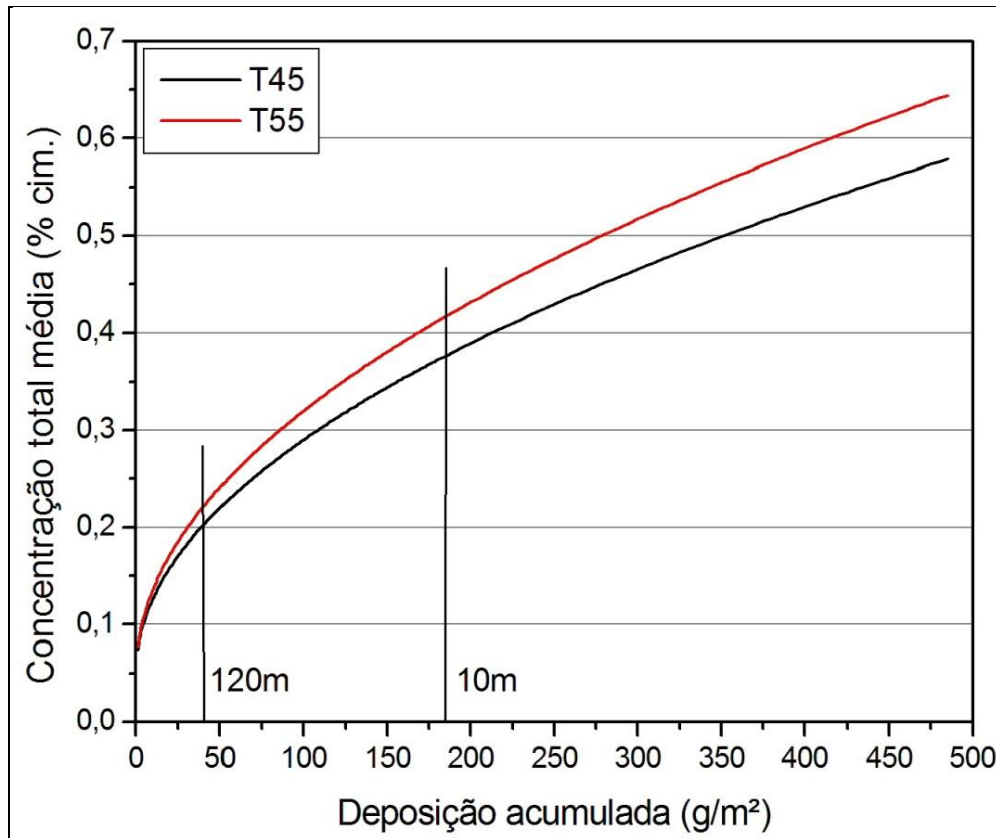


Figura 5.25: concentração média de cloretos no concreto em função da deposição acumulada de cloretos na atmosfera.

Com isso, pode-se presumir que a concentração média aos 10 m, após os 10 meses de exposição é de cerca de 0,4 % em relação à massa de cimento. Esse valor nos remete a um ambiente demasiadamente agressivo, comparando com os dados obtidos em Meira *et al.* (2007b). A baixa concentração de cloretos na atmosfera e o curto tempo de exposição diminuem a eficiência na captura dos cloretos, causando um aumento nos coeficientes das equações obtidas na Tabela 5.6. Seria necessário um acompanhamento de longo prazo para se obter medidas mais confiáveis.

No entanto, para valores médios de deposição, as equações da Tabela 5.6 são mais eficientes. Como exemplo, aos 120 metros, a diferença entre o valor obtido experimentalmente e o obtido através da equação é de 8,7% e 10,2% para os concretos T45 e T55, respectivamente.

5.5.2 Concentração máxima de cloretos no concreto e sua relação com a deposição de cloretos na atmosfera.

Além da concentração média, é possível relacionar a deposição acumulada de cloretos com a concentração máxima de cloretos de concreto (Meira, 2004), isto é, o valor de pico dos perfis apresentados no item anterior. A equação que relaciona esses dois parâmetros é a Equação 16.

$$C_{\max} = C_{\text{tot}0} + k_m \sqrt{D_{ac}} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

- C_{\max} – Concentração máxima de cloretos no concreto (% massa cimento);
- $C_{\text{tot}0}$ – Concentração inicial de cloretos no concreto (% massa cimento);
- k_m – coeficiente que depende do material e do ambiente;
- D_{ac} – Deposição acumulada de cloretos (g/m^2).

A Tabela 5.7 mostra os valores da Equação 16 para os dados da pesquisa. Os valores de k_m apresentam um crescimento com o aumento da relação água/cimento dos concretos. Os valores de $C_{\text{tot}0}$ mais uma vez foram considerados como 0,05% em relação à massa de cimento.

Tabela 5.7: valores da função de deposição acumulada versus concentração máxima.

| | C_{\max} (% cim.) | k_m | Função |
|-----|---------------------|---------|--|
| T45 | 0,05 | 0,03248 | $C_{\max} = 0,05 + 0,03248\sqrt{D_{ac}}$ |
| T55 | 0,05 | 0,03536 | $C_{\max} = 0,05 + 0,03536\sqrt{D_{ac}}$ |
| T65 | 0,05 | 0,03816 | $C_{\max} = 0,05 + 0,03816\sqrt{D_{ac}}$ |

De forma semelhante à Equação 15, os valores obtidos de k_m nesse trabalho estão bem acima dos valores obtidos em Meira (2004), indicando um cenário de agressividade mais forte que o de João Pessoa, apesar de os demais dados como deposição de cloretos e velocidade dos ventos mostrarem o contrário. Mais uma vez, esse fato pode ser associado a pouca quantidade de dados e ao fato de que as

medidas de concentração de cloretos em concreto foram feitas em locais de exposição afastados do mar, com baixa quantidade de cloretos na atmosfera. Além disso, deve ser considerado que, com a baixa deposição dos pontos de exposição, a eficiência da captura de cloretos aumenta, o que tende a fornecer valores de k_m (Equação 16) maiores.

A Figura 5.26 plota em um gráfico a função obtida na Tabela 5.7. As linhas horizontais traçadas no gráfico mostram o valor de concentração de cloretos local equivalente a 0,4% e 0,8% em relação à massa de cimento. Esses valores são tidos por alguns autores (DURAR, 1997; MEIRA, 2004) como quantidades críticas de cloretos, ou seja, concentrações que desencadeiam a corrosão de armaduras.

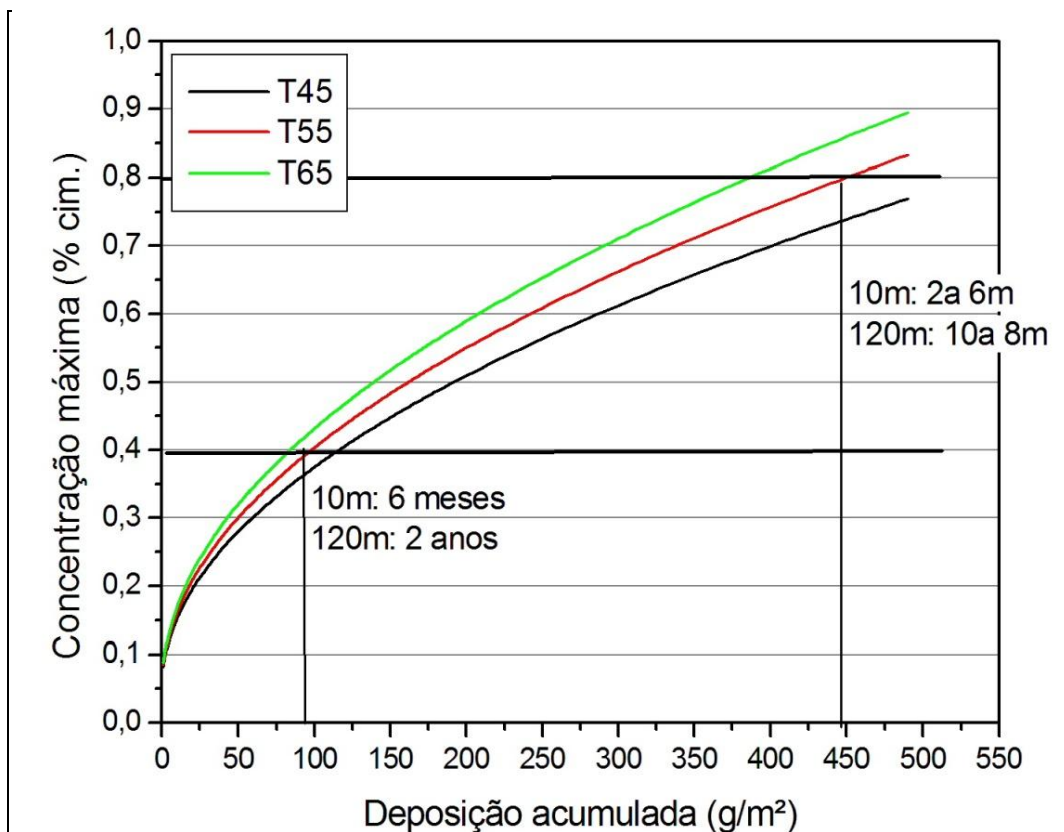


Figura 5.26: extrapolação dos valores de concentração máxima em função da deposição acumulada.

As linhas verticais traçadas no gráfico mostram o encontro da curva do concreto T55, determinado pela NBR 6118 (ABNT, 2007) para ambientes marinhos, com os teores de cloretos de 0,4% e 0,8%. Essa interseção nos fornece o valor da deposição acumulada, determinado pela função da Tabela 5.7, em que o T55 tem concentração máxima de 0,4% e 0,8% em relação à massa de cimento. Dessa

forma, é possível determinar em quanto tempo o concreto atingirá os valores limites de concentração de cloretos para cada ponto de exposição.

Assim sendo, aos 10 metros do mar a concentração de 0,4% seria atingida após seis meses de exposição, enquanto que haveria 0,8% de cloretos em relação à massa de cimento após dois anos e seis meses no concreto T55 a 10 metros do mar. De forma semelhante às análises anteriores, esse cenário indica um ambiente de agressividade maior que o esperado, fruto do pouco tempo de exposição e da baixa concentração de cloretos na atmosfera, nos locais de exposição.

Para chegar a tais valores, calculou-se a deposição acumulada, conforme descrito no Apêndice B.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais dos estudos realizados para essa dissertação. Também é apresentada a forma de divulgação dos resultados obtidos através dos meios científicos, como revistas e congressos. Ao final, são lançadas algumas sugestões para os trabalhos futuros de forma a complementar os estudos aqui desenvolvidos.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho faz parte de um estudo amplo sobre a agressividade às estruturas de concreto armado em ambiente marinho. Esse estudo tem apresentado ao meio técnico e científico diversos resultados de deposição de cloretos em diferentes regiões do Brasil e sua relação com a durabilidade das estruturas de concreto.

A região estudada é caracterizada por um clima tropical quente e úmido, com meses de inverno ameno pela chegada das frentes frias. Durante o período de estudo, a umidade relativa do ar média manteve-se acima de 70%, com uma diminuição entre os meses de julho a outubro. A temperatura média variou entre 20 e 30 °C, com máximas de 35 °C nos meses de dezembro a março e mínimas chegando aos 15 °C. A precipitação total do tempo de estudo foi maior que 1200 mm, sendo que só no mês de novembro chegou a chover 521 mm. Os ventos apresentaram-se fracos, com velocidade média entre 1 e 4 m/s e direção predominante Norte ou Nordeste. Nos meses de agosto, setembro e outubro ocorrem uma maior intensidade de ventos com a chegada das frentes frias. A força do vento foi um importante parâmetro para dimensionar a intensidade do vento e seu tempo de permanência no ar.

A baixa velocidade dos ventos acarretou em baixos valores de deposição de cloretos, com exceção dos meses já citados de ventos fortes que apresentaram picos de deposição. Foi verificada uma maior diminuição da deposição a partir dos pontos a 200 metros, devido ao afastamento do mar, que é a fonte de sal. Comparando com os resultados obtidos em Meira *et al.* (2006) pode-se dizer que a deposição de cloretos na cidade de Vitória é semelhante à encontrada pelo autor na cidade de João Pessoa. Apesar de apresentar maiores picos de ventos, Vitória é banhada por uma baía que dá nome a cidade e a presença de portos em sua costa abrandam a formação de ondas, uma das responsáveis pela geração do aerossol marinho.

A deposição de cloretos na atmosfera sofre influência direta de dois parâmetros: a distância ao mar e a velocidade dos ventos. Sobre o efeito da distância, pode-se concluir que a deposição diminui exponencialmente com o afastamento do mar. A

maior oferta de cloretos na região de costa implica em uma maior variabilidade de valores de deposição. Além disso, foi possível observar o crescimento da deposição de cloretos com o aumento da velocidade dos ventos, principalmente os ventos marinhos os ventos acima de 3 m/s. O efeito da força do vento na deposição de cloretos, ilustrada na Figura 5.16, corroboram esse comportamento.

Os concretos utilizados na pesquisa tiveram melhor desempenho aos esforços mecânicos com a diminuição da relação água/cimento. De forma semelhante, os concretos mais compactos apresentaram maior resistência à penetrabilidade de cloretos. Os valores de absorção total e absorção capilar tiveram comportamento inesperado, com o concreto T65 apresentando melhor desempenho.

A concentração superficial de cloretos apresentou valores baixos devido ao curto tempo de pesquisa e ao distanciamento das estações de exposição do mar. Apesar disso, pode-se notar o efeito da interação da zona superficial do concreto com o meio. As fortes precipitações ocorridas entre as medidas de 6 e 10 meses causaram uma lavagem do concreto e o carregamento do sal presente na superfície. Esse efeito se tornou mais forte com a proximidade do mar e com o uso de concreto com maior relação a/c.

A concentração de cloretos no concreto apresentou a presença de duas zonas distintas: uma zona de pele, exterior ao concreto, que interage com o meio e outra zona interna, onde a concentração de cloretos diminui conforme se penetra no interior do concreto. A zona de pele é maior para concretos com maior relação a/c, devido à maior interação desses concretos com o meio. O efeito da distância ao mar na concentração de cloretos também pode ser notado, principalmente nos concretos mais compactos.

A deposição acumulada de cloretos contribuiu para a concentração de cloretos no concreto. A equação de Meira (2007b) foi utilizada como ferramenta para estabelecer essa relação. Porém, o pouco tempo de exposição somado à exposição dos concretos em locais afastados do mar prejudicaram a adequação da Equação de Meira ao ambiente de estudo, retornando valores de concentração elevados, tanto na análise da concentração média (C_{tot}) como da concentração máxima (C_{max}). Essa concentração empiricamente elevada sugere um cenário de agressividade

demasiada, fato que não se justifica tomando em conta os valores de deposição de cloretos obtidos ao longo do estudo.

6.2 DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA

Até o fechamento dessa dissertação, os resultados parciais do estudo foram publicados em alguns congressos de importância nacional.

A primeira publicação foi um resumo expandido aprovado para o XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), realizado em Fortaleza no ano de 2008. Esse resumo apresentava os resultados do estudo piloto que determinou os primeiros dados de clima e deposição, além de definir os pontos de exposição.

Em seguida, foi aprovado um artigo para publicação em um congresso internacional realizado na América do Sul, o CONPAT 2009 (*Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción*) realizado em Valparaíso, Chile. O artigo apresentava resultados parciais de clima e deposição de cloretos.

O último artigo publicado durante o tempo da pesquisa foi enviado e aprovado para o 51º CBC (Congresso Brasileiro do Concreto), evento organizado pelo Instituto Brasileiro do Concreto (Ibracon) e realizado na cidade de Curitiba no ano de 2009. Esse artigo apresenta os resultados finais de comportamento climático e deposição de cloretos obtidos na pesquisa.

É válido esclarecer que a comunicação dos resultados obtidos não se limita aos artigos já publicados. Pretende-se para o futuro a publicação dos resultados de concentração de cloretos em concreto em congressos nacionais e internacionais. Além disso, objetiva-se a publicação de um artigo com os resultados de deposição de cloretos de vários estudos realizados no Brasil em uma revista indexada.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuação da pesquisa e aprimoramentos dos resultados aqui encontrados, sugere-se para trabalhos futuros:

- A exposição para determinação de cloretos em locais com maior intensidade de ventos, para aferir o comportamento da deposição de cloretos com o regime dos ventos.
- A exposição dos concretos em locais mais próximos ao mar na região de Vitória, para aferir o efeito da deposição acumulada na concentração de cloretos no concreto.
- A exposição dos concretos à agressividade ambiental por um tempo maior, para verificar o comportamento da concentração de cloretos na zona de pele e no interior do concreto.
- A exposição dos concretos estudados à agressividade artificial, a fim de conhecer os limites de cloretos para despassivação de armaduras de concreto.
- A determinação do teor crítico de cloretos para os concretos com cimento CPIII, utilizados na região sudeste.

BIBLIOGRAFIA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KHAJA, A. W. Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes. **Construction and Building Material**. V. 11, n.1, p. 9-13, 1997.

ALBUQUERQUE, A. T.; OTOCH, S. Proposta de classificação da agressividade do ambiente na cidade de fortaleza. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Recife, IBRACON, 2005.

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

ANDRADE, C.; ALONSO, C. Modeling of skin effects on diffusion process in concrete. In: INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP – chloride penetration into concrete. St Rémy lés Chevreuse. **Proceedings...** Paris, RILEM, 1997.

ANDRADE, C.; SAGRERA, J. L.; SANJUÁN, M. A. Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water. In: SECOND INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELING CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE. **Proceedings...** Paris, RILEM, 2000.

ANDRADE, T. Tópicos sobre durabilidade dos concretos. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005a. p. 753-792, vol. 1.

ANDRADE, J. J. O. Vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005b. p. 923-952, vol. 2.

BASF. **Glenium 51** – Aditivo superplastificante de nova geração desenvolvido para a indústria de concreto em geral. BASF, 2007. Catálogo de produtos.

BAUER, L. A. F. (coord). **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Vol 1. 5ª Ed. 488p.

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.

- CASCUDO, O. **O controle da corrosão das estruturas de concreto**. São Paulo: Pini; Goiânia: UFG, 1997.
- CHOMKA, M.; PETELSKI, T. Sea salt concentration over the coastal zone. In: EUROPEAN AEROSOL CONFERENCE. **Proceedings...** Leipzig, 2001.
- CORVO, F.; BETANCOURT, N; MENDONZA, A. The influence of airborne salinity on the atmospheric corrosion of steel. **Corrosion Science**, v.37, n.12, p.1889-1901, 1995.
- COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment – part II: prediction of long term chloride penetration. **Materials and Structures**, v.32, p.354-359, 1999.
- DE SCHUTTER, G. Quantification of the influence of cracks in concrete structures on carbonation and chloride penetration. **Magazine of Concrete Research**. V. 51, n. 6, p. 427-435, 1999.
- DELAGRAVE, A.; MARCHAND, J.; OLLIVIER, J-P; JULIEN, S.; HAZRATI, K. Chloride binding capacity of various hydrated cement past systems. **Advanced and Cement Based Materials**. V. 6, p. 28-35, 1997
- DURAR (Red Temática XV.B – durabilidad de la armadura – del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). **Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado**. Rio de Janeiro: CYTED, 1997. 208 p.
- FITZGERALD, J.W. Marine aerosols: a review. **Atmospheric Environment**, v. 25A, N.3/4, p. 533-545, 1991.
- FOLHA ONLINE. Desabamento de marquise de hotel mata duas pessoas e deixa feridos no Rio. **Jornal Folha On Line**. Publicado em: 26/02/2007. Acesso em: 16/08/2009. www.folha.uol.com.br.
- FOLHA VITÓRIA. Parapeito de prédio no centro de Vitória desmorona na manhã de sábado. **Jornal Folha Vitória**. Publicado em: 27/06/2009. Acesso em: 16/08/2009. www.folhavitoria.com.br.
- GARCIA, R. B.; PADARATZ, I. J.; SZPOGANICZ, B. Agressividade marinha medida pela taxa de deposição de cloretos na Região da Grande Florianópolis. IN: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Bento Gonçalves, IBRACON, 2007.
- GAZETA ONLINE. Marquise em ponto de ônibus desaba e uma pessoa fica ferida em Vitória. **A Gazeta On Line**. Publicado em: 03/09/2007. Acesso em: 16/08/2009. www.gazetaonline.com.br.
- GONZÁLEZ, J. A. et al. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part II: corrosion mechanisms and monitoring service life prediction and protection methods. **Materials and Structures**, v. 29, mar 1996, p. 97-104.
- GOOGLE MAPS. Encontre empresas locais, visualize mapas e obtenha rotas de tráfego no Google Maps. Disponível em <http://maps.google.com.br>. Acesso: 04 de Setembro de 2010.
- GRIJÓ, A. R.; NOGUEIRA, J. R.; REGIANI, L. R. **Falhas externas em edificações multifamiliares segundo a percepção dos usuários** – estudo de caso, Praia do

- Canto, Vitória, ES. 2007. 127 pg. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marinhos**. 2000. 241 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GUIMARÃES, A. T. C.; CASTRO, P.; NUNES, J. Teor de cloretos próximos a superfície do concreto em ambientes marítimos. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Bento Gonçalves, IBRACON, 2007.
- GUSTAFSSON, M.E.R.; FRANZÉN, L.G. Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 6, p. 977-989, 1996.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1993. 349p.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Órgão governamental com informações completas sobre o tempo e o clima em todo Brasil. Disponível em www.inmet.gov.br. Acesso: entre novembro de 2007 e fevereiro de 2009.
- 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, 1990.
- JONES, M. R.; McCARTHY, M. J.; DHIR, R. K. Chloride ingress and reinforcement corrosion in carbonated and sulphated concrete. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON CORROSION AND CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE. **Proceedings...** Sheffield, Sheffield Academic Press, 1994.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia científica: ciência e conhecimento científico, métodos científicos, teoria, hipóteses e variáveis, metodologia jurídica**. 3. ed. - São Paulo: Atlas, 2000. 289 p.
- LARSEN, C. K. The effect of type of aggregate, temperature and drying/rewetting on chloride binding and pore solution composition. In: INTERNACIONAL RILEM WORKSHOP – chloride penetration into concrete. St Rémy lés Chevreuse. **Proceedings...** Paris, RILEM, 1997.
- LEE, J-S.; MOON, H.-Y. Salinity distribution of seashore concrete structures in Korea. **Building and Environment**, 41, 2006, pg 1447-1453.
- LESSA, R. N. T. Determinações de cloretos em amostras de água pelo método de Mohr. In: CUNHA, A. A. V. **Manual de práticas de química analítica**. Da Universidade: Pelotas, 1984. 223p.
- LIN, P.; HU, M.; WU, Z.; NIU, Y.; ZHU, T. Marine aerosol size distribution in the springtime over China adjacent seas. **Atmospheric Environment**, 41, 2007, p. 6784-6796.
- LOVETT, R. F. Quantitative measurement of airborne sea-salt in the North Atlantic. **Tellus**, v. 30, p.358-364, 1978.
- MANGAT, P. S.; GURUSAMY, K. Chloride diffusion in steel fibre reinforced marine concrete. **Cement and Concrete Research**. V. 17, p. 385-396, 1987.

McDONALD, R.L.; UNNI, C.K.; DUCE, R.A. Estimation of atmospheric sea salt dry deposition: wind speed and particle size dependence. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, p. 1246-1250, Feb. 1982.

McKAY, W. A.; GARLAND, J. A; LIVESLEY, D.; HALLIWELL, C. M.; WALKER, M. I. The Characteristics of the shore-line sea spray aerosol and the landward transfer of radionuclides discharged to coastal sea water. **Atmospheric Environment**, v. 28, n 20 p 3299-3309, 1994.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Revisores e coordenadores: N. P. Hasparyk; P. Helene; V. A. Paulon. Ibracon: São Paulo, 2008. 3ª Ed. 674p.

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

MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. 2004. 410 pg. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J.; BORBA JR., J. C.; ALONSO, M. C.; ANDRADE, M. C. Carbonatação de estruturas de concreto armado em zona de atmosfera marinha – influência do grau de saturação. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Recife, IBRACON, 2005.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, M. C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA JR., J. C. Measurements and modeling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil. **Atmospheric Environment**, 40, 2006, p. 5596-5607.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, M. C.; ALONSO, M. C.; PADARATZ, I. J.; BORBA JR., J. C. Salinity of marine aerosols in a Brazilian coastal area – influence of wind regime. **Atmospheric Environment**, 41, 2007a, p. 8431-8441.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, M. C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA JR., J. C. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement and concrete Composites**, 29, 2007b, p. 667-676.

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**, v. 42, p. 91-104, 2000.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n 7, p. 995-1007, 1997.

NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. R. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 133-138, 2003.

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.

PACHECO, R. F. R. **Análise do módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos produzidos em centrais na grande vitória**.

Experimentos e estatística. 318 p. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo.

PADILHA, M. A.; MEIRA, G. R.; LIRA, R.; SILVA, A. L. C. Teor crítico de cloretos para iniciar a corrosão em estruturas de concreto – influência de características dos materiais. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Bento Gonçalves, IBRACON, 2007.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EI TARRAS, A. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 395-406, 1981.

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

PETELSKI, T.; CHOMKA, M. The Marine aerosol over the coastal zone. **Journal of Aerosol Science**, v.29, sup.1, p. S697-S698, 1998.

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

PMV – Prefeitura Municipal de Vitória. Secretaria de Desenvolvimento da Cidade. Fiscalização rigorosa nos prédios históricos de Vitória. Notícia publicada em 30/04/2009. Acesso: 15/08/2009. Disponível: www.vitoria.es.gov.br/diario

PONTES, R. B.; OLIVEIRA, R. A.; MONTEIRO, E. C. B.; PAIVA, S. C. Estimativas da concentração de cloretos na atmosfera marinha da região metropolitana do Recife. In: 48º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Rio de Janeiro, IBRACON, 2006.

POURBAIX, M. **Lecciones de corrosion electroquímica.** 3. Ed. Bruselas: CEBELCOR, 1987. 387 p.

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

SANDBERG, P.; TANG, L.; ANDERSEN, A. Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations. **Cement and Concrete Research**, 1998, v.28, n.10. pp. 1489-1503.

SPIEL, D. E.; LEEUW, G. Formation and production of sea spray aerosol. **Journal of Aerosol Science**, v. 27, s.1, p. S65-S66, 1966.

SWAMY, R.N.; HAMADA, H.; LAIW, J. C. A critical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CORROSION AND CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE (Edited by Swamy, 1994: Sheffield – UK). **Proceedings ...** Sheffield: Sheffield Academic Press, 1994. p. 404-419.

TAMINI, A. K.; ABDALLA, J. A.; SAKKA, Z. I. Prediction of long term chloride diffusion of concrete in harsh environment. **Construction and Building Materials**. Vol. 22, p. 829-836, 2008.

TANG, L.; ANDERSEN, A. Chloride ingress data from five years field exposure in a Swedish marine environment. In: SECOND INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELLING CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE. **Proceedings...** Paris: RILEM, 2000.

- TAYLOR, N.J.; WU, J. Simultaneous measurements of spray and sea salt. **Journal of Geophysical Research**, v.97, n. C5, p. 7355-7360, 1992.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Sweden: CBI, 1982. 482 pg.
- VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciências dos materiais**. 7. Ed. Tradução: L. P. C. Ferrão. São Paulo: Edgard Blücher, 1985.
- WOODCOCK, A. H. Salt nuclei in marine air as function of altitude and wind force. **Journal of Meteorology**, v.10, p. 362-371, 1953.
- WU, D.; TIE, X.; DENG, X. Chemical characterizations of soluble aerosols in southern China. **Chemosphere**. 64, 2006, p. 749-757.
- YIN, J.; ALLEN, A. G.; HARRISON, R. M.; JENNINGS, S. G.; WRIGHT, E.; FITZPATRICK, M.; HEALY, T.; BARRY, E.; CEBURNIS, D.; McCUSKER, D. Major component composition of urban PM₁₀ and PM₂₅ in Ireland. **Atmospheric Research**. 78, 2005, p. 149-165.
- YOON, I. S.; ÇOPUROĞLU, O.; PARK, K. B. Effect of global climate change on carbonation progress of concrete. **Atmospheric Environment**, 41, p. 7274-7285, 2007.
- ZEZZA, F.; MACRI, F. Marine aerosol and stone decay. **The Science of the Total Environment**, V. 167, p. 123-143, 1995.

NORMAS TÉCNICAS REFERENCIADAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM). **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**. ASTM C-1202. v.04.02., 1997.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). **Standard test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method**. ASTM G-140. v.03.02., 2002.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). **Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete**. ASTM C-1152. v.04.02., 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland de alto-forno**. NBR 5735. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. NBR 6118. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. NBR 7215. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. NBR 7218. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** NBR 7222. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, Índice de vazios e massa específica.** NBR 9778. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade – método de ensaio.** NBR 9779. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier.** NBR 11582. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico – método de ensaio.** NBR 12826. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – desempenho.** NBR 15575. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Análise química de cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre.** NBR NM 12. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Análise química de cimento Portland - Processos de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.** NBR NM 14. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel.** NBR NM 15. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico.** NBR NM 16. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland – análise química- determinação de perda ao fogo.** NBR NM 18. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland - Análise química - Determinação de enxofre na forma de sulfeto.** NBR NM 19. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland e matérias-primas - Determinação de anidrido carbônico (CO₂) por gasometria - Método de ensaio.** NBR NM 20. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica.** NBR NM 23. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregados - Amostragem.** NBR NM 26. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. NBR NM 27. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. NBR NM 30. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal**. NBR NM 43. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. NBR NM 45. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. NBR NM 46. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico**. NBR NM 47. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas**. NBR NM 49. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. NBR NM 52. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. NBR NM 53. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. NBR NM 65. Rio de Janeiro. 2003;

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBR NM 67. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)**. NBR NM 76. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NBR NM 101. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armadura.** Trad: Antonio Carmona Filho & Paulo Helene. Pini: São Paulo, 1992.
- CALMON, J. L. **Introdução à dissertação.** UFES: Vitória, 2007. Notas de aula – Introdução à dissertação. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES.
- FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobertura e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos.** 2003. 244p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- GENTIL, V. **Corrosão.** Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em estruturas de concreto armado.** 1993. 231p. Tese (Livre docência). Universidade de São Paulo.
- HELENE, P. R. L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado.** 3ª reimpressão. PINI: IPT: São Paulo, 1996.
- IEMA – Instituto Estadual do Meio Ambiente. **Relatório da qualidade do ar na região da grande Vitória 2005.** IEMA: Cariacica, 2006.
- DOS SANTOS, A. R. **Curso de Climatologia.** UFES: Vitória, 2006. Notas de aula – Climatologia. Curso de graduação em Geografia da UFES.

NORMAS TÉCNICAS CONSULTADAS

- American Society for Testing and Materials. Preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens – G 1 – 90 (reapproved 1999). **Annual Book of ASTM Standard**, v.03.02, p.15-22, 2000.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** NBR 5738. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Extração e preparação de amostras de cimentos.** NBR 5741. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Agregado para concreto.** NBR 7211. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Areia normal para ensaio de cimento.** NBR 7214. Rio de Janeiro: ABNT, 1982;
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova de argamassa e concreto.** NBR 9479. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Aditivos para concreto de cimento Portland.** NBR 11768. Rio de Janeiro: ABNT, 1992;
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Controle tecnológico de materiais componentes do concreto.** NBR 12654. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Preparação de concreto em laboratório.** NBR 12821. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Concreto - Amostragem de concreto fresco.** NM 33. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Concreto - Preparação das bases dos corpos de prova e testemunhos cilíndricos para ensaios de compressão.** NM 77. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Argamassa e concreto - Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland.** NM 137. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

APÊNDICES

APÊNDICE A: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Estado fresco

Massa específica – NBR NM 47

Traço: T45

| | Massa | Recipiente | M. Espec. | Média |
|-----|--------|------------|-----------|---------------|
| CP1 | 3821,3 | 1537,3 | 2284,0 | 2316,0 |
| CP2 | 3941,6 | 1537,3 | 2404,3 | |
| CP3 | 3797,1 | 1537,3 | 2259,8 | |
| | | | DP | 77,4 |
| | | | CV | 3,3% |

Traço: T55

| | Massa | Recipiente | M. Espec. | Média |
|-----|--------|------------|-----------|---------------|
| CP1 | 4023,3 | 1537,3 | 2486,0 | 2485,5 |
| CP2 | 4022,3 | 1537,3 | 2485,0 | |
| | | | DP | 0,7 |
| | | | CV | 0,0% |

Traço: T65

| | Massa | Recipiente | M. Espec. | Média |
|-----|--------|------------|-----------|--------------|
| CP1 | 3941,3 | 1537,3 | 2404,0 | 241,5 |
| CP2 | 3956,3 | 1537,3 | 2419,0 | |
| | | | DP | 10,6 |
| | | | CV | 0,4% |

Estado endurecido

Resistência à compressão axial – NBR NM 101

Traço: T45

| | Diâm. (cm) | Carga (kgf) | fc28 (MPa) | Média | DP | CV |
|-----|------------|-------------|------------|-------|------|------|
| CP1 | 9,96 | 35900 | 46,05 | 47,35 | 1,89 | 4,0% |
| CP2 | 9,94 | 36100 | 46,49 | | | |
| CP3 | 9,94 | 38400 | 49,52 | | | |

Traço: T55

| | Diâm. (cm) | Carga (kgf) | fc28 (MPa) | Média | DP | CV |
|-----|------------|-------------|------------|-------|------|------|
| CP1 | 9,99 | 27400 | 34,96 | 34,52 | 0,87 | 2,5% |
| CP2 | 10,03 | 27700 | 35,08 | | | |
| CP3 | 9,98 | 26200 | 33,52 | | | |

Traço: T65

| | Diâm. (cm) | Carga (kgf) | fc28 (MPa) | Média | DP | CV |
|-----|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|
| CP1 | 9,96 | 21000 | 26,94 | 26,38 | 0,59 | 2,2% |
| CP2 | 9,94 | 20000 | 25,76 | | | |
| CP3 | 9,94 | 20500 | 26,44 | | | |

Resistência à tração por compressão diametral – NBR 7222

Traço: T45

| | Diâm. (cm) | Compr. (cm) | Carga (kgf) | ft28 (MPa) | Média | DP | CV |
|-----|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|
| CP1 | 9,97 | 20 | 12200 | 3,89 | 4,00 | 0,11 | 2,9% |
| CP2 | 9,96 | 20 | 12900 | 4,12 | | | |
| CP3 | 9,96 | 20 | 12450 | 3,98 | | | |

Traço: T55

| | Diâm. (cm) | Compr. (cm) | Carga (kgf) | ft28 (MPa) | Média | DP | CV |
|-----|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|
| CP1 | 9,96 | 19,98 | 11200 | 3,58 | 3,60 | 0,10 | 2,8% |
| CP2 | 10,00 | 20,05 | 11050 | 3,51 | | | |
| CP3 | 9,98 | 20,03 | 11650 | 3,71 | | | |

Traço: T65

| | Diâm. (cm) | Compr. (cm) | Carga (kgf) | ft28 (MPa) | Média | DP | CV |
|-----|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|
| CP1 | 9,97 | 20 | 10000 | 3,19 | 3,14 | 0,24 | 7,8% |
| CP2 | 9,96 | 20 | 9000 | 2,88 | | | |
| CP3 | 9,96 | 20 | 10500 | 3,36 | | | |

Absorção por imersão – NBR 9778

Traço: T45

| | M. seca (g) | M. Sat. (g) | ABS (%) | Média | DP | CV |
|-----|------------------------|------------------------|----------------|--------------|-----------|-----------|
| CP1 | 3758,9 | 3892 | 3,54 | 3,47 | 0,10 | 3,0% |
| CP2 | 3737 | 3863,9 | 3,40 | | | |

Traço: T55

| | M. seca (g) | M. Sat. (g) | ABS (%) | Média | DP | CV |
|-----|------------------------|------------------------|----------------|--------------|-----------|-----------|
| CP1 | 3703,2 | 3864,5 | 4,36 | 4,69 | 0,47 | 10,1% |
| CP2 | 3683,6 | 3868,7 | 5,02 | | | |

Traço: T65

| | M. seca (g) | M. Sat. (g) | ABS (%) | Média | DP | CV |
|-----|--------------------|--------------------|----------------|--------------|-----------|-----------|
| CP1 | 3738,8 | 3821,7 | 2,22% | 2,23 | 0,02 | 0,9% |
| CP2 | 3730,6 | 3814,4 | 2,25% | | | |

Absorção por capilaridade– NBR 9779

| | | TRAÇO: T45 | | | | TRAÇO: T55 | | | TRAÇO: T65 | | |
|----------------|-----|-----------------------------------|--------------|----------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|--|
| Massa seca (g) | CP1 | 3720,5 | Média | 3746,4 | 3670,6 | Média | 3675,5 | 3706,8 | Média | 3733,1 | |
| | CP2 | 3782,4 | DP | 32,18 | 3647,7 | DP | 30,55 | 3743,7 | DP | 22,88 | |
| | CP3 | 3736,2 | CV | 0,9% | 3708,2 | CV | 0,8% | 3748,7 | CV | 0,6% | |
| Após 3h (g) | CP1 | 3727,4 | Média | 3755,1 | 3693,3 | Média | 3694,2 | 3722,6 | Média | 3746,3 | |
| | CP2 | 3790,7 | DP | 0,03 | 3661,2 | DP | 0,06 | 3755,3 | DP | 0,03 | |
| | CP3 | 3747,1 | CV | 23,3% | 3728,0 | CV | 25,2% | 3761,0 | CV | 17,0% | |
| | | ABS 3h (g/cm²) | | 0,11 | ABS 3h (g/cm²) | | 0,24 | ABS 3h (g/cm²) | | 0,17 | |
| Após 24h (g) | CP1 | 3741,8 | Média | 3769,5 | 3720,8 | Média | 3718,8 | 3730,2 | Média | 3753,0 | |
| | CP2 | 3805,3 | DP | 0,02 | 3685,3 | DP | 0,08 | 3762,1 | DP | 0,04 | |
| | CP3 | 3761,3 | CV | 8,3% | 3750,3 | CV | 14,7% | 3766,8 | CV | 14,9% | |
| | | ABS 24h (g/cm²) | | 0,29 | ABS 24h (g/cm²) | | 0,55 | ABS 24h (g/cm²) | | 0,25 | |
| Após 48h (g) | CP1 | 3750,2 | Média | 3776,60 | 3733,1 | Média | 3730,37 | 3732,0 | Média | 3755,20 | |
| | CP2 | 3812,1 | DP | 0,01 | 3698,9 | DP | 0,08 | 3763,8 | DP | 0,03 | |
| | CP3 | 3767,5 | CV | 3,1% | 3759,1 | CV | 12,1% | 3769,8 | CV | 12,2% | |
| | | ABS 48h (g/cm²) | | 0,38 | ABS 48h (g/cm²) | | 0,70 | ABS 48h (g/cm²) | | 0,28 | |
| Após 72h (g) | CP1 | 3754,1 | Média | 3780,17 | 3739,5 | Média | 3736,80 | 3732,5 | Média | 3756,20 | |
| | CP2 | 3815,1 | DP | 0,02 | 3706,8 | DP | 0,09 | 3765,2 | DP | 0,03 | |
| | CP3 | 3771,3 | CV | 3,6% | 3764,1 | CV | 11,0% | 3770,9 | CV | 9,7% | |
| | | ABS 72h (g/cm²) | | 0,43 | ABS 72h (g/cm²) | | 0,78 | ABS 72h (g/cm²) | | 0,29 | |

Penetrabilidade de íons cloretos – ASTM C1202

| | T45 | | T55 | | T65 | |
|---------------------------------------|--------------------|------------|---------------|-------------|-----------------|-------------|
| Correntes | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 |
| I0 | 20 | 18 | 31 | 39 | 42 | 51 |
| | 25 | 25 | 39 | 49 | 54 | 65 |
| I30 | 27 | 27 | 42 | 53 | 60 | 73 |
| I60 | 29 | 29 | 47 | 59 | 69 | 83 |
| I90 | 22 | 25 | 45 | 56 | 70 | 92 |
| I120 | 14 | 18 | 41 | 52 | 70 | 95 |
| I150 | 16 | 19 | 48 | 60 | 79 | 111 |
| I180 | 18 | 22 | 59 | 72 | 88 | 132 |
| I210 | 21 | 23 | 67 | 80 | 101 | 143 |
| I240 | 22 | 22 | 72 | 87 | 107 | 148 |
| I270 | 21 | 26 | 79 | 92 | 110 | 149 |
| I300 | 22 | 24 | 81 | 97 | 116 | 146 |
| I330 | 24 | 26 | 87 | 102 | 115 | 141 |
| I360 | 23 | 26 | 88 | 105 | 118 | 132 |
| Carga (C) | 515 | 566 | 1455 | 1764 | 2130 | 2809 |
| Média | 540,5 | | 1609,5 | | 2469,5 | |
| DP | 36,06 | | 218,50 | | 480,13 | |
| CV | 6,7% | | 13,6% | | 19,4% | |
| Penetrabilidade Cl⁻ | Muito Baixa | | Baixa | | Moderada | |

APÊNDICE B: DEPOSIÇÃO ACUMULADA DE CLORETOS

A deposição acumulada é a soma dos valores da deposição de cloretos obtidos mês a mês. Seu valor é importante para determinar a agressividade ambiental em cada ponto de exposição. A deposição acumulada pode ser obtida pela Equação I:

$$D_{ac} = \frac{N \cdot \sum Dep}{1000} \quad \text{Equação I}$$

Onde:

D_{ac} – deposição acumulada, em g/m²

Dep – Deposição mensal de cloretos, em g/(m².dia)

N – período de exposição, em dias.

1000 – fator de transformação de unidade, de mg para g.

A Tabela I mostra todos os valores de deposição obtidos mensalmente. O período de dias de exposição é de 30 dias.

Tabela I: valores de deposição de cloretos em todos os meses de exposição.

| | mar/08 | abr/08 | mai/08 | jun/08 | jul/08 | ago/08 | set/08 | out/08 | nov/08 | dez/08 | jan/09 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10 | 256,50 | 206,16 | 563,77 | 366,58 | 383,63 | 594,60 | 865,75 | 950,55 | 647,72 | 202,23 | 485,41 |
| 65 | 39,76 | 79,15 | 64,91 | 53,90 | 54,03 | 70,01 | 87,18 | 92,11 | 63,63 | 33,10 | 45,97 |
| 120 | 116,06 | 86,92 | 152,92 | 105,41 | 139,85 | 134,12 | 168,09 | 124,91 | 79,56 | 57,12 | 118,20 |
| 240 | 32,55 | 32,58 | 22,65 | 24,49 | 37,06 | 38,60 | 46,75 | 42,11 | 26,07 | 28,47 | 27,25 |
| 520 | 3,64 | 7,43 | 5,05 | 5,40 | 14,89 | 9,92 | 13,51 | 16,67 | 9,41 | 10,50 | 6,93 |

Como exemplo, usaremos o ponto a 10 metros para calcular a deposição acumulada no período de mar/08 a jan/09:

$$D_{ac10} = \frac{30 \cdot (256,5 + 206,16 + 563,77 + \dots + 647,72 + 202,23 + 485,41)}{1000}$$

$$D_{ac10} = \frac{30.5522,91}{1000} \Rightarrow D_{ac10} = 165,69g/m^2$$

Esse valor indica que, para o tempo de exposição do estudo – 11 meses – se depositaram mais de 165 gramas de cloreto em cada metro quadrado em uma superfície a 10 metros do mar. Isso nos dá uma média de aproximadamente 15 g/m² ao mês. Esse valor mensal de referência foi usado na análise do gráfico da Figura 5.26, no Capítulo 5.

As deposições acumuladas dos demais pontos de exposição na Tabela II.

Tabela II: deposição acumulada de cloretos, para 11 meses de exposição.

| Distância (m) | Dac (g/m ²) |
|---------------|-------------------------|
| 10 | 165,69 |
| 65 | 20,51 |
| 120 | 38,49 |
| 240 | 10,76 |
| 520 | 3,10 |

ANEXOS

ANEXO A: TABELA DE DIREÇÃO DOS VENTOS

A direção dos ventos pode ser definida pelos pontos cardeais e suas combinações (E, NE, etc.) ou em ° (graus), que é o ângulo com a direção Norte. A tabela abaixo converte os valores:

| Direção (°) | Abreviatura | Nomenclatura |
|--------------------|--------------------|---------------------|
| 0 | N | Norte |
| 22,5 | NNE | Norte-Nordeste |
| 45 | NE | Nordeste |
| 67,5 | ENE | Leste-Nordeste |
| 90 | E | Leste |
| 112,5 | ESE | Leste-Sudeste |
| 135 | SE | Sudeste |
| 157,5 | SSE | Sul-Sudeste |
| 180 | S | Sul |
| 202,5 | SSW | Sul-Sudoeste |
| 225 | SW | Sudoeste |
| 247,5 | WSW | Oeste-Sudoeste |
| 270 | W | Oeste |
| 292,5 | WNW | Oeste-Noroeste |
| 315 | NW | Noroeste |
| 337,5 | NNW | Norte-Noroeste |
| 360 | N | Norte |