

MARIA ROSANE VILPERT VITALI

**EFEITO DO DISTANCIAMENTO AO MAR DA
CONTAMINAÇÃO DO CONCRETO POR CLORETOS**

Florianópolis
2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
– PPGEC**

**EFEITO DO DISTANCIAMENTO AO MAR DA
CONTAMINAÇÃO DO CONCRETO POR CLORETOS**

Dissertação submetida à
Universidade Federal De Santa
Catarina como requisito
parcial exigido pelo Programa
de Pós-Graduação em
Engenharia Civil – PPGEC,
para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ivo José
Padaratz, PhD.

MARIA ROSANE VILPERT VITALI

Florianópolis
2013

MARIA ROSANE VILPERT VITALI

**EFEITO DO DISTANCIAMENTO AO MAR DA
CONTAMINAÇÃO DO CONCRETO POR CLORETOS**

Dissertação julgada para a obtenção do Título de **Mestre em Engenharia Civil** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.
Coordenador do PPGEC – ECV/UFSC

Prof. Ivo José Padaratz, Ph.D.
Orientador – ECV/UFSC

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Gibson Rocha Meira, Dr. – IFECTP

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr. – ECV/UFSC

Prof. Rafael Holdorf Lopez, Dr. – ECV/UFSC

“Muitas das coisas mais importantes do mundo foram conseguidas por pessoas que continuaram tentando quando parecia não haver mais nenhuma esperança de sucesso.”

Dale Carnegie

AGRADECIMENTOS

Á Deus, cuja misericórdia jamais será medida. E pela graça da vida.

Aos meus pais Ascendino Vitali e Silene Vilpert Vitali, pela eterna educação a mim dispensada e pelo apoio em todos os momentos de minha vida. Mãe, você é meu alicerce, meu porto seguro. Nas alegrias e nas dificuldades é sempre você quem está presente. Pai, sei o quanto você se orgulha de mim. Também tenho orgulho da sua força e disposição pela vida. Amo demais vocês!

Ao meu irmão Cláudio Vitali e minha cunhada Cleonice Oliveira, que sempre me estenderam a mão e me incentivaram a lutar pelo que se deseja. Ao meu sobrinho amado Leonardo Vitali que, com a sua inocência de criança me proporciona sempre o amor verdadeiro, que me ensina a cada dia a felicidade de viver e amar os irmãos.

Ao meu orientador Professor Ivo José Padaratz, Ph.D., por toda a atenção dispensada no decorrer deste estudo, pela oportunidade de ser sua orientada. Por todo o conhecimentos e experiências transmitidos e, principalmente, pelas cobranças e correções necessárias, me incentivando sempre a seguir em frente e concluir esta pesquisa.

Ao colega Raphael Barp Garcia, pela leitura e correção do texto na primeira parte do trabalho, pelas dicas fornecidas que auxiliaram muito na compreensão do tema.

Á construtora Momento Engenharia Projetos e Execução Ltda, onde atuo como engenheira de execução, pelo incentivo dado no desenvolvimento deste estudo, fornecendo os materiais necessários para a realização dos experimentos, disponibilizando pessoal para a instalação dos experimentos nos locais de estudo e também pelo espaço físico para a montagem dos mesmos.

Ao mestre Jorge El Ackhar, professor da UDESC e proprietário da Construtora Momento Engenharia, por sempre e em todo momento ter investido, apoiado e incentivado a realização deste mestrado. Por ter apresentado à possibilidade do mestrado e pela paciência dedicada às minhas inúmeras faltas ao trabalho. Por permitir que realizasse os experimentos dentro do espaço da empresa; pelos conselhos profissionais, acadêmicos e pessoais; e pela amizade que formamos ao longo dos anos. Tenho orgulho de fazer parte de sua equipe. Muito Obrigada!

A todos os colegas de trabalho, que participaram direta e indiretamente no decorrer desta pesquisa, ajudando na montagem dos experimentos,

auxiliando na coleta das amostras, transportando os experimentos até o local de estudo, e incentivando. Estavam sempre prontos para ajudar. Meus sinceros agradecimentos.

À empresa Vega do Sul do grupo Arcelor Mittal, por ter cedido o terreno para a instalação das estações e auxiliado no monitoramento durante o período de exposição.

Ao laboratório de materiais da UDESC de Joinville, pela realização dos ensaios de compressão nos corpos de prova e demais ensaios que foram necessários.

Ao laboratório Instituto de Pesquisas IP de Joinville, pelos ensaios realizados nas amostras de água provenientes dos ensaios de vela úmida. Pela descrição do procedimento adotado na realização destes ensaios.

À Central de Análises do departamento de química da UFSC, pela realização dos ensaios no pó de concreto. Em especial ao químico Denyo Silva, por fornecer informações referentes aos ensaios e também à descrição do procedimento adotado, bem como esclarecer dúvidas sobre os resultados dos ensaios.

À UDESC de Joinville, por ter cedido sua biblioteca para uso de materiais necessários durante a pesquisa.

AO EPAGRI, pelo fornecimento dos dados ambientais.

A todos os amigos que estiveram presentes e compartilharam as angústias e alegrias durante este período.

A todos que participaram no desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

As estruturas de concreto armado, quando inseridas em zonas de atmosfera marinha, são fortemente atacadas por agentes agressivos, sendo os cloretos os causadores dos maiores danos, provocando a corrosão das armaduras e afetando de forma significativa a vida útil da estrutura de concreto. Um dos principais parâmetros analisados na concepção dos projetos estruturais é a definição da classe de agressividade ambiental. A NBR 6118 (2007) define quatro classes de agressividade ambiental, sendo o ambiente marinho classificado como forte agressividade e proporcionando grande risco de deterioração à estrutura. A dificuldade atual dos projetistas de estruturas de concreto é justamente a limitação da extensão deste ambiente agressivo, motivo pelo qual alguns estudos já foram realizados no Brasil. A agressividade ambiental tem comportamento diferente em cada região e, por este motivo, desenvolveu-se esta pesquisa, para estudar a deposição de cloretos na região de São Francisco do Sul obtida através do aparato de vela úmida, método proposto pela NBR 6211 (2001). Paralelamente, prismas de concreto foram expostos juntamente aos aparatos de vela úmida, a fim de analisar o comportamento do ingresso de cloretos no concreto nas diferentes distâncias em relação ao mar. Sendo assim, o intuito deste estudo foi de propor uma segmentação para a atmosfera marinha na região de São Francisco do Sul, adotando-se como parâmetro, os limites da deposição de cloretos proposto por Meira (2004). Os resultados desta pesquisa mostraram uma distância de 1100 metros afastados do mar, a qual se estende a zona de atmosfera marinha e sendo este o limite entre as classes de agressividade II e III, definidas na NBR 6118 (2007).

PALAVRAS CHAVE: Concreto, Corrosão das armaduras, Atmosfera marinha, Deposição de cloretos.

ABSTRACT

The reinforced concrete structures, when inserted in areas with marine atmosphere, are strongly attacked by aggressive agents, being chlorides the main cause of the biggest damages, causing reinforcement corrosion and affecting significantly the useful life of the reinforced structure. One of the main parameters analyzed in the structure project conception is the definition of the environmental aggressiveness. The NBR 6118 (2007) defines four classes of environmental aggressiveness, being the marine environment classified as strong aggressiveness and providing great risk of deterioration to the structure. The current difficulty of the designers of concrete structures is precisely the limitation of the extension of this aggressive environment, reason why some studies have already been realized in Brazil. The environmental aggressiveness has different behavior in each region and, for this reason, this research has been developed, to study the deposition of chlorides in the São Francisco do Sul region obtained by wet candle apparatus, a method proposed by the NBR 6211 (2001). At the same time, concrete prisms were exposed along the wet candle apparatus, in order to analyze the behavior of the ingress of chlorides in the concrete in different distances in relation to the sea. Thus, the aim of this study was to propose segmentation to the marine atmosphere in the São Francisco do Sul region, adopting as a parameter, the limits of deposition of chlorides proposed by Meira (2004). The results of this research showed a distance of 1100 away from the sea, in which the marine atmosphere extends and being this the limit between the classes of aggressiveness II and III, defined by the NBR 6118 (2007).

KEYWORDS: Concrete, Reinforcement corrosion, Marine atmosphere, Deposition of chlorides.

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Volume de poros em pastas de cimento com diferentes relações água/cimento	61
TABELA 3.2 - Limites normatizados da relação água/cimento para concreto em ambientes marinhos	63
TABELA 3.3 - Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C3A	66
TABELA 3.4 - Coeficiente de difusão a 25°C em pastas de cimento com relação a/c: 0,5	67
TABELA 3.5 - Influência da temperatura no coeficiente de difusão	71
TABELA 3.6 - Valores limites da abertura de fissuras, conforme NBR 6118/2003	77
TABELA 6.1 - Ensaio de caracterização de materiais	104
TABELA 6.2 - Coordenadas das estações de monitoramento da névoa salina	112
TABELA 6.3 - Períodos estudados e seus respectivos meses de referência	126
TABELA 7.1 - Ensaio de absorção por imersão	131
TABELA 7.2 - Médias mensais da velocidade e direção predominante do vento (m/s) no período de jan/2011 à mar/2012	136
TABELA 7.3 - Agrupamento dos Dados climatológicos	140
TABELA 7.4 - Profundidade de carbonatação nos prismas de concreto com 18 meses de exposição	145
TABELA 8.1 - Deposição de cloretos média mensal e parâmetro wind power mensal no período de Jan./2011 a mai./2012	156
TABELA 8.2 - Relação entre a deposição de cloretos mensal e o parâmetro wind power (w) mensal, para todas as estações de monitoramento	158
TABELA 8.3 - Limitação do teor de cloreto para proteção das armaduras	161
TABELA 8.4 - Deposição de cloretos acumulada no período de exposição na estação E50: 50 metros do mar	162
TABELA 8.5 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm	167
TABELA 8.6 - Proposta final de segmentação da zona de atmosfera marinha para a pesquisa de Meira (2004)	171
TABELA 8.7 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	172

TABELA 8.8 - Comparação entre o concreto utilizado por Meira (2004) e o utilizado nesta pesquisa	173
TABELA 8.9 - Proposta de segmentação da zona de atmosfera marinhana região de São Francisco do Sul	175
TABELA 8.10 - proposta de segmentação da zona de atmosfera marinha na região de Florianópolis	176

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Representação esquemática das zonas de agressividade	34
FIGURA 2.2 - Tipos de exposição marinha (CEB - FIP, Bulletin 183, 1992)	35
FIGURA 2.3 - Ataque característico devido à corrosão de armaduras - Plataforma de Atlântida - RS	36
FIGURA 2.4 - Formação do aerosol marinho	37
FIGURA 2.5 - Esquema dos fluxos inerentes ao aerosol marinho	39
FIGURA 2.6 - Medida da taxa de deposição média de cloretos nas distâncias de 10, 100, 200 e 500 metros do mar	42
FIGURA 2.7 - Relação entre a concentração de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de agosto/2005 a janeiro/2006	43
FIGURA 3.1 - Esquema da absorção capilar	53
FIGURA 3.2 - Esquema de difusão entre meio externo e interior do concreto	55
FIGURA 3.3 - Esquema de permeabilidade	56
FIGURA 3.4 - Esquema da migração dos cloretos no concreto	58
FIGURA 3.5 - Influência da relação água/cimento no coeficiente de permeabilidade do concreto	62
FIGURA 3.6 - Influência da relação água/cimento sobre o coeficiente de difusão	65
FIGURA 3.7 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o aumento da idade do concreto	69
FIGURA 3.8 - Influência da temperatura no ingresso de cloretos	72
FIGURA 3.9 - Influência do teor de umidade sobre o risco de corrosão considerando o concreto de cobrimento	74
FIGURA 4.1 - Elementos do mecanismo de corrosão	82
FIGURA 4.2 - Diagrama de equilíbrio termodinâmico do metal ferro em meio aquoso a 25°C	84
FIGURA 4.3 - Esquema do processo de corrosão pela ação dos cloretos	88
FIGURA 5.1 - Curva de titulação para determinação do teor de cloretos no concreto por titulação potenciométrica	96
FIGURA 5.2 - Determinação gráfica do ponto de equivalência	97
FIGURA 6.1 - Mapa de São Francisco do Sul	101

FIGURA 6.2 - Local de estudo livre de edificações	102
FIGURA 6.3 - Vegetação do local de estudo	103
FIGURA 6.4 - Vela úmida ABNT NBR 6211, 2001	106
FIGURA 6.5 - Vela úmida exposta a ambiente marinho	107
FIGURA 6.6 - Aparato vela úmida	108
FIGURA 6.7 - Aparato posicionado em torno de vegetação mais alta	109
FIGURA 6.8 - Aparato de vela úmida posicionado a 50m do mar	110
FIGURA 6.9 - Aparato de vela úmida posicionado a 400m do mar	111
FIGURA 6.10 - Posicionamento das estações de monitoramento no terreno em estudo	113
FIGURA 6.11 - Fôrma de compensado plastificado para moldagem dos prismas	116
FIGURA 6.12 - Coleta e identificação dos prismas	117
FIGURA 6.13 - Posição dos testemunhos no prisma	118
FIGURA 6.14 - Testemunhos para a extração das amostras	119
FIGURA 6.15 - Adaptação da cortadora de parede para coletar o pó de concreto	120
FIGURA 7.1 - Evolução da resistência do concreto aos 28 dias	130
FIGURA 7.2 - Temperatura média mensal entre janeiro/2011 a maio/2012	132
FIGURA 7.3 - Temperaturas máxima e mínima média mensal (°C) entre janeiro/2011 a maio/2012	133
FIGURA 7.4 - Precipitação acumulada mensal (mm) entre janeiro/2011 a maio/2012	134
FIGURA 7.5 - Umidade relativa do ar média mensal (%) entre janeiro/2011 a maio/2012	135
FIGURA 7.6- Velocidades médias mensais do vento e suas direções predominantes (m/s) entre janeiro/2011 a março/2012	138
FIGURA 7.7 - Medida da taxa de deposição média de cloretos nos afastamentos de 50, 100,200, 400, 650 e 1100 metros do mar, no período de abril/2011 a maio/2012	142
FIGURA 7.8 - Medida da taxa de deposição média de cloretos nos afastamentos 400,650 e de 100, 200, 1100 metros do mar, no período de abril/2011 à maio/2012	143
FIGURA 7.9 - Medida da taxa de deposição média de cloretos nos afastamentos de 200, 400, 650 e 1100 metros do mar, no período de abril/2011 a maio/2012	144

FIGURA 7.10 - Perfil de cloretos no prisma "Não Exposto" aos 18 meses	146
FIGURA 7.11 - Perfis de cloretos dos concretos expostos a 50 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses	147
FIGURA 7.12 - Perfis de cloretos dos concretos expostos a 100 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses	147
FIGURA 7.13 - Perfis de cloretos dos concretos expostos a 200 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses	148
FIGURA 7.14 - Perfis de cloretos dos concretos expostos a 400 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses	148
FIGURA 7.15 - Perfis de cloretos dos concretos expostos a 650 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses	149
FIGURA 7.16 - Perfis de cloretos dos concretos expostos a 1100 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses	149
FIGURA 8.1 - Relação entre a deposição de cloretos e a distância com relação ao mar no período de estudo	152
FIGURA 8.2 - Relação entre a deposição de cloretos e a distância com relação ao mar no período de estudo (escala y modificada)	152
FIGURA 8.3 - Relação entre a deposição de cloretos e a distância com relação ao mar no período de estudo (escala x e y modificada)	153
FIGURA 8.4 - Relação entre a deposição média de cloretos, em função da distância em relação ao mar, durante o período de monitoramento das estações	154
FIGURA 8.5 - Comportamento wind power (w) durante o período de estudo	157
FIGURA 8.6 - Relação entre a deposição de cloretos e o parâmetro "wind power" mensal para a estação com 50 metros de afastamento do mar	158
FIGURA 8.7 - Concentração de cloretos nos picos dos perfis em relação à distância ao mar no período de exposição	166
FIGURA 8.8 - Perfis de cloretos dos concretos aos 18 meses de exposição natural, ao em relação afastamento do mar	168

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA	27
1.2 OBJETIVO GERAL	29
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	30
1.5 ESTRUTURA E CONTEÚDO DO TRABALHO	31
2 FORMAÇÃO E TRANSPORTE DO AEROSOL MARINHO	33
2.1 ZONAS DE INFLUÊNCIA DA AGRESSIVIDADE MARINHA	33
2.2 FORMAÇÃO E TRANSPORTE DO AEROSOL MARINHO	36
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O AEROSOL MARINHO	40
2.3.1 Distância em relação ao mar	40
2.3.2 Velocidade e direção do vento	43
2.3.3 Influência da altitude	45
2.3.4 Presença de obstáculos	45
2.3.5 Energia das ondas	46
2.3.6 Chuva	46
2.4 ALGUMAS PUBLICAÇÕES E ESTUDOS NO BRASIL REFERENTES À CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS DEVIDO AO AFASTAMENTO DO MAR	47
3 PENETRAÇÃO DOS CLORETOS NO CONCRETO	51
3.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE NO CONCRETO	51
3.1.1 Absorção capilar	51
3.1.2 Difusão	54
3.1.3 Permeabilidade	56
3.1.4 Migração	57
3.1.5 Mecanismos combinados	58
3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO	59
3.2.1 Relação água/cimento	60
3.2.2 Tipo de cimento	65
3.2.3 Idade do concreto	68

3.2.4 Diâmetro do agregado	69
3.2.5 Temperatura	70
3.2.6 Influência da umidade	73
3.2.7 Grau de saturação do concreto	75
3.2.8 Presença de fissuras	75
3.2.9 Carbonatação	77
3.2.10 Tipos de sal	78
4 CORROSÃO DAS ARMADURAS	81
4.1 FENÔMENO DA PASSIVAÇÃO	82
4.2 DESPASSIVAÇÃO DO AÇO DEVIDO À CARBONATAÇÃO	85
4.3 DESPASSIVAÇÃO DO AÇO NA PRESENÇA DE CLORETOS	86
5 METODOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS	89
5.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO	90
5.2 TITULOMETRIA	91
5.3 POTENCIOMETRIA	93
5.3.1 Potenciometria direta	94
5.3.2 Titulação potenciométrica	95
5.4 MÉTODOS MICROANALÍTICOS	98
5.5 ANÁLISE DOS MÉTODOS DISPONÍVEIS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS NO CONCRETO	99
6 PROGRAMA EXPERIMENTAL	101
6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	104
6.2 MONITORAMENTO AMBIENTAL	104
6.2.1 Monitoramento da taxa de deposição de cloretos da névoa salina	105
6.2.2 Monitoramento dos dados climatológicos	113
6.3 ESTUDO DO TRANSPORTE DE CLORETOS EM CONCRETOS EXPOSTOS EM AMBIENTE DE ATMOSFERA MARINHA	114
6.3.1 Preparação dos prismas	115
6.3.2 Extração das amostras	117
6.4 DETERMINAÇÕES DOS TEORES DE CLORETOS	120

6.4.1 Método de determinação do teor de cloreto proveniente da vela úmida	120
6.4.2 Procedimento para extração dos cloretos no pó de concreto	123
6.5 PERÍODOS ESTUDADOS E MESES DE REFÊRENCIA.	125
6.6 FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES	127
7 RESULTADOS	129
7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS	129
7.1.1 Cimento e Agregados	129
7.1.2 Concreto	130
7.1.2.1 Absorção total	131
7.2 MONITORAMENTO AMBIENTAL	131
7.2.1 Características climatológicas	131
7.2.1.1 Temperatura	132
7.2.1.2 Precipitação	133
7.2.1.3 Umidade relativa do ar	134
7.2.1.4 Velocidade e direção do vento predominante	135
7.2.1.5 Resumo das características climatológicas do ambiente	139
7.2.2 Monitoramento da névoa salina	142
7.3 ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO EXPOSTO AO AMBIENTE DE ATMOSFERA MARINHA	144
7.3.1 Perfis de concentração de cloretos nos prismas expostos ao ambiente marinho	144
8 ANÁLISES DOS RESULTADOS	151
8.1 NÉVOA SALINA	151
8.1.1 Efeito da distância em relação ao mar	151
8.1.2 Efeito da direção predominante e velocidade do vento	155
8.2 INGRESSO DE CLORETOS NO CONCRETO EXPOSTO AO AMBIENTE DE ATMOSFERA MARINHA	160
8.2.3 Resultados apresentados de alguns estudos realizados	169
8.3 SEGMENTAÇÃO DA ZONA DE ATMOSFERA MARINHA BASEADA NOS RESULTADOS DA PESQUISA	170
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	179
9.1 CONCLUSÕES	179
9.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS	181

9.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	182
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	183
APÊNDICE A	199
APÊNDICE B	207

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA

A degradação das estruturas de concreto armado nos ambientes de atmosfera marinha tem sido um problema crescente dentro da construção civil e que abrange diversas regiões do Brasil e do mundo, significando um grande impacto econômico.

É crescente o número de edificações que apresentam degradação precoce com manifestações patológicas de diversas origens. A corrosão das armaduras de aço é uma das principais causas do desgaste do concreto armado.

Estruturas de concreto armado, quando sujeitas à corrosão das armaduras, tem sua vida útil reduzida. E, sendo este um mecanismo de degradação, afeta a durabilidade, a funcionalidade e estética da edificação. A corrosão das armaduras manifesta-se na forma de: expansão, fissuração do concreto, destacamento do revestimento, perda de aderência e redução da seção do aço.

De acordo com Alves (2007), o cloreto presente na natureza, principalmente em regiões de atmosfera marinha, quando depositado na superfície de concreto e ao penetrar no mesmo pode desencadear o processo corrosivo das armaduras, afetando significativamente a vida útil da estrutura. Assim, estudos podem identificar a sua forma de atuação e teor necessário para desencadear o dano.

Em relação ao cloreto produzido pelo mar, Meira (2004, p. 9) esclarece que, “A agressividade marinha se estende além do entorno do mar, penetrando no sentido do continente e atacando as estruturas que se situam na zona onde a névoa salina exerce a sua influência”. No entanto, são poucas as pesquisas sobre o efeito da atmosfera marinha em estruturas de concreto armado situadas a certa distância do mar. No cenário nacional destacam-se alguns pesquisadores como: Meira e Padaratz (2002), Meira (2004), Albuquerque e Otoch (2005), Kumm (2005), Kumm e Repette (2006), Pontes (2006), Meira *et al.* (2007), Garcia (2008) e Romano (2009).

Como o Brasil possui uma extensa costa litorânea e com grande ocupação urbana, é de fundamental importância o conhecimento da agressividade na zona de atmosfera marinha, para a adequação dos novos projetos estruturais, bem como a intervenção em estruturas já existentes. A NBR 6118 (2007) tem definido para fins estruturais, quatro

classes de agressividade ambiental, classes I, II, III e IV, sendo a classe III a de agressividade marinha que apresenta grande risco de deterioração da estrutura. Porém, devido a sua complexidade, a norma não especifica exatamente a que distância em relação ao mar deve-se adotar esta classe e nem os parâmetros para sua definição.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), no ambiente marinho, o efeito da água do mar no concreto merece uma atenção especial. As estruturas de concreto expostas a estes ambientes sofrem ataques de vários processos físicos e químicos de deterioração. Sendo assim, um dos agentes agressivos do concreto armado a ser estudado é o aerosol marinho, elemento encontrado unicamente em regiões litorâneas.

O processo agressivo tem origem na formação e no transporte deste aerosol marinho, onde o vento tem importante papel. Meira e Padaratz (2002) colocam que uma vez formado o aerosol marinho, o mesmo caminha na direção do continente e tem sua relação com a salinidade atmosférica fortemente influenciada por variáveis como: direção e velocidade dos ventos, distância em relação ao mar, temperatura, umidade, topografia da zona, dentre outras. Estas variáveis fazem com que os cloretos cheguem à superfície do concreto a diferentes níveis de concentração, dependendo da distância que este se encontra em relação ao mar. Assim, as estruturas sofrem diferentes níveis de agressividade em função de sua distância em relação ao mar.

Mundialmente, o problema da corrosão de armaduras desperta maior preocupação em zonas litorâneas, devido à presença de cloretos. Um exemplo é a Ponte General Rafael Urdaneta sobre o lago de Maracaíbo/Venezuela, que apresentou sinais evidentes de degradação da sua estrutura logo após sua construção, levando Rincón *et al* (2006) a fazerem um estudo para sua reabilitação. Em estudos realizados por Gjörv (1994, *apud* Pontes 2006) relata casos de deterioração precoce de pontes na Noruega, onde num total de 320 pontes estudadas 25% manifestaram corrosão de armaduras e na maioria dos casos com menos de 25 anos de uso.

No Brasil, alguns estudos mostram que o problema de corrosão das armaduras incide principalmente nas regiões litorâneas. Dal Molim (1988) observou na região sul, que 40% dos danos graves encontrados nas estruturas, referiam-se à corrosão de armaduras. Estudos realizados por Aranha, (1994) na Região Norte, observou que 46% das manifestações patológicas aconteceram em função da corrosão de armaduras. Segundo Andrade, (1997), na região nordeste, especificamente na cidade de Recife, estes percentuais chegaram a 64%. Na Região Centro-Oeste, Nince e Clímaco, (1996) observaram que 30%

das incidências referiam-se à corrosão de armaduras, semelhante ao percentual apresentado por Carmona e Marega (1988) para a região sudeste.

Meira (2004) realizou uma importante pesquisa relacionada a este tema na cidade de João Pessoa/PB, onde propôs parâmetros para a classe de agressividade III inserida em zona de atmosfera marinha, sugerida pela NBR 6118 (2007). O próprio autor sugere que esta pesquisa seja desenvolvida em várias regiões do país, devido às diferenças nas condições ambientais evidenciadas pelas zonas climáticas que cada região está inserida.

A limitação correta da zona de atmosfera marinha tem influência na vida útil das estruturas, podendo significar também menor consumo de cimento se especificado classe de agressividade II, ao invés de classe III, que exige concreto com maior resistência característica que a classe II e, assim, um maior consumo de cimento. Estas definições corretas da classe de agressividade serão obtidas, determinando-se as concentrações de cloretos nas estruturas de concreto de cada região de ambiente marinho.

Portanto, o intuito deste estudo foi de avaliar a agressividade da atmosfera marinha na região de São Francisco do Sul, norte de Santa Catarina, para atender a necessidade dos projetistas de estruturas de concreto armado da região, relacionada à distância crítica em relação ao mar onde se estende a zona de atmosfera marinha.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo constitui em avaliar a influência do distanciamento em relação ao mar quanto à agressividade dos cloretos sobre as estruturas de concreto, considerando as condições de exposição da região de São Francisco do Sul - SC.

É importante salientar que, mesmo assumindo o distanciamento como variável que se relaciona com a variação da agressividade, o parâmetro que regula esse comportamento é a concentração de cloretos na névoa salina que chega a cada estação de monitoramento ambiental.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Verificar a relação entre a quantidade de cloretos que se depositam na vela úmida e aquelas que se depositam na superfície do concreto e o penetram, considerando a influência das características ambientais do local estudado.
- Analisar o comportamento do ingresso de cloretos no concreto, quando expostos em ambientes de atmosfera marinha.
- Identificar o distanciamento relação ao mar, a qual se estende a zona de atmosfera marinha, aplicando a taxa de deposição de cloretos sugerida por Meira (2004) de $10 \text{ mgCl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$ para o limite entre as classes de agressividade ambiental II e III.
- Propor a segmentação da zona de atmosfera marinha em faixas de agressividade, conforme proposta sugerida por Meira (2004) com base no comportamento da névoa salina, bem como na sua relação com os concretos.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa limita-se a estudar a agressividade da atmosfera marinha gerada pelos cloretos, desconsiderando outros agentes agressivos como, por exemplo, os sulfatos.

O estudo foi realizado a sudeste da ilha de São Francisco do Sul/SC, onde foram instaladas estações de monitoramento da névoa salina. Portanto, os resultados só podem ser aplicados para regiões com características climáticas e geográficas semelhantes, sendo este um fator limitante.

A avaliação da deposição de cloretos foi realizada através do aparato de vela úmida (NBR 6211, 2001), mesmo sendo um ensaio frequentemente utilizado, pode não captar perfeitamente os íons cloro presentes na atmosfera.

Para a avaliação do ingresso de cloretos no concreto, utilizou-se um único tipo de cimento, com resistência característica mínima adotada pela NBR 6118 (2007), para a classe de agressividade ambiental III (marinha).

Não foram realizadas simulações de vida útil das estruturas em função dos resultados para este estudo. As taxas de deposição de cloretos limite proposta por Meira (2004) são aplicadas neste estudo como válidas.

1.5 ESTRUTURA E CONTEÚDO DO TRABALHO

O presente trabalho divide-se em nove capítulos, sendo que o primeiro destina-se a apresentar a importância do estudo, seus objetivos, bem como limita o estudo proposto.

O capítulo 2 descreve os principais mecanismos de formação e transporte do aerosol marinho no sentido continental, apresentando os conceitos básicos e os fatores que influenciam este processo.

No capítulo 3 são apresentados os mecanismos de penetração de cloretos no concreto, a partir do momento que estes íons tenham atingido a superfície do concreto, bem como os fatores que influenciam estes mecanismos.

O capítulo 4 apresenta uma abordagem sobre o processo de corrosão, quando este se desenvolve em armaduras inseridas no concreto, suas causas e consequências. A corrosão se manifesta mais fortemente em estruturas de concreto armado expostas a ambientes ricos em cloretos. Porém, este tema não foi abordado diretamente no estudo, mas teve o intuito de mostrar o problema das estruturas de concreto armado em ambientes de atmosfera marinha.

No capítulo 5 são apresentados os principais métodos para a determinação do teor de cloretos, identificando os objetivos de cada etapa e as variáveis envolvidas.

O capítulo 6 descreve o procedimento experimental do presente estudo.

No capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos relativos às diversas fases do estudo, através da metodologia aplicada descrita no capítulo anterior.

No capítulo 8 são analisados todos os resultados, focando o comportamento da névoa salina em relação à distância do mar, e apresentando a proposta de segmentação da zona de atmosfera marinha para a região de São Francisco do Sul.

O capítulo 9 apresenta as considerações finais do estudo, com conclusões do presente estudo, dificuldades encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

2 FORMAÇÃO E TRANSPORTE DO AEROSOL MARINHO

Nos ambientes marinhos, o processo agressivo devido ao ingresso de cloretos que sofrem as estruturas de concreto armado e que não estão diretamente em contato com a água do mar, tem seu início na formação do aerosol marinho e seu transporte na direção do continente, segundo Meira *et al.* (2007).

2.1 ZONAS DE INFLUÊNCIA DA AGRESSIVIDADE MARINHA

Os cloretos estão presentes em diferentes ambientes onde o concreto armado pode estar exposto.

Para o melhor entendimento do processo de penetração dos cloretos nas estruturas de concreto armado expostas em ambiente marinho, é importante conhecer a segmentação deste ambiente em zonas de agressividade.

Swammy *et al.* (1994) segmentaram o ambiente marinho em cinco zonas, como segue na classificação abaixo:

Zona submersa: o concreto está localizado sempre abaixo do nível mínimo do mar (sempre exposto na água do mar).

Zona de flutuação de maré: o concreto está entre o nível mínimo e máximo do mar, ou seja, representa ciclos de molhagem e secagem, ora estando submerso, ora no ar, em ciclos diários provocados pela flutuação da maré.

Zona de respingo: o concreto está localizado um pouco acima do nível máximo da água, sempre exposto aos respingos.

Zona de interface do solo e respingo (zona de *spray*): o concreto está localizado entre a zona de solo e a zona de respingo, posicionado de tal forma que, quando os ventos são fortes e/ou as ondas são altas, o concreto esteja na zona de respingos; e quando os ventos são fracos, o concreto fica no solo e não sofra a ação dos respingos.

Zona de solo: o concreto está localizado a certa distância do mar (aproximadamente entre 10 - 20 metros), de tal forma que o mesmo receba a ação do aerosol marinho, não sendo atingido pelos respingos diretamente.

A divisão por zonas caracteriza-se pelo distinto acesso de oxigênio e de umidade, ou seja, a forma com que a água entra em

contato com a estrutura de concreto armado. Estas diferentes zonas de agressividade marinha são visualizadas na Figura 2.1 abaixo, sendo que Meira (2004) substituiu a terminologia zona de solo por zona de atmosfera marinha ou zona atmosférica. Neste trabalho, a terminologia empregada será esta.

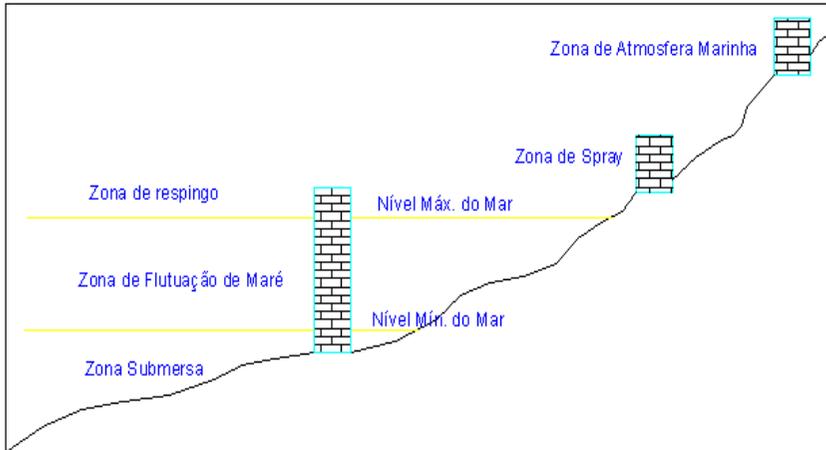


Figura 2.1 – Representação esquemática das zonas de agressividade
 Fonte: adaptado de Meira (2004).

Outros autores classificam a segmentação do ambiente marinho de forma mais simplificada, como nos trabalhos de Meira (2004) e Pontes (2006), que especificam as zonas submersas, respingo e de atmosfera marinha, de uma forma mais ampla.

A maioria dos estudos sobre a deterioração das estruturas de concreto em ambiente marinho resume-se nos temas de corrosão de armaduras ou ataque por sulfatos. A corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas mais preocupantes, do ponto de vista estrutural e econômico.

Dentre as zonas de agressividade classificadas a seguir, na figura 2.2, é na zona de respingos de maré que as estruturas de concreto estão sujeitas a maior deterioração por meio da penetração de agentes agressivos pelo concreto. O teor de umidade no qual estão expostas continuamente, juntamente com a presença de oxigênio, são fatores que contribuem para a deterioração das estruturas nesta zona.

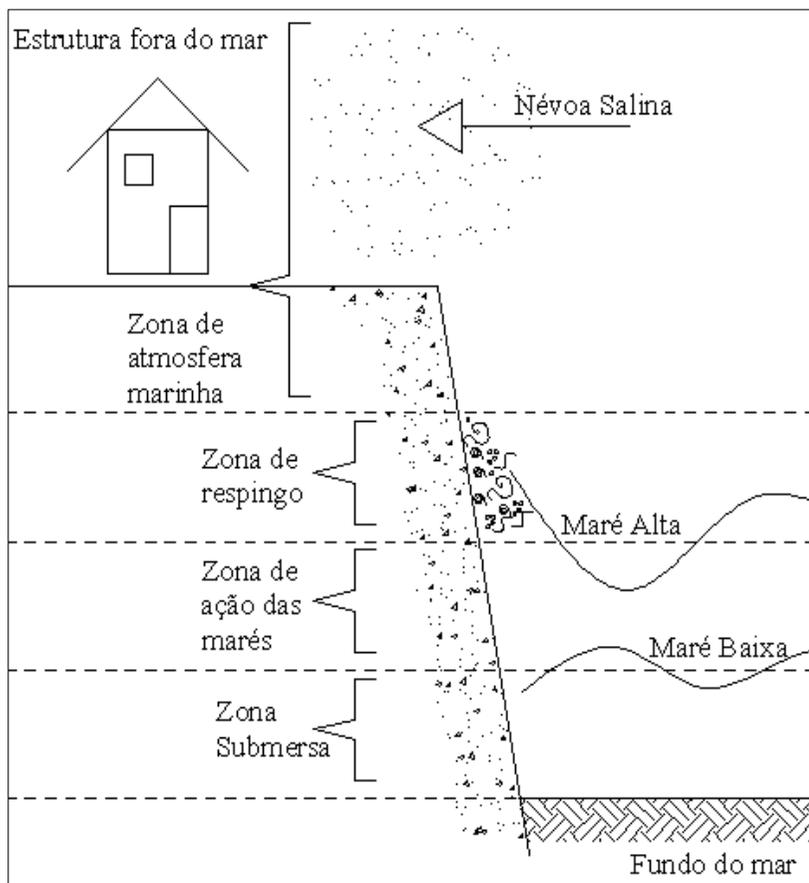


Figura 2.2 – Tipos de exposição marinha (CEB – FIP, Bulletin 183, 1992)

Fonte: Adaptado de Pontes (2006).

Segundo Andrade e Dal Molin (2001), na zona de ação das marés, a deterioração também é significativa, já que a estrutura está submetida à ação dos ciclos de molhagem e secagem, ocorrendo assim, uma combinação dos mecanismos de absorção e difusão de íons no concreto que retém uma grande quantidade de cloretos no interior do material, bem como o efeito físico do choque das ondas e partículas em suspensão, que pode lascas a camada superficial da estrutura. A deterioração na zona de respingo, porém, é superior às demais zonas de agressividade marinha classificadas acima.

Na zona de atmosfera marinha, a estrutura de concreto nunca está diretamente em contato com a água do mar, porém é atingido pelo aerossol marinho. A concentração de cloretos depositados nas estruturas de concreto varia à medida que estas se afastam do mar. Dependendo da direção e intensidade dos ventos, este aerossol pode apresentar uma significativa concentração há vários quilômetros da costa.

Pode-se observar na Figura 2.3, as estruturas de concreto armado submetidas à zona de respingos e indícios de corrosão aparentes na estrutura.



Figura 2.3 – Ataque característico devido à corrosão de armaduras
Plataforma de Atlântida – RS

Fonte: Lima (1996).

2.2 FORMAÇÃO E TRANSPORTE DO AEROSOL MARINHO

A formação do aerossol marinho tem origem na agitação da superfície do mar pelo vento. Esta agitação gera bolhas de ar que em

seguida explodem produzindo gotículas em forma de espuma ou película. Estas bolhas explodem porque a energia superficial é transformada em energia cinética. Assim, um jato de água é ejetado rapidamente rompendo-se em contato com o ar e formando as gotículas.

Segundo Fitzgerald (1991) e O'Dowd *et al.* (1997), na zona de quebra das ondas, as bolhas são mais numerosas pois são formadas pelo aprisionamento do ar na superfície da água com o movimento de quebra das ondas, e sendo este efeito o responsável pela geração de um maior volume de aerossol. Nas áreas de mar aberto também há produção do aerossol marinho, obtido pela própria agitação da superfície do oceano, porém de forma menos expressiva que na zona de quebra das ondas. O aerossol formado na quebra das ondas pode ser visualizado na Figura 2.4 abaixo.



Figura 2.4 – Formação do aerossol marinho

Fonte: Alves (2007).

Além da formação indireta do aerossol marinho, aquela produzida pela explosão das bolhas de ar, há também o efeito direto do aerossol marinho com a produção na forma de espuma, resultantes da

agitação no cume das ondas desencadeada pelo vento. Sendo este, um importante contribuinte na formação de partículas de maior tamanho.

No efeito direto ressalta-se também que o cloreto produzido pelas ondas se mantém ao longo da linha de costa. Pelo fato das partículas formadas serem de maior tamanho, e os cloretos oriundos do oceano adentrarem mais ao continente, estes são facilmente transportados pelo vento, como esclarece Cole *et al.* (2003):

A quantidade de cloreto produzido depende relativamente da extensão dos cumes brancos que cobrem as ondas. É relacionada com a latitude, na região equatorial há baixos cumes brancos, enquanto que em grandes latitudes têm-se altos cumes brancos.

Após a formação das gotículas, estas entram em contato com o ambiente e, dependendo das ações do vento, da umidade relativa, da temperatura e das demais condições climáticas e topográficas, como a altitude, a distância da costae a altura das ondas, assumem a forma de partículas salinas de distintas concentrações, segundo Morcillo *et al.* (2000).

De acordo com Zezza e Macri (1995), quando a umidade relativa estiver abaixo de 70-74%, as gotículas supersaturadas se transformam em partículas de sal, mudando de fase. Gustaffson e Franzén (1996) também estabelecem o valor de 75% de umidade relativa do ar, como o valor abaixo do qual as partículas cristalizam.

Meira (2004) também cita que há uma evaporação direta da água do mar que traz partículas de sal, mas numa parcela de aerosol pouco representativa, se comparada a decorrente na zona de quebra das ondas. Isto se deve à geração de partículas maiores e, conseqüentemente, a maior concentração salina nestas zonas.

Morcillo *et al.* (2000) relataram que as partículas suspensas no ar, na forma líquida ou sólida, tem variação de 0,1µm a 400µm. Para Ambler e Bain (1955, *apud* Meira 2004), as partículas maiores que 10 µm são as denominadas de depositáveis e ficam pouco tempo em suspensão na atmosfera; já as partículas menores que 10 µm, são as partículas flutuantes e viajam centenas de quilômetros na atmosfera sem sedimentar. Estes autores ressaltaram também que a corrosão é causada por partículas salinas maiores que 10 µm. Isto se refere a maior ou menor facilidade das partículas se depositarem em função do seu tamanho.

Porém, independente da classificação adotada, Meira *et al.* (2010) afirma que o aerossol marinho é composto por um amplo espectro de partículas, onde as de maior tamanho e maior massa se depositam mais rapidamente e as partículas menores e de menor massa permanecem em suspensão por mais tempo antes de se depositar.

Cessada a produção de partículas, é iniciada a deposição tão logo o aerossol marinho atinja o continente. Petelski e Chomka (1997) apresentaram um modelo baseado em dados coletados durante o Baltic Aerosol Experiment (BAEX-1). Este modelo determina o processo de troca entre o mar e o ar na zona costeira, em forma de fluxos de aerossol que entram e saem na zona costeira.

Os fluxos advectivos, os que entram e saem na zona costeira, são os mais importantes, pois esta é a zona de maior influência das partículas maiores, transportadas de maneira predominante pela ação dos ventos. Entrando na atmosfera marinha, as partículas do aerossol sofrem deposição pela ação gravimétrica ou devido à fricção com obstáculos (quando presentes), além de um fenômeno menos significativo que é a ressuspensão de pequenas partículas. Desta forma, a zona de atmosfera marinha é inserida ao modelo de Petelski e Chomka (1997), conforme a Figura 2.5.

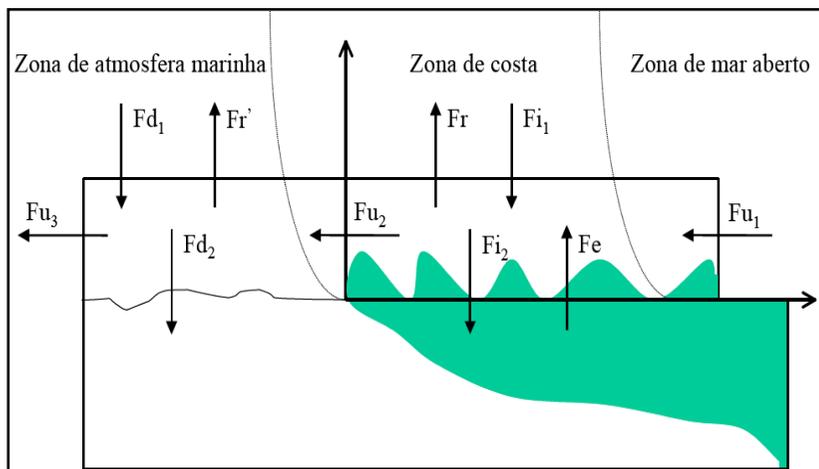


Figura 2.5 – Esquema dos fluxos inerentes ao aerossol marinho

Fonte: Adaptado por Romano (2009).

F_{i1} e F_{i2} : Fluxos de deposição na zona costeira;

F_r , $F_{r'}$: Fluxo de difusão turbulenta;

Fu_1 , Fu_2 e Fu_3 : Fluxos advectivos que entram e saem na zona costeira;
Fe: Fluxo de emissão na superfície do mar;
 Fd_1 e Fd_2 : Fluxos de deposição na zona de atmosfera marinha.

No modelo dos fluxos, pode-se perceber que os fluxos de deposição (Fd) e (Fi) são provocados pelo efeito gravimétrico, ou seja, as partículas se movem para as camadas inferiores através da gravidade. Diz ainda que a deposição ocorre também pelo efeito de fricção entre as massas de ar e os obstáculos, fazendo com que as partículas salinas do aerosol se depositem sobre a superfície destes. Além disto, os fluxos de deposição podem ocorrer tanto da forma úmida (acompanhados de chuva), como da forma seca (ausência de chuva).

O fluxo advectivo (Fu_3) é o deslocamento do aerosol provocado pela ação do vento. O fluxo turbulento (Fr') possui as mesmas características daquele presente na zona costeira e é menos expressivo com relação aos demais. Além disto, os fluxos difusos podem ocorrer em paralelo aos fluxos advectivos, apesar de serem menos significativos, motivo pelo qual não são apresentados no modelo em questão e são considerados integrados aos fluxos de deposição e advectivos. (MEIRA, 2004)

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O AEROSOL MARINHO

2.3.1 Distância em relação ao mar

A deposição das partículas salinas, à medida que há um distanciamento da costa, ocorre de modo acentuado nas primeiras centenas de metros, a partir da interface com o mar. Este comportamento se deve a um processo de deposição que ocorre, principalmente, pelo efeito gravitacional e pelo choque das partículas com o solo e os obstáculos sobre o mesmo. (MEIRA e PADARATZ, 2002) Assim, pode-se observar que este comportamento é característico de cada região, com flutuações ao longo do tempo.

Conforme este autor a influência da distância em relação ao mar é o aspecto mais importante no estudo da corrosão em zona de atmosfera marinha. O efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos, apesar de ser um tema tratado com maior frequência nas investigações sobre corrosão metálica, constitui-se em um aspecto

também importante no estudo da corrosão em estruturas de concreto armado, à medida que permite visualizar a redução da agressividade por cloretos com o distanciamento em relação ao mar.

A partir de estudo experimental realizado na região metropolitana de Salvador/BA, Costa (2001) constatou que o potencial médio de agressão aos materiais expostos ao aerosol marinho, em três estações e na distância máxima de 500 metros, é aproximadamente oito vezes maior do que o obtido para outras seis estações localizadas acima de 500 metros da costa marítima.

Nunes *et al.* (2004), estudaram quatro estruturas de concreto armado com mais de 15 anos de utilização na cidade do Rio Grande/RS. Analisaram a intensidade de ataque de cloretos nas seguintes distâncias do mar: 0, 160, 630 e 2200 metros. O resultado obtido foi o de que a concentração de cloretos é maior nos primeiros metros de afastamento do mar e que diminui acentuadamente até a distância de 630 metros afastados da costa.

Meira *et al.* (2006) estudaram, na cidade de João Pessoa/PB, o comportamento do aerosol marinho através do ensaio da vela úmida e da concentração de cloretos no concreto, e através de pilaretes de concreto expostos a 10, 100, 200 e 500 metros afastados do mar. Foi constatado nos resultados obtidos, uma redução nas concentrações de cloretos a partir dos 200 metros com relação ao mar. Portanto, a preocupação com a agressividade por cloretos é mais necessária nos primeiros 200 metros de faixa de terra afastados do mar. A partir desta distância, as concentrações de cloretos são menos pronunciadas (Figura 2.6).

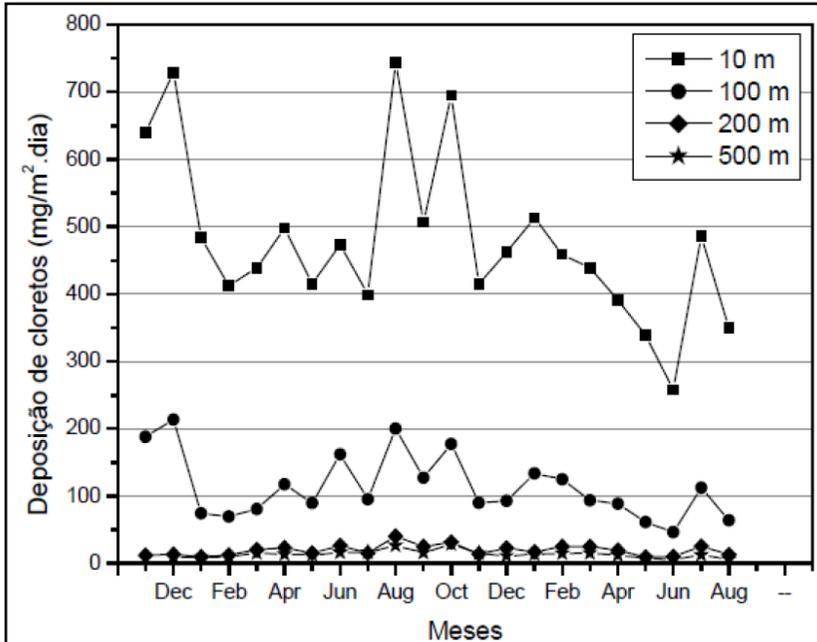


Figura 2.6 – Medida da taxa de deposição média de cloretos nas distâncias de 10, 100, 200 e 500 metros do mar

Fonte: Meira *et al.* (2006).

Pontes (2006) estudou os níveis de agressividade marinha na orla de Recife/PE, monitorando a concentração dos cloretos por meio do ensaio da vela úmida, com estações posicionadas aos 7, 100, 160, 230 e 320 metros afastadas do mar. E, com os resultados obtidos, pode-se concluir que a concentração de cloretos é decrescente à medida que há um distanciamento em relação ao mar. Esta concentração é significativa nos primeiros 400 metros afastados do mar, como pode ser visualizado na Figura 2.7, a seguir.

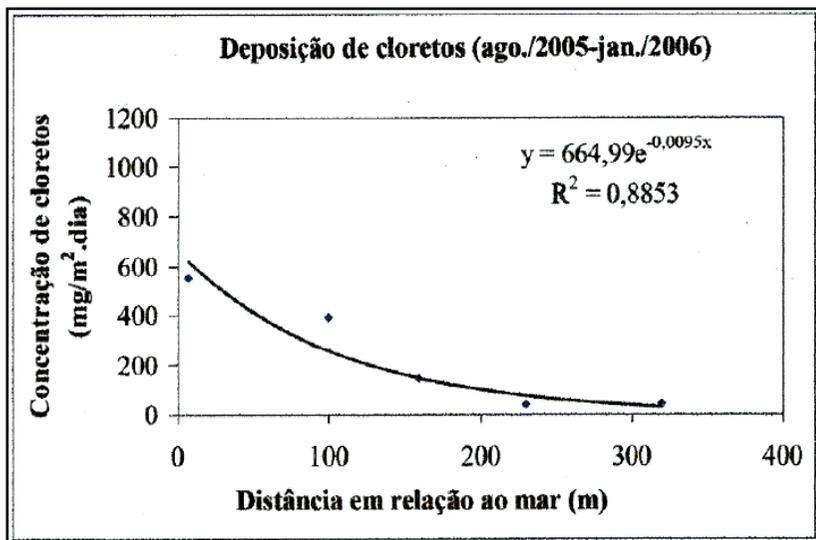


Figura 2.7 – Relação entre a concentração de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de agosto/2005 a janeiro/2006

Fonte: Pontes (2006).

Garcia (2008) realizou estudos na região de Florianópolis/SC, com o objetivo de avaliar a concentração dos cloretos na região marinha em relação ao distanciamento do mar. Os estudos foram realizados levando em conta o aparato de vela úmida e prismas de concreto expostos a diferentes distâncias com relação ao mar. Os resultados obtidos mostraram que até um afastamento de 400 metros do mar há maiores concentrações de cloretos. Além desta distância, porém, as concentrações reduziram bruscamente.

2.3.2 Velocidade e direção do vento

A importância da velocidade do vento está implícita na formação do aerosol marinho produzido pela agitação da superfície do mar. Os ventos influenciam no transporte de partículas salinas originadas no aerosol marinho e, com sua amplitude, partículas maiores podem alcançar distâncias maiores antes de se depositarem. Em regiões com elevado grau de agressividade, a velocidade do vento pode ser um

acelerador deste processo. Um exemplo disto é a região de respingos, onde há áreas molhadas e onde os ventos fortes são mais susceptíveis à agressão. (PEREIRA, 2001)

Piazzola e Despiou (1997) realizaram estudos na Costa Mediterrânea e analisaram como a quantidade de partículas salinas no aerosol marinho, bem como o tamanho destas partículas tem influência na velocidade do vento. O aumento da velocidade do vento provoca o aumento na produção de partículas salinas e, assim, aumenta a concentração salina no aerosol. Segundo os autores, partículas com tamanho entre $0,045\mu\text{m}$ e $0,3\mu\text{m}$, são formadas pelo fenômeno da coagulação das partículas menores e não por agitação da superfície do mar. Assim, quanto maior a agitação provocada pelo vento, menor a capacidade de coagulação das partículas. Então, com o aumento da velocidade do vento, há uma diminuição de concentração destas partículas. Os autores observaram ainda, que a concentração do aerosol marinho é maior para ventos com velocidade entre $7,0$ e $11,0$ m/s.

Spiee e Leeuw (1996), em estudo semelhante, definiram que as concentrações de partículas salinas se elevam a partir de ventos com velocidades superiores a $5,0$ m/s.

Segundo Garcia (2008, p. 16), “A velocidade e a direção do vento são fatores que exercem grande influência no avanço do aerosol marinho para o continente”. O aerosol se move mais rapidamente com ventos mais fortes e, portanto, as partículas com maior tempo de residência, podem viajar mais longe, o que faz com que a zona de atmosfera marinha tenha sua faixa alargada. O tempo de residência das partículas se refere ao tempo que uma partícula se mantém em suspensão até se depositar.

Morcillo *et al.*(2000) descrevem que existe uma boa relação entre a velocidade do vento e o seu tempo de atuação com a deposição de cloretos. Relatam ainda, que a maior concentração do aerosol marinho no continente, não está relacionada diretamente com o aumento de velocidade do vento, mas que também depende da direção do vento atuante. No estudo realizado pelos autores na Espanha, onde avaliaram a influência do vento na concentração salina, estes relacionaram a salinidade atmosférica com a potência do vento, ou como os autores chamam de “*wind power*”. Sendo este, o produto da intensidade do vento pelo seu tempo de atuação, chamado de potência do vento. Os resultados deste estudo mostraram que, ventos mais fortes e duradouros geram maior quantidade de aerosol marinho, bem como, o aumento da deposição salina ocorre devido a ventos com sopros a partir de $3,0$ m/s.

Gustaffson e Franzén (1996) e Morcillo (1999) analisaram que a importância do vento aumenta quando o aerossol marinho é transportado na direção do continente. Devido a sua amplitude, maiores partículas podem alcançar maiores distâncias antes de se depositarem, formando assim, um aerossol marinho com maior concentração salina.

2.3.3 Influência da altitude

Blanchard e Woodcock (1984) e Zezza e Macri (1995) observaram que a concentração do aerossol marinho decresce à medida que a altitude aumenta.

De acordo com Blanchard e Cipriano (1984), há um decréscimo na concentração de sais à medida que a altitude aumenta em relação ao nível do mar, acentuando nos metros mais próximos da costa. Isto ocorre devido à presença de partículas maiores e que são influenciadas pelo efeito da gravidade que impedem que alcancem níveis muito elevados em altitude e se depositem mais rápido.

Petelski e Chomka (1997) mostraram em seu artigo, o perfil vertical do aerossol a diferentes alturas (2, 3, 4 e 5 metros) em relação ao mar, para velocidades de vento variando de 7,9 m/s a 9,2 m/s. Observaram que um aumento brusco da concentração salina de dois para três metros de altura deve-se ao fato que os jatos das bolhas de ar que estouram das ondas são lançados a alturas de até três metros do mar, concentrando o aerossol nesta faixa de altura.

Rincón *et al.*(2006) avaliaram a estrutura da Ponte General Rafael Urdaneta sobre o lago de Maracaíbo/Venezuela e constataram claramente o efeito da altitude no nível de agressividade do concreto, verificando que, a seis metros do nível do lago, o ingresso de cloretos na estrutura é muito baixo.

2.3.4 Presença de obstáculos

Morcillo *et al.* (2000) destacaram que o avanço do aerossol não depende somente da distância em relação ao mar e do regime de ventos, mas também da topografia do local.

Segundo Garcia (2008, p. 22), “os obstáculos tendem a diminuir a concentração do aerossol durante seu avanço”, pois parte das partículas

ao se deslocar, deposita-se na superfície destes obstáculos, diminuindo assim, a concentração do aerossol à medida que este adentra o continente. O estudo do autor mostrou a redução da concentração de cloretos em relação ao afastamento do mar, devido à presença de obstáculos.

2.3.5 Energia das ondas

Petelski e Chomka (2000) analisaram que a emissão do aerossol na zona de quebra de ondas é mais intensa que a emissão do aerossol nas áreas de mar aberto. Os autores sugerem que a emissão do aerossol na zona costeira depende principalmente da energia da quebra das ondas e menos da velocidade do vento. Eles também observaram que a concentração salina do aerossol na praia nem sempre se manteve acima da concentração na região de mar aberto, para as mesmas condições de vento.

Conforme os estudos dos autores, a concentração na costa chegou a ser da ordem de sete vezes maior que na de mar aberto e pode-se observar que à medida que o vento aumenta de intensidade, aumenta a diferença na produção do aerossol entre a costa e a região de mar aberto. As ondas ganham altura com os ventos mais intensos e assim, sua energia na zona de arrebentação sofre um incremento significativo.

A energia das ondas é um importante fator quanto à formação do aerossol marinho. Segundo Garcia (2008, p. 23), “Nas regiões litorâneas onde não há arrebentação das ondas ou esta é fraca, produzirão uma quantidade de aerossol menor do que regiões com uma arrebentação intensa”.

2.3.6 Chuva

Algumas questões podem ser avaliadas nas estruturas de concreto armado, decorrente dos períodos chuvosos, sendo: diminuição da concentração de cloretos na superfície do concreto, logo após as chuvas; o aumento do grau de saturação superficial; a diminuição da temperatura; bem como o aumento da umidade relativa. Segundo Pontes (2006), a análise destas questões podem indicar as interferências que as chuvas acarretam na deposição de cloretos provenientes da névoa salina, bem como a remoção úmida da quantidade de cloretos depositados.

Para Morcillo *et al.* (2000), é considerado um fato anormal ou não usual, obter-se altos teores de salinidade para tempestades de curta duração, muitas vezes maior que a deposição de sais de um mês inteiro, com o regime normal de ventos na região, como já registrados. Em estudo realizado pelos autores na costa oeste da Suécia, registraram uma deposição total de cloretos de 4900 mg/m² em duas tempestades, sendo uma com duração de 12 horas e outra com 3 dias. Assim, este fator só influência a deposição em locais sujeitos à ação da chuva.

2.4 ALGUMAS PUBLICAÇÕES E ESTUDOS NO BRASIL REFERENTES À CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS DEVIDO AO AFASTAMENTO DO MAR

Alguns estudos sobre a concentração de cloretos provenientes do aerosol marinho já foram realizados em diversas regiões marinhas no Brasil, e outros ainda encontram-se em andamento. Alguns destes estudos estão relacionados abaixo, seguindo uma ordem cronológica:

2002 – Meira e Padaratz (2002) estudaram o efeito do distanciamento do mar na agressividade por cloretos, entre novembro de 2001 e março de 2002, em João Pessoa/ PB, observando o rápido decréscimo da concentração salina da atmosfera com o distanciamento em relação ao mar, principalmente nos primeiros 200 metros de distância em relação ao mar.

2003 – Meira *et al.* (2003) dão continuidade ao seu estudo sobre o efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos, apresentando os resultados de deposição de cloretos de janeiro a junho de 2002. Observaram a redução da taxa de deposição de cloretos a partir de uma faixa entre 100 e 200 metros em relação ao mar.

2004 – Meira (2004) apresenta os resultados de um dos trabalhos mais completos realizados no Brasil sobre a agressividade por cloretos na zona de atmosfera marinha, visando os problemas da corrosão em estruturas de concreto armado. O autor considera inúmeras influências na formação e no avanço do aerosol no sentido continental, tais como a velocidade do vento e sua direção, a temperatura e a distância do mar, entre outros menos significativos. Neste estudo, foram coletados dados durante 22 meses, e os resultados comprovaram a redução da concentração salina na atmosfera a partir de uma distância entre 100 e 200 metros em relação ao mar. Na estação com afastamento de 200 metros do mar, a taxa de deposição de cloretos ficou abaixo de 30

mg/m²dia, exceto em dois picos nos meses de vento mais intenso. Outra observação é a grande influência da velocidade do vento, que aumenta a taxa de deposição de cloretos de uma faixa de 450 mg/m²dia para 700 mg/m²dia, ou mais nos primeiros 10 metros do mar.

2005 – Albuquerque e Otoch (2005) apresentaram uma proposta de classificação do ambiente na região de Fortaleza/CE, onde sugeriram vários pontos de medição (a várias distâncias da costa), com o intuito de encontrar isolinhas que representariam o índice de cloretos e, a partir daí, identificar as zonas de agressividade ambiental em Fortaleza.

2006 – Kumm e Repette (2006) propuseram uma metodologia para a avaliação da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto armado. Estes autores avaliaram o teor de cloretos no pó extraído de postes da rede de iluminação pública, posicionados a varias distâncias em relação ao mar (50, 100, 200, 300 metros), em Florianópolis/SC. Os autores observaram a redução do teor de cloretos em função do distanciamento do mar.

2006 – Pontes (2006) estudou a concentração de cloretos na atmosfera marinha em Recife/PE. Utilizando o aparato de vela úmida (NBR 6211, 2001), o autor mediu a névoa salina da região em estações situadas a 7, 100, 160, 230, 320 metros em relação ao mar entre agosto de 2005 e janeiro de 2006. A relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar encontrado é exponencial, da mesma forma que aquela encontrada por Meira e Padaratz (2002).

2007 – Alves (2007) estudou a contribuição à análise da perspectiva de vida útil de estruturas de concreto face ao teor de cloreto registrado em Maceió/AL. Observou-se um aumento nas taxas de deposição de cloreto em pontos situados à beira mar, e uma diminuída à medida que adentra ao continente, tendo sido detectado o cloreto além de 14 km da costa.

2008 – Garcia (2008) estudou, na sua dissertação de mestrado, o efeito do distanciamento do mar na agressividade por cloretos, na região de Florianópolis/SC, entre novembro de 2006 e outubro de 2007, observando a redução da taxa de deposição de cloretos em função do distanciamento ao mar.

2009 – Romano (2009) estudou, na sua dissertação de mestrado, o ingresso de cloretos em concretos. Este estudo foi realizado no litoral norte do Rio Grande do Sul, na orla marítima de Tramandaí e propôs analisar os níveis de agressividade em função do distanciamento em relação ao mar, contemplando diversos tipos de aglomerantes, relações água/aglomerante e condições climáticas.

É importante dar continuidade a esta linha de pesquisa nas várias regiões do país, pois cada região apresenta condições ambientais diferentes. Os resultados obtidos nas regiões estudadas permitem analisar o grau de agressividade adotado pelos projetistas em ambientes de atmosfera marinha e definidos pela NRB 6118 (2007).

3 PENETRAÇÃO DOS CLORETOS NO CONCRETO

Nas cidades litorâneas expostas à atmosfera marinha, encontram-se presentes os íons cloro provenientes do aerosol marinho. Estes íons se depositam na superfície do concreto armado. Penetram-se nele e desencadeiam, dependendo do seu teor na superfície da armadura, o processo de corrosão, influenciando a vida útil destas estruturas.

A penetração de íons cloro não é visível, não reduz a resistência do concreto e não altera a sua aparência superficial. Para identificar a profundidade de um teor crítico de cloreto são necessários ensaios específicos. (CASCUDO, 1997)

Segundo Garcia (2008), a durabilidade das estruturas de concreto armado depende da proteção adequada que o concreto confere ao aço e também da resistência à penetração dos íons cloro que o concreto oferece.

3.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE NO CONCRETO

O mecanismo de penetração tem forte influência no desenvolvimento da corrosão no concreto armado, afetando a estrutura. Os íons cloro que penetram no interior do concreto são responsáveis pelo aumento da condutividade elétrica do eletrólito, facilitando a corrosão das armaduras. A taxa de penetração de cloreto, através do concreto, depende de diversos fatores, que incluem: o local onde a estrutura de concreto está localizada (incluindo o micro clima e a situação de contato com o cloreto), a água e o oxigênio, que são os fatores contribuintes de todo o processo de corrosão. (MEDEIROS e HELENE, 2003)

O transporte dos íons cloro no interior do concreto ocorre por meio de quatro mecanismos de penetração tradicionalmente referidos na literatura, que são: a absorção, a difusão iônica, a permeabilidade e a migração iônica.

3.1.1 Absorção capilar

A absorção capilar é um fenômeno que ocorre em estruturas porosas e consiste na ação de forças de atração dos poros da estrutura sobre os líquidos que estão em contato com sua superfície. Mede-se pela

absorção o volume dos poros, que nada tem a ver com a facilidade com a qual um fluido pode penetrar no concreto, já que não existe uma relação necessária entre as duas quantidades. (NEVILLE, 1997)

As moléculas da superfície de um líquido estão sujeitas às forças de atração de suas moléculas adjacentes. Os poros capilares exercem atração sobre as moléculas da superfície dos líquidos que atraem aquelas imediatamente inferiores, provocando o deslocamento do líquido, mesmo na direção vertical.

Este fenômeno ocorre até que as forças de atração dos capilares sejam equilibradas pelo peso do líquido. O líquido absorvido por este fenômeno pode transportar sais ou outros elementos agressivos ao conjunto concreto e aço, sabendo-se que as maiores causas de patologias de estruturas de concreto armado são devidas a corrosão das armaduras.

De maneira geral, quanto menor o diâmetro dos capilares, maiores as pressões e, sendo assim, mais rápida a absorção de água pelo concreto. A água em pequenos capilares, de diâmetro entre 5 e 50 nm, exerce pressão hidrostática e sua remoção tende a induzir uma tensão de compressão sobre as paredes sólidas do poro capilar, causando também a contração do sistema. (GUIMARÃES, 2011)

Basheer *et al.*(2001) consideram que em poros com mais de 50 nm, a água existente se comporta como água livre nestes poros e se torna mais relevante na durabilidade do concreto. A absorção da água pelo concreto é um fator difícil de ser controlado, pois, além do diâmetro dos poros, ainda há a intercomunicação entre os capilares que, dependendo da rede de poros, pode tornar a estrutura do concreto um fácil caminho para que agentes agressivos migrem livremente entre o meio e a armadura de aço, iniciando processos de deterioração da mesma.

Segundo Helene (1993), a absorção é uma das propriedades que regem o transporte dos íons no interior do concreto e que os poros com diâmetro inferior a 10 nm são os que mais influenciam na absorção destes íons. A absorção capilar é mais importante para a durabilidade que a permeabilidade, na avaliação da penetração de fluidos no concreto (CAMARINI, 1999).

Para Neville (1997), a absorção não pode ser usada como uma medida da qualidade do concreto, mas a maioria dos bons concretos apresenta absorção bem abaixo de 10% em massa. No ensaio de absorção capilar, a taxa de penetração da água é de 10^{-6} m/s, enquanto que, no ensaio de permeabilidade, este valor é da ordem de um milhão de vezes inferior: 10^{-12} m/s.

Toda a estrutura de concreto externa está sujeita a ciclos de molhagem e secagem e, como a absorção capilar trata do transporte de fluidos em vazios não saturados, esta propriedade tem grande influência no transporte de água e de outros agentes agressivos para o interior do concreto.

Em ambientes com alto teor de cloretos, segundo Cascudo (1997), a absorção de soluções líquidas ricas em íons cloro, devido aos sais dissolvidos, é o primeiro passo para contaminação por ingresso na estrutura de concreto. Este fenômeno é motivado pelas tensões capilares e ocorre logo após o contato do líquido com o concreto.

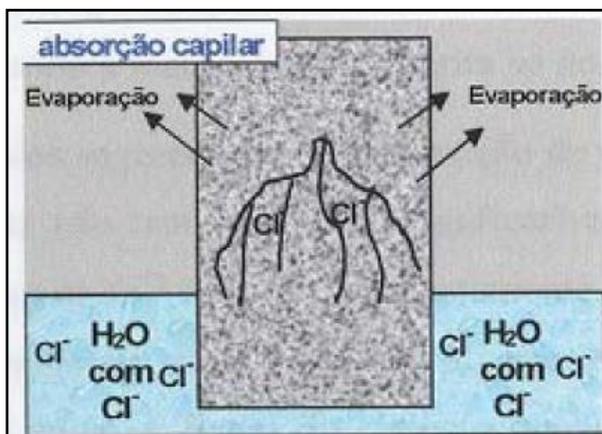


Figura 3.1 – Esquema da absorção capilar

Fonte: Hoffmann (2001).

A absorção capilar pode ser descrita pela Lei de Jurin, que relaciona a altura de ascensão capilar ao tempo de contato com a água, segundo Helene (1993). A Lei de Jurin é uma modificação da Lei de Darcy, que considera o fluxo de água no concreto não saturado, segundo Grube *et al.* (1995, *apud* Calçada 2004).

Segue a equação da Lei de Jurin abaixo:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma \cdot r \cdot t}{\eta}}$$

Onde:

h = altura de ascensão capilar (m);

σ = tensão superficial da água ($\approx 75 \times 10^{-4}$ kg/m);

r = raio do capilar (m);

t = período de tempo para atingir a penetração h (s);

η = viscosidade da água ($\approx 13,5 \times 10^{-5}$ kg.s/m²).

Para Calçada (2004), o fenômeno de absorção é de curta duração, pois quando atingida a altura de ascensão, as forças capilares são insuficientes para movimentar o fluido. Sendo assim, há um limite para o tempo de absorção a partir do qual a penetração do líquido é cessada.

3.1.2 Difusão

Difusão é um processo espontâneo de transporte de massa causada unicamente por gradientes de concentração, não dependendo do fluxo dos fluidos proporcionado por dois diferentes meios aquosos: o da solução dos poros do concreto e o meio ambiente. Segundo Cascudo (1997), a difusibilidade acontece, devido a gradientes de concentração iônica, seja entre o meio externo e o interior do concreto ou dentro do próprio concreto.

Pode-se definir difusão como a movimentação de espécies iônicas de uma região de maior concentração para regiões de menor concentração, ou seja, os cloretos em regiões de maior concentração se movem para regiões de concentração mais baixa, conforme a Figura 3.2 abaixo. (CALÇADA, 2004)

Para a difusão iônica no concreto, é necessário um teor de umidade mínimo que permita a movimentação do íon, diferente no caso de gases, pois se há elevada concentração de umidade, esta bloqueia a sua entrada por difusão. Se o íon encontra no caminho uma região seca, a difusão é interrompida. Assim, o meio líquido é fundamental para que a difusão ocorra e no concreto este meio é a água. Portanto, os maiores coeficientes de difusão ocorrem quando o concreto está saturado e seu valor reduz com a umidade. (KROPP *et al.*, 1995)

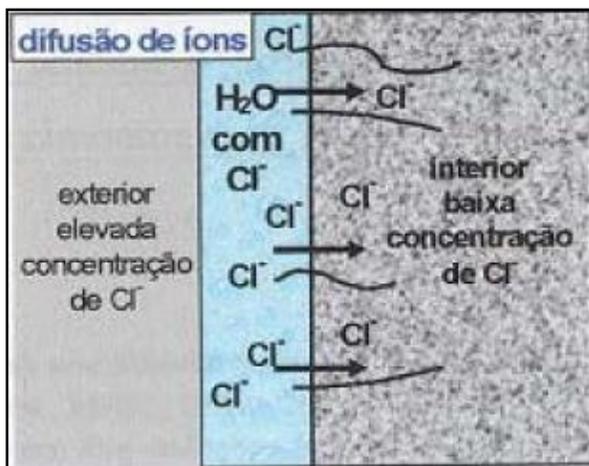


Figura 3.2 – Esquema de difusão entre meio externo e interior do concreto

Fonte: Hoffmann (2001).

Buenfeld (1995) afirma que o mecanismo de difusão é mais lento que os demais mecanismos relacionados à penetração de cloretos no concreto, porém o suficiente para deteriorar as estruturas de concreto armado por corrosão de armadura.

Na difusão onde o transporte de cloretos ocorre por diferenças de concentração deste íon, a propriedade que relaciona à condição de movimentação deste íon é chamada de coeficiente de difusão. A Lei que representa este fenômeno é conhecida como 1ª Lei de Fick da difusão. Esta lei descreve o mecanismo da difusão em condições de fluxo estacionário ou contínuo. Porém, a difusão dos cloretos nas estruturas de concreto armado ocorre em condições não estacionárias, onde a concentração destes cloretos em um volume infinitesimal de concreto varia com o tempo. A lei que descreve este fluxo não estacionário é a 2ª Lei de Fick da difusão.

Segundo Guimarães (2011), são muitos os pesquisadores a alertarem para o fato de que as leis citadas acima tratam os poros como sendo uniformes, retilíneos e contínuos. Porém, no caso do concreto, esta condição não é verdadeira. Sendo assim, a difusão de cloretos no concreto é muito mais complexa do que as descritas nas Leis de Fick.

3.1.3 Permeabilidade

Para Neville (1997), permeabilidade é a facilidade com que os fluidos (líquidos e gases) ingressam no concreto e se deslocam em seu interior. A permeabilidade pode ser definida como o escoamento de um fluido através de um meio poroso e a permeabilidade do concreto como a facilidade com que os fluidos ingressam e se deslocam em seu interior; este deslocamento se dá por diferença de pressão. Este parâmetro ocorre em função da porosidade, das dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros, variando este fator com a evolução da hidratação do cimento. Na Figura 3.3 abaixo, apresenta-se um esquema deste fenômeno.

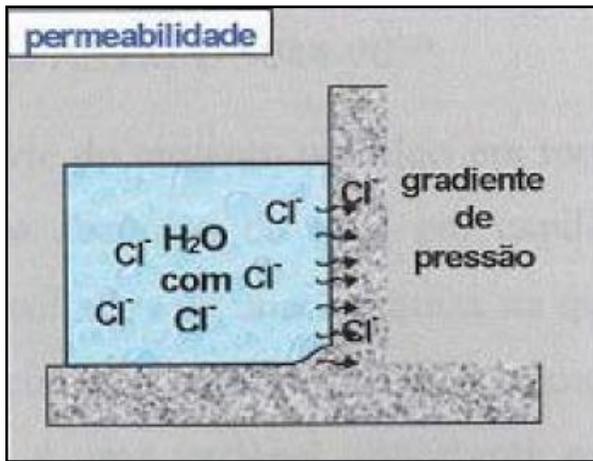


Figura 3.3 – Esquema de permeabilidade

Fonte: Hoffmann (2001).

Mehta e Monteiro (1994) definem a permeabilidade como a propriedade que controla a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. Diferente da porosidade que se refere à totalidade dos poros e vazios, a permeabilidade está relacionada à continuidade destes canais.

Segundo Neville (1997), são três os principais fluidos que, ao penetrar no concreto, podem deteriorá-lo: água pura ou com íons agressivos, dióxido de carbono, e oxigênio. Quando a entrada destes fluidos no concreto se dá por diferencial de pressão, diz-se que houve

uma penetração por permeabilidade. Por outro lado, quando os gases se deslocam no interior do concreto devido à diferença de concentração, com pressões e temperaturas iguais, ocorre então à difusão.

Alguns fatores como a relação água/cimento, grau de hidratação, tipo de cimento, adições minerais, agregados, temperatura, procedimentos de cura, adensamento, entre outros, são determinantes para a formação da estrutura dos poros e capilares e, conseqüentemente, definidores de uma maior ou menor permeabilidade dos concretos. A permeabilidade de uma pasta completamente hidratada pode ser da ordem de 10⁶ vezes menor que a de uma pasta com baixa idade. (PARK, S.S. *et al.*, 2012)

O coeficiente de permeabilidade é a grandeza que mede a facilidade com que um fluído escoar através de um meio poroso. Seu valor depende da viscosidade do fluído, do índice de vazios, do grau de saturação, do tamanho e da forma das partículas; ou seja, é a taxa de fluxo viscoso por meio da estrutura de poros de um determinado meio. Para uma taxa de fluxo contínuo, esta percolação em um meio sólido é regida pela Lei de Darcy.

3.1.4 Migração

A migração é o fenômeno de movimentação de espécies iônicas em que a força motriz é uma diferença de potencial originada pela presença de dois eletrodos – um positivo em um negativo – de modo que os íons se movem ao eletrodo com carga de sinal oposto. A movimentação iônica por migração pode permitir o fluxo de íons de regiões de maior concentração para de menor concentração, seguindo o fluxo de difusão. (KROPP, 1995).

A Figura 3.4 abaixo apresenta o esquema da migração no concreto.

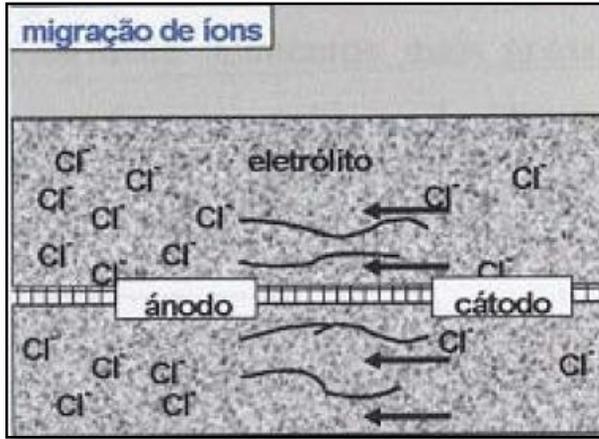


Figura 3.4 – Esquema da migração dos cloretos no concreto

Fonte: Hoffmann (2001).

Calçada (2004, p. 34) entende que “em condições de fluxo estacionário, a migração de cloretos foi descrita com base na equação de Nernst - Plant, que se constitui em um modelo geral para o movimento de íons em eletrólitos, considerando mecanismos envolvidos”. Desta equação foram desprezadas as parcelas que se referem à difusão e convecção, restando somente à migração. Segundo a teoria desenvolvida por Zhang e Gjörv (1994), para diferenças de potencial maiores que seis volts, a razão entre migração e difusão são muito pequenas, ou seja, da ordem de centenas, desconsiderando assim a difusão quando há um processo de migração.

3.1.5 Mecanismos combinados

Segundo Calçada (2004), para que a penetração de cloretos no concreto ocorra individualmente, depende das condições de exposição que está submetida e principalmente da umidade. A permeabilidade pura e a difusão pura só ocorrem em estruturas totalmente saturadas. Para o concreto seco ou não saturado, a absorção capilar é o mecanismo predominante. No estudo de penetração de cloretos no concreto, cada mecanismo de transporte deve ser considerado em separado, porém sua interrelação não pode ser desprezada. Pois segundo Kropp (1995), pode-

se dizer que o teor de umidade interfere na difusão, mas as diferenças de concentração iônica podem ser responsáveis pelo fluxo de umidade.

Nas situações onde os mecanismos de transportes de cloretos atuam simultaneamente, é onde se observa as maiores penetrações de cloretos no concreto, afirma Helene (1993). À medida que a porosidade total do concreto diminui, a difusão se torna o mecanismo predominante de penetração de cloretos, bem como em casos onde o concreto está submetido à ação de águas paradas.

Hong e Hooton (1999) realizaram um estudo sobre concretos sujeitos a ciclos de molhagem e secagem com diferente relação água/cimento iguais a 0,3 e 0,4. Chegaram à conclusão de que os cloretos só conseguiam atingir a armadura das estruturas de concreto, quando havia a combinação de absorção capilar e difusão, pois a absorção capilar é responsável pelo transporte de cloretos no primeiro centímetro de profundidade e que a difusão transporta em maiores profundidades, completando o percurso dos íons cloro até a armadura. E, segundo a NBR 6118 (2007), a proteção da armadura para ambientes urbanos é de 2,5cm, e para ambientes marinhos é de 3,0cm de profundidade. Profundidade esta em que os íons cloro só conseguirão atingir a armadura mediante a combinação destes dois mecanismos.

Calçada (2004, p. 34) entende que: “quando a espécie em estudo esta dissolvida em uma dada solução, o seu fluxo pode ser expresso pelo produto entre o fluxo da solução e a concentração da espécie nesta solução”. Neste caso, pode-se citar a penetração de cloretos por absorção capilar ou por permeabilidade, sendo muito comum em estruturas parcialmente submersas nas regiões de respingos ou expostas a névoa salina.

Sendo assim, os mecanismos de transporte de cloretos no concreto ocorrem simultaneamente ou sucessivamente, porém em situações onde o transporte de diferentes fenômenos ocorre em conjunto, o fluxo pode ser obtido por meio da associação de equações de cada caso.

3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO

São fatores que influenciam na penetração de cloretos no concreto: a relação água/cimento, tipo de cimento, idade do concreto,

diâmetro do agregado, temperatura, grau de saturação do concreto, presença de fissuras, carbonatação e tipos de sal.

3.2.1 Relação água/cimento

A relação água/cimento é o principal fator que influencia na penetração de cloretos no concreto, devido ao refinamento da porosidade capilar que se obtém nas baixas relações. A porosidade está relacionada diretamente com a relação água/cimento e é o parâmetro que rege a durabilidade do concreto, influenciando as propriedades de absorção capilar, permeabilidade, difusão e migração de íons cloro. (CEB, 1989).

A penetração de cloretos em ambientes marinhos está relacionada com sua estrutura porosa. Em casos de concretos com baixa relação água/cimento, os íons cloro se difundem por caminhos mais tortuosos e desconectados, o que dificulta o seu ingresso para o interior do concreto. (SACIOTO, 2005) Portanto, reduzindo-se a relação água/cimento, reduz-se automaticamente o volume de poros e a permeabilidade do concreto.

Segundo Neville (1997), para relações água/cimento maiores que 0,38, o volume de gel formado pela hidratação do cimento não é capaz de preencher todos os vazios do concreto e que são em volume ainda maior à medida que aumenta a relação água/cimento.

E ainda Kropp (1995), afirma que os íons cloro provenientes de fontes externas penetram no concreto, através de redes contínuas de poros da matriz cimentante e da zona de transição entre pasta e agregado, e ainda os íons que ingressam na estrutura de concreto através de microfissuras.

Diferentes porcentagens nos volumes de poros são obtidas, dependendo da relação água/cimento da pasta de cimento hidratada, conforme Alanis *et al.* (1990) e mostrada na Tabela 3.1, abaixo.

Tabela 3.1 – Volume de poros em pastas de cimento com diferentes relações água/cimento

Relação a/agl	Volume de poros (%)
0,4	23,3
0,5	34,5
0,6	42,1
0,8	53,4

Fonte: Alanis *et al.*(1990).

Um concreto com baixa permeabilidade é a porta aberta para a entrada de fluídos e/ou gases agressivos, originando assim, patologias nas estruturas de concreto armado e, quando somado com a umidade relativa, pode impulsionar e acelerar o processo de degradação da mesma. Esta permeabilidade é correlacionada ao fator água/cimento utilizado na produção do concreto. Para o concreto com a relação água/cimento acima de 0,6, há um aumento significativo nos valores do coeficiente de permeabilidade, ou seja, tem-se um concreto mais poroso, facilitando a degradação da estrutura, principalmente quando submetida aos íons cloro presentes na atmosfera marinha.

O comportamento desta correlação pode ser visualizado por meio da curva mostrada na Figura 3.5, abaixo. (ALVES, 2007)

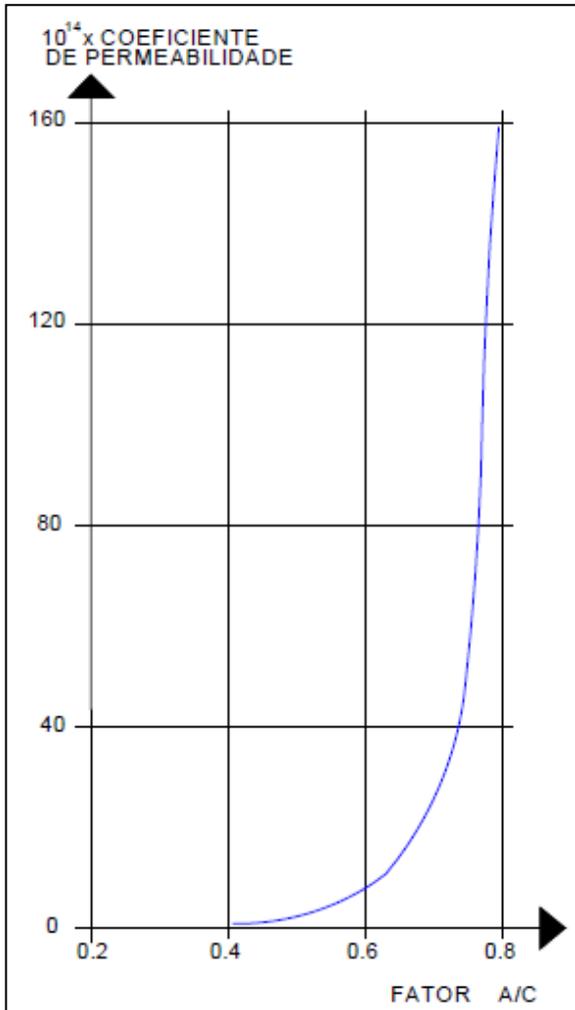


Figura 3.5 – Influência da relação água/cimento no coeficiente de permeabilidade do concreto

Fonte: Alves (2007).

A porosidade do concreto, em especial nas regiões litorâneas, deve ser controlada por meio da utilização dos padrões de qualidade específicos na execução do mesmo, principalmente nas regiões de clima tropical, onde as variações térmicas originam esforços de tração sobre o concreto, causando fissuração na estrutura de concreto. A relação

água/cimento é especificada em projeto, conforme recomendações normativas.

Sendo assim, a Tabela 3.2 abaixo apresenta os valores estabelecidos para a relação água/cimento em normativas internacionais e brasileiras, para ambientes marinhos onde o grau de deterioração das estruturas é maior.

Tabela 3.2 – Limites normalizados da relação água/cimento para concreto em ambientes marinhos

Norma		Concreto Armado	Concreto Protendido	Comentários
ABNT NBR 6118 (2003)	Submersa	0,65	0,60	-----
	Aérea	0,55	0,50	
	Respingos da maré	0,45	0,45	
ACI Committee 318/318R (1996)		0,40		-----
CEB-FIP. BULLETIN 213/214		0,50		Com geada (0,55 sem geada)
CPH- EHE (2008)	Submersa	0,50	0,45	Para adições: substituir a/c por A/(C+KF), sendo F = consumo de adição e K = coeficiente de eficácia. Para cinza volante, $K_{mix} = 0,3$. Considerar zona de respingo igual à zona de maré.
	Aérea	0,50	0,45	
	Maré	0,45	0,45	

Fonte: Pontes (2006) – Adaptado pela autora.

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

Figueiredo (2005) analisou alguns resultados relativos ao efeito da relação água/cimento quanto à penetração de cloretos no concreto. Um concreto mais denso com menor relação água/cimento funciona como uma barreira, inibindo a ação do íon cloro, pois dificulta a penetração deste íon na camada de cobrimento do concreto.

Observa-se, também, que todas as relações água/cimento permitiram que o teor de cloreto ultrapassasse o patamar de 0,4% em relação à pasta de cimento. Portanto, com a relação água/cimento mais elevada, é facilitado o ingresso de cloretos por difusão iônica, permitindo assim, que os íons atinjam maiores profundidades.

Na figura 3.6 abaixo, pode-se observar melhor a influência da relação água/cimento sobre o coeficiente de difusão de cloretos, avaliando concretos com 28 dias de idade e produzidos com cimento Portland comum. Para Ollivier (1998), a influência da relação água/cimento é maior para menores períodos de exposição e menor influência para períodos de maiores contatos com a solução contendo cloretos.

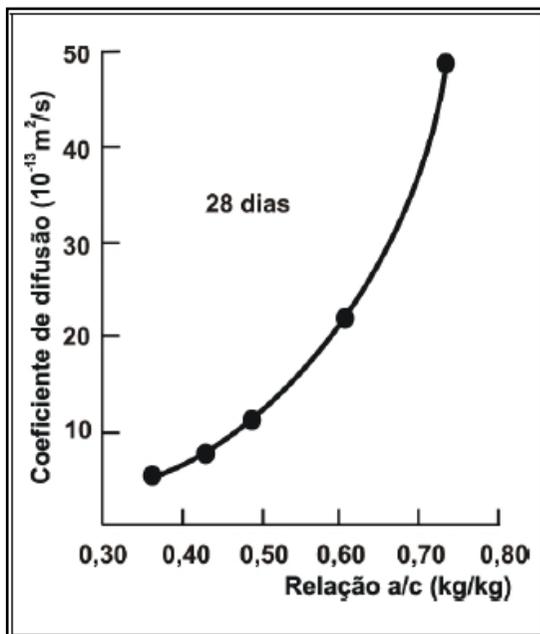


Figura 3.6 – Influência da relação água/cimento sobre o coeficiente de difusão

Fonte: Ollivier (1998).

3.2.2 Tipo de cimento

A escolha do tipo de cimento mais adequado para resistir à agressividade ambiental é um importante aspecto que influenciará na maior ou menor capacidade de penetração dos cloretos no concreto. Os teores de aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) estão presentes no cimento e determinam a capacidade de fixação de cloretos no concreto. (NEVILLE, 1997)

Segundo Helene (1999), para reduzir o ingresso destes íons cloro, são preferíveis os cimentos com adições tipo CP II, com escória de alto forno e o CP IV, com cinza volante.

Page *et al.* (1981, *apud* Calçada 2004) verificaram que, nos concretos contendo adições minerais, houve uma redução da difusividade de cloretos. Este comportamento é devido à melhoria dos

sistemas de poros por meio da reação pozolânica, que reduz o volume total e o diâmetro dos poros. Para os autores, cimentos com a presença de cinza volante e escória de alto forno permitem maior proteção ao concreto em relação a outros cimentos, como os resistentes a sulfatos e cimento Portland comum, pois apresentam um melhor refinamento dos poros e elevados teores de C_3A , que possui a capacidade de fixação dos íons

livres de cloreto no concreto, formando os cloroaluminatos.

Já os cimentos que possuem menor quantidade de C_3A são menos efetivos nestas reações e tem desempenho inferior aos cimentos com elevados teores de C_3A , conforme apresenta a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C_3A

Teor de C_3A	% de cloretos livres	Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão
2%	86%	Referência
9%	58%	1,75 vezes
11%	51%	1,93 vezes
14%	33%	2,45 vezes

Fonte: Rasheezafar *et al.* (1990, *apud* Meira (2004)).

A constatação dos resultados obtidos por Page *et al.* (1981), foram por meio de estudos de difusão realizados em pasta de cimento Portland comum, com adição de 65% de escória de alto forno, com 30% de adição de cinza volante e resistente a sulfatos.

Na Tabela 3.4 abaixo, pode-se observar como as adições reduzem o coeficiente de difusão, pois reduzem a estrutura porosa em volume e diâmetro.

Tabela 3.4 – Coeficiente de difusão a 25°C em pastas de cimento com relação a/c: 0,5

Tipo de cimento	Coeficiente de difusão x 10 ⁻⁹ (cm ² /s)
Portland comum	44,7
30% de cinza volante	14,7
65% de escória	4,1
Resistente a sulfatos	100,0

Fonte: Meira (2004).

As adições minerais também apresentam grande influência na fixação de cloretos, quando são alterados os teores de C₃A do cimento. A redução na concentração de cloretos livres é em torno de 90%, quando o teor de C₃A do cimento aumenta de 2,8% para 10%, segundo estudos realizados por Al-Khaja (1997).

Thomas (1996) relatou em seus estudos uma redução de 61% no coeficiente de difusão para o emprego do cimento com uma adição de 56% de cinza volante, enquanto que os estudos de Ollivier (1998) apresentaram uma redução na ordem de grandeza nos coeficientes de difusão em concreto com cinza volante e escória de alto forno.

As pozolanas ultrafinas, como a sílica ativa e a cinza da casca de arroz, atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição e, assim, reduzindo a penetrabilidade dos cloretos e aumentando a resistência mecânica do concreto, afirma Dal Molin (1995). O efeito do tipo de cimento no ingresso e transporte dos cloretos no interior do concreto tem relação direta com sua porosidade. Uma matriz mais densa do concreto dificulta a entrada de agentes agressivos como os cloretos, bem como umidade e oxigênio.

Gjørsv (1995) observou que a adição de 9% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland comum pode reduzir em cinco vezes a difusividade dos cloretos. Jones *et al.* (1997) obtiveram uma redução de 90% no coeficiente de migração em cimentos contendo sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno, considerando um fluxo estacionário.

O uso de cimentos resistentes a sulfatos para concreto submetidos à presença de íons cloro apresenta desvantagens, pois quando o concreto carbonata os cloroaluminatos, os mesmos tornam-se instáveis e permitem que os íons cloro sejam liberados para a solução aquosa do concreto, segundo Neville (1997). O autor ainda ressalta que os cimentos mais finos produzem pastas de cimento menos porosas, sendo as preferíveis no que diz respeito à penetração de cloretos.

3.2.3 Idade do concreto

A hidratação do cimento é um processo progressivo ao longo do tempo e, devido a esta ação progressiva da hidratação do cimento, ocorre a substituição dos espaços ocupados pelos vazios capilares por produtos de hidratação. Isto significa que os produtos preenchem os espaços inicialmente ocupados pela água, diminuindo a porosidade capilar. Os produtos de hidratação chegam a ocupar em média duas vezes o volume ocupado pelo cimento anidro.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), à medida que aumenta o grau de hidratação do cimento, o volume dos poros vai reduzindo ao longo do tempo. Assim, conforme avança a idade do concreto, diminui a sua porosidade. Pode-se afirmar, então, que ocorre uma redução da permeabilidade, da absorção capilar e da difusividade do cloreto no concreto.

Salta (1994) realizou estudos em torno de concretos, contendo ou não cinza volante, expostos à água do mar e argamassas submetidas a ensaios de difusão de cloretos em laboratório. O resultado do coeficiente de difusão obtido para ambos os casos foi de três vezes menor, quando foi aumentada a idade de início dos ensaios de 07 para 28 dias. Este coeficiente foi ainda menor, entre 28 e 90 dias.

De acordo com Ollivier (1998), a evolução do grau de hidratação do cimento, além de diminuir a porosidade, impediu a comunicação entre os poros, dificultando o transporte de agentes agressivos no concreto. O mesmo autor observou a variação do coeficiente de difusão, conforme a idade dos concretos com ou sem sílica ativa. Constatou que em concretos com idade variando entre 01 e 200 dias e com teores de sílica ativa entre 0 e 24% , houve a diminuição do coeficiente de difusão do concreto com o avanço da idade. Portanto, o aumento do teor de adição mineral resulta em maior variação do coeficiente de difusão em função da idade do concreto, como pode ser

visualizado no gráfico que apresenta esta variação, representado na Figura 3.7.

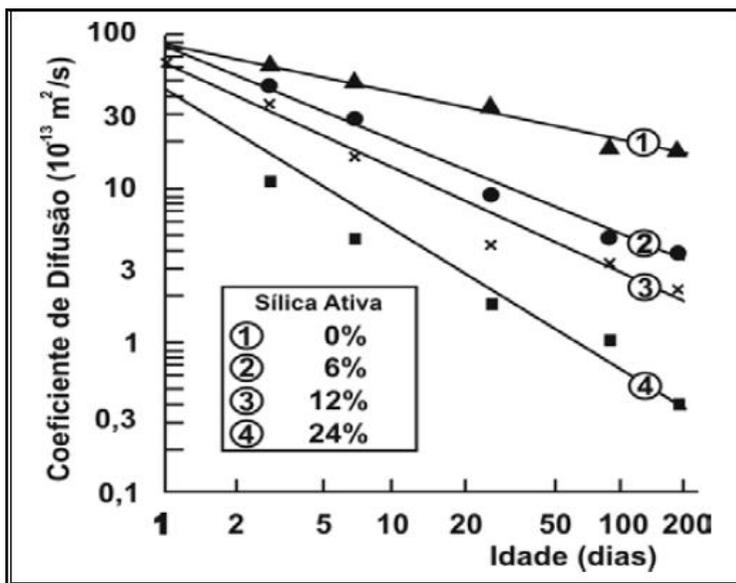


Figura 3.7 – Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o aumento da idade do concreto.

Fonte: Ollivier (1998).

3.2.4 Diâmetro do agregado

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a incorporação de agregados à pasta de cimento aumenta consideravelmente a sua permeabilidade e, quanto maior a dimensão do agregado, maior o coeficiente de permeabilidade do concreto. Isto ocorre devido à presença de microfissuras na zona de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento. A dimensão do agregado e sua distribuição granulométrica afetam a característica de exsudação da mistura de concreto, influenciando na zona de transição na interface.

E, ainda de acordo com o autor, no período inicial da hidratação, a zona de transição é fraca e vulnerável à fissuração, devido aos esforços diferenciais entre a pasta de cimento e o agregado, permitindo

estabelecer a interconexão entre os poros capilar presentes na pasta de cimento, e facilitando o ingresso de agentes agressivos no concreto.

Basheer *et al.* (2005) realizaram estudos sobre a influência do agregado graúdo na permeabilidade ao ar do concreto e os resultados mostraram que, aumentando o diâmetro médio do agregado, aumenta também a sua permeabilidade.

3.2.5 Temperatura

Há influência da temperatura na penetração de cloretos, no entender de Goni e Andrade (1990). As temperaturas mais elevadas aumentam a velocidade de transporte dos cloretos no concreto, ou seja, o aumento da temperatura aumenta o teor de cloretos livres na água dos poros. Helene (1986) afirma que a diminuição acentuada da temperatura pode causar condensação no interior do concreto, aumentando a umidade nos poros.

Segundo Garcia (2008, p. 48):

Admite-se que um aumento de 10°C na temperatura dobre a velocidade da reação, embora haja evidências que esse acréscimo seria de apenas 1,6 vezes. Este fato explica a existência de mais concretos deteriorados em regiões litorâneas quentes do que temperadas.

Segundo Cascudo (1997), a temperatura tem um papel duplo nos processos de deterioração. Se por um lado, o aumento da temperatura promove um aumento na velocidade de corrosão e da mobilidade iônica, por outro lado, sua diminuição pode dar lugar as condensações, as quais podem produzir aumentos no teor da umidade.

Kropp (1995) afirma em seu trabalho que, à medida que a temperatura se torna mais elevada, a mobilidade iônica também aumenta, facilitando o ingresso dos cloretos por difusão no concreto.

A Tabela 3.5 abaixo mostra a conclusão de vários pesquisadores que também observaram o aumento do coeficiente de difusão com a elevação da temperatura.

Tabela 3.5 – Influência da temperatura no coeficiente de difusão

Autor	a/c	Temperatura (°C)	Cura (dias)	D (10⁻¹² m²/s)	Tipo de Mistura
Collepari (1972)	0,40	10	48	1,2	Pasta
		25		2,5	
		40		4,9	
		25	28 – ao ar	1,7	Concreto
Goto (1981)	0,40	35	28	2,7	Pasta
		45		3,7	
		50	60°C	9,2	
Page (1981)	0,40	7	60 imersão	1,1	Pasta
		25		2,6	
		44		8,4	
	0,50	7		2,1	
		25		4,5	
		44		18,4	
	0,60	7		5,2	
		25		12,3	
		44		31,8	
Brodersen (1982)	0,6	15	7 imersão	4,21	Pasta
		21		6,21	
		25		7,83	
		30		10,79	

Fonte: Kropp (1995).

Pereira e Cincotto (2001) afirmam que a temperatura tem um importante papel na penetração de cloretos nas estruturas de concreto. Em um aumento de temperatura de 15°C para 30°C, o coeficiente de difusão de cloreto duplica. Andrade e Dal Molin (2001) observam que com o aumento da temperatura durante o processo de cura do concreto, ocorre uma minimização do coeficiente de difusão dos cloretos, devido à melhoria das condições micro estruturais do concreto.

Al-Khaja (1997) estudou a influência da temperatura em dois tipos de concretos com cimento Portland comum – um com resistência convencional e outro com alta resistência – e evidenciaram que, ao

variar a temperatura de 20 para 45°C, ocorre um aumento significativo na penetração de cloretos no concreto, conforme mostrado na Figura 3.8, principalmente nos concretos convencionais, quando são comparados aos concretos de resistência mais elevada, pois estes possuem menor porosidade. Neste mesmo estudo, os autores também perceberam que a temperatura teve influência significativa, para os concretos com relação água/cimento maiores.

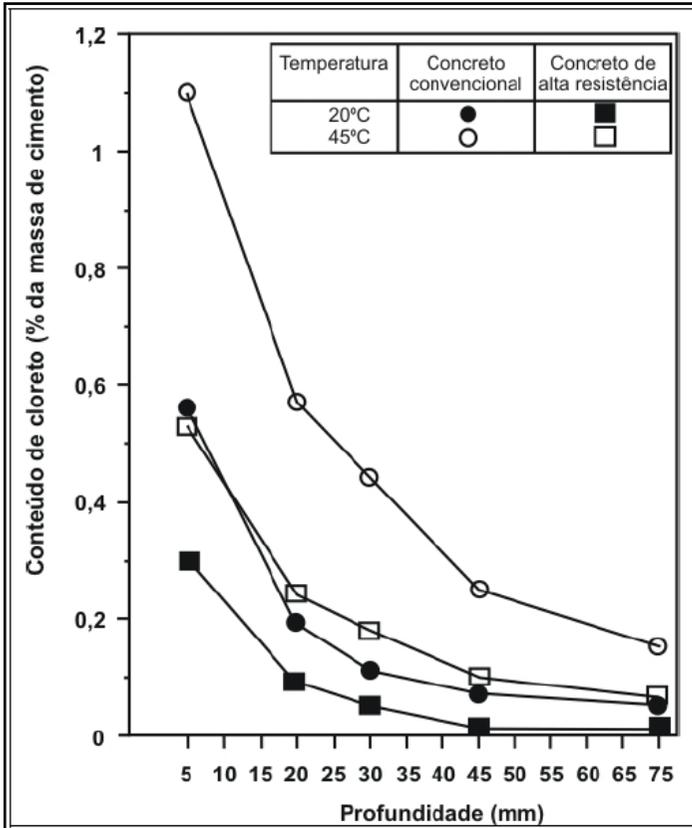


Figura 3.8 – Influência da temperatura no ingresso de cloretos
 Fonte: Al-Khaja (1997).

3.2.6 Influência da umidade

A penetração do cloreto só é possível quando há água nos poros do concreto. (GUIMARÃES, 2000) Segundo Perea *et al.* (1987, *apud* Andrade, 2001), a umidade relativa do ambiente pode ser relacionada diretamente com a água presente no interior do concreto, desde que este não esteja saturado. Helene (1986) diz que como referência, tem-se os seguintes teores aproximados de umidade de equilíbrio no concreto normal, a 25°C, em relação à umidade do ambiente:

- para U.R. = 40% : teor de umidade de equilíbrio \approx 3% (\approx 70 litros de água/m³);
- para U.R. = 65% : teor de umidade de equilíbrio \approx 4% (\approx 95 litros de água/m³); e
- para U.R. = 95% : teor de umidade de equilíbrio \approx 8% (\approx 190 litros de água/m³).

A água presente no concreto, principalmente nas regiões expostas às intempéries e/ou às elevadas taxas de umidade, geralmente apresenta-se em quantidade suficiente para atuar como eletrólito.

Uma relação aproximada entre o nível de umidade ambiental e o risco da corrosão está apresentada na Figura 3.9:

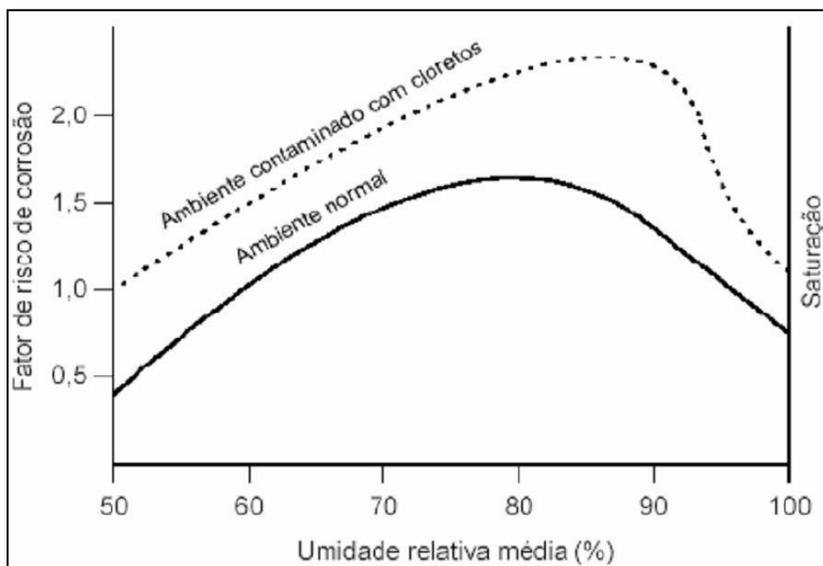


Figura 3.9 – Influência do teor de umidade sobre o risco de corrosão Considerando o concreto de cobrimento

Fonte: CEB (1993).

O comportamento mostrado na Figura 3.9 representa a influência da umidade na etapa de propagação da corrosão. Nos poros saturados (taxa de umidade no concreto de 100%), o acesso de oxigênio é limitado e, com baixos valores de umidade relativa, o risco de corrosão é minimizado. Para o concreto seco (taxa de umidade no concreto de 0%), o processo eletrolítico não ocorre (ANDRADE, 1992). E, segundo Figueiredo e Helene (1994), ainda contribui para intensificar a corrosão, o fato de o concreto absorver com facilidade a umidade do meio, porém perde com menos facilidade esta umidade.

De acordo com diversos autores, a umidade crítica para o aço, a 25°C, está entre 65% e 85%, o que aumenta as exigências de cobrimento e proteção de armaduras imersas em concreto. (GUIMARÃES, 2000)

A umidade relativa em uma construção pode ser variável, segundo a microrregião que se considere. Locais por natureza mais úmidos e com maior risco de condensação podem, principalmente em estruturas de concreto aparente, apresentar sintomas de corrosão mais rápida e intensa que em locais mais secos da construção.

3.2.7 Grau de saturação do concreto

A penetração de cloretos no concreto é influenciada pelo grau de saturação do concreto. Os mecanismos de penetração apresentam diferentes comportamentos com relação à umidade presente no concreto. A absorção capilar e a permeabilidade não ocorrem em concretos totalmente saturados e quanto menor for a umidade, maior será a penetração de cloretos através destes mecanismos.

No entanto, a difusão iônica só ocorre na presença de umidade e, quanto maior o grau de saturação do concreto, maior será o ingresso de cloretos por difusão. Os íons precisam de um teor mínimo de umidade para se transportar, caso contrário, este processo é dificultado pela descontinuidade da solução no interior do concreto, portanto a difusão reduz à medida que diminui o grau de saturação. (KROPP, 1995) E ainda conforme o autor, quando a umidade relativa do ar diminui do valor crítico de 75%, a difusividade de íons apresenta uma queda acentuada.

Estudos realizados por Guimarães *et al.* (2011) indicam que há uma redução brusca na taxa de difusão, quando o grau de saturação do concreto diminui para aproximadamente 85%. Neste grau de saturação, toda água encontra-se adsorvida às paredes dos poros e os cloretos precisam percorrer caminhos mais tortuosos para ingressar no concreto, reduzindo sua profundidade de penetração. O processo de difusão pode ser cessado, quando o grau de saturação for pequeno o suficiente para que a camada de água adsorvida nos poros seja inferior ao mínimo necessário para a movimentação dos cloretos.

3.2.8 Presença de fissuras

A fissuração presente no concreto facilita o ingresso e o transporte de agentes agressivos, percorrendo caminhos no interior do concreto, podendo atingir a armadura e, no caso dos cloretos, provocando a despassivação da mesma. Nas estruturas de concreto expostas à água, vapor ou solo que contenham cloretos, a região fissurada da estrutura será a primeira a apresentar corrosão pela facilidade de ingresso dos cloretos na estrutura. (FIGUEIREDO, 2005)

Andrade e Dal Molin (2001) colocam que diversos fatores como as variações de temperatura, a presença de vento e umidade, entre outros, agem sobre as estruturas ocasionando tensões térmicas e de retração, podendo causar a fissuração do concreto dos elementos estruturais, facilitando o ingresso de agentes agressivos no concreto.

Calçada (2004) apresentou estudos de autores que induziram fissuras por tracionamento em corpos-de-prova prismáticos de concreto com fibras de aço e submeteram os mesmos a ciclos de molhagem e secagem. Ao final do experimento, os autores observaram que, em elementos fissurados, o aumento do teor de cloretos no concreto ao longo do tempo é mais acentuado. Em relação aos efeitos da fissuração para concretos com resistências diferentes, observou-se que o aumento da fissuração com o aumento do coeficiente de difusão é maior para concretos com resistência mais elevada. Os resultados mostraram que, para concretos com resistência de 45, 80 e 100 MPa, ocorreram aumento no coeficiente de difusão de 33%, 38% e 48%, respectivamente.

A velocidade com que os cloretos penetram depende da abertura da fissura e da qualidade do concreto. Segundo Cascudo (1997) a fissuração acelera o início do processo de corrosão, porém não influencia de forma significativa na intensidade desta corrosão.

A NBR 6118 (2007) relaciona a fissuração à função das classes de agressividade ambiental. A norma justifica que a fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável, devido à grande variabilidade e à baixa resistência do concreto à tração. A norma estabelece os valores limites da abertura característica das fissuras (W_k), por meio de uma relação com a classe de agressividade ambiental, o tipo de estrutura de concreto e outras combinações de serviço que devem ser utilizadas, visando uma proteção adequada das armaduras quanto à corrosão (Tabela 3.6). A norma informa também que, mesmo se respeitando os limites de fissuração impostos no item de dimensionamento dos elementos, os valores maiores aos estimados de aberturas de fissuras podem surgir nas estruturas.

Tabela 3.6 – Valores limites da abertura de fissuras, conforme NBR 6118/2007.

Tipo de concreto Estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA)	Abertura de Fissuras (W_k)	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto armado	CAA I	$W_k \leq 0,4$ mm	Combinação Frequente
	CAA II e CAA III	$W_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	$W_k \leq 0,2$ mm	

Fonte: NBR 6118 (2007).

3.2.9 Carbonatação

O processo de carbonatação ocorre, quando o gás carbônico (CO_2) da atmosfera, penetra no concreto e reage na presença de

umidade, com o hidróxido de cálcio (CH) da solução ou outros compostos alcalinos (K-H e Na-H), consumindo o CH e formando carbonato de cálcio (CaCO_3). (CRAUSS, 2010)

Ainda conforme a autora, estas reações promovem a distinção de duas regiões no concreto, onde, a área carbonatada sofre uma redução de pH, enquanto que a área não carbonatada permanece com pH alto, mantendo a passivação da armadura. Sendo assim, quando a frente de carbonatação alcança o entorno das armaduras, reduz o pH da solução dos poros de valores entre 12,3 a 13,5 para cerca de 9,0 permitindo assim, a despassivação da armadura.

Para Andrade (1992), esta é uma reação natural e lenta no concreto e, conforme o progresso da frente de carbonatação diminui com o tempo, os produtos das reações tendem a preencher os poros do concreto, dificultando a entrada do CO_2 . Porém, se a carbonatação atingir as armaduras, estas irão sofrer corrosão. E, ainda segundo o autor, a velocidade com que se desenvolve a carbonatação no concreto está relacionada a alguns fatores como a umidade e temperatura do ambiente, a concentração de CO_2 no ar e de íons alcalinos disponíveis no concreto.

Helene (1993) denomina este teor de íons alcalinos disponível para carbonatação de reserva alcalina, e afirma que quanto maior a concentração de hidróxido de cálcio na solução aquosa dos poros menor será a velocidade de penetração de CO_2 . Para que ocorra um avanço na frente de carbonatação é necessário que o CO_2 rebaixe o pH dos poros e reaja com todo o hidróxido de cálcio disponível, para então, continuar penetrando e precipitar o carbonato de cálcio.

Ainda para o autor, cimentos com maior teor de C_3S (tri-silicato de cálcio) apresentam menor espessura carbonatada, quando comparados aos demais cimentos, isso mantidas as mesmas condições de exposição ao ambiente e traço, uma vez que liberam mais Ca(OH)_2 . Assim, o autor afirma que concretos com adições pozolânicas apresentam profundidade de carbonatação superiores à profundidade de carbonatação obtidas em concretos com cimentos Portland comum, pois ocorre uma diminuição no teor de álcalis quando a sílica reage como Ca(OH)_2 , na reação pozolânica.

Jones *et al.* (1997) realizaram estudos que envolveram concretos com e sem adições minerais e comprovaram que a carbonatação teve grande influência na aceleração da penetração de cloretos nos concretos, mesmo nos concretos parcialmente carbonatados.

Os autores também estudaram o tempo de início de corrosão devido ao ingresso de cloretos em corpos de prova de concreto com e

sem adições minerais. Com os resultados, observaram que o tempo de início é reduzido quando o concreto está parcialmente carbonatado. Este tempo foi reduzido três vezes para cimento Portland comum e quatro vezes para cimento com adição de cinza volante. Portanto, o ingresso de íons cloro é acelerado, quando os concretos estão carbonatados.

Outros fatores relativos às propriedades do concreto também influenciam na profundidade de carbonatação deste, que são: relação a/c (responsável pela porosidade e permeabilidade do concreto), presença de microfissuras, tipo de cimento e utilização de adições minerais, condições de cura, entre outros.

Quanto maior o grau de hidratação do cimento, maior será a densificação da matriz e menor será a taxa de penetração de agentes agressivos. A boa execução no processo de cura do concreto diminui significativamente a profundidade de penetração do CO_2 , e assim, favorecendo o concreto no processo de carbonatação. (CONCIATORI *et al.*, 2010)

3.2.10 Tipos de sal

A penetração de cloretos no concreto é bastante influenciada pelo tipo de cátion e sua concentração, sendo que os diferentes cátions promovem viscosidades e tensões superficiais diferentes às soluções que contém os cloretos. O tipo de sal e sua concentração tem influência sobre a taxa de difusão e absorção capilar, responsáveis pelo ingresso de cloretos no concreto. (KROPP, 1995)

Pontes (2006) cita estudos de alguns autores que analisaram em corpos de prova, a consequência de uma mesma quantidade de cloretos originados do NaCl (cloreto de sódio) e do CaCl_2 (cloreto de cálcio) em relação à corrosão da armadura. Os resultados obtidos foram que, os corpos de prova que continham CaCl_2 (cloreto de cálcio) mostraram armaduras mais afetadas pela corrosão, apesar de conter menor quantidade de cloretos livres e menor relação Cl^-/OH^- , quando comparados aos resultados dos corpos de prova contendo NaCl (cloreto de sódio). A maior agressividade do cloreto de cálcio pode estar relacionado à redução do pH.

Tritthart (1989) afirma que o efeito do cátion associado ao íon cloro tem influência sobre a concentração de hidroxilas na solução dos poros. Os cátions que formam hidróxidos menos solúveis reduzem o conteúdo de íons OH^- na solução dos poros e, assim, reduzem a capacidade de fixação de cloretos, facilitando seu ingresso no concreto.

Isto explica a redução de teor de cloretos livres e a menor relação Cl^-/OH^- para os cátions de sódio.

4 CORROSÃO DAS ARMADURAS

A corrosão das armaduras no concreto armado ocorre devido ao mecanismo de corrosão eletroquímica em meio aquoso, um processo de natureza expansiva que, segundo Mehta e Monteiro (2008), provocam tensões de tração no concreto, resultando na fissuração e no destacamento do concreto na camada de proteção da armadura. Este processo proporciona a perda de aderência entre o concreto e a armadura e a diminuição da seção transversal das barras, podendo causar o colapso da estrutura. O aumento de volume da barra de aço original causado pela formação de ferrugem pode chegar a 600%.

Segundo Neville (1997), o processo eletroquímico caracteriza-se pela formação de células de concentração, onde parte da barra se torna anódica e a outra parte catódica. As reações anódicas e catódicas são desencadeadas, quando ocorre a despassivação do aço e na presença de um eletrólito, de oxigênio e uma diferença de potencial. Pois, sem o eletrólito não ocorre a condução de corrente do ânodo para o cátodo. Não ocorrendo diferença de potencial, não há formação da pilha de corrosão, bem como as reações de redução não ocorrem na falta de oxigênio.

O autor ainda afirma que os cátions ferrosos formados pela dissolução do metal na fase anódica são transferidos para a solução dos poros, enquanto os elétrons livres migram para a fase catódica que, estando na presença de água (eletrólito), formam íons hidroxila (OH). Como existe a contínua migração de íons através do eletrólito, ocorre a formação da ferrugem pela combinação entre os íons hidroxila e os íons ferrosos, formando uma pilha de corrosão.

A Figura 4.1 demonstra a pilha eletroquímica, que se forma dentro do concreto no processo de corrosão, de forma simplificada.

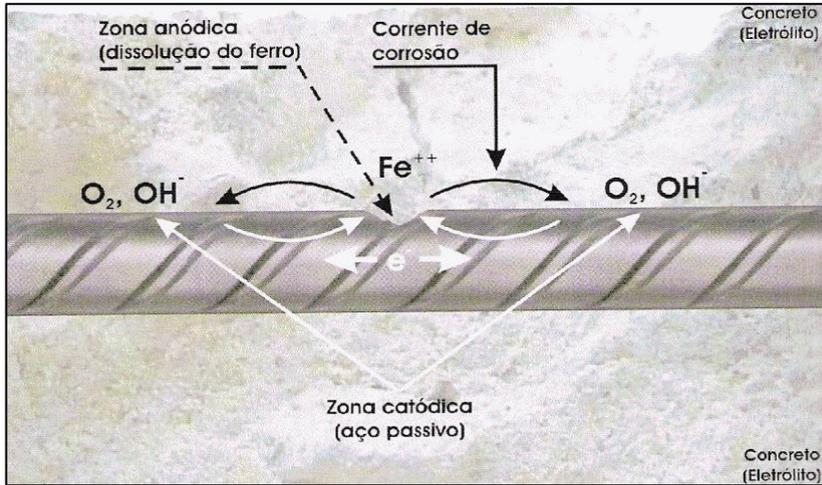


Figura 4.1 – Elementos do mecanismo de corrosão.

Fonte: Cascudo(2005).

A corrosão eletroquímica é um processo espontâneo e passível de ocorrer quando o metal está em contato com um eletrólito, ocorrendo simultaneamente às reações anódicas e catódicas. Caracteriza-se por realizar-se necessariamente na presença de água, na maioria das vezes na temperatura ambiente e com a formação de uma pilha de corrosão. A corrosão eletrolítica caracteriza-se por ser um processo eletroquímico, que se dá com a aplicação de corrente elétrica externa, ou seja, trata-se de uma corrosão não espontânea. (HORNBOSTEL, *et al.* 2013)

4.1 FENÔMENO DA PASSIVAÇÃO

A elevada alcalinidade da solução aquosa dos poros do concreto favorece a formação e a manutenção de um filme óxido aderente à superfície, que evita a dissolução anódica dos íons ferrosos e, portanto passiva o aço. Esta elevada alcalinidade do meio, com pH entre 12,5 a 13,5 é obtido às custas da formação de óxidos básicos durante a hidratação do cimento.

Neste ambiente de alto pH do concreto, as reações de eletrodo são reações de passivação, onde o sistema ferro-água desenvolve uma reação no metal, favorecendo a deposição de uma película de óxidos

protetores na superfície metálica, chamada película de passivação do aço. Esta película envolve a armadura e possui um efeito extremamente protetor, impedindo o contato de agentes agressivos do meio com a superfície metálica. (CASCUDO, 2005)

Para Pourbaix (1987, *apud* Meira 2004), a película passivadora é formada por uma extensa reação eletroquímica que, quando está na presença de oxigênio, forma uma película de óxidos extremamente fina e aderente ao aço na superfície do metal, formando uma camada protetora. A espessura desta película varia entre 10^{-3} e 10^{-1} μm e composta por óxidos, desde Fe_3O_4 a $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, e ainda, em uma camada mais extensa, uma mistura de óxidos com geotita – αFeOOH .

A passivação do aço no concreto pode ser resultado da combinação da ferrugem superficial (produto da corrosão) ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando o ferrato de cálcio ($\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$).

A ação da película passiva é garantida pela elevada alcalinidade do concreto e um adequado potencial eletroquímico. A potencialidade da corrosão depende do pH do meio onde há ligação entre os íons formados nas reações da corrosão com os íons do eletrólito. Esta condição pode ser observada no diagrama elaborado por Pourbaix (1987, *apud* Santos 2006), para o sistema Fe-H₂O a 25°C (Figura 4.2), mostrando que as condições de pH e o potencial onde o metal permanece em estado passivo, se corroem ou permanecem imunes.

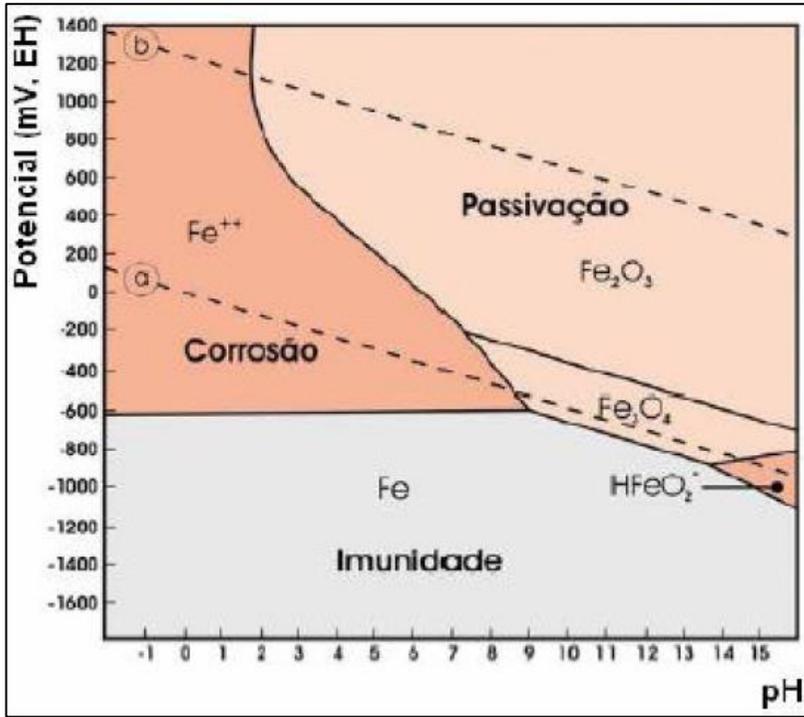


Figura 4.2 – Diagrama de equilíbrio termodinâmico do metal ferro em meio aquoso a 25°C

Fonte: Pourbaix (1987), adaptado por Santos (2006).

Conforme o diagrama apresentado distingue-se três zonas: imunidade, passivação e corrosão. Na zona de imunidade, o metal não se corrói, permanecendo estável para qualquer valor de pH. Na zona de passivação, o metal se recobre de delgada camada de óxidos e hidróxidos, atuando como barreira de proteção, impedindo a corrosão. Na zona de corrosão, o pH e o potencial eletroquímico dão condições para o processo de corrosão, devido à instabilidade da camada de passivação.

O processo de corrosão se inicia quando ocorre a perda da camada passivadora e devido à penetração de agentes agressivos, por meio dos seguintes fatores:

- redução do pH do concreto a níveis críticos entre 8 e 9,5, devido ao gás carbônico presente na atmosfera;

- presença dos cloretos, provocando acidificações localizadas e rompendo a camada passivadora.

Sendo assim, a camada de revestimento é de extrema importância, pois forma uma barreira física e química para o aço. No entender de Helene (1993), um revestimento de baixa permeabilidade dificulta o ingresso de agentes agressivos, além de formar uma barreira aos elementos da corrosão eletroquímica, à água e ao oxigênio.

4.2 DESPASSIVAÇÃO DO AÇO DEVIDO À CARBONATAÇÃO

A carbonatação do concreto ocorre em função da reação química entre os ácidos do meio ambiente e o líquido intersticial constantes nos poros do concreto. Este líquido encontra-se saturado por hidróxidos de cálcio (CH), além de outros compostos como o hidróxido de sódio e o potássio. O ácido carbônico (H_2CO_3), resultante da reação entre o gás carbônico e a água, age como desencadeador da carbonatação do concreto, reagindo principalmente com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), devido a sua maior disponibilidade no material. (CUNHA E HELENE, 2001)

O processo de carbonatação ocorre a partir da superfície, de fora para dentro do concreto, formando uma frente de carbonatação, dividindo-se em duas zonas com pH distintos: uma zona com pH superior a 12; e outra com pH em torno de 8. Diminuindo o pH, a frente de carbonatação avança progressivamente para o interior do concreto, podendo atingir a armadura e dando origem a despassivação. O concreto é um meio altamente alcalino, com pH em torno de 13,5 devido a grande quantidade de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) obtida pelas reações de hidratação do cimento. (CADORE, 2008)

Assim, a película passivadora da armadura se desfaz e, com a presença do oxigênio e da umidade, o processo de corrosão se instala. A corrosão pela carbonatação é do tipo generalizada, porém a corrosão gerada pela ação dos cloretos é do tipo localizada. (CASCUDO, 1997)

A carbonatação também tem como consequência a alteração da permeabilidade e do volume de poros do concreto, devido às alterações microestruturais causadas pelas reações químicas de hidratação do cimento. Devido à precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), ocorre uma redução da porosidade da pasta de cimento, pois este composto possui maior volume que os demais compostos hidratados, como o CH. Enquanto observa-se uma redução da porosidade total, verifica-se um

aumento na porosidade capilar, com diâmetros dos poros maiores que 30 nm, devido à decomposição do C-S-H. (CADORE, 2008)

Outro processo da carbonatação é a retração causada por dois fatores:

- perda de moléculas de água na reação principal; e
- diminuição de volume na pasta de cimento endurecida, devido à dissolução do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) em zonas sob tensão e precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), onde não está sujeito a tensão.

Ainda segundo o autor, a água liberada pela reação de carbonatação ajudaria na hidratação do cimento, resultando na maior dureza superficial, menor permeabilidade superficial e, assim, menor transporte de umidade.

4.3 DESPASSIVAÇÃO DO AÇO NA PRESENÇA DE CLORETOS

A despassivação do aço, neste caso, ocorre devido à penetração dos íons cloro nos poros do concreto que, juntamente com a água e o oxigênio e em contato com a camada passivadora da armadura, provocam acidificações localizadas ou pontuais na superfície desta armadura, desestabilizando a película de óxidos passivos, segundo Treadway (1988, *apud* Meira 2004). Os íons cloro não reduzem o pH do concreto e a corrosão desencadeada é tipicamente por pites, diferenciando-se da carbonatação, onde sua corrosão é uniforme e provoca a redução do pH. Para Vieira (2003), a corrosão por “pites” é um tipo de corrosão localizada, caracterizada pelo ataque de pequenas áreas em uma superfície metálica, enquanto o restante do metal permanece intacto, sendo comum em metais que se passivam.

De acordo com a ACI 222 (1997), existem três teorias para explicar os efeitos dos cloretos na corrosão das armaduras, conforme segue:

- a) *Teoria do filme óxido*: expõe que os íons cloro penetram através dos poros ou falhas do filme óxido passivante da armadura, mais facilmente que outros íons. E ainda, os íons cloro podem dispersar coloidalmente o filme passivo, facilitando sua penetração e propagação da corrosão.
- b) *Teoria da absorção*: o cloreto, adsorvido na superfície do metal e em competição com o oxigênio dissolvido e as hidroxilas,

promove a hidratação dos íons metálicos, facilitando assim, a dissolução do metal.

- c) *Teoria do complexo transitório*: os cloretos concorrem com os íons hidroxila para combinarem com os íons ferrosos produzidos pela corrosão, formando um composto solúvel de cloreto de ferro (complexo transitório). Difundem-se a partir do ânodo e destroem a camada de hidróxido de ferro, permitindo o contínuo processo de corrosão. Afastando-se da zona anódica, o complexo é rompido, precipitando o hidróxido de ferro e assim, o cloreto fica livre para transportar mais íons ferrosos no ânodo. Com o avanço da corrosão, mais íons de ferro migram para o interior do concreto, formando óxidos mais altos com o oxigênio, resultando em um aumento quatro vezes maior, produzindo aumento de tensões internas e fissuração do concreto.

Segundo Cascudo (2000), a primeira teoria está relacionada ao início da corrosão, enquanto as outras duas teorias referem-se ao período de propagação. Sendo assim, o cloreto, além de despassivar a armadura, acelera o processo corrosivo, bem como aumenta a condutividade do eletrólito. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a presença de cloretos em função de sua higroscopicidade faz com que o concreto conserve mais umidade, diminua a resistividade e aumente o risco de corrosão.

A Figura 4.3 apresenta uma representação esquemática do processo ou formação do “pite” de corrosão do aço devido à ação dos cloretos.

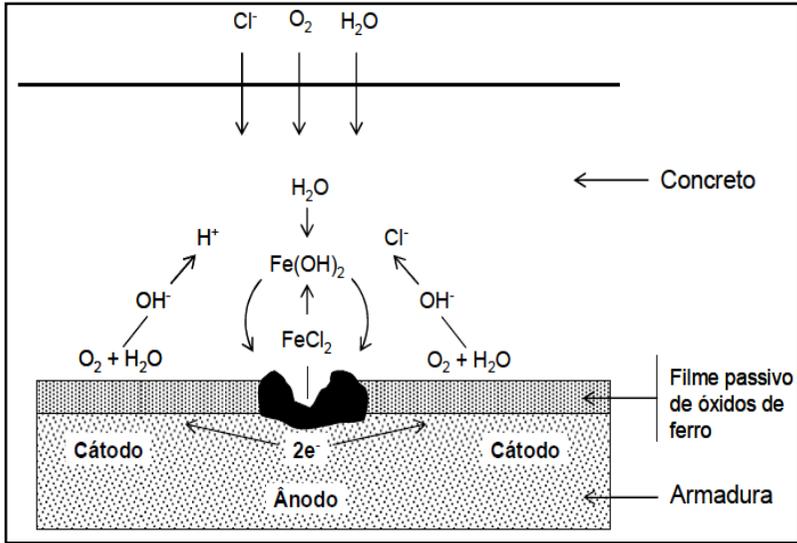


Figura 4.3 – Esquema do processo de corrosão pela ação dos cloretos.

Fonte: Adaptado por Vieira 2003.

5 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS

É necessário o conhecimento do teor de cloretos nas regiões próximas das armaduras no concreto para a avaliação da possibilidade de ocorrência de processos corrosivos.

Diversos são os métodos disponíveis para a determinação do teor de cloretos por meio da química analítica clássica ou por medidas indiretas com técnicas microanalíticas, segundo Pereira (2001). Alguns métodos descritos na literatura para a determinação do teor de cloretos (Cl⁻) são: gravimétricos, volumétricos, potenciométricos e colorimétricos.

A determinação do teor de cloretos está relacionada à quantidade total dos íons cloro no concreto ou à parcela de íons livres. O método de extração destes íons do concreto é o que determinará se a análise é de íons cloro totais ou livres. (GARCIA, 2008)

Para determinar o teor de cloretos é necessário que a amostra de concreto contendo cloretos contenha uma solução aquosa obtida através do concreto em pó. Esta solução deve ser produzida de acordo com o tipo de cloretos a ser analisado, livre ou total. A extração dos cloretos do concreto para a produção desta solução pode ser de duas formas básicas, segundo RILEM TC 178- TMC (2002):

- Extração dos cloretos livres: produção de uma suspensão de pó de concreto em água destilada ou deionizada, ou seja, extraída a amostra de pó do concreto, esta é atacada com água destilada, aquecida e filtrada para retenção do material. Estes cloretos, solúveis em água, são considerados como aqueles livres na solução de poros do concreto, e capazes de iniciar o processo corrosivo.
- Extração dos cloretos totais: dissolução do pó do concreto em meio ácido. Ocorre a decomposição dos compostos hidratados ou não do cimento, liberando os cloretos livres, adsorvidos e fixos.

Há vários procedimentos para a extração de cloretos em água, porém se diferem quanto à quantidade de água, à temperatura atingida por aquecimento, ao procedimento de agitação e ao tempo de suspensão. Segundo Garcia (2008), para garantir a extração completa dos cloretos livres, as amostras do pó do concreto devem ser mantidas em suspensão por um período mínimo de 24 horas, utilizando ou não o aquecimento durante o processo.

Há também diversos métodos para a dissolução ácida dos cloretos. O mais empregado é preconizado na norma ASTM C 114 (1994), a qual sugere a utilização de ácido nítrico (HNO_3) em solução aquosa 1:1 com aquecimento até a fervura. Segundo Tritthart e Calvek (2000), para determinar cloretos pelo método de titulação potenciométrica, é recomendado o uso do ácido acético, pois apresenta melhores resultados que o uso do ácido nítrico (HNO_3). O ácido clorídrico (HCl) não é recomendado, pois este possui cloro na sua composição.

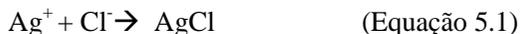
Assim como na dissolução de cloretos em água, também ocorrem variações nos procedimentos de dissolução ácida no que diz respeito à concentração e à quantidade de ácido a ser empregado, ao tempo de exposição da amostra ao ácido e na realização ou não do aquecimento. Após a extração dos cloretos, as suspensões são filtradas e o líquido passante pelo papel filtro é utilizado para determinar o teor de cloretos.

Portanto, para determinar o teor de cloretos, vários métodos podem ser utilizados, desde os mais simples como a titulação com indicação colorimétrica do ponto final do ensaio, até ao emprego de equipamentos mais sofisticados.

5.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Este método baseia-se na precipitação de um composto pouco solúvel e de composição conhecida, contendo cloretos na amostra. A determinação do teor de cloretos da amostra ocorre através da pesagem desta precipitação. O método consiste na adição de uma solução de nitrato de prata (AgNO_3), com concentração conhecida à solução em análise. Quando em solução, principalmente a elevadas temperaturas e em presença de ácido nítrico (HNO_3), ocorre à formação de cloreto de prata (AgCl), sendo um sal de baixa solubilidade formado por partículas pequenas que se aglomeram e não absorve impurezas. A solução que contém o precipitado é filtrada, permitindo sua separação. Depois de seco, o cloreto de prata (AgCl) é pesado e, conhecendo-se a massa atômica do cloro e da prata, pode-se determinar a concentração de cloreto da amostra. (CALÇADA, 2004)

A Equação 5.1, a seguir, mostra a reação que ocorre entre o cloreto (Cl^-) e a prata (Ag^+).



O cloreto de prata (AgCl) precipitado não apresenta grande tendência em ocluir sais e, portanto a presença de substâncias estranhas não causam erro significativo na análise, principalmente quando a precipitação é efetuada adicionando-se a solução de prata à solução de cloreto. A quantidade de nitrato de prata (AgNO₃) deve ser suficiente para permitir a combinação de todos os cloretos da amostra com a prata adicionada.

Pereira (2001) não considera este método adequado para amostras de concreto, devido à pequena quantidade de cloretos a serem determinados. Porém, Calçada (2004) citou a aplicação deste método em amostras de concreto e se obteve bons resultados, mas afirma ser um método trabalhoso.

E, ainda segundo Garcia (2008), outro problema deste método é que o precipitado obtido deve ser puro ou quase puro, pois se outros íons que formam precipitados estiverem presentes, ocorrerão erros nas determinações dos cloretos. Como no caso da adição de nitrato de prata (AgNO₃) às soluções contendo cloreto, por exemplo, outros produtos podem ser formados como AgCl_2^- ou AgCl_3 .

5.2 TITULOMETRIA

A Titulometria é a análise quantitativa realizada para determinar a concentração de uma solução conhecida, reagindo com a substância a ser determinada, mais conhecida como titulação. Para se encontrar uma concentração, a titulação é um procedimento analítico e, geralmente são realizadas medidas de volume, caracterizando as titulações volumétricas. Em alguns casos, porém, pode-se monitorar a variação gradual de outra grandeza, como a massa, caso das titulações gravimétricas, ou a absorção da luz, como nas titulações espectrofotométricas.

Esta análise permite dosar uma solução e determinar a sua quantidade por intermédio de outra solução de concentração conhecida, sendo que a solução padrão é a que se conhece como concentração, e a solução problema é a que se busca determinar. No caso dos cloretos, a solução adotada é, em geral, o nitrato de prata, devido às vantagens com relação ao composto formado, cloreto de prata. (CALÇADA, 2004)

As soluções envolvidas são: uma básica, uma ácida e um indicador ácido-base. A titulação é determinada pela ação do indicador

ácido-base. Os indicadores são substâncias que mudam de coloração na presença de ácidos ou de bases. Portanto, o ponto de equivalência entre as substâncias tituladas e titulante é obtido com o auxílio de um indicador que é escolhido em função da reação química envolvida. Os indicadores mais conhecidos são:

- fenolftaleína: solução que, em meio ácido se torna incolor e em meio básico, se torna rosa;
- papel tornassol vermelho: papel indicador que, em contato com ácido, se torna rosa, e com a base se torna azul; e
- alaranjado de metila: solução que, em meio ácido fica vermelha e em meio básico, fica amarela.

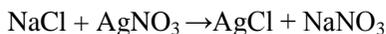
O indicador responde ao excesso de titulante mudando de cor, e este ponto é chamado de “ponto de viragem”. Conhecendo-se a reação que gera os produtos, é possível determinar a quantidade da substância analisada na solução, a partir do volume de titulante necessário para se atingir o ponto de viragem. (GARCIA, 2008)

Destacam-se dois métodos titulométricos, com ponto de equivalência indicado colorimetricamente, que são: de Mohr e o de Volhard. Em ambos os métodos, o nitrato de prata é utilizado como solução padrão de concentração conhecida. São extensivamente utilizados em análise de cloretos e foram desenvolvidos no século XVII, segundo Gaines, Parker e Gascho (1984, *apud* Pereira 2001). O método Mohr é a determinação direta do íon cloro e o método Volhard é a determinação indireta destes íons. (JEFFERY *et al.*, 1992)

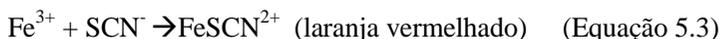
- Método de Mohr: os íons cloreto são titulados com solução padronizada de nitrato de prata (AgNO_3), na presença de cromato de potássio (K_2CrO_4) como indicador. O ponto final da titulação é identificado, quando todos os íons Ag^+ tiverem se depositado sob a forma de cloreto de prata (AgCl), ocorrendo à precipitação de cromato de prata (Ag_2CrO_4) de coloração marrom avermelhada (Equação 5.2), pois o cromato de prata é mais solúvel que o cloreto de prata. Portanto, esta titulação usa as diferenças nos valores dos produtos de solubilidade do cloreto de prata (AgCl) e do cromato de prata (Ag_2CrO_4) para a determinação do ponto final da titulação.

Este método torna-se inconveniente por exigir que a solução titulada tenha pH neutro para a reação do indicador com o nitrato de prata (AgNO_3), sendo esta a reação que indica o ponto de viragem. (CALÇADA, 2004)

Segundo Pereira (2001), este método não é recomendado para amostras que contém cimento, pois em casos de dissolução em água, a solução ficará altamente alcalina e, em casos de dissolução ácida, o pH é extremamente baixo.



- Método de Volhard: consiste na adição de nitrato de prata (AgNO_3) à solução a ser titulada em quantidade conhecida e onde todos os cloretos da amostra sejam combinados na formação de um precipitado de cloreto de prata (AgCl). A solução restante, depois de filtrada, é titulada contra tiocianato de amônio (NH_4SCN) em presença do indicador, que é uma solução saturada de sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). Obtendo-se a quantidade de nitrato de prata (AgNO_3) restante da reação com os cloretos, e o ponto de equivalência indicado pela coloração laranja-avermelhada quando da formação de tiocianato de ferro (FeSCN^{2+}), equação 5.3. (JEFFERY *et al.*, 1992)



Alguns autores afirmam que os métodos de Mohr e Volhard não apresentam bom grau de precisão, pois dependem da habilidade visual do operador para identificarem a mudança de cor do ponto de viragem. (GULIKERS, 2000; TRITTHART e CAVLEK, 2000)

5.3 POTENCIOMETRIA

O objetivo de uma medição potenciométrica é obter informações sobre a composição de uma solução mediante ao potencial que aparece entre dois eletrodos. A medição do potencial se determina mediante condições reversíveis, de forma termodinâmica, e isto implica no tempo suficiente para alcançar o equilíbrio, extraíndo a mínima quantidade de intensidade, para não influenciar sobre o equilíbrio que se estabelece entre a membrana e a solução da amostra. (PONTES, 2006)

O eletrodo deve ser aquele em que seu potencial dependa da atividade do íon a ser analisado, enquanto que o eletrodo de referência possui um potencial fixo e conhecido. (GARCIA 2008)

O eletrodo indicador é um eletrodo sensível à espécie iônica interessada que, quando imerso na solução de estudo, responde assumindo um potencial em função da atividade daquela espécie iônica. O eletrodo de referência é um eletrodo com potencial constante conhecido.

Portanto, os métodos potenciométricos de análise baseiam-se na medida do potencial de uma célula eletroquímica na ausência de corrente (método estático) e, para isto são utilizados dois eletrodos – um chamado eletrodo indicador e outro chamado eletrodo de referência – e um dispositivo para leitura do potencial. Há dois métodos de potenciometria, que são: a potenciometria direta e a titulação potenciométrica, sendo o último uma combinação de titulometria e potenciometria.

5.3.1 Potenciometria direta

Este é o método mais rápido para se determinar o teor de cloretos em amostras de concreto, além de ser o processo que utiliza uma única medida do potencial de eletrodo para determinar a concentração de uma espécie iônica em solução.

A potenciometria direta determina a concentração do íon ativo simplesmente medindo a força eletromotriz da célula em condições que permitam conhecer o seu valor exato. Desta exatidão dependerá a precisão dos resultados analíticos. O potencial do eletrodo indicador é medido inicialmente em soluções padrão da espécie química a ser determinada. Comparando-se a medição do potencial em amostras com os dados das soluções padrões, é possível avaliar a concentração da amostra.

Segundo Dühr *et al.* (1990, *apud* Calçada 2004), os eletrodos indicadores apresentam uma grande sensibilidade de resposta e, portanto, permitem a aplicação da potenciometria direta em soluções muito diluídas (abaixo de 10^{-4} mol/L). Além disto, muitos eletrodos indicadores são altamente seletivos. Este método é muito preciso, podendo chegar até 5×10^{-5} mol/litro, em torno de 1,5 ppm (partes por milhão).

Segundo Garcia (2008), para a análise dos cloretos, o eletrodo adotado é o seletivo de íons cloreto. Este eletrodo é sensível à atividade

dos íons cloreto, e, a partir de uma curva de calibração obtida com concentrações conhecidas de cloretos, pode-se determinar a concentração de uma amostra por meio de uma única leitura de potencial. Muitos autores afirmam que este método é o mais rápido para a determinação do teor de cloretos em amostras de concreto, além de apresentar boa confiabilidade e ser de fácil execução.

5.3.2 Titulação potenciométrica

Na titulação potenciométrica, também chamada de potencimetria relativa, mede-se a força eletromotriz da célula no curso da titulação. As titulações apresentam variações bruscas de concentração nas imediações do ponto de equivalência, o que provoca uma variação brusca no potencial do eletrodo indicador e, portanto, também na força eletromotriz da célula.

A titulação potenciométrica é uma técnica de localização do ponto final na análise volumétrica, aplicando um eletrodo indicador para a espécie desejada. São realizadas sucessivas medições da força eletromotriz da célula, sendo estas realizadas após a adição de certo volume de solução titulante.

A seguir, relacionam-se estes potenciais com o volume de solução titulante consumida. As medições realizadas no decorrer da titulação potenciométrica são relativas e informam sobre as variações ocorridas no potencial da célula. Através delas, pode-se estabelecer com precisão o ponto de equivalência que determinará a concentração da espécie analisada. (HARRIS, 2000)

Segundo Calçada (2004), este método determina o ponto final da titulação, utilizando um conjunto de eletrodos composto por um eletrodo de referência, com potencial conhecido e fixo e um eletrodo de prata/cloreto de prata, com potencial variável devido à concentração iônica da solução titulada. No decorrer do ensaio, a cada adição de nitrato de prata, lê-se o potencial entre os eletrodos. O ponto de equivalência corresponde à inflexão da curva, gerada pelo volume total de nitrato adicionado e a respectiva leitura de potencial (Figura 5.1), sendo a maior relação entre a variação de potencial e a adição da solução de nitrato de prata. Conhecido o volume total de titulante correspondente a este ponto, pode-se determinar o teor de cloretos da amostra.

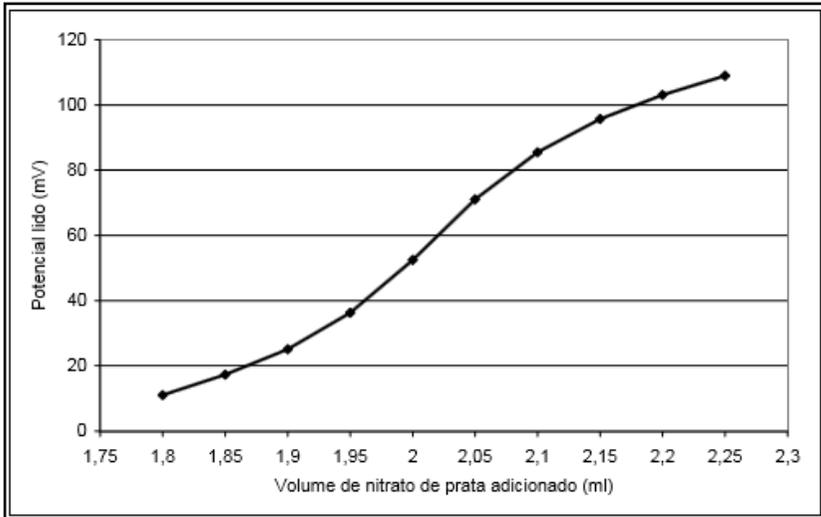


Figura 5.1 – Curva de titulação para determinação do teor de cloretos no concreto por titulação potenciométrica

Fonte: Calçada (2004).

O ponto final de uma titulação pode ser fixado pelo exame da curva de titulação e pelas curvas das derivadas. Existem ocasiões, no entanto, em que pode ser útil um método de detecção elétrico simples e independente de gráficos, especialmente quando se fazem determinações de rotina. Nestes procedimentos, não se usa a combinação normal do eletrodo de referência com o eletrodo indicador, e não há registro contínuo dos valores da força eletromotriz durante a titulação.

Conforme Harris (2000), para uma maior exatidão na determinação do ponto final, empregam-se métodos geométricos para a sua determinação. São eles: o método das bissetrizes, o método das tangentes paralelas e o método dos círculos tangentes. A menos que a curva tenha sido plotada automaticamente, a exatidão dos resultados de qualquer destes métodos dependerá da habilidade com que a curva de titulação tiver sido desenhada pelos pontos plotados no gráfico, a partir das observações experimentais. Por isto, é usualmente preferível empregar métodos analíticos para localizar o ponto final, conforme o gráfico a seguir, colocado na Figura 5.2.

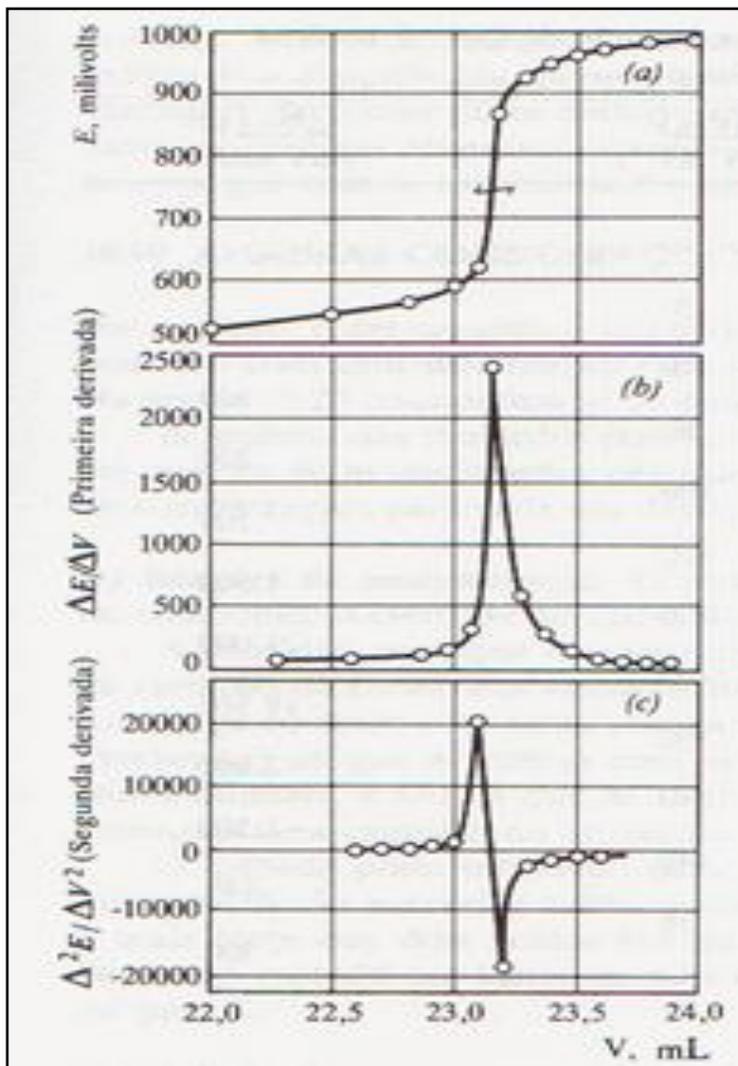


Figura 5.2 – Determinação gráfica do ponto de equivalência

Fonte: Harris, (2000).

Este método é o mais preciso para a determinação do teor de cloretos em amostras contendo cimento, não sendo influenciado pela habilidade do operador. E, ainda segundo Tritthart e Cavlek (2000) e Pereira (2001), este método possui muitas vantagens, como: não exige

pH neutro; é realizado em qualquer meio; tem baixo custo; é relativamente rápido se comparado aos outros métodos; e não depende do valor absoluto do potencial, mas das diferenças entre cada volume de titulante adicionado.

Porém, Calçada (2004) alerta para a demora no procedimento de titulação devido à dificuldade de estabilização das leituras de potencial. Este método é preconizado pela ASTM C 114 (1994), para a determinação do teor de cloretos em amostras de cimento e indicada pela ASTM C 1152 (1994) para a argamassa e concreto.

5.4 MÉTODOS MICROANALÍTICOS

Há dois métodos microanalíticos descritos na literatura que determinam o teor de cloretos em amostras de concreto, que são: espectrometria de fluorescência X e cromatografia iônica líquida. Porém, estes métodos não são muito utilizados, pois exigem equipamentos bastante sofisticados e com elevado custo. Segue a descrição destes métodos:

- Espectrometria de Fluorescência X: são ensaiadas amostras de concreto em pó e há a necessidade de ensaiar amostras padrão, com conhecido teor de cloretos para definir as curvas de calibração. Este método consiste em incidir um feixe de raios X sobre a amostra, absorvendo e modificando as características de seus elementos químicos constituintes. Diagramas com picos característicos dos elementos químicos são gerados, a partir da análise dos raios X transformados pela amostra. A comparação entre a intensidade destes picos com a dos picos das amostras padrão, permite determinar o teor de cloretos da amostra. (CALÇADA 2004)

Segundo Dhir *et al.* (1990), este método aplica-se na determinação de cloretos totais, pois elimina o procedimento de extração dos cloretos. Ainda de acordo com o autor, esta é a maior vantagem do método, já que em suas pesquisas, este método foi o que resultou em teores de cloretos mais próximos do total adicionado à amostra. Isto se dá devido à ineficiência dos métodos de extração ácida de cloretos do concreto em liberar os íons fixados à matriz.

- Cromatografia iônica líquida: os cloretos são extraídos das amostras e a análise é feita com a solução resultante deste processo. Segundo Vogel (1992, *apud* Calçada 2004), este é um procedimento físico-químico baseado na separação dos cloretos da amostra, por meio do contato da mesma com uma resina que possua íons livres capazes de fixar somente os íons cloro da solução em análise separado da solução original. A liberação dos cloretos na amostra padrão se dá com o uso do solvente. A determinação do conteúdo de cloretos da amostra é obtida pela análise da condutividade desta solução.

5.5 ANÁLISE DOS MÉTODOS DISPONÍVEIS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS NO CONCRETO

Vários pesquisadores realizaram trabalhos científicos adotando algumas das técnicas citadas anteriormente, a fim de avaliar o desempenho destas para a determinação do teor de cloretos em amostras de concreto. E, alguns autores como Dhir *et al.* (1990), Tritthart e Calvek (2000), entre outros, concluíram que os resultados são conflitantes, pois certos métodos foram adequados em alguns trabalhos e inadequados em outros.

Em estudo realizado por Tritthart e Calvek (2000), aplicando o método de Volhard em amostras de igual material enviadas a 16 laboratórios austríacos, foi observado uma grande variabilidade nos resultados entre os diferentes laboratórios. Sendo assim, estes autores sugerem o emprego do método de titulação potenciométrica, pois são ensaios precisos e de fácil execução.

Muitos pesquisadores atribuem grande parte da variabilidade dos resultados obtidos nos ensaios, à falta de cuidado na extração dos cloretos da amostra.

O Comitê Técnico RILEM TC 178 – TMC (2002) realizou um estudo interlaboratorial, envolvendo instituições de vários países. Com o objetivo de extrair os cloretos solúveis em ácido, foram sugeridos dois procedimentos diferentes para esta extração e cinco métodos de análise das amostras obtidas. No Brasil, os laboratórios que participaram das análises foram: O Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e o Departamento de construção Civil da Universidade de São Paulo. Cada laboratório empregou o seu método de preferência, mostrando a importância do treinamento para a realização destes testes. Este estudo

interlaboratorial identificou o método de Volhard e o da titulação potenciométrica, indicados para a determinação do teor de cloretos em concreto.

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo apresenta o programa experimental adotado neste estudo, com o intuito de verificar a taxa de deposição de cloretos e o avanço do aerosol marinho em direção ao continente.

Este estudo foi realizado na região norte de Santa Catarina, na ilha de São Francisco do Sul, mais especificamente na Praia Grande, situada a sudeste da Ilha, como pode ser observado no mapa (Figura 6.1).



Figura 6.1 – Mapa de São Francisco do Sul
Fonte: Autora da pesquisa.

A escolha deste local para o estudo teve como base o fato de ser uma região totalmente livre de edificações (Figura 6.2). Os obstáculos encontrados no local são as vegetações de tipos e tamanhos diferenciados (Figura 6.3), porém considerado local com baixa influência de obstáculos.

O mar, em determinadas épocas, apresenta intensa arrebentação das ondas, provocando uma concentração maior de névoa salina. Está voltada para os ventos de leste a sudeste na região, podendo ocasionar maior avanço do aerossol marinho no continente adentro, ou seja, a intensidade do vento pode transportar o aerossol por distâncias maiores, partindo do mar com direção ao continente.



Figura 6.2 – Local de estudo livre de edificações

Fonte: Autora da pesquisa.



Figura 6.3 – Vegetação do local de estudo

Fonte: Autora da pesquisa.

O objetivo desta pesquisa, portanto, foi avaliar o efeito do distanciamento em relação ao mar quanto à agressividade nas estruturas de concreto armado devido aos teores de cloretos da névoa salina e, para isto, estações de monitoramento foram instaladas paralelas à direção dos ventos e com diversos afastamentos do mar.

Nas estações de monitoramento serão avaliados os teores de cloretos do aerosol marinho, que leva em consideração o aparato de vela úmida, medindo estes teores por meio da água e também o quanto estes cloretos penetram no concreto, através de prismas de concreto exposto ao ambiente de atmosfera marinha, a fim de verificar o ingresso de cloretos com relação ao afastamento do mar e ao longo do tempo de exposição.

O programa experimental será dividido em três etapas paralelas:

- Caracterização dos materiais: ensaios realizados nos agregados e no concreto utilizado;
- Monitoramento ambiental: foco na deposição de cloretos oriundos da névoa salina e nos parâmetros climatológicos; e
- Estudo do ingresso de cloretos em concretos expostos em ambiente de atmosfera marinha: devido à exposição de prismas de concreto ao ambiente marinho a diversas distâncias do mar.

6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios de caracterização dos materiais se referem aos insumos do concreto: agregados e cimento. As características físicas e químicas do cimento utilizado (CP IV-32 Votorantim) nos prismas de concreto foram obtidas pelo fabricante deste material através de laudo.

Cabe aqui, identificar os procedimentos empregados já normalizados e não detalhá-los, conforme Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Ensaios de caracterização de materiais

Material	Propriedade	Norma
Agregado Miúdo	Propriedades físicas	NBRs 7251, 9776, NM 248
	Impurezas e Contaminação	NBRs 7218, 7219, NM 49
Agregado Graúdo	Propriedades físicas	NBRs 7217, 7251
	Impurezas e Contaminações	NBRs 7218, 7219, NM 46
Concreto	Consistência	NBR 7323
	Massa específica(estado fresco)	NBR 9833
	Resistência à compressão	NBR 5739
	Absorção Total	NBR 9778
	Absorção Capilar	NBR 9779

Fonte: Autora da pesquisa.

6.2 MONITORAMENTO AMBIENTAL

A etapa de monitoramento ambiental realizada neste estudo teve como objetivo identificar as condições ambientais da região. Avaliar a deposição de cloretos gerada pela névoa salina e analisar os perfis de concreto expostos na região de São Francisco do Sul, no Estado de Santa Catarina.

As variáveis envolvidas nesta etapa foram subdivididas em: aquela relacionada à presença do agente agressivo no ar e aquela relacionada aos dados climatológicos.

6.2.1 Monitoramento da taxa de deposição de cloretos da névoa salina

A deposição de cloretos foi monitorada com o auxílio do aparato de vela úmida, de acordo com a NBR 6211 (2001). A determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida também pode ser disciplinado pela ASTM G 140 (1996) e não apresentam diferenças significativas com relação à NBR 6211 (2001).

A coleta de cloretos presente na atmosfera pelo método da vela úmida, conforme determina a NBR 6211 (2001) consiste na preparação da vela e aparato de sustentação, exposição e recolhimento das amostras, cujos procedimentos foram realizados em ambientes isento de contaminantes para a preservação e a validação do ensaio.

a) Preparação da vela úmida

A vela úmida, de acordo com recomendação normativa, deve ser constituída de um frasco coletor de material inerte – vidro ou polietileno – com aproximadamente 800 ml de capacidade, sobre o qual é fixado um tarugo cilíndrico também de material inerte com 2,5 cm de diâmetro e altura total de 15 cm. É envolvido com dupla camada de gaze cirúrgica, cuja área exposta da gaze à atmosfera é de aproximadamente 117 cm². No frasco coletor contém aproximadamente 200 ml de água destilada, isenta de cloretos, vedado por uma rolha de borracha que possui dois orifícios aos quais são inseridos tubos para passagem dos extremos das gazes que ficam embebidos na água, conforme visualizado na Figura 6.4.

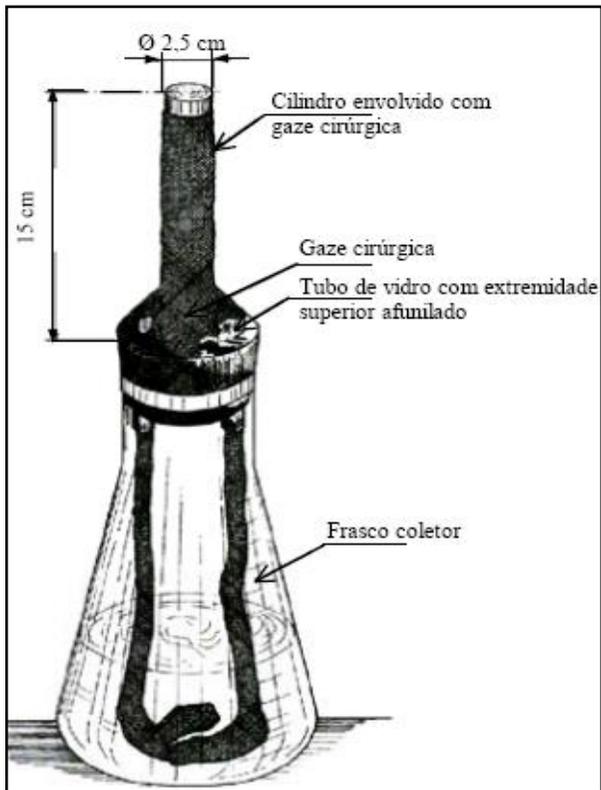


Figura 6.4 – Vela úmida ABNT NBR 6211, 2001

Fonte: ABNT 6211 (2001).

No primeiro mês de monitoramento, utilizou-se 200 ml de água destilada no frasco coletor, conforme NBR 6211 (2001). Porém na coleta das amostras (após 30 dias), percebeu-se uma redução significativa na quantidade do líquido, devido à evaporação, tornando a amostra insuficiente para os ensaios. Sendo assim, foi necessário aumentar a quantidade de água no frasco para 400 ml, e obteve-se amostra satisfatória para a realização dos ensaios.

Após a montagem das velas úmidas (no total de sete velas), as mesmas foram vedadas com saco plástico, visando protegê-las de contaminantes durante o percurso até as estações de monitoramento.

Foram identificadas e acondicionadas em caixa para transporte, dispostas em campo, conforme pode ser observado na Figura 6.5,

permanecendo por 30 dias. Uma das velas permaneceu armazenada em local isento de cloretos para realização do ensaio em branco, que serve de referência para os demais ensaios. As outras seis velas foram expostas em campo num mesmo dia para que todos os experimentos estivessem sob as mesmas condições climáticas durante o período de exposição.



Figura 6.5 – Vela úmida exposta a ambiente marinho

Fonte: Autora da pesquisa.

b) Aparato de sustentação da vela úmida

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

estrutura da cobertura é 20 cm. O suporte para a vela úmida foi confeccionado, levando em conta as recomendações normativas e materiais resistentes durante o período de exposição.

Para inibir a presença de curiosos, foram colocadas placas de “Perigo!”, a fim de evitar extravios e danos ao experimento. As dimensões normativas para o aparato da vela úmida podem ser visualizadas na Figura 6.6, a seguir.

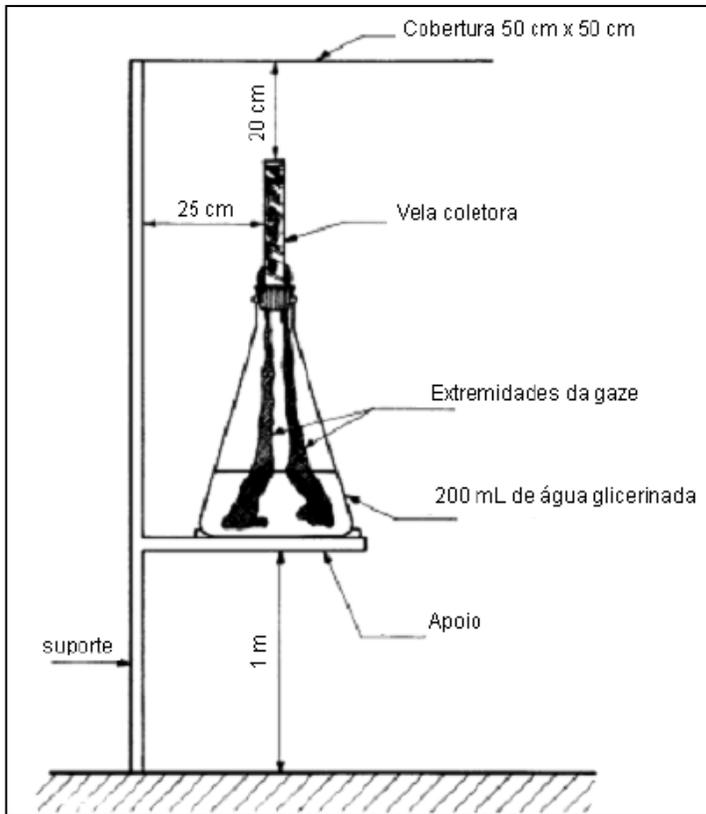


Figura 6.6 – Aparato vela úmida

Fonte: NBR 6211 (2001).

O aparato de sustentação adotado neste estudo seguiu as dimensões especificadas pela NBR 6211 (2001). A altura da base ao solo, porém, tiveram variações, devido à altura da vegetação em torno do aparato.

Nos primeiros 400 metros a altura ficou em 1,30 metros, pois apresentava vegetação rasteira que atingia no máximo 1,5 metros de altura, mas com raio de afastamento superior a 3 metros. Já os aparatos com 650 e 1100 metros afastados do mar, ficaram com alturas de 2,0 metros, com o intuito de posicionar acima da vegetação, mas não foi o suficiente devido à presença de árvores de grande porte naquele local. Assim, os dois aparatos mais afastados do mar não ficaram livres de obstáculos como os demais, conforme visualizado na Figura 6.7. Neste caso, a condição ideal seria elevar a base do aparato acima das árvores, mas devido à grande altura, dificultaria o acesso para a coleta mensal da vela úmida. A variação de altura nos aparatos de vela úmida foi possível, pois conforme estudos mostrados no subitem 2.3.3, percebe-se uma redução brusca na concentração salina a partir de três metros de altura em relação ao nível do mar.



Figura 6.7 – Aparato posicionado em torno de vegetação mais alta
Fonte: Autora da pesquisa.

c) Exposição e coleta das amostras

Foram instaladas seis estações de monitoramento, contendo um aparato de vela úmida com frasco de vidro em cada uma, posicionadas às distâncias de 50, 100, 200, 400, 650 e 1100 metros em relação ao mar. As quatro primeiras estações foram livres de obstáculos com vegetação rasteira e as duas últimas com presença de obstáculos (árvores de grande porte). As estações foram posicionadas no local de estudo em fevereiro/2011 e seu monitoramento ocorreu até junho/2012, com coletas mensais das amostras durante este período, a fim de se obter resultados em todas as estações do ano e avaliar o comportamento da deposição de cloretos neste período.

A Figura 6.8 mostra a estação afastada 50 metros do mar, enquanto que a Figura 6.9 mostra a estação distante 400 metros do mar.



Figura 6.8 – Aparato de vela úmida posicionado a 50m do mar

Fonte: Autora da pesquisa.



Figura 6.9 – Aparato de vela úmida posicionado a 400m do mar

Fonte: Autora da pesquisa.

Nos dois primeiros meses de monitoramento ocorreram vários transtornos nas primeiras estações em função de vandalismo, como: danos no aparato de sustentação e furtos das velas. Apesar das estações terem sido instaladas em terreno particular cedido por uma empresa de São Francisco do Sul, ainda assim ocorreram muitos danos nas estações, e também por se tratar de uma região litorânea extensa e totalmente deserta, com circulação basicamente de pescadores.

A primeira estação foi instalada inicialmente a 10 metros do mar, mas devido aos danos causados nos dois primeiros meses, foi reinstalada a 50 metros do mar em área protegida. Algumas velas foram danificadas, como nas estações de 100 e 200 metros do mar no segundo mês, comprometendo os resultados.

As estações de monitoramento ficaram protegidas a partir do terceiro mês de exposição, quando a empresa proprietária do terreno isolou o acesso que ficava na beira mar. Minimizando assim, o problema de perdas de resultados em determinadas estações como estava ocorrendo anteriormente.

As amostras coletadas mensalmente foram encaminhadas ao IP – Instituto de Pesquisas Químicas – na cidade de Joinville, para a determinação do teor de cloretos contido em cada amostra. Este laboratório aplicou o método da Volumetria de Mohr, por ser de uso habitual do mesmo e possuir pessoal qualificado para realização deste ensaio. Porém, este método para baixas concentrações pode ocorrer uma significativa variabilidade, devido a maior dificuldade de identificar o exato ponto de viragem, conforme já citado no subitem 5.1.

As estações foram nomeadas de acordo com o afastamento do mar, sendo estações de 50, 100, 200, 400, 650 e 1100 metros, usadas como referência nas citações de afastamentos das mesmas. Na Tabela 6.2 abaixo, estão indicadas as estações de referência e seu afastamento real do mar, bem como as coordenadas geográficas correspondentes.

Tabela 6.2 – Coordenadas das estações de monitoramento da névoa salina

Estação	Latitude	Longitude	Distância do mar
E50	26°19'15,50''S	48°33'7,24''O	46 m
E100	26°19'14,26''S	48°33'10,10''O	105 m
E200	26°19'11,15''S	48°33'11,40''O	196 m
E400	26°19',10,86''S	48°33'21,17''O	415 m
E650	26°19'8,30''S	48°33'45,70''O	658 m
E1100	26°19'6,98''S	48°33'31,20''O	1125 m

Fonte: Autora da pesquisa.

Na Figura 6.10 a seguir, pode-se ter uma visualização aérea do local de estudo e que retrata o já citado anteriormente: um local desabitado, livre de obstáculos como edificações e variação na vegetação. Assim, as estações foram posicionadas em locais abertos e

com a presença de vegetação rasteira, nomeadas como E50, E100, E200, E400, E650 e E1100.

As coletas de cada estação foram efetuadas mensalmente durante o período de fevereiro/2011 a junho/2012, porém nos dois primeiros meses os resultados ficaram comprometidos devido ao extravio de amostras.



Figura 6.10 – Posicionamento das estações de monitoramento no terreno em estudo

Fonte: Google Earth.

6.2.2 Monitoramento dos dados climatológicos

As variáveis relacionadas à climatologia são:

- temperatura;
- umidade relativa do ar;
- precipitação;
- intensidade e direção dos ventos.

Os dados climatológicos utilizados na análise deste estudo foram fornecidos pela EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A. – e referem-se à estação de São

Francisco do Sul/Santa Catarina, com a latitude de 26°13' 58" e a longitude de 48°31'55" e com uma altitude de 12 metros com relação ao nível do mar. A estação da EPAGRI de São Francisco do Sul recebe os ventos das direções sul e sudeste, totalmente livres de obstáculos e está situada próxima do local em estudo.

Em se tratando de características ambientais, é comum a relação entre as variáveis temperatura e umidade. E também tem relação direta no processo de transporte dos cloretos no concreto, pois a variação da temperatura acelera ou retarda o transporte, bem como a umidade relativa indica a presença de água nos poros do concreto.

A precipitação tem relação com o aumento da saturação superficial após as chuvas ou com a diminuição da concentração superficial de cloretos no concreto.

A intensidade e direção dos ventos são variáveis de fundamental importância nas análises deste estudo, pois tem relação com a formação e com o transporte da névoa salina com direção ao continente.

6.3 ESTUDO DO TRANSPORTE DE CLORETOS EM CONCRETOS EXPOSTOS EM AMBIENTE DE ATMOSFERA MARINHA

Esta etapa do estudo teve por objetivo avaliar o comportamento do ingresso de cloretos em estruturas de concreto, que comumente são utilizados na região de São Francisco do Sul, expostas ao ambiente de atmosfera marinha, levando-se em consideração o afastamento destas estruturas com relação ao mar. Para esta avaliação, prismas de concreto foram expostos ao ambiente de atmosfera marinha com diferentes afastamentos do mar e acompanhando sua evolução ao longo do tempo.

Três prismas foram posicionados junto a cada estação de monitoramento ambiental em abril/2011, estando a um metro de altura em relação ao solo para não receber influência da umidade do solo e sendo recolhidos em períodos diferentes, como: o primeiro de cada estação aos 06 meses; o segundo aos 09 meses; e o terceiro aos 18 meses de exposição para a extração das amostras e determinação dos teores de cloretos.

O concreto utilizado na confecção dos prismas foi fornecido por uma usina de concreto da cidade de Joinville que fornece concreto para toda a região de São Francisco do Sul, dosado em caminhão betoneira com resistência característica (f_{ck}) de 30 MPa.

Adotou-se este concreto para que o estudo do ingresso de cloretos fosse compatível com o especificado pela NBR 6118 (2007) para regiões de ambientes marinhos, onde é classe de agressividade III e, principalmente, por se tratar do concreto mais utilizado nas estruturas de concreto na região litorânea de São Francisco do Sul.

Os concretos, quando dosados em laboratório, são produzidos com alguns parâmetros diferentes dos produzidos em caminhões betoneira, como: tempo de mistura, condições de transporte, tempo entre a mistura e a descarga, perda de água por evaporação, relação água/cimento, entre outros. Estes fatores podem alterar significativamente as propriedades do concreto, como por exemplo, a imprecisão na determinação da relação água/cimento em caminhão betoneira.

6.3.1 Preparação dos prismas

Para avaliar o teor de cloretos no concreto foram moldados 21 prismas de concreto com dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm, sendo expostos três prismas em cada estação de monitoramento ambiental e outros três reservados em local seco e livre de qualquer contaminação para os ensaios em branco, ou seja, para identificar a quantidade de cloretos que o material já continha antes de ser exposto ao ambiente marinho.

Além disto, seis corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm foram moldados para a avaliação da resistência do concreto aos 7 e aos 28 dias, e mais seis corpos de prova para os ensaios de absorção, seguindo a NBR 9778 (1986) e a NBR 9779 (1995).

Os prismas foram moldados na obra, utilizando-se a fôrma de chapa de compensado plastificado (Figura 6.11), concretado com f_{ck} de 30 Mpa e produzido em caminhão betoneira, ambos doados pela Construtora Momento Engenharia Ltda de Joinville/SC.

As fôrmas dos prismas foram preenchidas com concreto, primeiro até a metade de sua altura, fazendo-se o adensamento com vibrador de imersão; e em seguida completando a fôrma e dando acabamento superficial no concreto, conforme orientação da NBR 5738 (2003). Na sequência, aplicando os mesmos procedimentos, foram preenchidas as fôrmas metálicas dos corpos-de-prova cilíndricos utilizados nos ensaios de resistência à compressão.



Figura 6.11 – Fôrma de compensado plastificado para moldagem dos prismas

Fonte: Autora da pesquisa.

Antes do lançamento do concreto nas fôrmas, foi realizado o teste de abatimento (*slump*) para a verificação da quantidade de água do concreto, e este foi de 15 cm, atendendo as especificações do concreto utilizado para *slump* de 14 + -2cm.

Os prismas foram desmoldados após 72 horas e conduzidos a um tanque com água na própria obra onde sofreram cura úmida até o sétimo dia.

Após o período de cura úmida, os prismas receberam um tratamento prévio de impermeabilização, antes de serem expostos ao ambiente marinho nas faces expostas não trabalhadas, sendo três faces laterais, de topo e de fundo dos prismas. Estas faces foram impermeabilizadas com uma argamassa polimérica bicomponente e semiflexível, da marca DENVER (DENVERTEC 100) à base de cimento e agregados com polímeros acrílicos, formando um revestimento impermeável. Foram aplicadas três demãos cruzadas do produto misturado e sobre o substrato úmido, esperando a secagem entre as demãos de no mínimo duas horas. O objetivo deste procedimento foi evitar o ingresso dos cloretos por outras faces que não a frontal, onde foram coletadas as amostras de pó para os ensaios. Adotou-se este produto por se tratar de um material de uso comum na região e também na construção civil, para a impermeabilização de estruturas de concreto.

Concluído este processo, os prismas foram expostos à atmosfera marinha nas estações de monitoramento, sendo três prismas em cada estação. A cura dos prismas com sete dias foi adotada, devido ao fato de ser o período mínimo de cura recomendado pela NBR 6118 (2007) para construções de concreto armado e, principalmente, por representar as condições reais na execução destas estruturas de concreto.

6.3.2 Extração das amostras

Os prismas foram coletados das estações de monitoramento ao final de cada período de exposição (6, 9 e 18 meses) e levados a um local livre de cloretos para a extração das amostras, devidamente identificados, como pode ser visualizado na Figura 6.12.



Figura 6.12 – Coleta e identificação dos prismas

Fonte: Autora da pesquisa.

O último prisma de cada estação foi coletado aos 18 meses, ficando exposto por um período maior, até outubro/2012, enquanto a última amostra de vela úmida foi coletada em junho/2012, conforme solicitação do proprietário do terreno.

As amostras foram extraídas da face frontal do prisma, face voltada para o mar e não impermeabilizada, extraída de forma pulverulenta. Para isto, foi necessário utilizar alguns equipamentos, como: uma perfuratriz de concreto da marca Merax e disco de corte diamantado com diâmetro de 50 mm; uma cortadora de parede da marca Makita com disco de corte diamantado de 125 mm; e um compressor de ar.

Inicialmente, na face frontal dos prismas, foram traçadas linhas de referência para demarcar a posição dos pontos de coleta, iguais em todos os prismas. Foram escolhidos dois pontos centrais de cada prisma e retirados dois testemunhos com diâmetro de 50 mm cada, utilizando a perfuratriz de concreto para esta extração, conforme a Figura 6.13 e a 6.14.



Figura 6.13 – Posição dos testemunhos no prisma

Fonte: Autora da pesquisa.



Figura 6.14 – Testemunhos para a extração das amostras

Fonte: Autora da pesquisa.

Na sequência, foram coletadas as amostras de pó do concreto dos testemunhos retirados dos prismas. Primeiramente, realizou-se a extração superficial da amostra, utilizando a cortadora de parede com baixa rotação, provocando uma raspagem na superfície com aproximadamente 2 mm de profundidade. Após, foram realizadas as extrações do concreto, nas seguintes profundidades em relação à superfície: 10, 20 e 35 mm, a fim de traçar o perfil de penetração dos cloretos, devido a profundidade. Estas amostras foram coletadas através da cortadora de parede, mas utilizando a função lateral do disco de corte, provocando um desgaste nos testemunhos e, assim, extraindo o pó do concreto.

Na extração de cada amostra, a cortadora e o disco de corte foram limpos por um compressor de ar, que retirou todo o pó retido no interior da máquina e evitou a contaminação entre as amostras.

Para evitar a dispersão do pó coletado, foi instalada, junto à cortadora, uma proteção plástica transparente no orifício de saída da mesma e foi adaptada uma caixa coletora de papelão na área de corte do disco para coletar o pó espalhado por ele, conforme a Figura 6.15. Após o término de desgaste de cada amostra, o pó coletado foi armazenado em saco plástico e vedado, para não extraviar e nem contaminar o mesmo. Foi utilizado um saco plástico limpo para cada amostra e identificados de acordo com cada prisma e seu tempo de exposição.



Figura 6.15 – Adaptação da cortadora de parede para coletar o pó de concreto

Fonte: Autora da pesquisa.

As amostras continham em torno de 40 gramas de pó de concreto, exceto as de superfície que atingiram em torno de 25 gramas. A quantidade extraída foi determinada em função da necessidade do laboratório para a realização dos ensaios.

As amostras foram encaminhadas ao laboratório de análises químicas – Central de Análises Químicas da UFSC – para a realização dos ensaios. O método utilizado foi o de Potenciometria, por ser o método conhecido e aplicado neste laboratório para a avaliação de cloretos no concreto.

6.4 DETERMINAÇÕES DOS TEORES DE CLORETOS

6.4.1 Método de determinação do teor de cloreto proveniente da vela úmida

As velas úmidas, ao serem coletadas mensalmente, foram devidamente lacradas, identificadas e encaminhadas ao Instituto de Pesquisas Químicas para a análise do teor de cloretos das amostras. Para tal análise, optou-se por utilizar o método volumétrico de Mohr, que

determina o teor de cloretos solúveis em água, onde o nitrato de prata é utilizado como solução padrão. Este é o método utilizado pelo Instituto de Pesquisas Químicas – IP, da cidade de Joinville, para a realização de ensaios desta procedência. As amostras foram preparadas e os ensaios realizados de acordo com a NBR 6211 (2001). Conforme descrito no item 5.2, a inconveniência deste método é a necessidade da solução titulada ter pH neutro.

a) Equipamentos utilizados:

- bureta 50ml;
- erlenmeyer 250ml;
- becker de vidro;
- pinça; e
- peagômetro.

b) Procedimentos e reagentes utilizados:

Primeiramente, é necessário preparar e padronizar a solução de nitrato de prata a ser utilizada na titulação das amostras: pesa-se a massa de reagente de nitrato de prata (AgNO_3), que deve ter sido previamente seca em estufa a $150\text{ }^\circ\text{C}$ por duas horas, necessita-se de 250 ml de solução de 0,1 ml/L. Para a padronização, utiliza-se 0,17 g de NaCl em um erlenmeyer, com adição de água e 1 ml de cromato de potássio a 5% como indicador.

A gaze cirúrgica da vela úmida foi desenrolada com uma pinça esterilizada e colocada num becker de vidro com adição de 200 ml de água destilada para lavagem da mesma. A água existente no frasco coletor e também as águas provenientes de lavagem da gaze e do frasco foram reservadas para análise.

Separa-se inicialmente 50 ml da água de lavagem para a verificação do seu pH, que deve estar entre 7 e 10. Para tal, utiliza-se o peagômetro por aproximadamente 30 minutos para calibrá-lo e, assim, medir o pH da amostra. Se o pH for menor que o indicado, deve ser ajustado, adicionando-se lentamente a solução de hidróxido de sódio (NaOH) para elevá-lo ou a solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) para diminuí-lo. Muitas amostras necessitaram de calibração em seu pH para que as mesmas fossem tituladas.

Para determinar o teor de cloreto, é necessário dispor de uma alíquota de 50 ml da solução com pH ajustado em uma proveta, adicionando 3 gotas de fenolftaleína e em seguida gotas de hidróxido de

sódio (NaOH) até que a solução apresente a cor rosa. Este procedimento foi realizado em todas as amostras coletadas em campo e na amostra em branco, deixando as amostras prontas para a titulação. Coloca-se esta solução num erlenmeyer sobre um agitador para que seja efetuada a titulação, que é feita adicionando-se gota a gota da solução de nitrato de prata (AgNO_3 a 0,0141 N) na amostra até que a cor marrom avermelhada apareça e se mantenha firme, indicando o fim da titulação.

A titulação foi iniciada pela amostra em branco que será utilizada como indicadora para as demais. Sua solução deve ser colocada num erlenmeyer e corrigida através da adição de 0,5 g de carbonato de cálcio (CaCO_3) e 1 ml do indicador a um volume de água igual ao volume final da titulação, que é o somatório de 50 ml da alíquota mais a solução de nitrato de prata (AgNO_3) que foi adicionada para titulação da amostra. A correção do branco não deve ser muito maior que 0,1 ml e este valor deve ser deduzido do volume gasto na titulação.

De posse da titulação do coletor branco como referência, determinou-se o teor de cloreto das demais amostras coletadas, titulando-as como recomendado anteriormente. O volume da solução de nitrato de prata (AgNO_3) gasto para a titulação das alíquotas extraídas de cada amostra foi utilizado para calcular-se a concentração de cloreto.

Utiliza-se a fórmula seguinte para que seja determinado o teor de cloreto existente em cada amostra, equação 6.1:

$$\text{Cloreto (mg/l)} = ((V_a - V_b) \cdot N \cdot 35500) / (V_{am}) \quad (\text{Equação 6.1})$$

Onde:

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

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

N = normalidade da solução de nitrato de prata usada;

V_{am} = volume da amostra, em mililitros.

Determinado o teor de cloreto de cada amostra de vela úmida, calcula-se a taxa de deposição diária de cloretos sobre a superfície conhecida para cada estação de monitoramento, equação 6.2:

$$\text{Cloretos (mg/m}^2\text{.d)} = (\text{Cloretos (mg/l)} \cdot \text{VT}) / (\text{A} \cdot \text{t}) \quad (\text{Equação 6.2})$$

Onde:

VT = volume total da amostra, em litros;

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

t = tempo de exposição, em dias.

A área de exposição da gaze é determinada pela expressão, equação 6.3:

$$A \text{ (m}^2\text{)} = \pi \cdot D \cdot L \quad (\text{Equação 6.3})$$

Onde:

D = diâmetro do tubo da vela úmida;

L = comprimento exposto do tubo.

6.4.2 Procedimento para extração dos cloretos no pó de concreto

As amostras de pó de concreto, após serem embaladas em sacos plásticos e vedadas, foram encaminhadas ao laboratório da Central de Análises Químicas da UFSC. O método utilizado pelo laboratório na realização dos ensaios foi o ASTM D512-12 (1981), titulação potenciométrica com eletrodos de íon seletivo como indicador para cloretos, com equipamentos aferidos previamente nos padrões primários.

Na análise do ingresso de cloretos no concreto foram utilizados os teores livres e totais dos íons em relação à massa de cimento e o procedimento de extração dos cloretos das amostras de concreto foi:

1. Secou-se a amostra por 24 horas em estufa a aproximadamente 105°C.
2. Pesou-se 20 gramas de amostra em becker de 250 ml, anotando-se a massa com precisão de 0,1 mg.
3. Adicionou-se 150 ml de água quente à 80°C.
4. Agitou-se a amostra por 15 minutos, mantendo nesta temperatura.
5. Após sonicou-se (ultrasom) por 15 minutos.

6. Filtrou-se a amostra em papel faixa rápida para balão volumétrico de 200 ml.
7. Neutralizou-se a amostra com HNO₃ diluído até pH 7.
8. Avolumou-se a seguir para 200 ml.

Para a análise de cloreto da amostra, foi utilizada alíquota de 100 ml da solução acima preparada. Após, adicionou-se 2 ml de solução ajustadora de força iônica (ISA). Na sequência, fez-se a leitura direta no equipamento, após o mesmo estar calibrado contra padrões de 3,54 ppm; 35,4 ppm e 354 ppm.

Segundo a Central de Análises Químicas (UFSC), a maior dificuldade encontrada por quem executa estes ensaios é a identificação do ponto de viragem das amostras, sendo um fator determinante na obtenção dos resultados. A dificuldade em reconhecer a tonalidade que indica a precipitação do cromato de prata pode induzir a variação dos resultados de teor de cloretos determinados através da potenciometria.

Com os valores de massa de cada amostra de concreto e os volumes de nitrato de prata referentes, calculou-se o teor de cloretos nos concretos, através da Equação 6.4.

$$Cl_{concreto}^- = \frac{(V_{médio} - V_{ol}) \cdot N \cdot Fc \cdot 35,450}{M_{média} \cdot 10,000} \quad (\text{Equação 6.4})$$

Onde:

$Cl_{concreto}^-$ = teor de íon cloreto em relação à massa de concreto, em %;

$V_{médio}$ = média entre os volumes de nitrato utilizado nas amostras, em mL;

V_{ol} = volume de titulação, em mL;

N = normalidade, que é a concentração do nitrato de prata equivalente a 0,01;

Fc = fator de correção;

$M_{média}$ = média entre as massas das amostras de concreto, em g.

Obtido o valor do teor de cloreto em relação à massa de concreto, e com outras variáveis intrínsecas ao traço e aos materiais do

concreto, determinou-se o teor de cloretos em relação à massa de cimento, como é geralmente expresso no meio científico. O teor de cloretos foi determinado para cada profundidade de amostra coletada, permitindo o traçado do perfil de penetração de cloretos no concreto, ou seja, teor de Cl^- versus profundidade. O teor de cloretos foi determinado através da Equação 6.2. (HELENE, 1993)

$$Cl_{cimento}^- = \frac{Cl_{concreto}^- \cdot \gamma_{concreto}}{C} \quad (\text{Equação 6.5})$$

Onde:

$Cl_{cimento}^-$ = teor de íon cloreto em relação à massa de cimento, em %;

$Cl_{concreto}^-$ = teor de íon cloreto em relação à massa de concreto, em %;

$\gamma_{concreto}$ = massa específica do concreto, em kg/m^3 ;

C = consumo de cimento, em kg/m^3 .

Nas amostras de concreto, o laboratório optou pela utilização do eletrodo seletivo de íons como indicador na titulação potenciométrica por apresentar resultados mais precisos, principalmente em amostras que contém baixa concentração de cloretos. O eletrodo de fio de prata é comumente utilizado nestes ensaios, mas apresentam resultados mascarados em amostras com quantidades menores de cloretos.

Garcia (2008) mostrou em sua pesquisa que o uso do eletrodo de fio de prata como indicador na titulação potenciométrica não deve ser utilizado, quando a solução titulada conter ácido nítrico em pH muito baixo. Sendo assim, o recomendado é a utilização do eletrodo seletivo de íons cloreto como indicador (ESI).

6.5 PERÍODOS ESTUDADOS E MESES DE REFÊRENCIA

É importante esclarecer que os períodos estudados não coincidiram exatamente com os meses do ano. Portanto, foram adotados meses de referência para facilitar as análises, conforme segue na Tabela 6.3, onde são relacionados os períodos mensais estudados com os meses

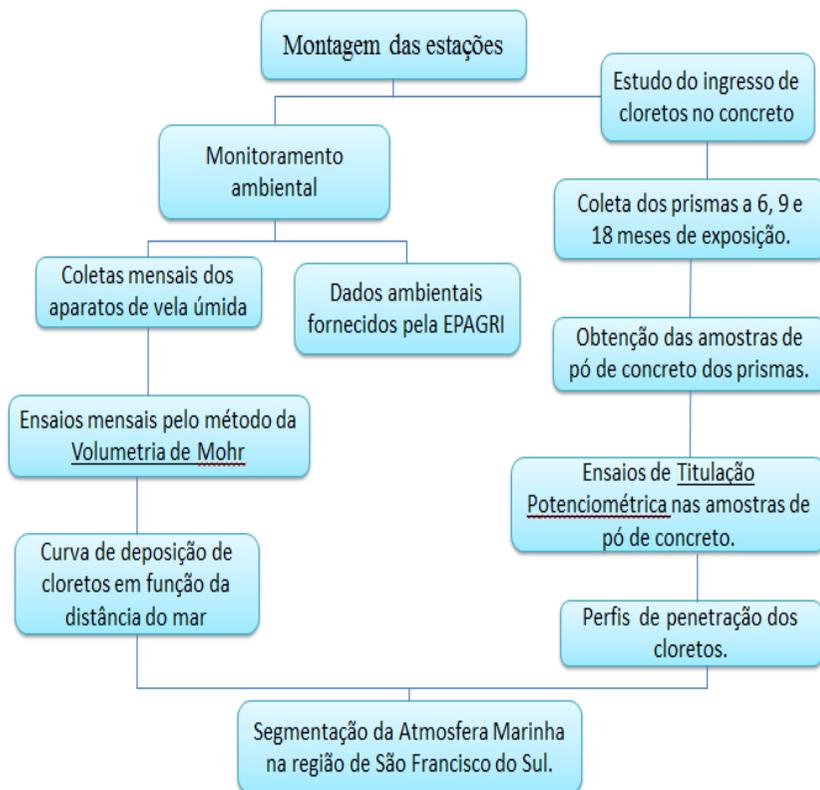
adotados como referência. As coletas e o reposicionamento de novas amostras sempre aconteceram às 9:00 horas de cada período.

Nos meses de referência, fevereiro/2011 e março/2011, os resultados ficaram desfalcados, devido aos danos causados por vândalos em algumas estações. A partir de abril/2011 é que este estudo começou a ter resultados satisfatórios para a análise de cloretos e, portanto, prorrogou-se o seu término para maio/2012, a fim de avaliar todos os meses do ano.

Tabela 6.3 – Períodos estudados e seus respectivos meses de referência

Período	Nº de Dias	Mês referência	Período	Nº de Dias	Mês referência
07/02 à 11/03/2011	32	Fev/2011	15/10 à 16/11/2011	32	Out/2011
11/03 à 13/04/2011	33	Mar/2011	16/11 à 16/12/2011	30	Nov/2011
13/04 à 14/05/2011	31	Abr/2011	16/12 à 16/01/2012	31	Dez/2011
14/05 à 14/06/2011	31	Mai/2011	16/01 à 17/02/2012	32	Jan/2011
14/06 à 14/07/2011	30	Jun/2011	17/02 à 17/03/2012	29	Fev/2012
14/07 à 15/08/2011	32	Jul/2011	17/03 à 18/04/2012	32	Mar/2012
15/08 à 16/09/2011	32	Ago/2011	18/04 à 19/05/2012	31	Abr/2012
16/09 à 15/10/2011	29	Set/2011	19/05 à 20/06/2012	32	Mai/2012

6.6 FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES



7 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no decorrer do estudo, primeiramente no que se refere à caracterização dos materiais empregados no estudo: concreto e agregados. Na sequência, os dados que representam o monitoramento ambiental, com resultados de temperatura, precipitação, umidade relativa, intensidade e direção dos ventos e da deposição de cloretos da névoa salina, serão tratados. E, por fim, será estudada a penetração de cloretos no concreto, apresentando os perfis de concentração.

7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

A caracterização do concreto foi dividida entre seus componentes básicos: agregados e cimento.

7.1.1 Cimento e Agregados

- **Cimento:** No concreto aplicado na moldagem dos prismas, o cimento utilizado foi o CP IV - 32 -RS, da empresa fabricante Votorantim, proveniente da Fábrica Rio Branco do Sul/Paraná. A empresa forneceu o relatório com as características físicas e químicas do referido cimento, conforme Apêndice A.1.
- **Agregados:** Os ensaios de caracterização dos agregados graúdos e miúdos utilizados no concreto foram fornecidos pelas empresas produtoras dos agregados e que fornecem para a usina de concreto. As análises granulométricas e as características físicas dos agregados graúdos e miúdos podem ser visualizadas nos apêndices A.2 e A.3, respectivamente.

7.1.2 Concreto

O concreto utilizado continha resistência característica (f_{ck}) de 30 MPa, com traço unitário em massa de 1: 2,62 : 3,38 e fornecido pela usina de concreto, sendo esta a responsável pela dosagem.

Os agregados miúdos foram compostos na seguinte proporção, em massa: 81,20% de areia natural e 18,80% de areia industrial. Os agregados graúdos, por sua vez, estavam compostos na proporção de 5,25% de brita 0 (pedrisco) e 94,75% de brita 1 (3/4"). Foi utilizado aditivo plastificante TEC MULT 840 do fornecedor Rheoset. As características do concreto podem ser visualizadas no Apêndice A.4 de forma detalhada.

Para o concreto adotado e de acordo com suas características, pode-se perceber a evolução da resistência deste concreto aos 28 dias, conforme Figura 7.1. A resistência atingida aos 28 dias atendeu o f_{ck} solicitado, onde a resistência média (f_{cj}) ficou além da resistência esperada de 33,3 MPa, pois:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d$$

Onde:

$S_d = 2$ MPa, adotou-se o S_d mínimo permitido pela NBR 12655.

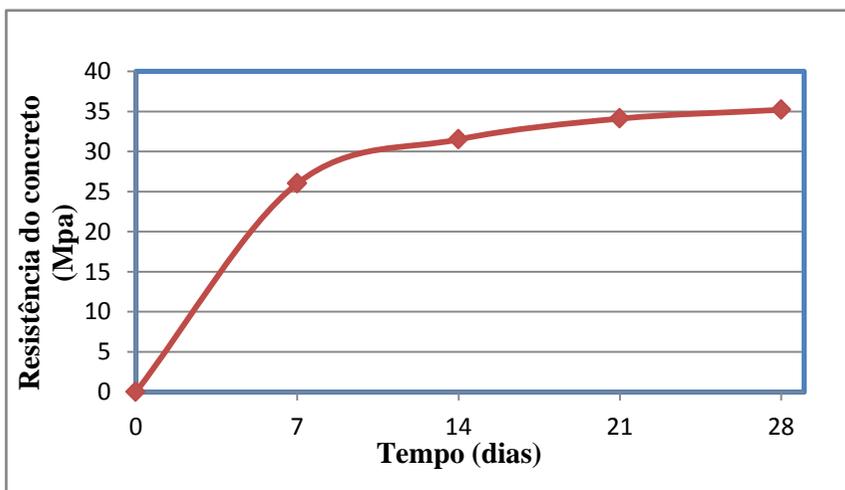


Figura 7.1 – Evolução da resistência do concreto aos 28 dias

Fonte: Autora da pesquisa.

7.1.2.1 Absorção total

A absorção total e o índice de vazios do concreto foram determinados através do ensaio descrito na NBR 9778 (1986), com 90 dias de idade. Os ensaios de absorção foram realizados no laboratório de materiais da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/Joinville e os resultados de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica estão apresentados na Tabela 7.1. Foram adotados tempos de fervura de 5 horas para os ensaios.

Tabela 7.1 – Ensaio de absorção por imersão

Absorção por imersão (%)	5,29
Índice de vazios (%)	12,54
Massa específica seca (g/cm ³)	2,37
Massa específica saturada (g/cm ³)	2,56
Massa específica real (g/cm ³)	2,73

Fonte: Autora da pesquisa.

7.2 MONITORAMENTO AMBIENTAL

O monitoramento ambiental foi dividido na caracterização climatológica do ambiente, por meio do levantamento dos dados climatológicos e da deposição de cloretos devido à névoa salina, medida através da vela úmida.

7.2.1 Características climatológicas

Os dados climatológicos da região estudada foram obtidos junto à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A. – EPAGRI – e dizem respeito à estação de São Francisco do Sul. Esta caracterização foi definida em função da temperatura, da umidade

relativa, da precipitação e da velocidade dos ventos predominantes no período de exposição das estações.

7.2.1.1 Temperatura

A Figura 7.2 apresenta as médias mensais de temperatura. Já a Figura 7.3 apresenta as médias mensais máximas e mínimas de temperatura durante o período de estudo.

Analisando os dados, pode-se observar que os meses mais quentes (janeiro a março) apresentaram temperaturas mais elevadas, próximas aos 25°C, chegando ao mês de fevereiro/2012 com 26°C, enquanto que nos meses mais frios (junho a agosto) as temperaturas ficaram abaixo dos 15°C.

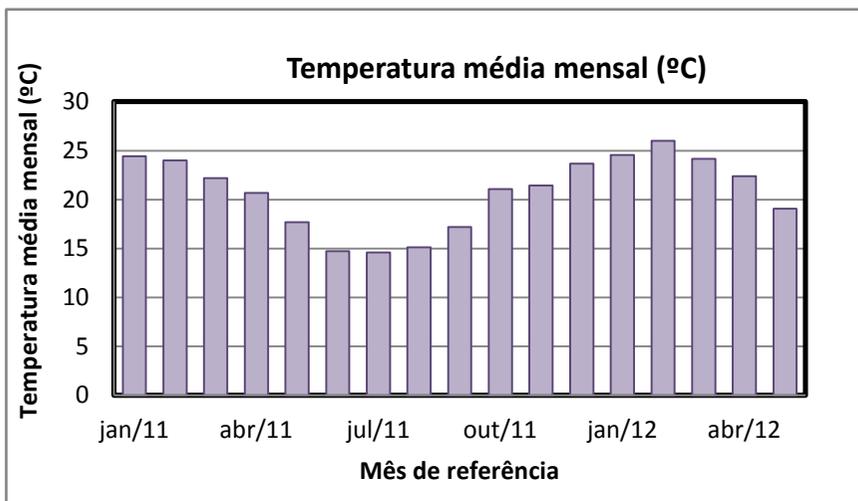


Figura 7.2 – Temperatura média mensal entre janeiro/2011 a maio/2012

Fonte: EPAGRI – São Francisco do Sul.

As temperaturas máximas e mínimas acompanharam a tendência da média, aonde a máxima temperatura chegou aos 27°C em

fevereiro/2012 e a mínima, no início do mês de julho/2011, ficou em torno de 10°C.

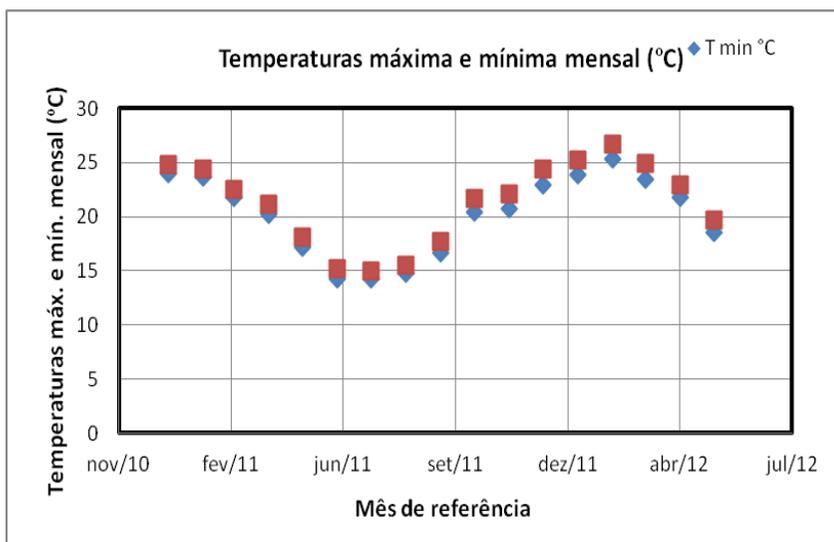


Figura 7.3 – Temperaturas máxima e mínima média mensal (°C) entre janeiro/2011 a maio/2012

Fonte: EPAGRI – São Francisco do Sul.

7.2.1.2 Precipitação

Na Figura 7.4 são apresentados os valores da precipitação mensal acumulada no período de estudo. Pode-se observar que as maiores precipitações ocorreram nos meses entre janeiro e março/2011 e também no mês de agosto/2011, ficando acima dos 300 mm. Já no mês de outubro/2011 foi registrada a menor precipitação (72,6mm) durante o período estudado.

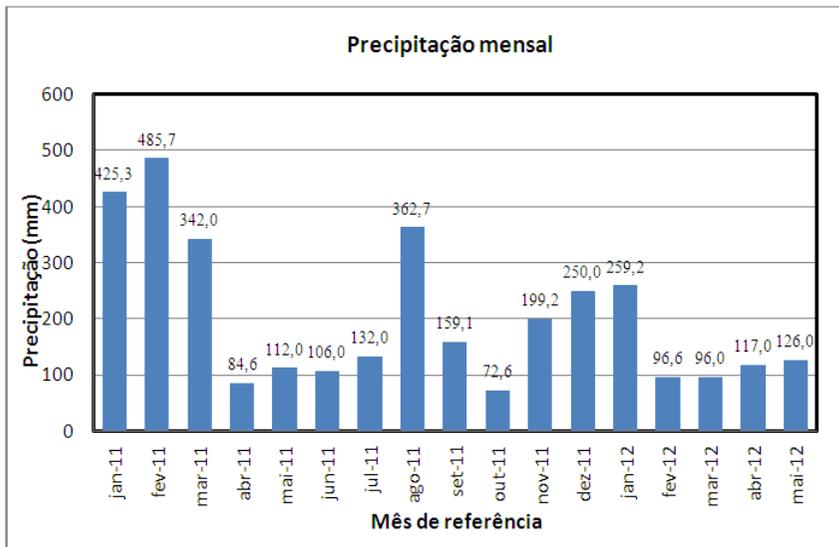


Figura 7.4 – Precipitação acumulada mensal (mm) entre janeiro/2011 a maio/2012

Fonte: EPAGRI – São Francisco do Sul.

7.2.1.3 Umidade relativa do ar

A Figura 7.5 apresenta a umidade relativa do ar média mensal referente ao período de estudo. De acordo com os valores mostrados, pode-se verificar que nos oito primeiros meses do ano de 2011 (janeiro a agosto/2011), a umidade ficou na casa dos 94%. Já a partir de setembro/2011 a maio/2012, a umidade diminuiu cerca de dez pontos percentuais na média, ficando em torno de 84%.

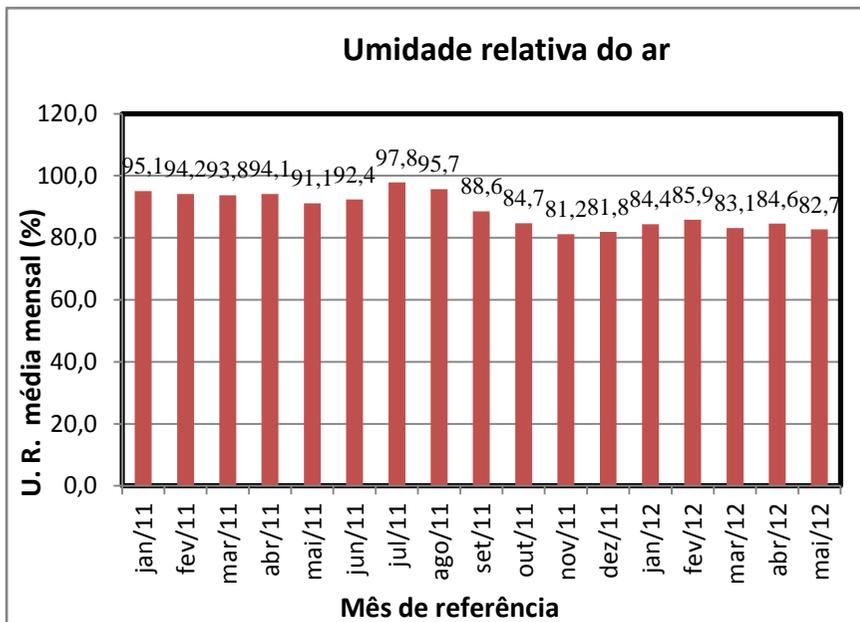


Figura 7.5 – Umidade relativa do ar média mensal (%) entre janeiro/2011 a maio/2012

Fonte: EPAGRI – São Francisco do Sul.

7.2.1.4 Velocidade e direção do vento predominante

A velocidade e a direção predominante do vento são fatores importantes na formação e no transporte do aerossol marinho, conforme já abordado no Capítulo 2.

A Tabela 7.2 apresenta as médias mensais dos ventos continentais e marítimos em cada direção durante o período de estudo, entre janeiro/2011 e maio/2012. Os dados de velocidade e direção dos ventos foram fornecidos pela EPAGRI de São Francisco do Sul, porém valores por hora de atuação e sua direção, e foram transformados em médias mensais de velocidade e direção predominante para o estudo. Portanto, os valores foram adaptados às médias mensais de velocidade do vento e sua respectiva direção.

Tabela 7.2 – Médias mensais da velocidade do vento (m/s) em cada direção no período de janeiro/2011 a maio/2012

Médias mensais da velocidade do vento e sua direção (m/s)															
	SE	SW	S	SSW	SSE	ESE	E	NW	WSW	NE	ENE	NNE	N	NNW	W
jan/11	3,21	1,86	2,84	2,07	3,41	2,90	3,44	1,56	1,45	2,95	3,22	2,36	2,03	1,45	1,70
fev/11	2,42	1,79	3,81	2,01	4,77	3,05	2,93	1,35	1,55	3,23	2,89	2,20	1,85	1,48	1,04
mar/11	3,15	1,98	3,78	2,42	3,96	3,11	3,35	1,34	1,48	2,78	3,33	2,47	2,45	2,31	1,12
abr/11	2,43	1,45	2,50	1,67	3,68	2,44	2,43	1,35	1,10	2,41	2,14	2,20	1,46	1,20	1,11
mai/11	3,03	2,05	3,29	2,17	3,58	2,04	2,16	1,13	1,53	2,48	2,37	2,31	1,97	1,57	1,01
jun/11	3,59	1,31	2,13	1,67	2,92	1,53	1,83	1,11	1,53	2,57	1,90	2,74	2,81	1,79	1,74
jul/11	2,61	1,46	2,28	1,60	3,17	2,04	2,22	1,09	1,07	2,21	1,80	2,10	1,65	1,33	0,69
ago/11	2,71	2,18	2,95	1,74	3,38	2,40	2,34	2,03	2,49	2,47	2,05	2,42	2,20	1,66	3,17
set/11	3,32	1,65	2,98	1,78	3,81	3,64	3,02	1,11	0,98	2,93	2,93	2,71	1,77	1,73	0,95
out/11	3,39	1,88	3,36	2,99	2,88	3,42	3,79	2,30	1,70	2,72	2,73	2,13	1,80	1,54	1,24

Continua

Continuação

nov/11	3,01	2,86	3,84	3,93	3,36	2,37	3,70	1,01	1,89	2,13	3,28	2,07	1,37	1,11	1,38
dez/11	3,18	3,13	4,28	3,52	3,42	3,66	3,67	0,93	2,22	2,24	3,06	1,43	1,83	1,21	1,82
jan/12	3,72	2,32	3,33	3,64	3,38	3,13	3,74	1,00	1,72	2,56	3,32	1,58	1,24	1,28	1,54
fev/12	2,76	1,89	2,70	2,71	2,59	2,91	3,26	0,81	1,54	1,61	2,45	1,61	1,40	0,87	1,21
mar/12	3,27	2,78	3,51	3,26	2,89	3,14	3,21	1,08	1,90	2,01	2,94	1,70	1,25	1,25	1,71
abr/12	2,88	2,57	3,15	2,65	3,76	2,15	3,59	0,89	1,55	2,35	3,10	1,98	1,18	0,98	1,23
mai/12	2,75	3,78	4,15	1,78	3,62	3,20	2,98	1,23	1,76	2,55	2,98	2,32	1,90	1,75	1,10

Fonte: EPAGRI – São Francisco do Sul.

Para o período entre janeiro/2011 e maio/2012, a Figura 7.6 mostra a velocidade média mensal do vento e sua direção predominante para os ventos marítimos que influenciam no transporte e deposição de cloretos no concreto vindos do mar em direção ao continente.

Pode-se observar na Figura 7.6 que no mês de setembro/2011 há uma combinação entre intensidade e direção (SSE), em dezembro/2011 tem-se elevada intensidade, porém com direção pouco perpendicular (S) em relação ao posicionamento das estações (SE). Já no mês de fevereiro/2012 tem-se baixa intensidade e direção perpendicular (E) ao posicionamento.

Durante o período de estudo ocorreram muitas variações quanto à direção e velocidade dos ventos, porém as direções predominantes foram: SE, SSE e S.

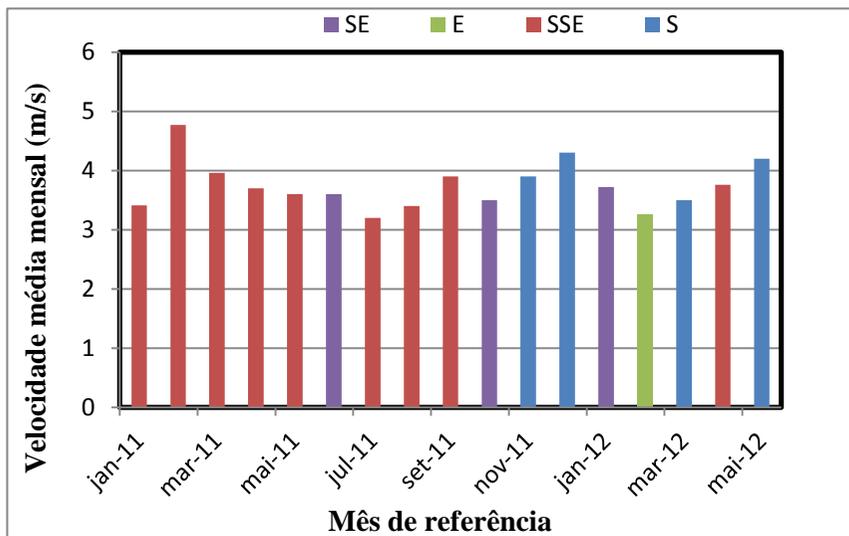


Figura 7.6– Velocidades médias mensais do vento e suas direções predominantes (m/s) no período de janeiro/2011 a maio/2012

Fonte: EPAGRI – São Francisco do Sul.

7.2.1.5 Resumo das características climatológicas do ambiente

A Tabela 7.3 apresenta os dados climatológicos agrupados durante o período de estudo. As médias mensais do vento em cada direção predominante e seu tempo de atuação para cada mês de análise, bem como as médias mensais da temperatura, precipitação e umidade relativa com seus desvios padrão.

Tabela 7.3 – Agrupamento dos Dados climatológicos

Mês Refe- rência	Vento						Temperatura			Preci- pita- ção (mm)	Umidade relativa		
	Vel. Mé- dia (m/s)	Sd (m/s)	CV (%)	Atua- ção (h)	Direção Pred.		Mé- dia (°C)	Sd (°C)	CV (%)		Média (%)	Sd (%)	CV (%)
					1	2							
Jan/11	3,41	0,93	27,0	44,5	SSE	SE	24,43	1,49	6,1	425,3	95,1	3,78	4,0
Fev/11	4,77	1,59	33,3	70,5	SSE	S	24,01	1,34	5,6	485,7	94,2	3,07	3,3
Mar/11	3,96	1,67	42,1	131,5	SSE	S	22,20	2,24	10,1	342,0	93,8	5,37	5,7
Abr/11	3,70	1,39	37,5	102,5	SSE	SE	20,67	1,32	6,4	84,6	94,1	3,68	3,9
Mai/11	3,6	1,33	36,9	102,0	SSE	S	17,69	2,37	13,4	112,0	91,1	5,55	6,1
Jun/11	3,59	1,83	50,9	30,0	SE	SSE	14,72	2,51	17,0	106,0	92,4	7,53	8,1
Jul/11	3,20	1,35	42,1	79,0	SSE	SE	14,60	3,12	21,3	132,0	97,8	6,23	6,4
Ago/11	3,40	1,89	55,6	81,0	SSE	S	15,11	2,44	16,1	362,7	95,7	8,36	8,7

Continua

Continuação

Set/11	3,90	1,73	44,4	83,0	SSE	SE	17,19	2,35	13,6	159,1	88,6	7,03	7,9
Out/11	3,40	0,95	25,0	85,0	SE	S	21,07	1,54	7,3	72,6	84,7	7,89	9,3
Nov/11	3,90	1,67	42,8	47,0	S	E	21,44	1,81	8,4	199,2	81,2	7,13	8,8
Dez/11	4,30	1,91	44,4	91,5	S	SSE	23,66	1,65	6,9	250,0	81,8	7,04	8,6
Jan/12	3,72	1,03	27,5	127,0	SE	E	24,56	1,40	5,7	259,2	84,4	4,76	5,6
Fev/12	3,25	1,02	31,4	185,5	E	SE	26,02	0,98	3,7	96,6	85,9	3,84	4,5
Mar/12	3,50	1,28	36,6	41,5	S	SE	24,18	2,50	10,3	96,0	83,1	4,55	5,5
Abr/12	3,80	1,15	30,3	44,0	SSE	E	22,38	1,85	8,2	117,0	84,6	5,15	6,1
Mai/12	4,20	1,32	31,4	61,0	S	SSE	19,08	2,10	11,0	126,0	82,7	6,46	7,8

Fonte: Autora da pesquisa.

7.2.2 Monitoramento da névoa salina

O comportamento da névoa salina foi avaliado através da taxa média mensal de deposição de cloretos, segundo o ensaio da vela úmida (NBR 6211, 2001). As figuras a seguir mostram as medidas da taxa de deposição média de cloretos nos meses estudados, indicados nos meses de referência.

Na Figura 7.7 pode-se observar uma redução acentuada na deposição de cloretos devido ao afastamento do mar. A taxa de deposição de cloretos a 50 metros do mar chegou a ser aproximadamente 10 vezes maior que a deposição a 100 metros, e em torno de 17 vezes maior que a deposição encontrada a 200 metros. Assim, pode-se perceber a importância da agressividade por cloretos nos primeiros metros afastados do mar, reduzindo bruscamente à medida que ocorre o distanciamento com relação ao mesmo.

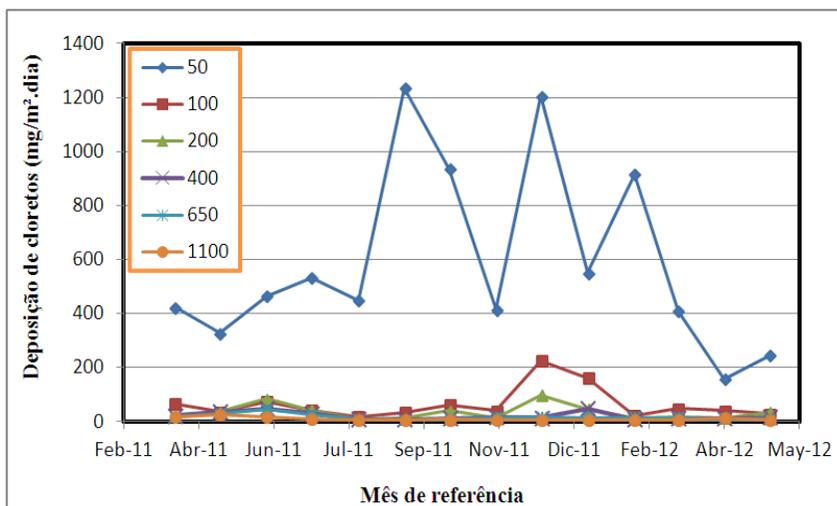


Figura 7.7 – Medida da taxa de deposição média de cloretos nos afastamentos de 50, 100, 200, 400, 650 e 1100 metros do mar, no período de abril/2011 a maio/2012

Fonte: Autora da pesquisa.

Na Figura 7.8 e 7.9, pode-se observar que a deposição de cloretos aos 100 e 200 metros afastados do mar, apresentou uma redução significativa durante o período de estudos, e somente entre os meses de dezembro/2011 e janeiro/2012 é que ocorreram valores maiores de deposição de cloretos. A partir dos 400 metros esta deposição apresentou valores ainda mais baixos, bem como valores próximos nos afastamentos de 400, 650 e 1100 metros.

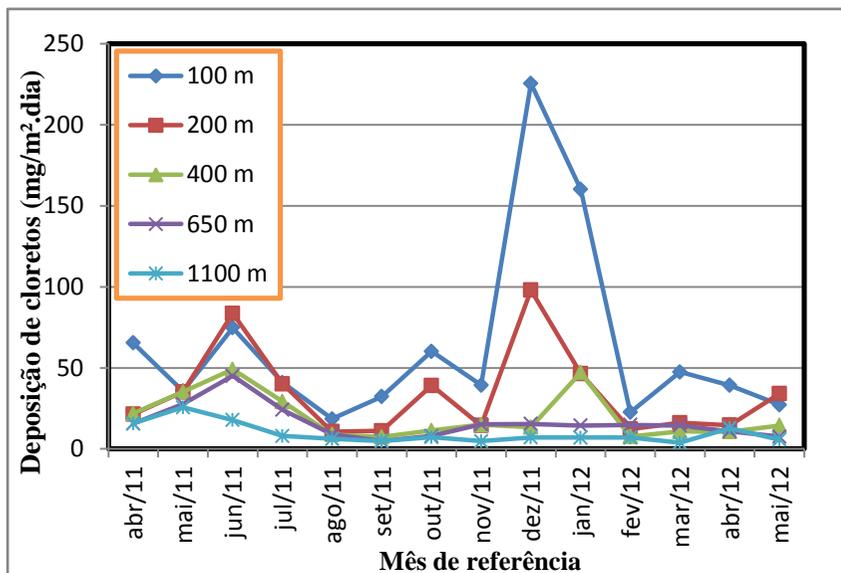


Figura 7.8 – Medida da taxa de deposição média de cloretos nos afastamentos de 100, 200, 400, 650 e 1100 metros do mar, no período de abril/2011 à maio/2012

Fonte: Autora da pesquisa.

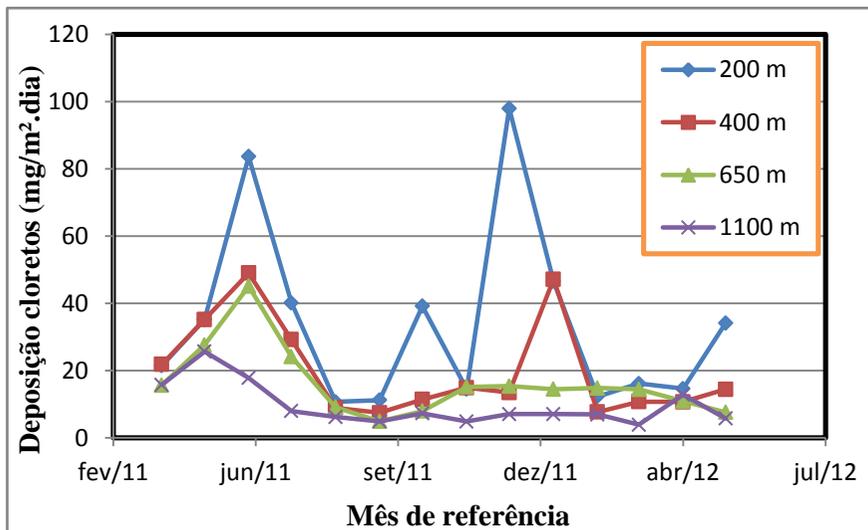


Figura 7.9 – Medida da taxa de deposição média de cloretos nos afastamentos de 200,400, 650 e 1100 metros do mar, no período de abril/2011 a maio/2012

Fonte: Autora da pesquisa.

7.3 ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO EXPOSTO AO AMBIENTE DE ATMOSFERA MARINHA

7.3.1 Perfis de concentração de cloretos nos prismas expostos ao ambiente marinho

A seguir, são apresentados os perfis de concentração de cloretos em função da profundidade em relação à superfície do concreto, nos prismas expostos nas distâncias de 50, 100, 200, 400, 650 e 1100 metros em relação ao mar e nas idades de 6, 9 e 18 meses. Esta pesquisa foi realizada em ambiente natural, sendo assim, a penetração de cloretos nos prismas de concreto se dá de forma mais lenta, e conforme o esperado, com pequenas concentrações de cloretos no concreto. Os picos de concentração de cloretos foram obtidos em cada profundidade média em relação à superfície, sendo: 01 mm, 6 mm, 15 mm e 27,5 mm.

Também foram medidas as profundidades de carbonatação nos concretos com 18 meses de exposição ao ambiente marinho nas

diferentes distâncias do mar. Para efetuar as medidas de profundidade empregou-se indicadores de pH, constituídos de uma solução que foi aspergida sobre a superfície fraturada de concreto.

Assim, neste estudo foi adotado o ensaio da fenolftaleína, que é um composto orgânico utilizado com indicador ácido-base. Foi preparada uma solução com 2% de etanol, que em contato com o meio apresenta coloração incolor para pH ácido ou menor que 7,0, e em pH básico ou alcalino ou para pH maior que 7,0, apresenta coloração rósea. Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais de construção da universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, da cidade de Joinville.

Portanto, a Tabela 7.4 apresenta o resumo das profundidades de carbonatação medidas nos concretos com 18 meses de exposição ao ambiente marinho.

Tabela 7.4 – Profundidade de carbonatação nos prismas de concreto com 18 meses de exposição

Estação	Distância (m)	Prof. Carbonatação (mm)
E 50	50	5,60
E 100	100	5,10
E 200	200	4,80
E 400	400	5,30
E 650	650	5,40
E 1100	1100	6,50

Fonte: Autora da pesquisa

A Figura 7.10 apresenta o perfil de concentração de cloretos do prisma que não foi exposto ao ambiente marinho, a fim de verificar a quantidade de cloretos contida no concreto, ou na matéria prima do mesmo. Foi ensaiado com 18 meses de idade, sendo armazenado durante o período de estudo em saco plástico, para que não houvesse contaminação. Alguns pesquisadores denominam este prisma de “Branco”.

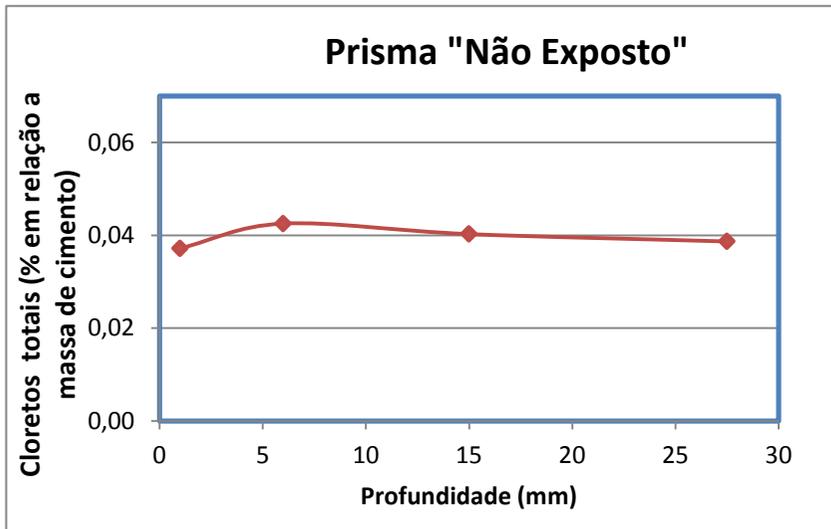


Figura 7.10 – Perfil de cloretos no prisma Não Exposto, aos 18 meses
Fonte: Autora da pesquisa

Da Figura 7.11 até a 7.16, estão apresentados os perfis de cloretos dos concretos para cada distância em exposição em relação ao mar e nas idades ensaiadas, com base nos dados no Apêndice B. A determinação do teor de cloretos em relação à massa de cimento se obteve através da massa total do cimento CP IV-32-RS utilizada no traço do concreto.

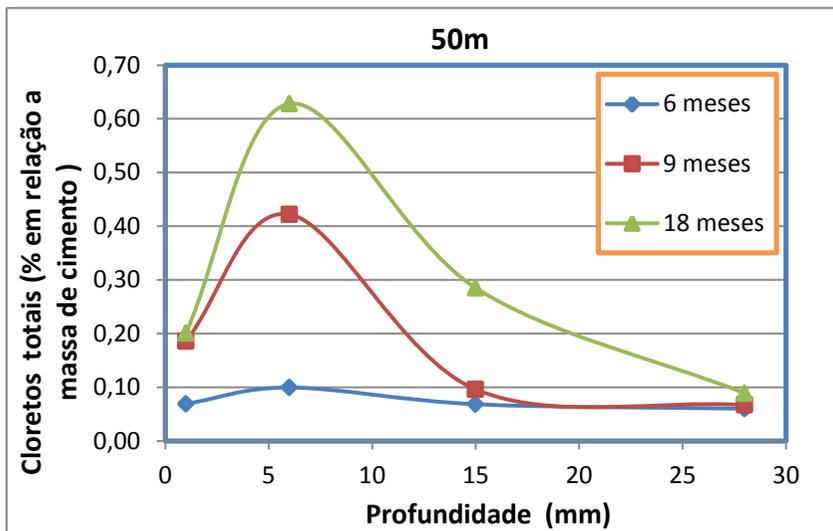


Figura 7.11 – Perfis de cloretos dos concretos expostos a 50 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses

Fonte: Autora da pesquisa.

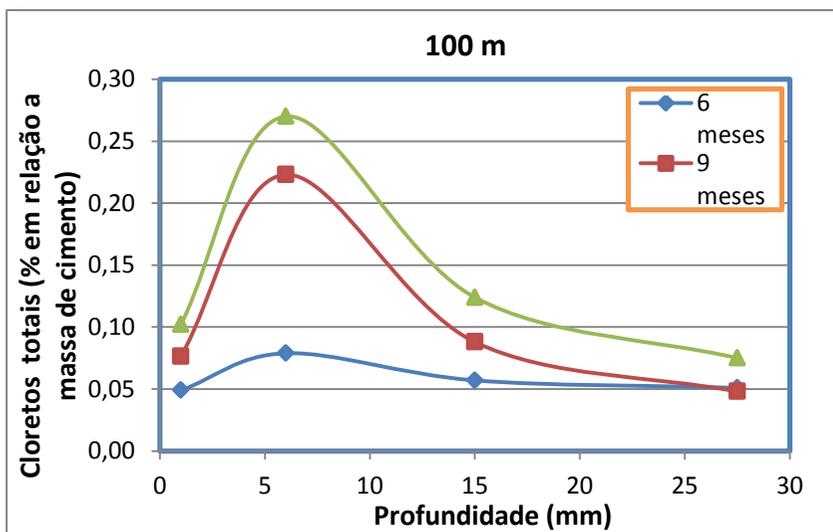


Figura 7.12 – Perfis de cloretos dos concretos expostos a 100 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses

Fonte: Autora da pesquisa.

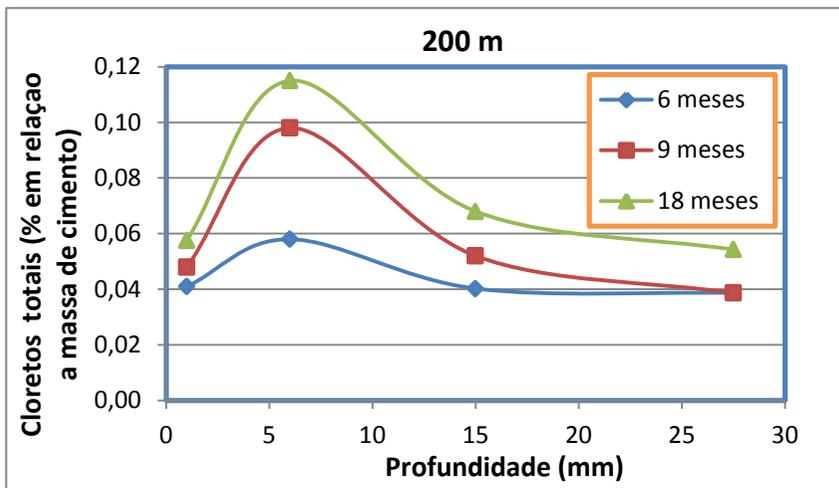


Figura 7.13 – Perfis de cloretos dos concretos expostos a 200 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses

Fonte: Autora da pesquisa.

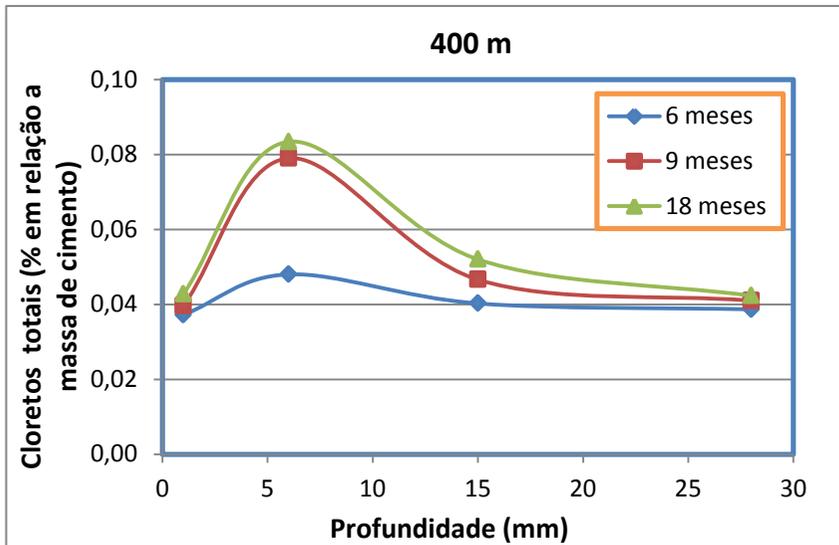


Figura 7.14 – Perfis de cloretos dos concretos expostos a 400 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses

Fonte: Autora da pesquisa.

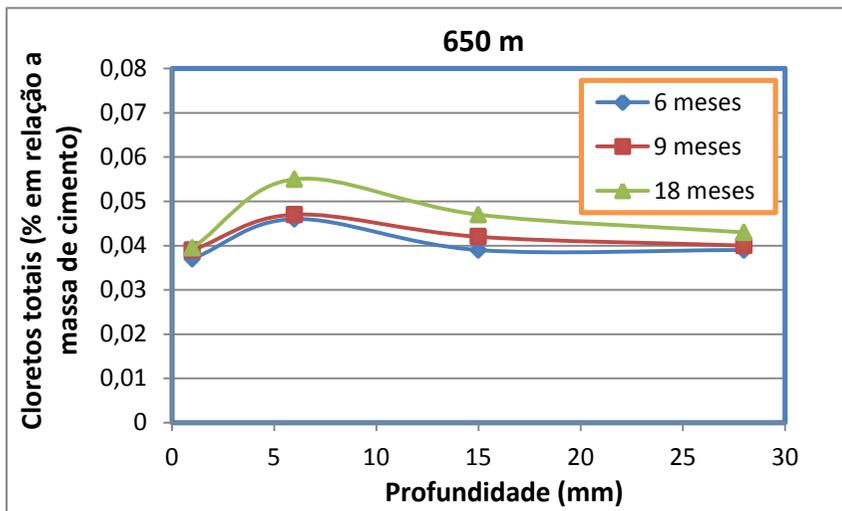


Figura 7.15 – Perfis de cloretos dos concretos expostos a 650 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses

Fonte: Autora da pesquisa.

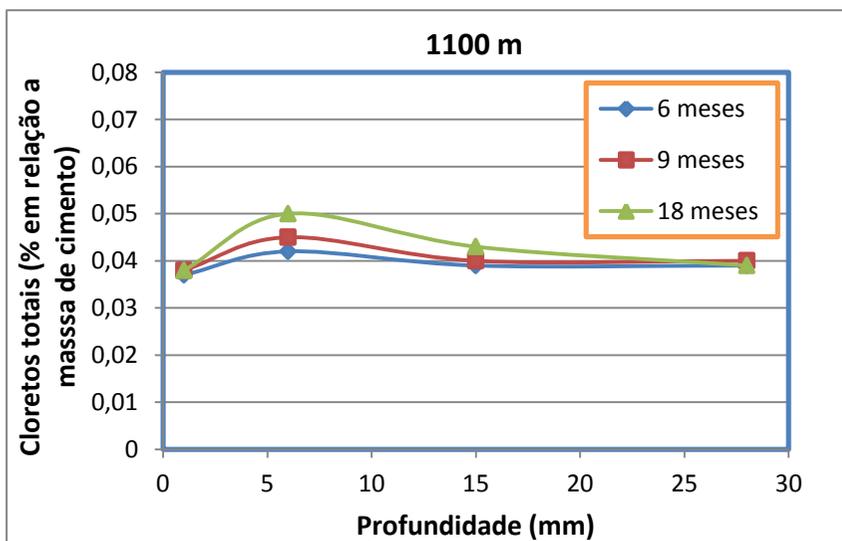


Figura 7.16 – Perfis de cloretos dos concretos expostos a 1100 metros do mar aos 6, 9 e 18 meses

Fonte: Autora da pesquisa.

8 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo é realizada a análise dos resultados que foram apresentados no capítulo anterior e está dividida em três partes, sendo: monitoramento ambiental, névoa salina e perfis de cloretos nos prismas expostos ao ambiente marinho.

8.1 NÉVOA SALINA

8.1.1 Efeito da distância em relação ao mar

A diminuição na deposição de cloretos, à medida que ocorreu o afastamento em relação ao mar, obtida em cada estação de monitoramento, se comportou de maneira evidente, conforme apresentada na Figura 8.1 e na figura 8.2 e de acordo com o já descrito no subitem 2.3.1.

A Figura 8.1 apresenta a relação encontrada entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar, para as estações de monitoramento durante o período de estudo, através de diagramas de dispersão com linha de tendência. A Figura 8.2 mostra esta relação, porém em uma escala diferente no eixo da deposição de cloretos. Já na Figura 8.3 esta relação pode ser observada em escala diferente no eixo da deposição e da distância.

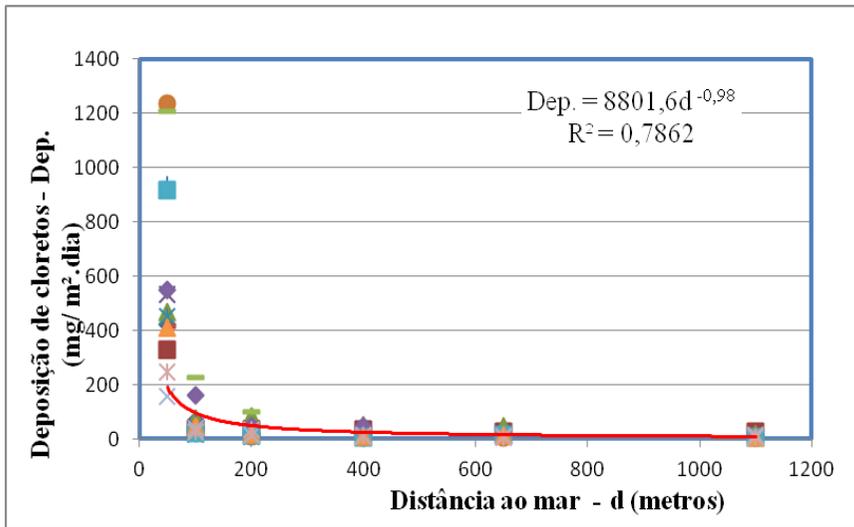


Figura 8.1 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância com relação ao mar no período de estudo
 Fonte: Autora da pesquisa.

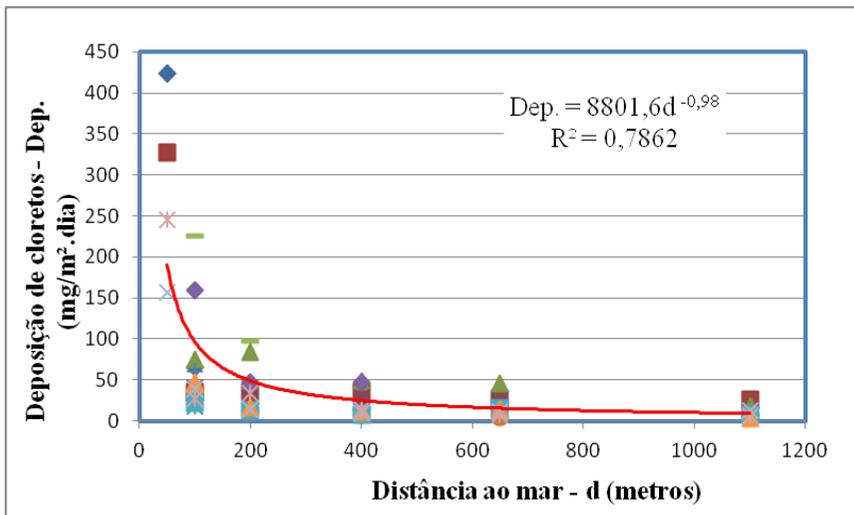


Figura 8.2 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância com relação ao mar no período de estudo (escala y modificada)
 Fonte: Autora da pesquisa.

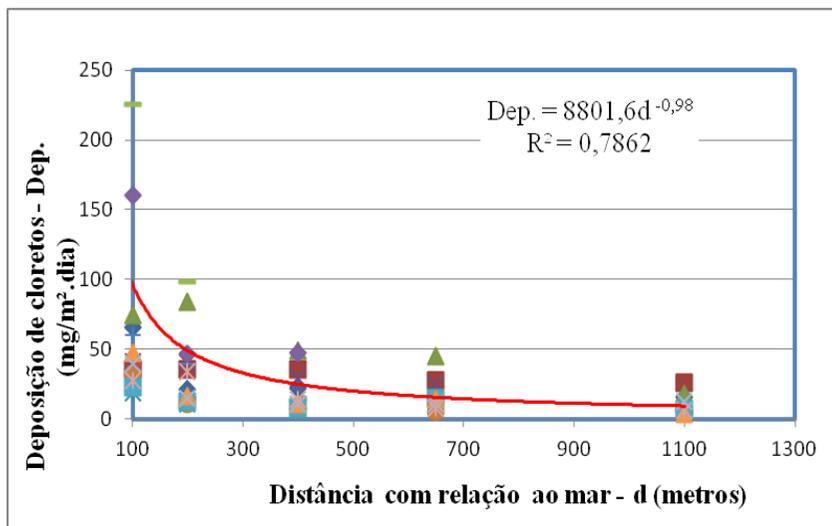


Figura 8.3 – Relação entre a deposição de cloretos e a distância com relação ao mar no período de estudo (escala x e y modificada)

Fonte: Autora da pesquisa.

A relação que melhor se ajustou aos resultados obtidos neste estudo foi a da linha de tendência de potência, do tipo $y = a \cdot x^{-b}$, onde y é a deposição de cloretos (Dep.) do aerosol marinho, e x é a distância em relação ao mar (d). Esta relação entre a deposição de cloretos e a distância ao mar no período de estudo, tem como resultado do ajuste da curva, um coeficiente de determinação $R^2 = 0,7862$, significando que 78,62% da variabilidade em y (Dep.) é explicada pela regressão, e como equação, $\text{Dep.} = 8801,6 \cdot d^{-0,98}$, conforme visualizado na Figura 8.1. Este modelo também foi adotado no estudo realizado por Garcia (2008), na ilha de Florianópolis/SC.

Já nos estudos realizados por Morcillo *et al* (1999) e Meira (2004), o modelo adotado que apresentou os melhores resultados para as duas variáveis foi o exponencial, do tipo, $y = a e^{-bx}$. Porém, no presente estudo, este modelo não apresentou boa relação entre as duas variáveis, indicando uma correlação de $R^2 = 0,45$, entre deposição de cloretos e distância em relação ao mar.

Outro modelo analisado neste estudo foi o modelo com dupla exponencial, obtendo a equação $\text{Dep.} = 50,66e^{9,55(e^{-0,020d} - 1)}$ e uma

correlação de $R^2 = 0,70$. E também não apresentou a melhor relação entre as variáveis da deposição de cloretos e distância em relação ao mar. Assim, pode-se perceber que não há um modelo específico para a relação entre estas variáveis, é importante analisar os vários modelos disponíveis e adotar o modelo que apresenta os melhores resultados.

A relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar sofre variações de uma região para outra, pois apresentam diferentes regimes de vento, precipitação e também depende das variações em torno da média (desvio padrão). Sendo assim, a escolha do tipo de relação entre as variáveis deve ser aquela que melhor ajustar os resultados obtidos.

Uma previsão de vida útil das estruturas pode ser obtida através da deposição de cloretos média anual ou de um período específico de tempo. A Figura 8.4 mostra a deposição média no período de coleta de cada estação, com intervalo de confiança de 95%. E, assim, pode-se observar a redução da deposição de cloretos à medida que ocorreu o distanciamento com relação ao mar.

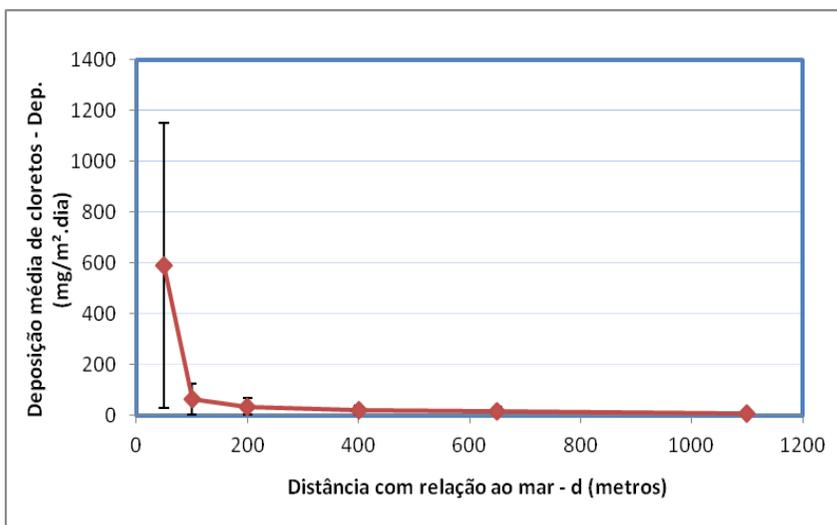


Figura 8.4 – Relação entre a deposição média de cloretos, em função da distância em relação ao mar, durante o período de monitoramento das estações

Fonte: Autora da pesquisa.

8.1.2 Efeito da direção predominante e velocidade do vento

O vento tem grande influência no processo de formação do aerossol marinho, principalmente em seu transporte no sentido continental. Mesmo com as interferências, na concentração de sais e na própria composição como, tamanho e proporção de partículas, conforme descrito no subitem 2.3.2, não foi possível avaliar a composição do aerossol neste trabalho. Somente foi possível avaliar a relação entre a deposição de cloretos e a velocidade média dos ventos marinhos e a sua direção predominante.

É necessário considerar os ventos capazes de transportar o aerossol no sentido do continente e, no presente estudo, são ventos dos quadrantes S e SE.

De acordo com estudos realizados por Morcillo *et al.* (2000) e exposto no subitem 2.3.2, para se analisar a influência do vento na concentração de cloretos, um parâmetro importante a ser adotado é o chamado “*wind power*” (w), que considera a intensidade e o tempo de atuação de cada vento, simultaneamente. É analisada a influência do vento para casos onde ventos mais brandos, porém constantes ou de longa duração, podem produzir quantidades de aerossol compatíveis com ventos fortes, porém de curta duração.

Porém, o parâmetro (w) pode apresentar deficiência, quando se trata do afastamento com relação ao mar, pois mesmo que ocorra uma significativa produção de aerossol marinho decorrente de ventos brandos e constantes, se submetidos às baixas velocidades do vento, o aerossol não avança por muitos metros no continente e deposita-se nas primeiras faixas de terra. Ventos mais intensos, porém com curta duração, transportam o aerossol por distâncias maiores até que as partículas se depositem, assim tem-se uma faixa maior de terra em relação ao mar com concentração de cloretos.

Neste estudo a influência do vento sobre a concentração de cloretos foi analisada através do parâmetro (w). Foram adotados os ventos mais intensos da região durante o período e não somente a direção dos ventos predominantes, mas suas componentes direcionais. Os ventos considerados para a análise do parâmetro foram somente os ventos acima de 3m/s, quando ocorre o aumento da deposição salina, segundo Meira *et al* (2007) e já citado no subitem 2.3.2. Assim, o parâmetro (w) foi obtido através do produto entre a intensidade média

dos ventos acima de 3,0m/s e seu tempo de atuação em horas para cada período.

A Tabela 8.1 apresenta a deposição de cloretos médias mensais e o parâmetro “wind power”(w) mensal no período estudado

Tabela 8.1 – Deposição de cloretos média mensal e parâmetro wind power mensal no período de Janeiro/2011 a maio/2012

Mês referência	Wind power (h.m/s)	Deposição de cloretos mensal (mg Cl/m ² .dia)					
		50 m	100 m	200 m	400 m	650 m	1100 m
Jan/2011	18,50						
Fev/2011	96,00						
Mar/2011	105,00						
Abr/2011	70,00	423,55	65,45	21,43	21,83	15,65	15,74
Mai/2011	60,00	326,87	35,70	35,20	35,20	27,60	25,64
Jun/2011	18,00	465,78	74,75	83,63	49,03	45,10	17,79
Jul/2011	16,00	532,40	40,93	40,15	29,20	24,15	7,96
Ago/2011	33,00	449,70	18,46	10,69	8,90	9,10	6,20
Set/2011	95,00	1235,80	32,30	11,20	7,42	4,90	4,90
Out/2011	110,00	936,64	60,18	39,15	11,40	7,96	7,26
Nov/2011	43,00	415,57	39,30	14,46	14,90	15,13	4,85
Dez/2011	135,00	1205,80	225,52	97,98	13,45	15,39	7,06
Jan/2012	80,00	551,05	160,10	46,50	47,16	14,44	7,03
Fev/2012	120,00	916,30	22,55	12,27	7,66	14,80	6,96
Mar/2012	21,00	409,24	47,52	16,15	10,74	14,43	3,90
Abr/2012	36,00	156,80	39,25	14,61	10,68	10,88	12,81
Mai/2012	73,50	245,36	27,20	34,11	14,42	7,56	5,74

Fonte: Autora da pesquisa.

A Figura 8.5 apresenta o comportamento “*wind power*”, ou seja, a potência do vento ao longo do período de estudo. Pode-se perceber que ocorreram variações durante este período, picos mais baixos do parâmetro w , como nos meses de junho/2011, julho/2011 e março/2012, bem como picos mais elevados nos meses de março/2011 e dezembro/2011. Portanto, os valores de w sofreram variações, com um desvio padrão em torno de $Sd = 39$ h.m/s.

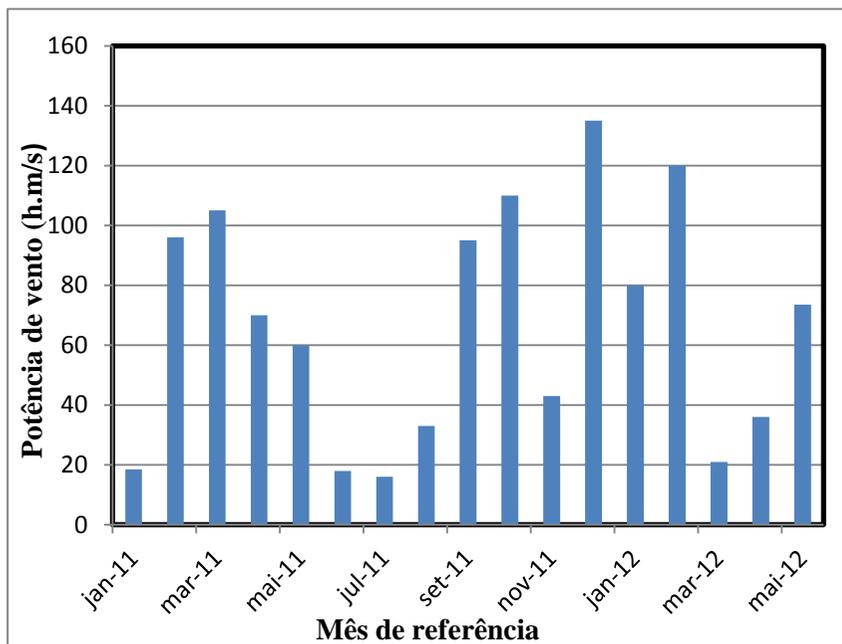


Figura 8.5 – Comportamento *wind power* (w) durante o período de estudo

Fonte: Autora da pesquisa.

A relação entre a deposição de cloretos e o parâmetro “*wind power*” (w) mensal, relativo aos ventos predominantes sul e sudeste para a estação de monitoramento afastada a 50 metros do mar, pode ser observada na Figura 8.6.

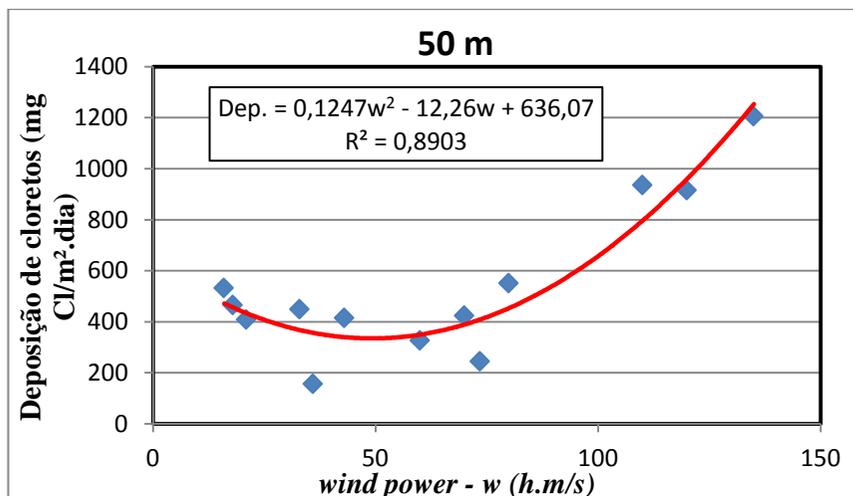


Figura 8.6 – Relação entre a deposição de cloretos e o parâmetro “wind power” mensal para a estação com 50 metros de afastamento do mar

Fonte: Autora da pesquisa.

As relações entre a deposição de cloretos e o parâmetro w , encontradas para todas as estações de monitoramento com 50m, 100m, 200m, 400m, 650m e 110m afastadas do mar, estão representadas na tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Relação entre a deposição de cloretos mensal e o parâmetro wind power (w) mensal, para todas as estações de monitoramento

Distância do mar	Relação	R ²
50 m	Dep. = $0,1247w^2 - 12,26w + 636,07$	R ² = 0,890
100 m	Dep. = $0,0137 w^2 - 1,225w + 68,94$	R ² = 0,337
200 m	Dep. = $0,010 w^2 - 1,250w + 60,46$	R ² = 0,318
400 m	Dep. = $-0,0013 w^2 + 0,096w + 22,42$	R ² = 0,103
650 m	Dep. = $0,0024 w^2 - 0,494w + 33,24$	R ² = 0,252
1100 m	Dep. = $-0,017 w^2 - 0,474w + 69,039$	R ² = 0,026

Fonte: Autora da pesquisa.

De acordo com as relações apresentadas na tabela acima, pode-se observar que o vento tem significativa influência na deposição de cloretos, porém devido aos valores de R^2 encontrados nas relações entre o vento e a deposição de cloretos, pode-se perceber que o vento não é o único responsável pela formação do aerossol. Nos primeiros 50 metros em relação ao mar, tem-se o valor de correlação entre as duas variáveis $R^2 = 0,89$, mostrando a grande influência do vento, já nas estações posicionadas a 100 e 200 m, percebe-se uma redução significativa desta correlação, com valores de $R^2 = 0,337$ e $R^2 = 0,318$, respectivamente. Portanto, há outros fatores que somados a influência do vento implicam significativamente na formação do aerossol e na sua deposição no avanço continental.

A Figura 8.6 mostra a relação entre a deposição de cloretos e a potencia de ventos para a estação com 50 m do mar, com valor de R^2 . Especificamente esta estação foi representada no estudo, pois é a estação que melhor reflete a formação do aerossol por estar mais próxima ao mar, dependendo menos da capacidade de transporte do aerossol pelo vento. As estações mais afastadas dependem do transporte do aerossol para uma maior deposição de cloretos.

Analisando os valores do parâmetro “*wind power*” (w) na Tabela 8.1 registrada acima, pode-se observar que, para um mesmo valor de w , ocorrem deposições de cloretos variadas. Nos meses de abril/2011 e maio/2012, por exemplo, os valores *wind power* apresentados foram de aproximadamente 70h.m/s, enquanto que a deposição de cloretos nestes meses foram de 423,55 mg Cl⁻/m².dia e 245,36 mg Cl⁻/m².dia, respectivamente. Pode-se perceber ainda que, para valores próximos de deposição de cloretos, como nos meses de abril/11, junho/11 e agosto/11 onde as deposições foram em torno de 450 mg Cl⁻/m².dia, já as potências de vento foram bastante variadas, em 70h.m/s, 18h.m/s e 33h.m/s, respectivamente.

Os resultados também mostram que o vento teve grande influência na deposição de cloretos, pois nos meses com elevados picos de potência de vento ocorreram as maiores deposições de cloretos, como nos meses de setembro/11, outubro/11, dezembro/11 e fevereiro/12, onde ocorreram os respectivos *wind power*, 95h.m/s, 110h.m/s, 135h.m/s e 120h.m/s, bem como as respectivas deposições 1235,80 mg Cl⁻/m².dia, 936,64 mg Cl⁻/m².dia 1205,80 mg Cl⁻/m².dia e 916.30 mg Cl⁻/m².dia.

Portanto, a análise da deposição de cloretos em relação à potência de vento mostra que o vento teve grande influência na

formação e no transporte do aerossol, principalmente nos primeiros 50 metros em relação ao mar. Mas além do vento, o fator que também exerce influência na deposição de cloretos é a energia de quebra das ondas, conforme já citado no subitem 2.3.5. Porém, neste estudo não foi possível dimensionar esta energia. A quebra das ondas tem maior ou menor relevância, dependendo do regime de ventos e das ondas de cada região. Quanto maior a arrebentação das ondas, maior a formação do aerossol e, de acordo com a intensidade do vento, há um transporte maior no sentido continental, principalmente porque a energia das ondas depende do vento.

Pode-se observar, neste estudo, que a maior deposição de cloretos ocorreu nos primeiros metros do mar, onde o vento foi o principal fator nesta deposição e que juntamente com a energia de quebra das ondas resultou na deposição total de cloretos. À medida que ocorre o afastamento do mar, a deposição de cloretos reduz drasticamente. Este comportamento se dá em função da baixa intensidade do vento, transportando pouco aerossol no sentido continental, e também pelo fato da energia das ondas não atuar a longas distâncias do mar. A concentração de cloretos à grandes afastamentos do mar é influenciado basicamente pela ação da intensidade do vento e se este se apresenta com baixa intensidade a quantidade de cloretos transportada reduz.

8.2 INGRESSO DE CLORETOS NO CONCRETO EXPOSTO AO AMBIENTE DE ATMOSFERA MARINHA

Inicialmente foi verificada a quantidade de cloretos existente no próprio concreto, através da amostra que não foi exposta ao ambiente marinho, apresentada na Figura 7.10, onde mostra uma tendência ao valor médio de 0,039% de cloreto em relação à massa de cimento. Assim, a quantidade de cloretos encontrada no concreto ficou com valor bem abaixo do limite de 0,15% preconizado pela NBR 12655 (2006), conforme pode ser visualizado na Tabela 8.3. Este teor corresponde aos íons cloro contidos na água de amassamento, nos agregados graúdo e miúdo, no cimento e aditivo utilizados na dosagem do concreto.

Tabela 8.3 – Limitação do teor de cloreto para proteção das armaduras

Tipo de estrutura	Teor máximo de íons cloro (Cl) no concreto (% sobre a massa de cimento)
Concreto protendido.	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura.	0,15
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura).	0,40
Outros tipos de construção com concreto armado.	0,30

Fonte: NBR 12655:2006

O prisma de concreto exposto a 50 metros do mar durante dezoito meses foi o que apresentou maior pico de concentração de cloretos (0,628%) em relação à massa de cimento, conforme figura 7.11, sendo o esperado por se encontrar muito próximo ao mar e com maior tempo de exposição. Para o período de nove meses de exposição, a concentração máxima de cloretos foi de 0,422%, enquanto que aos seis meses a concentração foi de 0,0995% em relação à massa de cimento. Os picos de concentração foram atingidos a uma profundidade média aproximada de 06 mm neste período.

Os resultados dos prismas afastados 50 metros do mar mostram que, nos primeiros seis meses de exposição, a concentração de cloretos foi muito baixa. No período de seis a nove meses ocorreu um aumento significativo da concentração e, nos últimos nove meses, houve um acréscimo, mas em proporções menores. O esperado seria que no período de nove a dezoito meses houvesse uma concentração maior de cloretos, devido ao maior tempo de exposição.

Segundo Calçada (2004), para concretos dosados com cimento CP IV, o coeficiente de difusão dos cloretos no concreto diminui com o passar do tempo, pois com o avanço das reações pozolânicas, o tamanho dos poros e sua interconexão tendem a diminuir em função dos produtos destas reações.

Para Helene (1993), o CO_2 penetra no interior do concreto através do mecanismo de difusão. A penetração e a reação da carbonatação ocorrem de forma gradual, formando uma camada carbonatada que aumenta de espessura com o tempo, chamada de frente de carbonatação. Na camada carbonatada, devido à precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), ocorre a redução da porosidade da pasta de cimento, pois este composto possui maior volume que os demais compostos hidratados do cimento.

Portanto, o fato de se ter uma quantidade menor de cloretos no concreto no período entre nove e dezoito meses, pode ser analisada sob dois aspectos: o efeito da redução do coeficiente de difusão de cloretos devido às reações pozolânicas do cimento Portland CP IV e, o efeito da carbonatação do concreto que devido à precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), provoca a redução da porosidade da pasta de cimento, formando uma camada de maior espessura com o tempo, impedindo a penetração dos cloretos.

Além dos resultados obtidos nos prismas de concreto, esta análise também pode ser realizada através da deposição de cloretos obtida da vela úmida, considerando a deposição acumulada nos períodos de exposição, bem como a deposição acumulada entre os períodos, apresentada na Tabela 8.4.

Tabela 8.4 – Deposição de cloretos acumulada no período de exposição na estação E50: 50 metros do mar

Tempo (meses)	Deposição Acumulada (mg/m^2)
6	118,417
9	206,624
14	285,202
Entre 6 e 9	88,207
Entre 9 e 14	78,578

Fonte: Autora da pesquisa.

Na tabela de deposição de cloretos acumulada, pode-se perceber que ocorreu uma concentração menor de cloretos no período entre nove e quatorze meses (período de análise da vela úmida), sendo menor que

no período entre seis e nove meses. Este resultado foi contrário ao esperado, devido à provável redução do coeficiente de difusão em função do maior tempo de exposição e também devido à camada carbonatada.

O pico de concentração de cloretos do concreto, conforme pode ser visualizado através dos perfis de cloretos nas Figuras 7.11 à 7.16, ocorreram com uma profundidade média aproximada de 06 mm a partir da superfície em todos os prismas. O fato de não ter picos de concentração com profundidades maiores no interior do concreto, é devido à microestrutura do concreto com cimento CP IV apresentar menor porosidade e interconexão entre os poros do concreto, com o passar do tempo. Assim, quanto maior o tempo de exposição do concreto, menor é a possibilidade de ingresso dos íons, havendo uma concentração de cloretos maior nas primeiras camadas superficiais.

Além disto, observou-se que a precipitação foi outro fator que teve grande influência nos resultados. Observando-se a concentração de cloretos no concreto nos primeiros seis meses, percebe-se uma baixa concentração (0,0995%) neste período, podendo ser decorrente da grande precipitação acumulada nos seis primeiros meses, em torno de 960 mm, mas principalmente pelas intensas chuvas no mês de agosto/11. Enquanto que a precipitação acumulada no período de seis a nove meses foi de 521 mm, apresentando uma concentração de cloretos de 0,422%. Já no último período de estudo, dos nove aos dezoito meses, a precipitação acumulada foi de 695 mm para uma concentração de 0,628%, porém a precipitação mensal neste período é somente até os 14 meses de exposição.

Os resultados mostram que no período de maior precipitação acumulada, menor foi a quantidade de cloretos no interior do concreto. O excesso de chuva deve ter reduzido a concentração de cloretos na superfície do concreto, por estar exposta, e assim por consequência, houve a redução de ingresso dos íons cloro no interior do concreto. Com a diminuição das precipitações acumuladas, como no período de seis e nove meses, houve um aumento na concentração de cloretos no concreto. Pode-se perceber a baixa precipitação mensal no período de nove a quatorze meses, porém com elevadas concentrações de cloretos.

No concreto exposto a 100 m do mar, Figura 7.12, observa-se que ocorreu uma grande concentração de cloretos no período entre seis e nove meses, comportamento este semelhante ao verificado na estação com 50 metros do mar. E também, que o pico de cloretos no interior do

concreto aos dezoito meses foi de 0,27%, muito próximo do cloreto máximo encontrado aos nove meses que foi de 0,223%, porém uma concentração significativamente pequena, nos seis primeiros meses de 0,0789%.

Nota-se, ainda, a significativa redução de cloretos no interior do concreto a 100 metros do mar, se comparado aos prismas expostos a 50 metros. A redução do pico de concentração de cloretos dos prismas expostos a 50 metros para os expostos a 100 metros do mar, aos 18, 9 e 6 meses foram de 57,01%, 47,15% e 20,70%, respectivamente. Porém, a redução média da deposição de cloretos proveniente da vela úmida, entre as duas primeiras estações em relação ao mar, foi de 85,81%, representando uma redução muito mais acentuada que a apresentada nos prismas de concreto e mostrando que as concentrações de cloretos são maiores com maior tempo de exposição.

Como a deposição de cloretos a 100 metros foi inferior à mesma deposição a 50 metros, percebe-se que o efeito da chuva deve ser mais significativo a 100 metros do mar, onde a concentração de cloretos na superfície do concreto é menor, pois a chuva remove parte deste cloreto. Além da chuva, a baixa influência do vento também pode ter sido um fator que interferiu na concentração de cloretos a 100 metros do mar, pois a fraca intensidade do vento não transporta a salinidade em longa distância na direção do continente, conforme citado no subitem 8.1.2.

A redução média na deposição de cloretos obtida na névoa salina, de 50 para 200 metros do mar, foi de 94,23%, enquanto que a redução no pico de concentração de cloretos no interior do concreto para 18, 9 e 6 meses de exposição foi de 81,70%, 80,57% e 41,72%, respectivamente. Observa-se que, quanto maior o tempo de exposição do concreto e mais afastado estiver do mar, menor é a concentração de cloretos, e esta relação pode ser explicada pelas mudanças que ocorrem na microestrutura do concreto.

Nos perfis de cloretos dos prismas afastados a 400 metros do mar, como pode ser visualizado na Figura 7.14, o pico de concentração referente aos dezoito meses ficou muito próximo do pico de concentração referente aos nove meses, 0,083% e 0,079%, respectivamente. Enquanto que aos seis meses ficou com 0,048%.

A redução da concentração de cloretos no interior do concreto, de 50 metros para 650 metros em relação ao mar referente aos 18, 9 e 6 meses de exposição, foi de 91,24%, 88,90% e 53,78%, respectivamente.

A redução média na deposição de cloretos para esta mesma relação de afastamento do mar foi de 97,27%. Esta redução acentuada na quantidade de cloretos do concreto pode ser também explicada pela barreira causada pela vegetação localizada neste afastamento. A vegetação pode ter impedido a passagem da salinidade trazida pelo vento e, assim, reduzido a concentração desta na superfície do concreto. Os prismas estavam posicionados a um metro de altura do solo, porém ficaram parcialmente livres da vegetação, já que algumas plantas tinham altura maior que 1,50 metros.

A 1100 metros de distância em relação ao mar, os picos de concentração relativos a seis e nove meses de exposição ficaram muito próximos, com 0,042% e 0,045% respectivamente, enquanto que aos dezoito meses teve uma concentração de 0,051%. Porém, valores já muito baixos de cloretos no interior do concreto, pouco acima da quantidade de cloretos no concreto que não foi exposto à atmosfera marinha. Neste afastamento, a vegetação também teve influência na redução de cloretos no concreto.

Porém, nas distâncias de 650 e 110 metros em relação ao mar, apesar da presença da vegetação e da possibilidade desta ter provocado uma redução na concentração de cloretos, outros fatores devem ser considerados. O vento, conforme tabela 8.2, apresentou baixa intensidade para influenciar no transporte do aerossol a estas distâncias do mar. Outro fator é a elevada precipitação acumulada nos seis primeiros meses, a chuva provoca a remoção da salinidade depositada na superfície do concreto, reduzindo o ingresso desta no interior do concreto.

A Figura 8.7 apresenta o comportamento dos picos de concentração de cloretos no interior do concreto em relação à distância ao mar, correspondente ao tempo de exposição na atmosfera marinha. Estes picos de concentração aconteceram com aproximadamente 06 mm de profundidade em relação à superfície do prisma. E pode-se perceber que nos primeiros 200 metros houve uma concentração mais acentuada de cloretos no concreto, porém com maior tempo de exposição.

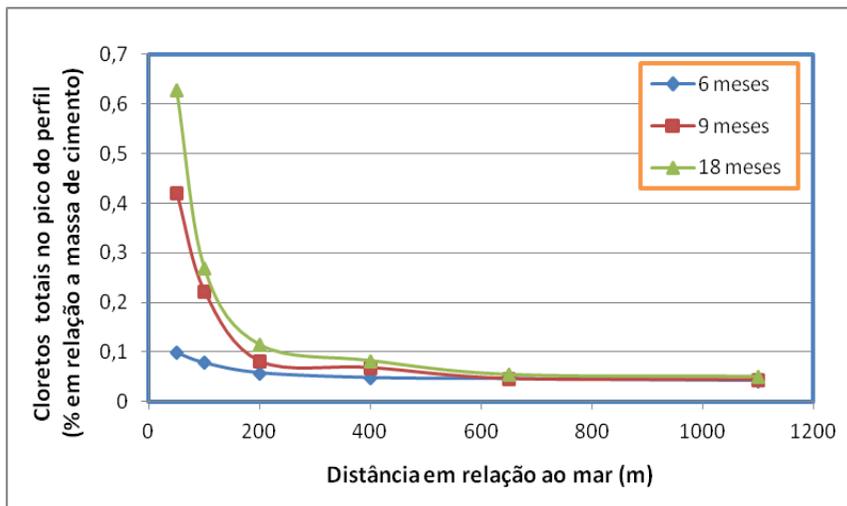


Figura 8.7 – Concentração de cloretos nos picos dos perfis em relação à distância ao mar no período de exposição

Fonte: Autora da pesquisa.

As concentrações máximas de cloretos no concreto dependem dos fatores externos, como a concentração de cloretos na superfície do concreto, e também dos fatores intrínsecos ao próprio concreto. O concreto é um material heterogêneo e em constante mudança. Algumas propriedades, como a porosidade, o grau de saturação, a resistência mecânica, entre outros, variam ao longo de sua vida útil. E alguns fatores podem alterar significativamente suas propriedades.

Assim, os prismas que foram expostos nos diferentes períodos de exposição podem apresentar diferenças nas características do seu concreto de tal forma que, mesmo com períodos mais longos de exposição, alguns prismas tenham sido mais resistentes ao ingresso dos cloretos. Isto pode ser visualizado nos prismas expostos a 400 metros do mar, Figura 7.14, onde o pico de concentração dos cloretos no concreto exposto durante nove meses ficou praticamente igual ao exposto por dezoito meses. Considerando que o efeito da chuva foi o mesmo para todos os prismas durante o mesmo período de exposição, o comportamento da concentração dos cloretos nos períodos citados não poderia ser atribuído à influência da precipitação.

O prisma de concreto que apresentou maior concentração de cloretos foi o exposto a 50 metros do mar e aos dezoito meses de exposição, com 0,628% de cloretos em relação à massa de cimento situada a aproximadamente 06 mm de profundidade a partir da superfície do concreto. Porém, sendo esta a máxima concentração dos prismas expostos, esta profundidade está muito distante do cobrimento nominal de 40 mm, que a NBR 6118 (2007) estabelece para dimensionamento de estruturas em zona de atmosfera marinha, ou 30 mm de cobrimento mínimo para vigas e pilares, conforme pode ser visualizado na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipos de estruturas	Componente ou elemento estrutural	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga / pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118 (2007).

Nota: Δc - Tolerância de execução para o cobrimento.

Os perfis de ingresso de cloretos nos prismas de concreto aos dezoito meses, nas distâncias de 50, 100, 200, 400, 650 e 1100 metros em relação ao mar, podem ser visualizado na Figura 8.8.

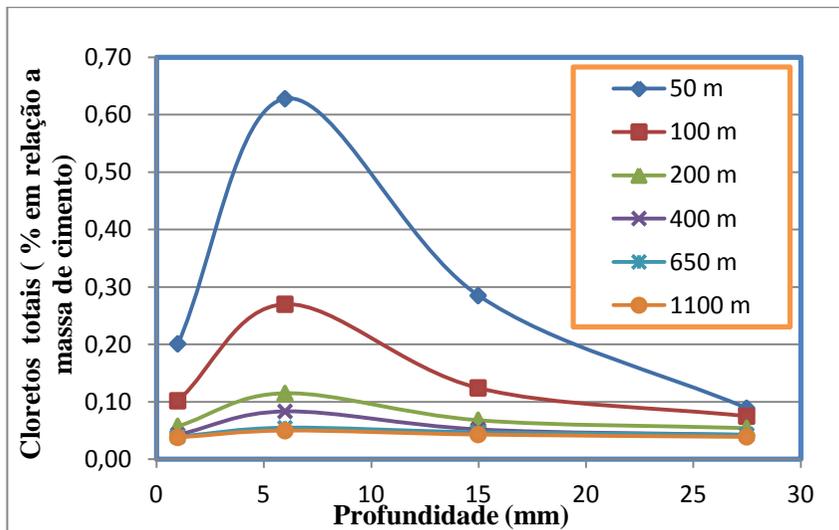


Figura 8.8 – Perfis de cloretos dos concretos aos 18 meses de exposição natural, em relação ao afastamento do mar

Fonte: Autora da pesquisa.

Pode-se observar na figura acima que os perfis apresentam um mesmo tipo de comportamento: os maiores picos de concentração de cloretos encontram-se adentrados no concreto, nenhum na superfície ou próximo da mesma. Este comportamento pode ser decorrente da camada de carbonatação. Através da tabela 7.4, pode-se perceber que a profundidade de carbonatação do concreto aos 18 meses de exposição, praticamente coincide com as profundidades de pico de cloretos. Pois com o passar do tempo aumenta a espessura da camada de carbonatação, dificultando o ingresso de cloretos a maiores profundidades.

A umidade relativa do ambiente pode estar relacionada com a água presente no interior do concreto. A figura 7.5, mostra que no período de estudo a umidade relativa média foi de aproximadamente 89%, sendo elevada. Assim pode-se dizer que os prismas de concreto se apresentaram parcialmente saturados no período estudado, facilitando o ingresso de cloretos por difusão e favorecendo o efeito de carbonatação.

A distância do mar em relação ao posicionamento dos prismas de concreto também tem grande influência quanto ao ingresso de cloretos. Pode-se perceber a redução da concentração de cloretos no interior do concreto, dos prismas afastados 50 metros do mar em relação

aos prismas afastados a 100 metros. A redução do pico de concentração de cloretos de 50 para 100 metros foi de 57%. E os picos de concentração de cloretos de 650 e 1100 metros obtiveram uma concentração muito baixa, comportamento este devido à vegetação mais concentrada nestes afastamentos, impedindo a chegada de cloretos trazidos pelo vento.

8.2.3 Resultados apresentados de alguns estudos realizados

Nos perfis de ingresso de cloretos obtidos por Meira (2004), em um concreto com cimento CP IV e relação a/c de 0,57 no período de 18 meses de exposição à atmosfera marinha e com afastamento de 10 metros do mar, teve um pico de concentração de cloretos de 0,55%. No período de 12 meses, o mesmo autor obteve uma deposição de cloretos acumulada, medida através da vela úmida, de 195,24 mgCL⁻/m².

No presente estudo, para o mesmo concreto e relação a/c no período de 18 meses de exposição, o pico do perfil de ingresso de cloretos foi de 0,628% nos prismas de concreto expostos a 50 metros do mar. Pode-se perceber a semelhança entre os valores das concentrações de cloretos para diferentes distâncias. Já a deposição de cloretos acumulada proveniente da vela úmida no período de 12 meses de exposição foi de 262,31 mgCL⁻/m², sendo 34,5% maior que a deposição medida no estudo de Meira (2004).

Também na pesquisa realizada por Garcia (2008) na região de Florianópolis, o pico de concentração de cloretos em prismas expostos a 10 metros do mar, no período de 12 meses, foi de apenas 0,42%, porém o concreto utilizado na pesquisa foi CP IV com relação a/c de 0,65. No período de 12 meses de exposição à atmosfera marinha, a deposição de cloretos acumulada, também medida por vela úmida, foi de 311, 312 mgCL⁻/m², sendo esta 59% maior que a deposição medida por Meira (2004) em João Pessoa, e 18,5% maior que a deposição medida no presente estudo na cidade de São Francisco do Sul.

Estas variações podem ser explicadas devido às diferenças no índice de vazios do concreto: no presente estudo, o índice foi de 12,54%; no concreto usado por Meira (2004) foi de 12,84%; e no concreto adotado por Garcia (2008) o índice foi de 9,18%. Quanto à absorção

total do concreto também se observa 5,29%, 5,72% e 4,02%, respectivamente.

A absorção do concreto é um mecanismo importante no ingresso dos cloretos em concretos expostos a ambientes marinhos, conforme exposto no capítulo 3. O concreto desta pesquisa apresentou uma absorção total, 30% maior que a absorção do concreto adotado na pesquisa de Garcia (2008). Assim, o ingresso de cloretos neste último foi menor, o que era esperado, para as mesmas condições de agressividade. Porém, já a absorção do concreto desta pesquisa para com o utilizado por Meira (2004) foi 7,51% menor.

Os perfis de cloretos da pesquisa de Garcia (2008) resultaram em menores concentrações de cloretos, que aqueles encontrados por Meira (2004) e os encontrados nesta pesquisa, devido à qualidade do concreto utilizado.

8.3 SEGMENTAÇÃO DA ZONA DE ATMOSFERA MARINHA BASEADA NOS RESULTADOS DA PESQUISA

Com base nos resultados desta pesquisa, propõe-se, de acordo com a metodologia aplicada por Meira (2004), a segmentação da zona de atmosfera marinha na região litorânea de São Francisco do Sul, norte de Santa Catarina.

A segmentação da zona de atmosfera marinha proposta por Meira (2004) leva em consideração três formas de determinação. São elas: o comportamento da deposição dos cloretos e sua redução à medida que ocorre o afastamento do mar; o comportamento da concentração total de cloretos no concreto, bem como sua relação com a deposição da vela úmida; e a vida útil da estrutura, baseada no teor de cloretos necessário para a despassivação da armadura.

A proposta final para a segmentação da zona de atmosfera marinha apresentada por Meira (2004) está representada na Tabela 8.6.

Tabela 8.6 – Proposta final de segmentação da zona de atmosfera marinha para a pesquisa de Meira (2004)

Faixa de agressividade		Distâncias aproximadas para a região do estudo (m)		
Nível de agressividade	Deposição média (mgCl/m ² .dia)			
Elevada	Até 100	Até 100	1a	1
Moderada	Entre 100 e 10	Entre 100 e 600	1b	
Mínima	Menor que 10	Acima de 600	2	

Fonte: Autora da pesquisa.

Na proposta final de Meira (2004) mostrada na tabela acima, o autor subdivide a zona de agressividade marinha (desde a mínima até a elevada) em duas novas faixas agressivas. A zona identificada como 1, que corresponde efetivamente à zona de atmosfera marinha, sendo esta dividida em dois níveis de agressividade, onde o comportamento do ingresso de cloretos no concreto e sua vida útil são bastante diferenciados. A zona identificada como 2 refere-se à zona com a presença de cloretos, porém sua quantidade é muito pequena e as armaduras permanecem passivas durante um longo período.

A NBR 6118 (2007), por sua vez, classifica a zona de atmosfera marinha como classe de agressividade III, ou seja, apresenta uma forte agressividade. Suas recomendações estão apresentadas na Tabela 8.7, e são: relação a/c máxima de 0,55, classe de concreto mínimo C30 e cobrimentos nominais de 35 mm pra lajes e 40 mm pra vigas e pilares, conforme Tabela 8.5. Estas recomendações visam à qualidade do concreto para os diferentes ambientes agressivos.

Tabela 8.7 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

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

Nota:

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

Fonte: NBR 6118 (2007)

A qualidade do concreto influencia diretamente no limite de agressividade marinha, pois a determinação do limite entre as zonas de agressividade II e III depende da qualidade do concreto.

Com o intuito de aplicar a proposta de segmentação de Meira (2004) para a região litorânea de São Francisco do Sul estudada neste trabalho, fez-se um comparativo entre o concreto utilizado nesta pesquisa e o concreto adotado pelo referido autor, ambos dosado com o mesmo tipo de cimento e mesma relação água/cimento apresentado na Tabela 8.8, analisando assim, a qualidade do concreto utilizado nos dois estudos.

Tabela 8.8 – Comparação entre o concreto utilizado por Meira (2004) e o utilizado nesta pesquisa

Concreto	Meira (2004)	São Francisco do Sul
Dosagem (ci.:ag. m.:ag. g.)	1 : 2,29 : 2,67	1 : 2,62 : 3,38
Resistência característica f_{ck} (MPa)	25	30
Tipo de cimento	CPIV – RS - 32	CPIV – RS - 32
Relação água/cimento	0,57	0,573
Consumo de cimento (kg/m ³)	356	350
Abatimento (slump) (cm)	8±1	12 ± 2
Resistência à compressão f_{c7} (MPa)	-	26,90
Resistência à compressão f_{c14} (MPa)	-	31,50
Resistência à compressão f_{c21} (MPa)	-	34,10
Resistência à compressão f_{c28} (MPa)	26,90	35,20
Aditivo (l/m ³)	0	2,808
Absorção por imersão (%)	5,72	5,29
Índice de vazios (%)	12,84	12,54
Massa específica real (g/cm ³)	2,59	2,73

Fonte: Autora da pesquisa.

Observa-se que o concreto utilizado neste estudo apresentou características semelhantes ao concreto utilizado por Meira (2004). O concreto utilizado em São Francisco do Sul possui menor índice de vazios e menor absorção, mas com uma diferença percentual pouco significativa. Possui, porém, uma maior resistência característica de 30

MPa e, assim, uma maior resistência à compressão aos 28 dias. Concretos de melhor qualidade são os que apresentam sua microestrutura mais fechada, ou seja, menor índice de vazios e absorção capilar. Os agentes agressivos terão, assim, maiores dificuldades em penetrar no interior do concreto, apresentando menores concentrações de cloretos no concreto.

Portanto, é possível utilizar os limites propostos por Meira (2004), para a segmentação da zona de atmosfera marinha em São Francisco do Sul, pois o concreto utilizado neste estudo apresentou qualidade semelhante ou pouco superior ao concreto utilizado pelo referido autor. Para um concreto com qualidade superior ao utilizado por Meira (2004), se adotaria limites a favor da segurança. Embora, a proposta do referido autor, levou em consideração a tendência de comportamento de vida útil para seis tipos de concreto diferentes. E a tendência foi à mesma para todos, assim, a proposta não é específica e tem aplicação mais ampla, não sendo especificamente a semelhança do concreto que define o uso do mesmo critério.

Na determinação da zona de transição entre as classes de agressividade II e III, devido à distância em relação ao mar, Meira (2004) propõe a extensão da zona de atmosfera marinha até o limite de deposição de $10 \text{ mgCl}^-/\text{m}^2$ e sua segmentação em duas faixas agressivas, que corresponde às zonas 1 e 2 identificadas na Tabela 8.6. O referido autor mostrou em sua proposta de segmentação, que na cidade de João Pessoa/Paraíba, a distância limite entre as classes II e III seria de 600 metros afastados do mar.

A deposição média de cloretos na estação de monitoramento mais afastada do mar nesta pesquisa, estando a 1100 metros, foi de $9,21 \text{ mgCl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$. Analisando a curva de deposição de cloretos na Figura 8.1 e através da equação lá apresentada, é possível determinar a distância em relação ao mar, onde a deposição média corresponde ao valor limite proposto por Meira (2004). Sendo assim, com base nos resultados desta pesquisa, sugere-se a distância de 1100 metros do mar, como sendo o limite entre as classes de agressividade ambiental II e III, conforme NBR 6118 (2003). A equação da curva da Figura 8.1 mostrou que o limite de deposição de $10 \text{ mgCl}^-/\text{m}^2$ sugerido por Meira (2004) ocorreu a uma distância de 1010 metros do mar. Porém, sugere-se adotar de forma conservadora neste estudo, a distância de 1100 metros como limite entre as classe de agressividade II e III.

Meira (2004) sugere uma segmentação dentro da própria zona de atmosfera marinha, sendo a zona de agressividade moderada (entre 10 mgCl/m².dia e 100 mgCl/m².dia) e a zona de agressividade elevada (acima de 100 mgCl/m².dia). Os dados deste estudo mostram que a faixa de agressividade elevada ocorre até 98 metros de distância do mar e a agressividade moderada compreende a faixa entre 98 e 1100 metros do mar.

A Tabela 8.9 apresenta a proposta de segmentação da zona de atmosfera marinha, conforme sugerido por Meira (2004), para a região de São Francisco do Sul, de acordo com os dados coletados e resultados obtidos neste estudo. A adaptação feita por Garcia (2008), alterando as classes 1 e 2 de Meira (2004), para classes CAA III e CAA II, respectivamente, mantendo a mesma terminologia da norma NBR 6118 (2003), foi mantida também na proposta deste estudo.

Tabela 8.9 – Proposta de segmentação da zona de atmosfera marinha na região de São Francisco do Sul

Faixa de agressividade		Distâncias aproximadas para a região de São Francisco do Sul (m)		
Nível de agressividade	Deposição média (mgCl/m ² .dia)			
Elevada	Até 100	Até 98	III a	CAA III
Moderada	Entre 100 e 10	Entre 98 e 1100	III b	
Mínima	Menor que 10	Acima de 1100	CAA II	

Fonte: Autora da pesquisa.

É importante salientar que esta proposta para a região de São Francisco do Sul baseia-se nos dados coletados neste estudo e que correspondem a 14 meses de coletas de dados referentes à deposição de cloretos por vela úmida; e 18 meses de exposição de prismas de concreto para a obtenção da concentração de cloretos no interior do concreto, com estações afastadas 50, 100, 200, 400, 650 e 1100 metros do mar. Estes dados são referidos a esta região.

Uma proposta de segmentação da zona de atmosfera marinha para a região de Florianópolis também foi sugerida, em estudo realizado por Garcia (2008), a partir da proposta de Meira (2004) e dos limites sugeridos por este para as classes de agressividade II e III. A proposta de segmentação de Garcia (2008) está apresentada na Tabela 8.10.

Na análise dos dados obtidos no estudo de Garcia (2008), observou-se que o concreto utilizado para a região de Florianópolis apresentou melhor qualidade quanto a sua durabilidade em relação ao concreto utilizado por Meira (2004). O concreto utilizado por Garcia (2008) apresentou um índice de vazios de 9,18%, absorção total de 4,02% e maior resistência à compressão aos 28 dias de 24,5 MPa, enquanto que o concreto utilizado por Meira (2004) apresentou respectivamente, 13,19%, 6,09% e 21Mpa. Portanto, o concreto utilizado na região de Florianópolis ficou com melhor qualidade em relação ao utilizado por Meira (2004) e ao concreto utilizado neste estudo, pois os agentes agressivos terão mais dificuldade para penetrar no concreto, em função da microestrutura mais fechada, proporcionando menores concentrações de cloretos no interior do concreto.

Tabela 8.10 – proposta de segmentação da zona de atmosfera marinha na região de Florianópolis

Faixa de agressividade		Distâncias aproximadas para a região de Florianópolis(m)		
Nível de agressividade	Deposição média (mgCl/m ² .dia)			
Elevada	Acima de 100	Até 95	III a	CAA III
Moderada	Entre 100 e 10	Entre 95 e 1400	III b	
Mínima	Menor que 10	Acima de 1400	CAA II	

Fonte: Garcia (2008).

Observa-se que na proposta sugerida por Garcia (2004), a distância ao mar em que a taxa de deposição média de cloretos corresponde ao valor limite de Meira (2004), de 10 mgCl/m².dia, foi de 1400 metros em relação ao mar, sendo esta a distância limite entre as

classes de agressividade II e III. Nota-se, também, que a faixa de agressividade elevada ficou nos primeiros 95 metros do mar.

Portanto, os dados obtidos em cada região estudada, tem uma aplicação muito restrita, porém visam sanar a lacuna hoje existente na área de projetos estruturais em relação à limitação das classes de agressividade ambiental, proporcionando estruturas de concreto armado mais econômicas.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

9.1 CONCLUSÕES

Com a realização deste estudo foi possível observar a redução da deposição de cloretos em relação ao distanciamento do mar, como já era esperado. A relação que melhor descreveu este comportamento para a região estudada foi do tipo $Dep. = a.d^{-b}$, mesma relação encontrada por Garcia (2008) em seu estudo na região de Florianópolis/SC, porém diferente daquela escolhida por Meira (2004), do tipo $Dep. = a.e^{(-b).d}$, para sua pesquisa em João Pessoa/PB. Esta relação depende diretamente das condições climáticas de cada região. O regime de ventos e a energia das ondas exercem grande influência na formação e transporte do aerossol marinho, qualquer alteração no comportamento destas variáveis proporciona mudanças no comportamento da deposição de cloretos.

A partir do comportamento da deposição média de cloretos e da sua interação com os concretos estudados, o limite proposto neste estudo para segmentação entre as zonas de agressividade ambiental, classes II e III definidas pela NBR 6118 (2007), para a região estudada de São Francisco do Sul/SC é de 1100 metros de distância do mar.

Ainda, segundo critério proposto por Meira (2004), dentro deste limite o comportamento agressivo assume diferentes níveis. Os níveis de agressividade elevada, ficando nos primeiros 100 metros em relação ao mar, a agressividade moderada na faixa entre 100 a 1100 metros. E agressividade mínima acima dos 1100 metros. Portanto, conclui-se que o limite entre as classes de agressividade II e III proposto neste estudo ocorra a 1100 metros do mar de forma conservadora.

Pode-se observar que, em relação às condições climatológicas, a precipitação teve grande influência na redução da concentração de cloretos no interior do concreto, pois nos períodos com maior precipitação acumulada, ocorreram as menores concentrações de cloretos. Já o vento apresentou significativa influência sobre o ingresso de cloretos nos primeiros 50 metros de distância em relação ao mar que

juntamente como a influência da energia de quebra das ondas na formação do aerossol, resultou em elevadas concentrações de cloretos nestes primeiros metros. À medida que ocorreu o afastamento das estações em relação ao mar, as concentrações de cloretos reduziram consideravelmente, devido à baixa intensidade do vento.

Devido à pequena variabilidade da temperatura no período estudado, não permitiu identificar variações significativas quanto ao ingresso dos cloretos. Já umidade relativa média se mostrou elevada durante todo o período, assim os prismas de concreto encontraram-se parcialmente saturados, facilitando o ingresso de cloretos por difusão e permitindo a frente de carbonatação.

Embora se tenha proposto uma segmentação da zona de atmosfera marinha para a região de São Francisco do Sul, ainda não há dados suficientes da deposição de cloretos, do ingresso destes íons no concreto e do seu teor crítico para a despassivação da armadura, dos concretos utilizados e nem do comportamento agressivo de toda a região. Porém, este estudo procurou oferecer um parâmetro inicial em torno de uma distância limite entre as zonas urbanas e as de atmosfera marinha e assim, situar melhor os projetistas de estruturas de concreto desta região.

É importante ressaltar que este estudo foi realizado a sudeste da ilha de São Francisco do Sul/SC por um curto período de tempo, onde a deposição de cloretos limite foi presumida como sendo a mesma apresentada na pesquisa de Meira (2004). Também não foram realizadas previsões de vida útil com os dados levantados neste estudo, sendo possível o deslocamento deste limite, aumentando ou diminuindo a faixa em relação ao mar da zona de atmosfera marinha.

Esta proposta é resultado de um estudo preliminar que busca preencher a lacuna deixada pela NBR 6118 (2007) na região em estudo, que deve ser aprimorada com a continuidade de levantamentos de dados, a fim de mapear toda a região.

9.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Foram muitas as dificuldades encontradas para a realização desta pesquisa. Seguem listadas as principais:

1. O local para se realizar a pesquisa. Procurou-se por terrenos livres de obstáculos e não edificados. Após escolher o local adequado para a instalação das estações, solicitou-se, junto ao proprietário, a autorização. Como todo terreno pertencia a uma empresa da região, foi necessário contato com um único proprietário. A empresa exigiu comprovação da Universidade Federal de Santa Catarina, quanto à veracidade da pesquisa, bem como uma declaração que confirmasse o não uso de elementos tóxicos.
2. Os furtos e danos ao longo da pesquisa nos aparatos de vela úmida e extravio dos prismas de concreto, muitos foram localizados fora da sua posição original. A estação a 10 metros do mar precisou ser deslocada para 50 metros, em local protegido, a fim de evitar os furtos mensais que aconteceram no início da pesquisa.
3. A estação a 1100 metros do mar estava localizada em região alagada que piorava nos períodos de chuva, dificultando o acesso para a coleta mensal dos dados.
4. O alto custo para a realização dos ensaios. Devido ao custeio próprio, esta foi a principal dificuldade encontrada na realização da pesquisa. Foi necessário contratar laboratório para a realização dos ensaios das amostras de água e amostras de pó de concreto. Além da dificuldade para localizar laboratório na região para tais ensaios, o custo de cada ensaio foi alto. E, ainda, o alto custo para preparar os aparatos e prismas de concreto.
5. Dificuldade na interpretação dos dados ambientais fornecidos pelo EPAGRI, devido ao excesso de informações repassadas.

9.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Não existem muitos estudos relacionados ao efeito do afastamento do mar na redução da agressividade por cloretos nas estruturas de concreto. Assim, é importante que outras pesquisas complementem este trabalho. Mapeando as diversas regiões litorâneas, já que o Brasil possui uma extensa costa marítima.

Sugere-se então, alguns temas relevantes para dar seguimento ao trabalho aqui realizado:

- Análise do comportamento da vida útil das estruturas e do teor de despassivação das armaduras nesta região estudada.
- Medição da deposição de cloretos por vela úmida ao norte e ao sul da ilha de São Francisco do Sul, para confrontar com os dados desta pesquisa, a leste da ilha. Medição também da energia das ondas, por se tratar de uma região de grande arrebentação, possibilitando analisar a influência desta energia na deposição de cloretos.
- Estudo do comportamento da relação entre a deposição de cloretos e a vida útil para concretos com relação água/cimento inferiores à estudada.
- Estudo da concentração de cloretos no interior dos prismas de concreto, porém os prismas teriam suas faces protegidas com reboco antes de serem expostos, simulando a real condição de exposição das estruturas de concreto.
- Estudo do comportamento do aerosol marinho para regiões onde a velocidade do vento atinjam maiores intensidades, de forma a obter relações com a deposição de cloretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALANIS, I.L. **Corrosión y protección del acero en el hormigón armado**. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 1990.

ALBUQUERQUE, A.T.; OTOCH, S. Proposta de classificação da agressividade do ambiente na cidade de Fortaleza. **47º Congresso Brasileiro do Concreto**. Recife, IBRACON, 2005

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

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Chloride threshold values to despassivate reinforcing bars embedded in a standardized. **Cement and Concrete Research**. V. 30, 2000, p. 1047-1055.

ALVES, A.M.C. Contribuição à análise da perspectiva de vida útil de estruturas em concreto face ao teor de concreto registrado em Maceió/AL. **Mestrado em Engenharia Civil**. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

AMBLER, H.R.; BAIN, A.A.J. Corrosion of metals in the tropics. **Journal of applied Chemistry**. 1995, p. 437-467.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 222**: Corrosion of metals in concrete, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D512 – 12. Standard Test Methods for Chloride Ion. In.: **Water**. Philadelphia (USA), 1981.

_____. ASTM C 114. Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. ASTM C114, In.: **Annual Book of Standards**. Philadelphia (USA),1994.

_____. ASTM C 1152. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. In.: **Annual Book of Standards**. Philadelphia (USA), 1994.

_____. ASTM G 140. Standard test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method. In.: **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia (USA), 1996.

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

ANDRADE, J.J.O. Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: Análise das Manifestações Patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco. **Mestrado em Engenharia Civil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

ANDRADE, J.J.O. O. Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos. **Doutorado em Engenharia Civil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001

ANDRADE, J.; DAL MOLIN, D. Aplicação dos princípios de confiabilidade na previsão da vida útil de projeto das estruturas de concreto armado. In.: **43º Congresso Brasileiro do Concreto**. IBRACON, 2001.

ANDRADE, C.; ALONSO, M.C. On-site: measurements of corrosion rate of reinforcements. **Construction and Building materials**. V. 15,2001, p. 141-145.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6211**. Corrosão atmosférica – determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 9779**. Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para Moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland – Preparo controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CHELAND, D.J. Assessment of durability of concrete from impermeation properties: a review. **Construction and Building materials**. V. 15, 2001, p. 93-103.

BASHEER,L.; BASHEER, P.A.M.; LONG, A.E. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**. V. 19, 2005, p. 682-690.

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

BLANCHARD, D.C.; WOODCOCK, A.H. The production, concentration and vertical distribution of sea salt aerosol. *Ann NY. Acad. Sei.*1980, p. 330-347.

BUENFELD, N.R. Measuring grand modeling transport phenomena in concrete for life prediction of structures. 1995, p. 77-90.

BURDEN, D. The Durability of Concrete Containing High Level soft Fly Ash. **Master of Science in Engineering.** University of New Brunswick, 2006.

CADORE, W.W. Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores e adições minerais e cal hidratada. **Mestrado em Engenharia Civil.** Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2008.

CALÇADA, L. M. L. Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto. **Doutorado em Engenharia Civil.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

CAMARINI, G. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. In: **41º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.** Salvador, 1999.

CARMONA, A.; MAREGA, A. **Retrospectiva da Patologia no Brasil** – estudo estatístico. Jornada em Espanol y Português sobre Estructuras e Materials. Madrid. V.6, 1988, p. 101-123.

CARMONA, T.G. Modelos de Previsão da Despassivação das Armaduras em Estruturas de Concreto Sujeitas à Carbonatação.

Mestrado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005

CASCUDO, O.O **controle da corrosão de Armaduras em Concreto:** Inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG, 1997.

_____. O. Influência das características do aço carbono destinado ao uso das armaduras para concreto armado no comportamento frente à corrosão. **Doutorado em Engenharia Civil.** Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 2000.

_____. Inspeção e Diagnósticos de Estruturas de Concreto com Problemas de Corrosão da Armadura. In: ISAIA, G. C. **Concreto. Ensino Pesquisa e Realizações.** V. 1. São Paulo: IBRACOM, 2005.

CASTRO, P. Corrosión en estructuras de concreto armado. **Cemento y Concreto.** México, 1998.

CINCOTTO, M.A.; SILVA M.A.; CARASEK, H. **Argamassas de Revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. (Boletim Técnico 68)

COLE, I.S.; PATERSON, D.A.; GANTHER, W.D. Holistic model for atmospheric corrosion - Theoretical framework for production, transportation and deposition of marine salts. **Corrosion Engineering Science and Technology.** V. 38, 2003, p. 129-134.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON - CEB. **Durability of concrete structure. State of the art report.** Bulletin D'Information n° 192, 1989.

_____. **CEB. Durable Concrete Structure.** Design Guide-Bulletin D'Information n°182, Paris, 1992.

_____. **CEB-FIP Model Code 1990**. London, Thomas Telford, 1993.

CONCIATORI, D.; LAFERRIÈRE, F.; BRUHWILER, E. Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate. **Cement and Concrete Research**. V. 40, 2010, p. 109-118.

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

CRAUSS, C. Penetração de cloretos em concretos com deferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial. **Mestrado em Engenharia Civil**. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010.

CUNHA, A.C.Q.; HELENE, P.R.L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2001.

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

DAL MOLIN, D.C.C. Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microsilica. **Doutorado em Engenharia Civil**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

DHIR, R.K.; JONES, M.R.; AHMED, H.E.H.; SENEVIRATNE, A.M.G. Rapidest Rimation of choride diffusion coefficient in concrete. **Magazine of Concrete Research**. V. 42, n. 152, 1990, p. 177-1785.

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

FIGUEIREDO, E.J.P.; ANDRADE, C.; HELENE, P.R.L. **Fatores determinantes da iniciação e prorrogação da corrosão da armadura de concreto**. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil – PCC. Escola Politécnica da USP, 1993.

FIGUEIREDO, E.P. **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto**. Concreto: ensino, pesquisa e realizações - Volume II. São Paulo: IBRACON, 2005, p. 829-855.

FITZGERALD, J.W. Marine aerosols: a review. **Atmospheric Environment**. V. 25A, 1991, p. 533-545.

GARCIA, R.B. Avaliação da Atmosfera marinha em estruturas de concreto na região de Florianópolis–SC. **Mestrado em Engenharia Civil**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed., Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GJØRV, O. E. Steel corrosion in concrete structures exposed to norwegian marine environment. **ACI Concrete International**, 1994, p. 35-39.

_____. Effect of condensed silica fume on steel corrosion in concrete. **ACI Materials Journal**. V. 92, n. 6, 1995, p. 591-598.

GJØRV, O. E., NGO, M. H., e MEHTA, P. K. Effect of Rice Husk Ash on the Resistance of Concrete Against Chloride Penetration. **Concrete in Severe Environment**. Tromso, Norway, 1998.

GONI, S.; ANDRADE, C. Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides. **Cement and Concrete Research**. V. 20, 1990, p. 525-539.

GONZALEZ, J.A. Some questions on the corrosion of steel in concrete - Part I: when, how and how much steel corrodes. **Materials and Structures**, v.29, 1996.

GULIKERS, J. Reliability of laboratory techniques for chloride analysis of reinforced concrete structures. In.: **International RILEM Workshop on Testing and Modeling Chloride Ingresses Into Concrete. Proceedings**, Paris, 2000.

GUIMARÃES, A.T.C. Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos. **Doutorado em Engenharia Civil**. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GUIMARÃES, A.T.C.; HELENE, P.R.L. Influence of the saturation degree of concrete on chloride diffusion: laboratory and fields tests in marine structure 22 year-old. In: **Third International Conference on High Performance Concrete and Quality of Concrete Structures. Proceedings**. Recife, 2002, p. 169-192.

GUIMARÃES, A.T.C. Medição de grau de saturação em concreto: Estação de Santa Pola - Espanha. In: **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**. Rio Grande do Sul, 2011.

GUSTAFFSON, M.E.R.; FRANZÉN, L.G. Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweeden. **Atmospheric Environment**. V. 30, n. 6, 1996, p. 977-989.

GRUBE, H. **Transport mechanisms and definitions**. Performance criteria for concrete durability. RILEM REPORT 12, 1995, p. 4-13.

HARRIS, D.C. **Quantitative Chemical Analysis**. 5. ed, W. H. Freeman and Company, New York, 2000.

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

_____. Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras de concreto armado. **Tese de Livre Docência**, EPUSP. São Paulo, 1993.

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

_____. Vida útil das estruturas de concreto. In.: **IV Congresso Ibero Americano de Patologia das Construções e VI Congresso de controle de Qualidade**. Porto Alegre, RS. V. 1, 1997, p. 1-30.

_____. Vida útil das estruturas do concreto. In.: **International Conferense on High** – Personance and quality of concrete structures. Procedings CD Room. Gramado, RS, 1999.

HOFFMANN, A.T. Influência de adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos. **Mestrado em engenharia Civil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

HONG, K.; HOOTON, R.D. Effect of cyclic chloride exposure on penetration of concrete cover. **Cement and Concrete Research**. V. 29, 1999, p. 1379-1386.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C.K.; GEIKER, M.R. Relationship betwen concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. **Cement and Concrete Composites**. V. 39, 2013, p. 60-72.

ISAIA, G.C. **Carbonatação de concreto: uma revisão**. Departamento de Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 1999.

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

JEFFERY, G.H. **Analítica Química Quantitativa**. 5. ed, Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992.

JONES, M.R.; DHIR, R.K. e MAGEE, B.J. Concrete containing ternary blended binders: resistance to chloride ingress and carbonation. **Cement and Concrete Research**. V. 27, nº 6, 1997, p. 825-831.

KHANDAKER, M.A.; HOSSAIN & SAID, M. E. **Spatial distribution of marine salts in coastal region using wet candle**. Dept. of Civil Engineering, Ryerson University 350 Victoria Street, Toronto, Ontario, M5B 2K3, Canada.2011

KRÖPP, J. Transport mechanisms and definition. In.: KRÖPP, J.; HILSDORF, H.K. **Performance criteria for concrete durability** (report 12 – RILEM). London: ERRN Spon, 1995.

KUMM, T.C. Avaliação da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto armado do Norte da Ilha de Santa Catarina, frente à penetração de cloretos trazidos pela névoa salina. **Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia civil**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

KUMM, T.C.; REPETTE, W.L. Proposta de metodologia para avaliação da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto armado. In.: **48º Congresso Brasileiro do Concreto**. Rio de Janeiro, 2006. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2006.

LIMA, M.G. Inibidores de corrosão. Avaliação da eficiência frente à corrosão de armaduras provocada por cloretos. **Doutorado em Engenharia Civil**. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 1996.

MEDEIROS, M.H.F., HELENE, P. Migração de íons cloreto no concreto - Influência da consistência, relação água/cimento e consumo de cimento. **Revista IBRACON**. São Paulo, ano XI, n. 32, 2003, p.53 - 65.

MEHTA, P.K. ; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 2. Ed., São Paulo, Pini, 1994.

_____. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo, IBRACON, 2008.

MEIRA, G.R.; PADARATZ, I.J. Efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos. In.: **44º Congresso Brasileiro do Concreto**. Belo Horizonte, 2002. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002.

MEIRA, G.R.; PADARATZ, I.J.; ALONSO, M.C.; ANDRADE, M.C. Agressividade por cloretos em estruturas de concreto em ambientes de atmosfera marinha. In.: **45º Congresso Brasileiro do Concreto**. Vitória, 2003. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003.

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

MEIRA, G.R.; ANDRADE, 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**, v. 27, 2007, p. 667 – 676.

MEIRA, G.R.; ANDRADE, C.; ALONSO, M.C.; BORBA Jr., J.C.; PADILHA Jr., M. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement and Concrete Composites**. V. 32, p. 427–435, 2010.

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

MORCILLO, M. Salinity in Marine Atmospheric Corrosion: It's Dependence on the Wind Regime Existing in the Site. **Corrosion Science**, n. 42, 2000.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2. Ed., São Paulo: Pini, 1997.

NILSSON, L.O.; MASSAT, M.; TANG, L. - The effect of non linear chloride binding on the prediction of chloride penetration into concrete structures - **ACI. Durability of Concrete**. SP, 1995, p. 469-486.

NINCE, A.A.; CLÍMACO, J.C.T.S. Levantamento de dados sobre deterioração de estruturas na região centro-oeste do Brasil. In.: **International congress on high-performance concrete and performance and quality of concrete structures**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1996, p. 414-424.

NUNES, J.L.O. Zona de névoa: Intensidade do ataque de Cloretos em função da distância do concreto em relação à água do mar. In.: **46º Congresso Brasileiro do Concreto**. Florianópolis, 2004.

O'DOWD, C.D. Marine Aerosol, sea-salt and the marine cycle - a short review. **Atmospheric Environment**. V. 31, n.1, 1997, p. 73-80.

OLLIVIER, J.P. Durability of concrete. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP**, BT/PCC/192, 1998.

PARK, S.S.; KWON, S.J.; JUNG, S.H. Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalente diffusion and permeation. **Construction and Building Materials**. V. 29, 2012, p. 183-192.

PEREIRA, L.F.L.C.; CINCOTTO, M.A. Determinação de Cloretos em Concreto de Cimentos Portland: Influência do tipo de Cimento. **Mestrado em Engenharia Civil**. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PETELSKI, T.; CHOMKA, M. Marine aerosol fluxes in the coastal zone. **Journal Aerosol Science**.V.28, 1997, p. 105-106.

_____. Sea salt emission from the coastal zone. **Oceanologia**.V.42, n. 4, 2000, p. 399-410.

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

PONTES, R.B. Estimativas da concentração de cloretos na atmosfera marinha da Região Metropolitana de Recife. In.: **48º Congresso Brasileiro do Concreto**. Rio de Janeiro, IBRACON, 2006.

_____. Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife/Pernambuco. **Mestrado em Engenharia Civil**. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2006.

REDDY, B.; GLASS, G.K.; LIM, P.J.; BUENFELD, N.R. On the corrosion risk present edby chloride boun in concrete. **Cement and Concrete Composites**. V. 24, 2002, p. 1-5.

REGATTIERI, C.E.X. Contribuição ao estado da influência da dosagem do concreto na absorção capilar e penetração de íons de cloreto. **Mestrado em engenharia civil**. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 1998.

RILEM Technical Committee Tc 178 – TMC: Testing and modelling chloride. Analysis of water soluble chloride content in concrete. **Materials and Structures**. V. 35, 2002, p. 586-588.

RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELLING CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE. **Proceedings**. Paris: RILEM, 2000.

RINCÓN, C. Avaliação/reabilitação de estruturas em ambientes marítimos. Caso histórico: Ponte de Maracaíbo. **Corros. Prot. Mater**. Vol. 25, nº 25, 2006.

ROMANO, F.S. Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte de Rio Grande do Sul. **Mestrado em Engenharia Civil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SACILOTO, A.P. Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura. **Mestrado em engenharia civil**. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2005.

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

SALTA, M.M. Influence of fly ash on chloride diffusion in concrete - **International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete**. University of Sheffield, England, 1994, p. 794-805.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por íons cloretos em estruturas de concreto. **Mestrado em engenharia civil**. Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SPIEE, D.E.; LEEUW, G. Formation and production of sea spray aerosols. **Journal of Aerosol Science**. V.27, supplement 1, 1996, p. S65-S66.

SWAMY, R.N. A critical evolution of chloride penetration into concrete in marine environment. In.: **International Conference On Corrosion And Corrosion Protection Of Steel In Concrete, Sheffield (England)**. University of Sheffield, 1994, p. 404-419.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. 2. ed. United Kingdom: Thomas Telfond, 1997.

THOMAS, M. Chloride thresholds in marine concrete. **Cement and Concrete Research**. V. 26, 1996, p. 513-519.

TRITTHART, J. Chloride binding in cement II. The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding. **Cement and Concrete Research**. Volume 19, 1989, p. 683-691.

TRITTHART, J.; CAVLEK, K. Determination of total and free chloride in cement paste and concrete. In.: **Second International RILEM Workshop on Testing and Modeling Chloride Ingress Into Concrete**. Proceedings. Paris, 2000, p. 429-438.

TULLA, L.S. Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável. **Doutorado em Engenharia Civil**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm, Swedish. **Cement and Concrete Research Institute**, 1982.

VIEIRA, F.M.P. Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa. **Doutorado em Engenharia Civil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

ZHANG, T.; GJØRV, O. E. An electrochemical method for accelerated testing of chloride diffusivity in concrete. **Cement and Concrete Research**. V. 24, n., 8, 1994, p. 1534-1548.

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

APÊNDICES

A- CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS A.1 – CIMENTO

Tabela 1 – Características físicas e químicas do cimento

Controle	Unidade	Média	Desvio	Mínima	Máxima
Ensaio Físicos					
Material retido #200 (mesh)	%	0,29	0,12	0,1	0,8
Material retido #325 (mesh)	%	2,38	0,67	1,1	4,7
Blaine	cm ² /g	4740	104	4450	4920
Água de consistência	%	30,24	0,33	29,7	30,8
Início de pega	Horas	3:55	00:21	3:20	4:45
Fim de pega	Horas	4:59	00:23	4:15	5:55
Expansibilidade à quente	Mm	0,00	0	0	0
Resistência (3 dias)	MPa	24,38	0,51	23,40	25,50
Resistência (7 dias)	MPa	28,98	0,72	27,60	30,30
Resistência (28 dias)	MPa	41,58	0,79	40,20	42,90
Ensaio Químicos					
Massa específica	g/cm ³	2,83	----	----	----
Perda ao fogo	%	3,17	0,31	2,60	3,98
Dióxido de silício (SiO ₂)	%	31,26	0,41	30,43	32,62

Continua

Continuação

Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	%	11,33	0,27	10,78	12,23
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	%	3,63	0,08	3,49	3,87
Óxido de cálcio (CaO)	%	42,11	0,55	40,42	43,42
Óxido de magnésio (MgO)	%	4,91	0,08	4,76	5,15
Óxido de sódio (Na ₂ O)	%	0,07	0	0,07	0,07
Óxido de potássio (K ₂ O)	%	1,36	0,03	1,31	1,43
Trióxido de enxofre (SO ₃)	%	2,59	0,12	2,39	2,84
Dióxido de carbono (CO ₂)	%	2,38	0,20	1,84	2,77
Resíduo insolúvel	%	30,0	1,06	27,55	33,38

A.2 – AGREGADOS GRAÚDOS

Tabela 2 –Análise granulométrica da brita 1 (19 mm)

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% Retida	% Acumulada
75			
63			
50			
37,5			

Continua

Continuação

31,5			
25			
19	21,21	1,20	1
12,5	1.031,89	60,14	61,4
9,5	539,35	31,43	92,8
6,3	110,33	6,43	99,2
4,8	3,00	0,20	99,4
2,4	3,48	0,20	99,6
1,2			
0,075	2,90	0,20	99,8
Fundo	3,75	0,20	100
Total	1.715,91	100	

Fonte: Infrasul Britagens.

Tabela 3 – Características físicas da brita 1 (19mm)

Módulo de finura	2,93
Diâmetro máximo (mm)	19,0
Material pulverulento (%)	0,22

Fonte: Infrasul Britagens.

Tabela 4 – Análise granulométrica da brita 0 (pedrisco)

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% Retida	% Acumulada
75			
63			
50			
37,5			
31,5			
25			
19			
12,5	12,81	1,29	1,29
9,5	127,22	12,85	14,14
6,3	514,32	51,94	66,1
4,8	202,64	20,5	86,5
2,4	118,29	11,9	98,5
1,2			
0,075	12,07	1,2	99,7
Fundo	2,87	0,3	100
Total	990,22	100	

Fonte: Infracul Britagens.

Tabela 5 – Características físicas da brita 0 (Pedrisco)

Módulo de finura	5,93
Diâmetro máximo (mm)	12,5
Material pulverulento (%)	0,29

Fonte: Infracul Britagens.

A.3 – AGREGADOS MIÚDOS

Tabela 6 – Análise granulométrica da areia média (industrial)

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% Retida	% Acumulada
9,5			
6,3			
4,8			
2,4	141,79	19	19
1,2	181,94	25	44
0,6	116,27	16	60
0,3	80,65	11	71
0,15	73,84	10	81
0,075	49,52	6	87
Fundo	94,24	13	100
Total	738,25	100	

Fonte: Infracul Britagens.

Tabela 7 – Características físico-químicas da areia média(industrial)

Módulo de finura	2,74
Diâmetro máximo (mm)	4,8
Material pulverulento (%)	12,8
Argila em torrões (%)	0
Massa específica (kg/dm ³)	2,66
Matéria orgânica	Menor que padrão
Material úmido (g)	741,49
Material seco (g)	738,25
Umidade (%)	0,44

Fonte: Infracul Britagens

Tabela 8 – Análise granulométrica da areia fina (natural)

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% Retida	% Acumulada
9,5	-	-	-
6,3	-	-	-
4,8	-	-	-
2,4	0,45	0	0
1,2	0,25	0	0
0,6	0,20	0	0
0,3	2,15	0	0
0,15	540,20	75	75
Fundo	176,75	25	100
Total	720	100	

Fonte: Cubatão Dragagens.

Tabela 9 – Características físico-químicas da areia fina (natural)

Módulo de finura	0,75
Diâmetro máximo (mm)	0,3
Material pulverulento (%)	1,50
Argila em torrões (%)	0,08
Massa específica (kg/dm ³)	2,61
Matéria orgânica	-
Material seco (g)	720
Massa unitária (kg/m ³)	1365

Fonte: Cubatão Dragagens.

A.4 - CONCRETO

Tabela 10 – Características do concreto

Dosagem do concreto (cimento, agregados miúdos, agregados graúdos.)	1 : 2,62 : 3,38
Resistência característica (f_{ck})	30 MPa
Tipo de cimento	CP IV - 32 - RS
Fator água/cimento	0,573
Consumo de cimento	350 kg/m ³
Abatimento do tronco cone no lançamento (slump)	15 cm
Abatimento do tronco cone do traço (slump)	14 +- 2cm
f_{c7}	27,9 MPa
f_{c14}	31,50 MPa
f_{c21}	34,10 MPa
f_{c28}	35,20 MPa
Aditivo plastificante	2,808 l/m ³

Fonte: Supermix concreteira

B – CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO

50 m do mar				
Tempo de exposição	Superfície	10 mm	20 mm	35 mm
6 meses	0,0690	0,0995	0,0684	0,0599
9 meses	0,1860	0,4220	0,0960	0,0670
18 meses	0,2010	0,6280	0,2850	0,0890
100 m do mar				
Tempo de exposição	Superfície	10 mm	20 mm	35 mm
6 meses	0,0490	0,0789	0,0570	0,0510
9 meses	0,0765	0,2230	0,0880	0,0480
18 meses	0,1020	0,2700	0,1240	0,0750
200 m do mar				
Tempo de exposição	Superfície	10 mm	20 mm	35 mm
6 meses	0,041	0,058	0,040	0,039
9 meses	0,048	0,082	0,052	0,039
18 meses	0,058	0,115	0,068	0,054
400 m do mar				
Tempo de exposição	Superfície	10 mm	20 mm	35 mm
6 meses	0,0372	0,048	0,04025	0,03867
9 meses	0,0396	0,079	0,0466	0,041
18 meses	0,04276	0,0834	0,052	0,0423

Continua

Continuação

650 m do mar				
Tempo de exposição	Superfície	10 mm	20 mm	35 mm
6 meses	0,037	0,046	0,039	0,039
9 meses	0,039	0,047	0,042	0,04
18 meses	0,0395	0,055	0,047	0,043
1100 m do mar				
Tempo de exposição	Superfície	10 mm	20 mm	35 mm
6 meses	0,037	0,042	0,039	0,039
9 meses	0,038	0,045	0,04	0,04
18 meses	0,038	0,05	0,043	0,039
	Branco			
	Superfície	10 mm	20 mm	35 mm
	0,0372	0,0425	0,0403	0,0387