

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DO INGRESSO DE CLORETOS EM CONCRETOS
LOCALIZADOS NO LITORAL NORTE DO
RIO GRANDE DO SUL**

Fátima Sequeira Romano

Porto Alegre
Dezembro 2009

FÁTIMA SEQUEIRA ROMANO

**ESTUDO DO INGRESSO DE CLORETOS EM CONCRETOS
LOCALIZADOS NO LITORAL NORTE DO
RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Prof^a Denise C. C. Dal Molin
Dr^a pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof^o Alexandre Rodrigues Pacheco
Dr. pela Pennsylvania State University
Co-Orientador

Porto Alegre
Dezembro 2009

R759e Romano, Fátima Sequeira

Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul / Fátima Sequeira Romano. – 2009.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rodrigues Pacheco

1. Concreto armado. 2. Corrosão – Armaduras. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Pacheco, Alexandre Rodrigues, coorient. III. Título.

FÁTIMA SEQUEIRA ROMANO

**ESTUDO DO INGRESSO DE CLORETOS EM CONCRETOS
LOCALIZADOS NO LITORAL NORTE DO
RIO GRANDE DO SUL**

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2009

Prof^a Denise C. C. Dal Molin
Dr^a pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof^o Alexandre Rodrigues Pacheco
Dr. pela Pennsylvania State University
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Aguida Gomes de Abreu (UPF)
Dr^a pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Ivo José Padaratz (UFSC)
Dr. pela University of Edinburgh, Escócia

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
PhD pela University of Leeds, Grã Bretanha

*Às pessoas responsáveis pelo que sou e até onde cheguei:
Meus queridos pais – D^a. Zilma e Seu Chico,
E minha irmã e melhor amiga – Fran.*

AGRADECIMENTOS

Voltar ao estudo regular após, praticamente, vinte anos de haver me formado pareceu-me, inicialmente, uma completa loucura. Porém, graças a um grupo de pessoas que me são muito queridas, consegui levar adiante esse sonho.

À minha família e amigos pelo carinho e apoio.

Ao convite e incentivo dos professores João Luis Campagnolo, Luiz Carlos Silva Filho e Ângela Masuero para que ingressasse no mestrado.

Especial agradecimento à professora Denise Dal Molin por ter me orientado nesta jornada, junto com o professor Alexandre Pacheco.

Aos meus colegas que atuam na área de apoio do NORIE e LEME, pois sem eles esta pesquisa não vingaria: Airton e Éder pelo braço forte na hora da concretagem, Flávio pela confecção das fôrmas, Fontes pela troca de idéias e Simone pelo maravilhoso cafezinho e recados dados.

Aos colegas do NORIE que sempre que solicitados não negaram apoio, em especial ao Nei Vaske.

Ao motorista do CECLIMAR, Manuel Nunes, por além de transportar os blocos de concreto, também ajudou a carregar as “crianças”.

Ao TEDUT, na pessoa do Coordenador da Área de Operação, Sr. Sandro e ao CECLIMAR, na pessoa das professoras Norma Würdig e Carla Ozório, antiga e atual Diretora da Unidade.

*“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei;
não fosse por elas, eu não teria saído do lugar...
As facilidades nos impedem de caminhar.
Mesmo as críticas nos auxiliam muito.”*

Chico Xavier

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	20
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	24
1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA.....	24
1.2 ORIGINALIDADE DO TEMA.....	26
1.3 OBJETIVOS	27
1.3.1 Objetivo principal.....	27
1.3.2 Objetivos secundários.....	27
1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	27
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA	28
CAPÍTULO 2 – FORMAÇÃO E INGRESSO DE CLORETOS NO CONCRETO.....	30
2.1 ZONAS DE INFLUÊNCIA DA AGRESSIVIDADE MARINHA	30
2.2 ORIGENS DO AEROSOL MARINHO	34
2.2.1 Velocidade do vento	36
2.2.2 Altitude	37
2.2.3 Distância em relação ao mar	37
2.3 MECANISMOS DE INGRESSO DE CLORETOS	40
2.3.1 Absorção capilar.....	44
2.3.2 Difusão.....	45
2.3.3 Permeabilidade	46
2.3.4 Migração	46
2.4 INFLUÊNCIAS DOS MATERIAIS	46
2.4.1 Tipo de aglomerante	47
2.4.2 Relação água/aglomerante	50
2.4.3 Consumo de cimento	53
2.4.4 Tempo de cura.....	53
2.4.5 Fissuras	54
2.5 INFLUÊNCIAS RELATIVAS AO AMBIENTE.....	56
2.5.1 Temperatura	56
2.5.2 Grau de saturação	57

CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	58
3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	58
3.2 FLUXOGRAMA DA PROGRAMAÇÃO EXPERIMENTAL.....	61
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS	62
3.3.1 Agregado graúdo	62
3.3.2 Agregado miúdo	62
3.3.3 Cimento.....	63
3.3.4 Sílica ativa.....	64
3.3.5 Aditivo químico	65
3.3.6 Água	66
3.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL	66
3.5 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	68
3.5.1 Fôrmas	68
3.5.2 Concretagem	69
3.5.3 Cura	71
3.6 ENSAIOS	72
3.6.1 Ensaio de Resistência à Compressão.....	72
3.6.2 Determinação da Penetração de Cloretos	74
3.7 MONITORAMENTO AMBIENTAL.....	83
3.7.1 Localização do ambiente	83
3.7.2 Características climatológicas.....	86
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	91
4.2 PENETRAÇÃO DE CLORETOS	98
4.2.1 Influência da relação água/aglomerante	109
4.2.2 Influência da distância ao mar	111
4.2.3 Influência do tipo de cimento e uso de adição de sílica ativa.....	112
4.2.4 Influência da temperatura, umidade, velocidade do vento e precipitação	114
4.3 CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS.....	115
4.4 CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS	123
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
5.1 CONCLUSÕES	133
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	134
APÊNDICE A – TEOR DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS NA.....	145

ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO I/TRAMANDAÍ (DISTÂNCIA AO MAR: 100 M)	145
APÊNDICE B – RESULTADOS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA E REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA.....	150

LISTA DE TABELAS

Figura 1 - Tipos de exposição marinha (CEB - FIP, Bulletin 183, 1992).....	30
Figura 2 - Medida da taxa de deposição média de cloretos, nas distâncias de 10, 100, 200 e 500 m em.....	38
Figura 3 – Relação entre a deposição média de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de ago/2005 a jan/2006.....	39
Figura 4 – Deposição de cloretos, em uma topografia suave, em relação à distância ao mar	40
Figura 5 - Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do concreto	43
Figura 6 - Perfil típico da concentração de cloretos ao longo do cobrimento, em um concreto	45
Figura 7 – Influência do tipo de cimento na profundidade de penetração de cloretos no concreto, considerando um $f_{ck} = 30$ MPa.....	47
Figura 8 – Comportamento da carga total passante com a adição de sílica ativa (para a temperatura de exposição durante a cura de 25° C e idade de 28 dias).	49
Figura 9 - Teor de íons cloreto livre e teor de adição de sílica ativa.	49
Figura 10 - Influência da relação água/aglomerante no coeficiente de permeabilidade dos concretos	51
Figura 11- Profundidade de água sob pressão e relação água/aglomerante.....	51
Figura 12 – Influência da relação a/agl no teor de cloretos totais.	52
Figura 13 – Efeitos isolados da relação a/agl e do tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos.	52
Figura 14 – Fluxograma do programa experimental	61
Figura 15 - Diagrama de dosagem para concretos com cimento CP IV-RS e CP V-ARI	67
Figura 16 - Fôrmas de compensado naval para concretagem dos blocos	69
Figura 17 - Lançamento e adensamento do concreto nas fôrmas	70
Figura 18 - Concretagem dos blocos e corpos-de-prova.....	71
Figura 19 - Cura de blocos e corpos-de-prova em câmara úmida.....	72
Figura 20 - Capeamento de corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão axial.....	73
Figura 21 - Ensaio de resistência à compressão axial.....	73

Figura 22 – Impermeabilização das faces não trabalhadas do bloco de concreto	75
Figura 23 - Alinhamento da Av. Beira Mar, Tramandaí	76
Figura 24 - Localização das estações de monitoramento I e II, em Tramandaí	77
Figura 25 - Localização da estação de monitoramento IV, em Imbé	78
Figura 26 – Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento I.....	78
Figura 27 - Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento II	79
Figura 28 - Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento III.....	79
Figura 29 - Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento IV.....	79
Figura 30 - Bloco preparado para perfuração.....	80
Figura 31 - Marcação de grade de referência no bloco de concreto	81
Figura 32 - Laboratório portátil para análise de amostras: Sistema CL-2000 de Ensaio de Cloretos Para Uso em Obras, da NDT JAMES INSTRUMENTS INC.	82
Figura 33 – Localização de Tramandaí.....	84
Figura 34 – Relevo da região costeira de Tramandaí	85
Figura 35 - Comunicação com o mar da Laguna de Tramandaí	85
Figura 36 - Temperatura média compensada no período de set/08 a jun/09.....	87
Figura 37 - Umidade relativa do ar média no período de set/08 a jun/09	88
Figura 38 - Climatologia de Tramandaí.....	88
Figura 39 - Precipitação acumulada no período de set/08 a jun/09	89
Figura 40 - Velocidade média do vento no período de set/08 a jun/09	90
Figura 41 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento CP IV-32 RS.	93
Figura 42 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento CP V-ARI.....	93
Figura 43 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento	94
Figura 44 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento	94
Figura 45 – Resistência à compressão axial aos 28 dias em função da relação a/agl para concretos com diversas misturas.	96

Figura 46 - Evolução da resistência à compressão axial para concretos com diversos aglomerantes, com relação a/agl 0,45	96
Figura 47 - Evolução da resistência à compressão axial para concretos com diversos aglomerantes, com relação a/agl 0,55	97
Figura 48 - Evolução da resistência à compressão axial para concretos com diversos aglomerantes, com relação a/agl 0,65	97
Figura 49 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V-ARI, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 100 m do mar	99
Figura 50 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A., posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 100 m do mar.....	100
Figura 51 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V- ARI, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 200 m do mar	101
Figura 52 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 200 m do mar.....	102
Figura 53 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V-ARI. , posicionado a	103
Figura 54 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 850 m do mar.....	104
Figura 55 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V-ARI, posicionado a	105
Figura 56 – Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 1850 m do mar (25 m da lagoa)	106
Figura 57 – Efeito isolado da relação a/agl sobre o teor de cloretos no concreto, direção Nordeste	110
Figura 58 - Efeito isolado da relação a/agl sobre o teor de cloretos no concreto, direção Sudoeste	110
Figura 59 - Efeito isolado da distância ao mar sobre o teor de cloretos no concreto, na direção NE.....	111
Figura 60 - Efeito isolado da distância ao mar sobre o teor de cloretos no concreto, na direção SO	112

Figura 61 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP IV- RS, relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	116
Figura 62 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP IV- RS, relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	116
Figura 63 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP IV-RS, relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	117
Figura 64 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI, relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	117
Figura 65 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI, relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	118
Figura 66 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI, relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	118
Figura 67 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 5% S. A., relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	119
Figura 68 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 5% S. A., relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	119
Figura 69 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 5% S. A., relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	120
Figura 70 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 10% S. A., relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	120
Figura 71 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 10% S. A., relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	121
Figura 72 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 10% S. A., relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	121
Figura 73 - Concentração de Cl ⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 45 dias de exposição	124

- Figura 74 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 105 dias de exposição 125
- Figura 75 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 240 dias de exposição 125
- Figura 76 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 45 dias de exposição 126
- Figura 77 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 105 dias de exposição 127
- Figura 78 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 240 dias de exposição 127
- Figura 79 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 45 dias de exposição ... 128
- Figura 80 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 105 dias de exposição . 129
- Figura 81- Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 240 dias de exposição . 129
- Figura 82 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 45 dias de exposição . 130
- Figura 83 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 105 dias de exposição 131
- Figura 84- Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 240 dias de exposição 131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de exposição marinha (CEB - FIP, Bulletin 183, 1992).....	30
Figura 2 - Medida da taxa de deposição média de cloretos, nas distâncias de 10, 100, 200 e 500 m em.....	38
Figura 3 – Relação entre a deposição média de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de ago/2005 a jan/2006.....	39
Figura 4 – Deposição de cloretos, em uma topografia suave, em relação à distância ao mar	40
Figura 5 - Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do concreto	43
Figura 6 - Perfil típico da concentração de cloretos ao longo do cobrimento, em um concreto	45
Figura 7 – Influência do tipo de cimento na profundidade de penetração de cloretos no concreto, considerando um $f_{ck} = 30$ MPa.....	47
Figura 8 – Comportamento da carga total passante com a adição de sílica ativa (para a temperatura de exposição durante a cura de 25° C e idade de 28 dias).	49
Figura 9 - Teor de íons cloreto livre e teor de adição de sílica ativa.	49
Figura 10 - Influência da relação água/aglomerante no coeficiente de permeabilidade dos concretos	51
Figura 11- Profundidade de água sob pressão e relação água/aglomerante	51
Figura 12 – Influência da relação a/agl no teor de cloretos totais.	52
Figura 13 – Efeitos isolados da relação a/agl e do tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos.	52
Figura 14 – Fluxograma do programa experimental	61
Figura 15 - Diagrama de dosagem para concretos com cimento CP IV-RS e CP V-ARI	67
Figura 16 - Fôrmas de compensado naval para concretagem dos blocos	69
Figura 17 - Lançamento e adensamento do concreto nas fôrmas	70
Figura 18 - Concretagem dos blocos e corpos-de-prova.....	71
Figura 19 - Cura de blocos e corpos-de-prova em câmara úmida	72
Figura 20 - Capeamento de corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão axial.....	73
Figura 21 - Ensaio de resistência à compressão axial.....	73

Figura 22 – Impermeabilização das faces não trabalhadas do bloco de concreto	75
Figura 23 - Alinhamento da Av. Beira Mar, Tramandaí.....	76
Figura 24 - Localização das estações de monitoramento I e II, em Tramandaí	77
Figura 25 - Localização da estação de monitoramento IV, em Imbé	78
Figura 26 – Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento I.....	78
Figura 27 - Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento II	79
Figura 28 - Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento III.....	79
Figura 29 - Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento IV	79
Figura 30 - Bloco preparado para perfuração.....	80
Figura 31 - Marcação de grade de referência no bloco de concreto	81
Figura 32 - Laboratório portátil para análise de amostras: Sistema CL-2000 de Ensaio de Cloretos Para Uso em Obras, da NDT JAMES INSTRUMENTS INC.	82
Figura 33 – Localização de Tramandaí.....	84
Figura 34 – Relevo da região costeira de Tramandaí	85
Figura 35 - Comunicação com o mar da Laguna de Tramandaí	85
Figura 36 - Temperatura média compensada no período de set/08 a jun/09.....	87
Figura 37 - Umidade relativa do ar média no período de set/08 a jun/09	88
Figura 38 - Climatologia de Tramandaí.....	88
Figura 39 - Precipitação acumulada no período de set/08 a jun/09	89
Figura 40 - Velocidade média do vento no período de set/08 a jun/09	90
Figura 41 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento CP IV-32 RS.	93
Figura 42 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento CP V-ARI.....	93
Figura 43 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento	94
Figura 44 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento	94
Figura 45 – Resistência à compressão axial aos 28 dias em função da relação a/agl para concretos com diversas misturas.	96

Figura 46 - Evolução da resistência à compressão axial para concretos com diversos aglomerantes, com relação a/agl 0,45	96
Figura 47 - Evolução da resistência à compressão axial para concretos com diversos aglomerantes, com relação a/agl 0,55	97
Figura 48 - Evolução da resistência à compressão axial para concretos com diversos aglomerantes, com relação a/agl 0,65	97
Figura 49 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V-ARI, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 100 m do mar	99
Figura 50 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A., posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 100 m do mar.....	100
Figura 51 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V- ARI, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 200 m do mar	101
Figura 52 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 200 m do mar.....	102
Figura 53 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V-ARI. , posicionado a	103
Figura 54 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 850 m do mar.....	104
Figura 55 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V-ARI, posicionado a	105
Figura 56 – Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 1850 m do mar (25 m da lagoa)	106
Figura 57 – Efeito isolado da relação a/agl sobre o teor de cloretos no concreto, direção Nordeste	110
Figura 58 - Efeito isolado da relação a/agl sobre o teor de cloretos no concreto, direção Sudoeste	110
Figura 59 - Efeito isolado da distância ao mar sobre o teor de cloretos no concreto, na direção NE.....	111
Figura 60 - Efeito isolado da distância ao mar sobre o teor de cloretos no concreto, na direção SO	112

Figura 61 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP IV- RS, relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	116
Figura 62 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP IV- RS, relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	116
Figura 63 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP IV-RS, relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	117
Figura 64 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI, relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	117
Figura 65 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI, relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	118
Figura 66 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI, relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	118
Figura 67 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 5% S. A., relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	119
Figura 68 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 5% S. A., relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	119
Figura 69 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 5% S. A., relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	120
Figura 70 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 10% S. A., relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	120
Figura 71 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 10% S. A., relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	121
Figura 72 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 10% S. A., relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).....	121
Figura 73 - Concentração de Cl ⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 45 dias de exposição	124

- Figura 74 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 105 dias de exposição 125
- Figura 75 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 240 dias de exposição 125
- Figura 76 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 45 dias de exposição 126
- Figura 77 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 105 dias de exposição 127
- Figura 78 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 240 dias de exposição 127
- Figura 79 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 45 dias de exposição ... 128
- Figura 80 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 105 dias de exposição . 129
- Figura 81- Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 240 dias de exposição . 129
- Figura 82 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 45 dias de exposição . 130
- Figura 83 - Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 105 dias de exposição 131
- Figura 84- Concentração de Cl^- livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 240 dias de exposição 131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>a/c</i>	Relação água/cimento
<i>a/agl</i>	Relação água/aglomerante (cimento + adições minerais com ação química)
<i>ABCP</i>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ACI</i>	American Concrete Institute
<i>ANOVA</i>	Análise de Variância
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>C₂S</i>	Silicato dicálcico
<i>C₃A</i>	Aluminato tricálcico
<i>C₃S</i>	Silicato tricálcico
<i>C₄AF</i>	Ferroaluminato tetracálcico
<i>Ca(OH)₂</i>	Hidróxido de cálcio
<i>CaCO₃</i>	Carbonato de cálcio
<i>CaO</i>	Óxido de cálcio
<i>CEB</i>	Comité Euro-International du Béton
<i>CECLIMAR</i>	Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos
<i>cim</i>	Tipo de aglomerante
<i>CP IV</i>	Cimento Portland pozolânico
<i>CP V-ARI</i>	Cimento Portland de alta resistência inicial
<i>C_{cr}</i>	Teor crítico de cloretos – 0,15%
<i>C_s</i>	Concentração superficial de cloretos
<i>C-S-H</i>	Silicato de cálcio hidratado
<i>CV</i>	Coefficiente de variação
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>dist</i>	Distância em relação ao mar
<i>ELS</i>	Estado limite de serviço
<i>f_c</i>	Resistência à compressão axial
<i>GS</i>	Grau de saturação
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>IPT/EPUSP</i>	Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

<i>LEME</i>	Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais
μm	Micro metro (10 ⁻⁶ metros)
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>NaCl</i>	Cloreto de sódio
<i>NBR</i>	Norma Brasileira Regulamentada
<i>NE</i>	Nordeste
<i>nm</i>	Nano metro (10 ⁻⁹ metros)
<i>NORIE</i>	Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação
<i>Pa</i>	Massa de ar Polar Atlântica
<i>pH</i>	Potencial de hidrogênio
<i>prof</i>	Profundidade de ingresso no concreto
R^2	Coefficiente de determinação
R^2_{AJUST}	Coefficiente de determinação ajustado
<i>RILEM</i>	Reunion Internationale de Laboratoires D'essais et Materiaux
<i>S.A.</i>	Sílica Ativa
<i>SO</i>	Sudoete
<i>SO₂</i>	Dióxido de enxofre
<i>Ta</i>	Massa de ar Tropical Atlântica
<i>TEDUT</i>	Terminal Marítimo Almirante Soares Dutra
<i>UFRGS</i>	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
<i>UR</i>	Umidade relativa
<i>ven</i>	Direção do vento
W_k	Abertura característica das fissuras

RESUMO

ROMANO, F.S. **Estudo do ingresso de cloretos em estruturas de concreto no Litoral Norte do Rio Grande do Sul**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

As estruturas de concreto armado existentes em regiões marítimas são fortemente atacadas por agentes agressivos, sendo os cloretos os causadores dos maiores danos quando atingem níveis críticos, afetando de forma significativa a vida útil do concreto. Nos últimos anos a comunidade científica vem realizando pesquisas relativas à penetração de cloretos e suas conseqüências, sendo a maioria desenvolvida em laboratórios. Em ambiente natural, no Brasil, foram realizadas pesquisas nas regiões Nordeste e Sul, mais especificamente no Rio Grande do Sul na cidade de Rio Grande. O litoral Norte do Rio Grande do Sul possui condições climáticas diversas em relação ao litoral Sul, apresentando municípios com significativo incremento na indústria da construção civil, justificando assim o desenvolvimento do estudo nesta região. Esta pesquisa tem por objetivo estudar a influência do tipo de cimento utilizado, do uso de adições de sílica ativa da relação água/aglomerante em relação à penetração de cloretos nas estruturas de concreto em ambiente natural. Foi analisado, também, o distanciamento da estrutura de concreto em relação ao mar e as condições ambientais do local, tais como direção dos ventos predominantes e umidade relativa. Para fundamentar a pesquisa, foram realizados ensaios químicos para determinar o teor de cloretos nas amostras retiradas dos corpos-de-prova colocados em Tramandaí a três distâncias do mar (50, 150 e 800 m) e junto a Lagoa Tramandaí (1800 m em relação ao mar), em Imbé, a diversas profundidades (superficial, 5, 15 e 25 mm). Os resultados indicam que quanto menor a relação água/aglomerante e maior o distanciamento em relação ao mar, menor o teor de cloretos que ingressam nas estruturas de concreto, sendo que a 800 m da orla marítima essa agressividade não é significativa. Concretos com as faces posicionadas a nordeste foram as que apresentaram maior penetração de cloretos. O uso de cimento CP V-ARI com adição de sílica ativa proporciona uma maior concentração superficial de cloretos no concreto, porém, um menor ingresso em seu interior. Nesta pesquisa, nenhum concreto atingiu o teor crítico de cloretos (0,15%) para o ambiente de atmosfera marítima onde foram expostos.

Palavras-chave: cloretos, concretos, durabilidade.

ABSTRACT

ROMANO, F. S. **Study the entry of chlorides in concrete structures in the North of Rio Grande do Sul.** 2009. Dissertation (Masters in Engineering) - Programa de Pos-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The reinforced concrete structures existing in maritime regions are heavily attacked by aggressive agents, with chlorides those who cause more damage when they reach critical levels, significantly affecting the life of the concrete. In recent years the scientific community is conducting research on the penetration of chlorides and their consequences, mostly developed in laboratories. In the natural environment, in Brazil, were searched in the Northeast and South, more specifically in Rio Grande do Sul in Rio Grande. The northern coast of Rio Grande do Sul has different climatic conditions over the south coast, with municipalities with a significant increase in the construction industry, thereby justifying the development of the study in this region. This research aims to study the influence of cement type, the use of additions of silica fume of the water / binder for the penetration of chlorides in the concrete structures in the natural environment. We also analyzed the distance of the concrete structure from the sea and the environmental conditions of the site, such as direction of prevailing winds and relative humidity. In support of this research, we conducted chemical tests to determine the chloride content in the samples of soils-proof Tramandaí placed in the three distances from the sea (50, 150 and 800 m) and along the lagoon Tramandaí (1800 m above the sea), in Imbé at various depths (surface, 5, 15 and 25 mm). The results indicate that the lower the water / binder and the greater the distance from the sea, the smaller the amount of chlorides entering the concrete structures, and 800 meters from the seafront this aggression is not significant. Concrete with faces positioned northeast showed the highest penetration of chlorides. The use of cement CP V-ARI with the addition of silica fume provides greater surface concentration of chlorides in concrete, however, a lower entry inside. In this study, no case has reached the critical content of chloride (0.15%) to the environment of maritime atmosphere where they were exposed.

Keywords: chlorides, concrete, durability.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA

O envelhecimento e degeneração de estruturas de concreto armado constituem um processo natural e inevitável devido à sua interação com o meio ambiente, que apresenta vários níveis de agressividade.

Na prática, uma das maiores dificuldades em prever a vida útil de uma estrutura é justamente a variabilidade deste ambiente, que é mutável e que geralmente só pode ser estimada de forma aproximada.

Como nenhum material é perene, deve-se esperar que a ação do tempo sobre uma estrutura produza efeitos, causando modificações na microestrutura dos seus materiais componentes e, conseqüentemente, alterando as propriedades macroscópicas dos mesmos. Logo, os problemas de durabilidade ocorrem em função dos processos de degradação, que se manifestam pela deterioração precoce ou esperada do material.

Conforme a NBR 6118/2003, as estruturas de concreto devem atender a três requisitos mínimos de qualidade durante sua construção e ao longo de toda sua vida útil: capacidade resistente, desempenho de serviço e durabilidade. Neste caso, durabilidade consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas.

O CEB/1992, no boletim 183, reconhece a existência de inúmeras deficiências de durabilidade observadas em estruturas de concreto armado nos últimos anos, e salienta que a abundância dessas ocorrências levou a uma intensificação dos estudos sobre as causas e a natureza dos processos de degradação do concreto.

É significativamente crescente o número de edificações que apresentam deterioração precoce, com manifestação de danos de diversas origens, sendo a corrosão das armaduras de aço uma das principais causas do desgaste do concreto armado. Diversos fatores podem ser apontados como responsáveis pela ocorrência desta manifestação patológica: deficiências de projeto, espessura de cobrimento insuficiente, especificações e características inadequadas do concreto e de seus materiais constituintes, falhas de execução e manutenção e a ação agressiva do meio ambiente na qual a estrutura está inserida (BICZOK, 1972).

Mundialmente, a problemática da deterioração de estruturas de concreto devido à corrosão de armaduras desperta maior preocupação em zonas costeiras, pois se encontram em meios particularmente agressivos devido à presença de cloretos (Cl⁻). Um caso típico é a Ponte General Rafael Urdaneta, sobre o lago de Maracaíbo, na Venezuela. Esta ponte, logo após sua construção, começou a apresentar sinais evidentes de degradação prematura de sua estrutura, levando Rincón *et al.* (2006) a fazerem um estudo para sua reabilitação. Gjörv (1994), *apud* Pontes (2006) relata graves casos de deterioração precoce de pontes na Noruega, onde de um total de 320 estudadas, 25% manifestaram corrosão das armaduras, sendo em vários casos obras com menos de 25 anos de uso. Nos Estados Unidos, o Departamento de Transportes, realizando inspeção nas pontes existentes no país, constatou que 13,1% encontram-se estruturalmente deficientes, sem especificar as causas prováveis (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2006).

No Brasil, estudos realizados na região Norte por Aranha (1994) mostram que 46% das manifestações patológicas se referiam à corrosão de armaduras. No Nordeste, especificamente em Recife, Andrade (1997) chegou ao percentual de 64%. No Centro-Oeste, Nince e Clímaco (1996), *apud* Costa (2001), observaram que 30% das incidências se referiam ao mesmo problema, assemelhando-se ao valor apresentado por Carmona e Marega (1988) para a região Sudeste. Por fim, na região Sul, Dal Molin (1988) chegou ao patamar de 40% das manifestações patológicas consideradas graves.

Considerando a extensão da costa brasileira – 7.367 km, e sabendo que muitas das principais capitais estão ali localizadas, quais sejam Fortaleza, Natal, João Pessoa, Recife, Maceió, Salvador, Vitória, Rio de Janeiro e Florianópolis, aumenta a preocupação em relação à durabilidade e vida útil de estruturas de concreto armado em zona de atmosfera marinha. Por outro lado, estudos que mostram a relação entre a presença de cloretos na atmosfera e a durabilidade do concreto são escassos (MEIRA *et al.*, 2006).

Este trabalho está inserido nesse âmbito e se propõe a analisar os níveis de agressividade na orla marítima de Tramandaí/Rio Grande do Sul, em função do distanciamento em relação ao mar, contemplando diversos tipos de aglomerante, relações água/aglomerante e condições climáticas.

Justifica-se esta pesquisa por ser realizada na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, que conforme dados do censo demográfico do IBGE/2000, apresenta seis municípios – Balneário Pinhal, Cidreira, Arroio do Sal, Imbé, Capão da Canoa e Xangri-lá, que possuem as maiores taxas de crescimento populacional, com uma taxa média geométrica anual de 6%.

Mais precisamente no município de Tramandaí, houve um aumento de 43% em sua população fixa nos últimos dez anos, sendo que o resultado no último censo demográfico foi de 39.891 habitantes (IBGE, 2007), podendo esta população chegar, na temporada de veraneio, a 200.000 habitantes. Diante dessa situação, houve, nos últimos cinco anos, um incremento significativo na indústria da construção civil da cidade, resultando no aumento das construções verticais, sendo que nesse período já foram construídos dez edifícios com mais de doze andares. Segundo o Departamento de Engenharia da Secretaria Municipal de Obras, atualmente estão em construção treze edifícios, sendo um deles com dezenove andares.

Com o aumento de estruturas de concreto construídas, principalmente junto à Av. Beira-Mar, certamente torna-se imprescindível um estudo mais detalhado de como age esse meio agressivo – zona de atmosfera marinha e seu principal agente, os íons cloreto.

1.2 ORIGINALIDADE DO TEMA

Nos últimos anos, em face aos elevados índices de deterioração das estruturas de concreto em ambiente marítimo, a comunidade científica têm se esforçado em desenvolver pesquisas que aumentem o conhecimento relativo aos fatores associados à penetração dos cloretos e suas conseqüências, sendo que vários desses estudos são desenvolvidos em laboratórios, longe do ambiente natural.

Vários trabalhos internacionais têm sido realizados na Espanha (ODRIOZOLA; GUTIERREZ, 2007), Portugal (COSTA; APPLETON, 1999) e Venezuela (RINCÓN *et al.*, 2006) analisando estruturas expostas ao ambiente marinho. Porém, essas pesquisas se concentram em áreas localizadas nas zonas de maré ou em zonas submersas, gerando resultados destinados a obras portuárias ou que se insiram nesse meio.

No Brasil, Guimarães e Helene (2000) analisaram a estrutura do cais do Terminal de Containers – TECON, no porto marítimo da cidade de Rio Grande. Meira (2004) estudou as estruturas de concreto armado inseridas no meio ambiente de João Pessoa. Na região metropolitana de Salvador, Costa (2001) avaliou a agressão dos sais marinhos sobre as argamassas de revestimento. No Rio Grande do Sul as pesquisas nessa área, em ambiente natural, concentram-se na cidade de Rio Grande, localizada na região sul do Estado, sendo que no Litoral norte nenhuma pesquisa ainda foi realizada.

A relevância do presente trabalho é estudar o ingresso de cloretos em ambiente natural, fazendo com que seus resultados sirvam de parâmetro para edificações em zona marinha, ou seja, na zona de névoa salina em função da localização das estruturas e seu distanciamento em relação ao mar. Esses valores devem ser considerados para regiões com condições climáticas similares as do local estudado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo principal

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o perfil de penetração de cloretos no interior do concreto na zona atmosférica marinha, especificamente no Litoral Norte do estado do Rio Grande do Sul (*Tramandaí e Imbé*).

1.3.2 Objetivos secundários

Como objetivos secundários foram definidos:

- verificar como diferentes tipos de aglomerantes e relação água/aglomerante usados na confecção de concretos influem na penetração dos cloretos, quando expostos em ambientes de atmosfera marinha;
- verificar a influência da direção do vento na penetração de cloretos;
- verificar a relação entre a distância do mar e a profundidade de penetração de cloretos no concreto.

1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como primeiro aspecto limitante da pesquisa, está o fato da mesma ser realizada nos municípios de Tramandaí e Imbé. Assim, os resultados obtidos são válidos somente

para ambientes com características climáticas e agressividades semelhantes às encontradas na região de estudo.

Outras limitações que devem ser levadas em consideração:

- *distanciamento em relação ao mar*: foram três estações de monitoramento localizadas no município de Tramandaí, com distâncias aproximadas em relação ao mar de 50, 150 e 800 metros. Foi montado mais um ponto de monitoramento às margens da lagoa Tramandaí, no município de Imbé, sendo que a distância em relação à margem da lagoa é de 25 metros e em relação ao mar é de 1800 metros;
- *condições climáticas*: foram considerados dados em relação à velocidade dos ventos, temperatura ambiente, precipitação e umidade relativa do ar. Esses dados foram fornecidos pela Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda;
- *tipos de aglomerantes*: foram utilizados dois tipos de cimentos – o Portland Pozolânico CP IV-32 RS e o Portland de Alta Resistência Inicial CPV-ARI. No cimento CP V-ARI ainda foi considerada a adição sobre a massa de cimento de 5% e 10% de sílica ativa;
- *relação água/aglomerante*: foram considerados três fatores, quais sejam: 0,45; 0,55 e 0,65.

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro com caráter introdutório, estando inseridos nele a importância e justificativa, a originalidade do tema, os objetivos e as delimitações da pesquisa.

No segundo capítulo, é abordada a formação e ingresso do aerosol marinho, apresentando as zonas de influência da agressividade marinha, sua origem e como variáveis como a velocidade do vento, altitude e distância em relação ao mar podem atuar. Também são relatados os mecanismos de ingresso dos cloretos, as influências dos materiais e as relativas ao ambiente.

No terceiro capítulo é descrito o programa experimental, apresentando o planejamento do experimento, o fluxograma da programação experimental, a caracterização dos materiais empregados, a dosagem experimental e a produção do

concreto, os ensaios a serem realizados, o monitoramento ambiental e a metodologia para a previsão de penetração de cloretos.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos dos estudos realizados e sua discussão.

No quinto capítulo são feitas as considerações finais, com sugestão para novos estudos.

CAPÍTULO 2 – FORMAÇÃO E INGRESSO DE CLORETOS NO CONCRETO

Em regiões costeiras, todo o processo agressivo no que se refere ao ingresso de cloretos que sofrem as estruturas de concreto que não se encontram diretamente em contato com a água do mar, inicia-se pela formação do aerossol marinho e seu transporte em direção à costa.

2.1 ZONAS DE INFLUÊNCIA DA AGRESSIVIDADE MARINHA

A fim de melhor entender o processo de penetração de íons cloreto em estruturas de concreto expostas em ambiente marinho, vários autores fazem a segmentação desse ambiente em zonas de agressividade. Conforme Swammy *et al.* (1994) citado por Meira (2004), existem cinco zonas: zona submersa, zona de flutuação de maré, zona de respingo, zona de interface solo/respingo e zona de solo. A Figura 1 apresenta os tipos de exposição marinha, segundo o CEB (1992).

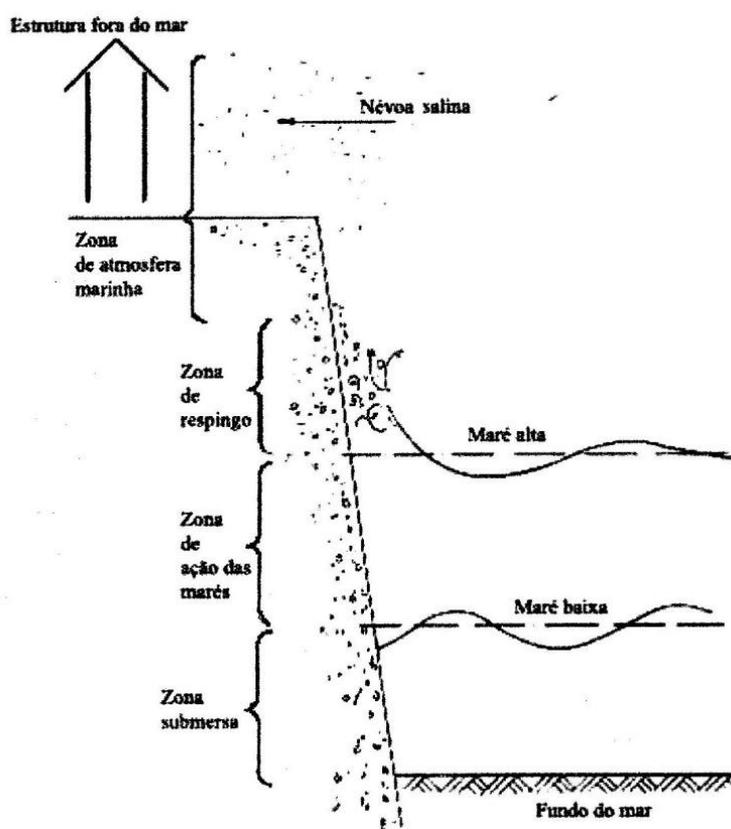


Figura 1 - Tipos de exposição marinha (CEB - FIP, Bulletin 183, 1992)

Fonte: Pontes (2006).

Mehta e Manmohan (1980), CEB (1992), Barbudo (1992), Helene (1993), Mehta e Monteiro (1994) e Guimarães (2000) fazem a correspondência entre a localização da estrutura de concreto e o tipo de deterioração provocada pela exposição em uma área salina, conforme descrito na Tabela 1 (ANDRADE, 2001).

Tabela 1 - Correspondência entre a localização da estrutura e o tipo de deterioração (MEHTA; MANMOHAN, 1980; CEB, 1992; BARBUDO, 1992; HELENE, 1993; MEHTA e MONTEIRO, 1994; GUIMARÃES, 2000)

Área	Características	Tipos de deterioração
Zona de atmosfera marinha (névoa salina)	O concreto nunca está diretamente em contato com a água do mar, porém é atingido pela névoa salina que vem do oceano. O nível de cloretos pode cair à medida que as construções se afastam do mar, mas, em alguns casos, dependendo do tipo da costa e da direção preferencial dos ventos, a névoa salina pode penetrar até muitos quilômetros do litoral.	<ul style="list-style-type: none"> • correção da armadura induzida por cloretos; • danos causados pelo efeito do frio.
Zona de respingo de marés	Localiza-se acima do nível da maré alta, estando sujeita a ação direta da água do mar através da molhagem do concreto pelas ondas. Essa área é uma das mais sujeitas à deterioração através da penetração de agentes agressivos pelo cobrimento de concreto. O teor de umidade, juntamente com a presença de oxigênio, são fatores que contribuem para a deterioração das estruturas.	<ul style="list-style-type: none"> • correção da armadura induzida por cloretos; • abrasão pela ação do impacto das ondas; • danos causados pelo efeito do frio.
Zona de variação das marés	O concreto está submetido à ação dos ciclos de molhagem/secagem, onde há uma combinação dos mecanismos de absorção e difusão de íons no concreto, retendo uma grande quantidade de cloretos no interior do material. Além disso, existe o efeito físico do choque das ondas e partículas em suspensão, que podem causar lascamentos das camadas superficiais do material.	<ul style="list-style-type: none"> • correção da armadura induzida por cloretos; • abrasão pela ação das ondas, gelo ou outros objetos; • ataque biológico causado por microorganismos; • ataque químico ao concreto.
Zona submersa	O processo de difusão de cloretos é o único mecanismo de transporte atuante. Contudo, o concreto pode estar sujeito à ação de ataques químicos, principalmente por íons magnésio ou sulfato.	<ul style="list-style-type: none"> • ataque químico ao concreto; • ataque biológico causado por microorganismos.

Fonte: Andrade (2001).

A NBR 6118 (ABNT/2003) apresenta uma classificação de agressividade ambiental, podendo ser avaliada segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes, salientando que a classificação pode ser considerada mais agressiva conforme os dados relativos ao ambiente que o responsável pelo projeto estrutural possuir. A classificação é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Riscos de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1),2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1),2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1),3)}	Elevado
		Respingos de maré	
¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura). ²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente. ³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.			

Fonte: ABNT NBR - 6118/2003

Mehta e Monteiro (1986), *apud* Odriozola e Gutiérrez (2007), consideram que o concreto exposto a um ambiente marinho pode se deteriorar devido aos efeitos combinados da ação química dos elementos constituintes da água do mar sobre os produtos de hidratação do cimento, da expansão álcali-agregado (quando houver agregados reativos), da pressão de cristalização dos sais do concreto (se uma face da estrutura estiver submetida a condições de umidade e a outra a secagem), da ação do gelo em climas frios, da corrosão das armaduras e da erosão física ocasionada pela ação das ondas e das partículas em suspensão, ocasionando o aumento da permeabilidade do concreto.

Considerando o exposto, várias normativas internacionais apresentam exigências relativas à qualidade do concreto, considerando o tipo e quantidade mínima de cimento utilizado, a relação água/aglomerante máxima adotada e o cobrimento de concreto às armaduras (Tabela 3).

Tabela 3 - Exigências relativas à qualidade do concreto

País	Normativa	Consumo mínimo de cimento (kg/m ³)	a/c máxima	Cobrimento mínimo (mm)
Espanha	EHE/2008	300	0,50	45
Reino Unido	BS 6349-1/2000	360	0,50	50
Reino Unido	FIP/1985	320	0,45	50
Estados Unidos	ACI 357R-84 (1997)	-	0,45	50
Europa	RILEM TC 32-RCA/1985	350	0,50	45

Fonte: Odriozola e Gutiérrez (2007)

No Brasil, a NBR 6118 (ABNT/2003) faz a correspondência entre a classe de agressividade e qualidade de concreto sem, porém, especificar o consumo mínimo de cimento a ser usado em cada situação, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

NOTAS:

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

Fonte: ABNT NBR 6118:2003

O processo de agressividade ambiental tem como um de seus principais agentes a água ou a umidade na atmosfera, porque a mesma age como meio catalisador de reações que não ocorreriam na sua ausência (COSTA, 2001). Para Mehta (1994), a água é um agente primário tanto da criação quanto da destruição de muitos materiais na natureza, sendo o fator central da maioria dos problemas de durabilidade.

Warneck (1988), *apud* Costa (2001), considera que a pior combinação de atmosfera é a industrial-marinha em um clima de alta umidade, característico em algumas das grandes cidades litorâneas do Brasil.

2.2 ORIGENS DO AEROSOL MARINHO

A água do mar contém quase todos os elementos, do hidrogênio ao urânio, e é composta por 96,7% de água e 3,3% de sais dissolvidos (JONES, 1999 *apud* ALVES, 2006). Apenas cinco elementos e um composto respondem por 93,5% dos sais dissolvidos (Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} e SO_4), todos em sua forma iônica (MATSUURA, 2001; VISSER, 2001, *apud* ALVES, 2006).

Essas águas, em sua maioria, apresentam composição química uniforme, caracterizada pela presença de 3,5% (35g/L) de sais solúveis em massa (ODRIOZOLA e GUTIÉRREZ, 2007). A norma DIN 4030 (1991) apresenta a quantidade dos principais íons contidos nas águas do Oceano Atlântico, mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 - Principais íons do Oceano Atlântico (DIN 4030, 1991)

Íons	Quantidade de íons (mg/l)
SO_4^-	2.800
Mg^{++}	1.300
Ca^{++}	400
Cl^-	19.900
Na^+	11.000
K^+	400
pH	> 8

Fonte: Pontes (2006)

Pontes (2006), citando Forschhammer (*s.d. apud* BICZÓK, 1972), apresenta a composição da água do mar em relação aos sais na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição da água do mar (FORSCHHAMMER, s.d., apud BICZÓK, 1972)

Sal	g/1000 ml de água	% em relação ao sal total
Cloreto de sódio	26,9	78,32
Cloreto de magnésio	3,2	9,44
Sulfato de magnésio	2,2	6,4
Sulfato de cálcio	1,3	3,94
Cloreto de cálcio	0,6	1,69
Outros (sulfato de potássio, bicarbonato de cálcio, etc)	-	0,21
TOTAL	34,3	100,00

Fonte: Pontes (2006)

Segundo Warneck (1988), pode-se usar o termo aerossol para o conjunto de ar e partículas carregadas pelo mesmo, sob forma coloidal. Sendo assim, podem-se ter tipos diversos de aerossol, conforme as características do local de exposição e das partículas em suspensão, quais sejam: rurais, urbanos, marinhos e árticos.

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

Ressalta-se que os cloretos contidos nos sais produzidos pelas ondas se mantêm ao longo da linha de costa, por terem, esses sais, maior granulometria, e os oriundos do oceano adentram mais ao continente, sendo facilmente carregados pelo vento (ALVES, 2007).

Após a geração das gotículas, as mesmas entram em equilíbrio com o ambiente e, dependendo das condições de temperatura e umidade relativa, assumem a forma de partículas salinas (cristais) ou soluções salinas de distintas concentrações (MEIRA, 2004). Segundo Zezza e Macri (1995) *apud* Meira (2004), abaixo de 70 – 74% de

umidade relativa, as gotículas supersaturadas se transformam em partículas de sal, mudando de fase.

O aerosol, quanto ao tamanho de suas partículas, pode ser dividido em dois grandes grupos: o primeiro, formado por partículas depositáveis ($\varnothing \geq 10 \mu\text{m}$) e outro por partículas flutuantes ($\varnothing < 10 \mu\text{m}$) (AMBLER e BAIN, 1955).

Pontes (2006), citando Taylor e Wu (1992), apresenta para essas partículas uma classificação com três faixas:

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

Independente da classificação, partículas de maior tamanho e maior massa se depositam mais rápido e as partículas menores e de menor massa permanecem mais tempo em suspensão.

Ao ser gerado, o aerosol marinho é transportado na direção do continente, sendo influenciado por alguns fatores ambientais em seu comportamento, como se apresenta a seguir.

2.2.1 Velocidade do vento

A importância da velocidade do vento está implícita na formação do aerosol, ocasionado pela agitação da superfície do mar.

Pontes (2006) cita vários autores (Woodcock, 1953; Lovett, 1978; Taylor e Wu, 1992; Gustafsson e Franzén, 1996) descrevendo a existência da relação entre a velocidade do vento e a concentração de sais no aerosol marinho, sendo que esta relação seguiria uma função do tipo exponencial. Segundo Lovett (1978), a velocidade do vento aumenta a quantidade de partículas no aerosol, facilitando a geração daquelas de maior tamanho e massa, ou seja, as que se depositam mais rapidamente sobre a superfície da estrutura.

De acordo com Spiel e Leeuw (1996), a ação do vento só assume caráter relevante com velocidades entre 7 e 11 m/s. Já Piazzola e Despiou (1997), consideram a velocidade a partir de 5 m/s.

O vento desenvolve influência preponderante na geração e transporte do aerossol, com efeito acentuado nas medidas de deposição de cloretos a partir do patamar de 3,0 m/s. Isto se reflete no comportamento temporal do aerossol, que apresenta períodos do ano com maior concentração salina, alternados com períodos de concentração inferior (MEIRA *et al*, 2006).

A importância do efeito do vento aumenta quando o aerossol é transportado na direção do continente. Com sua amplitude, maiores partículas podem alcançar maiores distâncias antes de se depositarem, aliando-se ao efeito de formação de um aerossol com maior concentração salina (GUSTAFSSON e FRANZÉN, 1996; MORCILLO, 1999 *apud* PONTES, 2006).

2.2.2 Altitude

A distribuição vertical do aerossol contribui também para sua concentração salina. Segundo Blanchard *et al* (1984), há um decréscimo na concentração de sais à medida que se aumenta a altitude em relação à superfície do mar, o que se acentua nos metros mais próximos à orla - *surface layer*. Isso se deve à presença de partículas maiores, que são fortemente influenciadas pelo efeito da gravidade, fazendo com que não alcancem níveis muito elevados em altitude e se depositem mais rápido.

Rincón *et al.*(2006), avaliando a estrutura da Ponte General Rafael Urdaneta sobre o Lago de Maracaibo, na Venezuela, constataram claramente o efeito da altura no nível de contaminação do concreto, observando que a seis metros do nível do lago o ingresso de cloretos é muito baixo.

2.2.3 Distância em relação ao mar

Como já foi dito anteriormente, partículas maiores, ao sofrerem a ação do efeito gravitacional nas primeiras faixas de terra, logo se depositam. Com a ação do vento, estas partículas podem chegar um pouco mais distantes, contudo o efeito gravimétrico ainda é importante e se sobrepõe ao primeiro. Assim sendo, a deposição de partículas de sais provenientes do aerossol sofre atenuação com o distanciamento em relação à costa.

Já foram observados casos de transporte de até 2 km ou distâncias ainda maiores, dependendo da topografia e do vento (NEVILLE, 1997).

Costa (2001), realizando ensaios em corpos-de-prova de argamassa, expostos a distâncias de 72 m a 4705 m em relação ao mar e localizados na região metropolitana de Salvador/BA, observou que o potencial de agressão aos materiais expostos ao aerosol marinho é aproximadamente oito vezes maior para distâncias até 500m em relação ao mar.

Em João Pessoa/PB, Meira *et al* (2006) estudaram o comportamento temporal do aerosol marinho através do ensaio da vela úmida e da concentração de cloretos no concreto utilizando pilaretes expostos a 10, 100, 200 e 500 m do mar, constatando uma clara redução nas concentrações de cloretos a partir dos 200 primeiros metros em relação ao mar, indicando que a diminuição da agressividade por cloretos é mais importante nas primeiras faixas de terra. A partir desta distância, embora haja diferenças nas concentrações medidas, elas são menos pronunciadas (Figura 2).

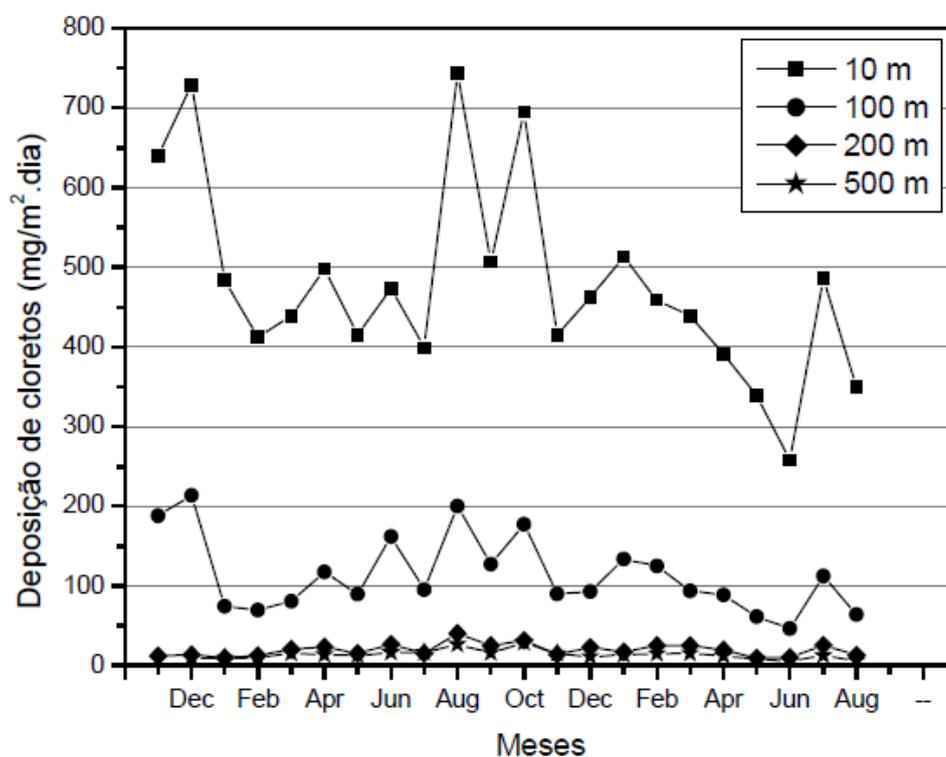


Figura 2 - Medida da taxa de deposição média de cloretos, nas distâncias de 10, 100, 200 e 500 m em relação ao mar.

Fonte: Meira *et al* (2006)

Nunes *et al*, (2004) em um estudo avaliando quatro estruturas de concreto armado na cidade do Rio Grande/RS, com afastamentos que variavam entre zero e 2200m, concluíram que as regiões a partir de 630m tinham seu teor de cloretos reduzidos significativamente.

Estudando os níveis de agressividade marinha na orla marítima de Recife/PE, Pontes (2006) conclui que a deposição de cloretos decresce, numa relação tipo exponencial, à medida que há uma aumento do distanciamento em relação ao mar, e que a agressividade é significativa até 400 m da orla marítima (Figura 3).

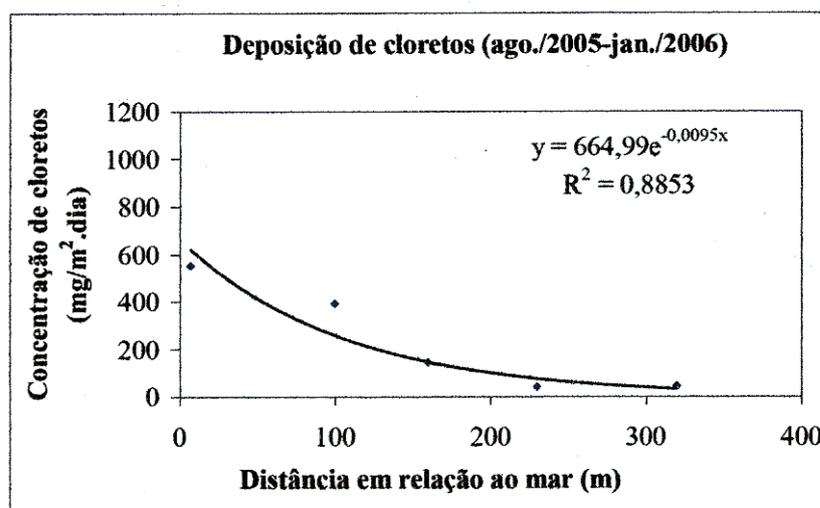


Figura 3 – Relação entre a deposição média de cloretos e a distância em relação ao mar, no período de ago/2005 a jan/2006.

Fonte: Pontes (2006).

Garcia (2008), objetivando definir a que distância em relação ao mar é necessária considerar a agressividade dos cloretos provenientes da névoa salina na região de Florianópolis, expôs prismas de concreto juntamente com aparatos de vela úmida, com o intuito de verificar os perfis de ingresso de cloretos a diferentes distâncias. Obteve a distância de 1400 metros do mar como sendo o limite entre as classes de agressividade II e III definidas na NBR 6118 (ABNT/2003).

Na zona costeira da Suécia, Gustafsson e Franzen (1996) estudaram a concentração de cloretos proveniente do aerosol marinho baseando-se em repetidas medições de cloretos em diversos pontos situados na direção da orla ao interior, constatando que a partir de 250 m de distância ao mar diminui em 50% a deposição de íons cloreto sobre as estruturas (Figura 4).

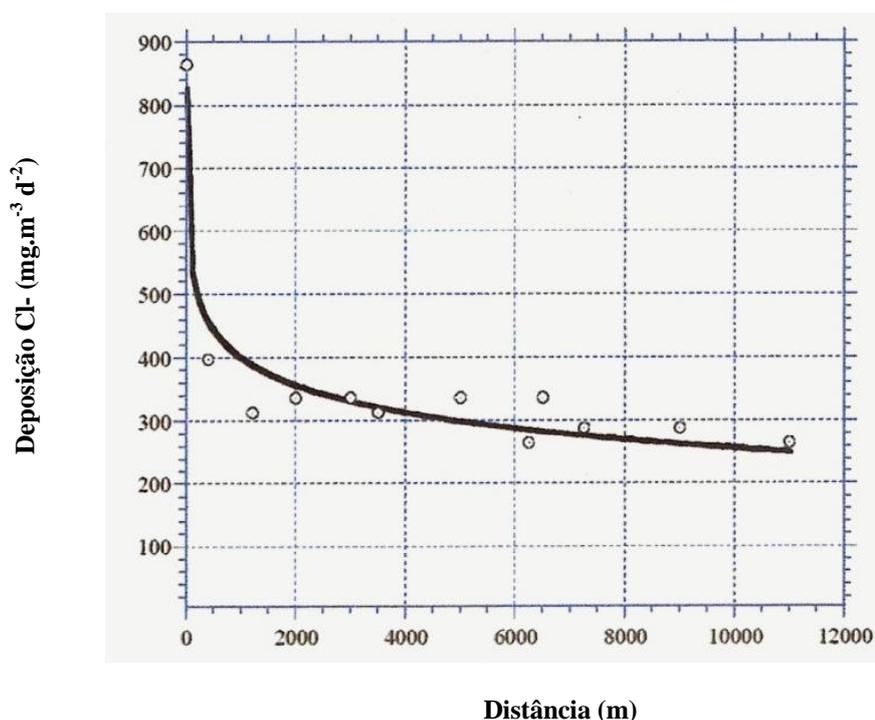


Figura 4 – Deposição de cloretos, em uma topografia suave, em relação à distância ao mar

Fonte: Gustafsson e Franzen (1996).

2.3 MECANISMOS DE INGRESSO DE CLORETOS

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a água é um forte agente de deterioração física e química do concreto por apresentar propriedades peculiares como a grande capacidade de penetração em cavidades e poros muito pequenos, elevada tensão superficial, maior temperatura de evaporação, a notável capacidade de dissolver substâncias como sais, ácidos e bases inorgânicas, assim como dissociar substâncias ionizáveis.

O ingresso de cloretos no concreto, além daqueles oriundos do próprio ambiente onde a estrutura está instalada, pode ocorrer durante sua mistura das seguintes formas: como contaminante do cimento ou dos agregados; com o uso da água de amassamento, se forem utilizadas águas com sais e com aditivo acelerador de pega a base de cloreto de cálcio ou como sais de degelo aplicado a pavimentos.

Outra forma de ingresso de cloretos seria em serviço. Durante o uso da estrutura, os íons Cl⁻ que provêm de fontes externas pode difundir rapidamente na cobertura de concreto e atingir a armadura em um período de tempo muito mais curto que o correspondente à vida projetada da estrutura.

Segundo Helene (1997), a identificação da frente ou profundidade de penetração de certo teor crítico de Cl^- requer ensaios específicos, sendo que o fenômeno não é perceptível a olho nu, não reduz a resistência do concreto nem altera seu aspecto superficial. Porém, a ação dos cloretos além de despassivar a armadura, aumenta significativamente a condutividade elétrica acelerando o processo de corrosão, participando das reações para a formação dos produtos de corrosão, provocando o aumento de volume da armadura e conseqüentes manchas e fissuras na estrutura, podendo chegar ao colapso.

Em ambientes agressivos, a quantidade de íons Cl^- tende a ser incrementada gradualmente, e o mesmo pode chegar, após certo tempo, a atacar toda a superfície das armaduras das estruturas de concreto armado, podendo provocar velocidades de corrosão intensas e perigosas, diminuindo sensivelmente sua vida útil (ANDRADE, 1992).

Tem-se realizado muitos trabalhos orientados a determinar a concentração limite de cloretos a partir da qual se produz corrosão, mas não se tem chegado a um consenso. Diferentes países têm adotado valores limites distintos para suas recomendações e normas.

As recomendações britânicas, segundo Page *et al* (1981), fixam os limites de risco de corrosão para concretos fabricados com cimento Portland comum, em:

- baixo risco: $\text{Cl}^- < 0,4\%$, em massa de cimento;
- risco intermediário: $0,4\% < \text{Cl}^- < 1\%$, em massa de cimento;
- alto risco: $\text{Cl}^- > 1\%$, em massa de cimento.

Como conteúdo nos aditivos, a norma britânica fixa os limites em 0,2% de cloreto, em massa de cimento resistente a sulfatos, e em 0,4% de cloreto, em massa de cimento Portland comum (JOUKOSKI, 2003).

A norma brasileira NBR 12655 (ABNT/2006) determina o teor máximo de cloretos sobre a massa de cimento no concreto pretendido em 500 mg/l (0,05%), sendo considerada a contribuição de todos os componentes do concreto, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Tipo de estrutura	Teor máximo de íons cloreto (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: ABNT NBR 12655 (2006).

Figueiredo (2005) apresenta alguns valores limites estabelecido por normas internacionais na Tabela 8.

Tabela 8 - Limites normalizados para o teor de cloreto no concreto

Norma	País	Ano	Teor limite de cloretos
NBR 6118 (ABNT)	Brasil	2003	Não se reporta ao teor de cloretos.
ACI 318-21	USA	2001	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos.
			$\leq 0,3\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente normal.
			$\leq 1\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente seco.
			$\leq 0,06\%$ em relação à massa de cimento (concreto protendido).
CEB	Europa	1991	0,04% em relação à massa de cimento
ENV 206	Portugal	1991	
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE-SP2	Japão	1986	

* A NBR 6118 (ABNT, 2003) não se reporta ao teor de cloretos, mas enfatiza que não é permitido utilizar aditivos contendo cloretos em sua composição, tanto em estruturas de concreto armado, quanto em protendidas.

Fonte: Figueiredo (2005)

Vários fatores influenciam na agressividade dos íons Cl⁻, tais como: a etapa de introdução dos cloretos na estrutura, a composição do cimento, a qualidade dos materiais, as condições de cura e exposição do concreto, entre outros (PORTELLA *et al.*, 2001). Cimentos com maiores teores de C₃A e C₄AF apresentam uma maior capacidade de fixação de íons Cl⁻, formando os cloroaluminatos, reduzindo a quantidade de cloretos livres na solução aquosa dos poros do concreto (HELENE, 1997).

Andrade (2001), citando vários autores (Bakker, 1988; Lima, 1990; Figueiredo, 1994; Kulakowski, 1994; Isaia, 1995 e Neville, 1995), descreve as diversas formas que os íons Cl^- podem ser encontrados no interior do concreto:

- quimicamente combinados: neste caso os cloretos podem combinar com o C_3A (aluminato tricálcico) e o C_4AF (ferro aluminato tetracálcico) contidos no cimento, originando o cloroaluminato de cálcio hidratado (que é o componente mais abundante) e o cloroferrato de cálcio hidratado. O cloreto reage com o aluminato tricálcico anidro não hidratado, mas não reage com o aluminato tricálcico hidratado. Desta reação resulta o mono-cloro-aluminato hidratado, denominado sal de Friedel : $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (MIDGLEY e ILLSTON, 1984). Na forma combinada, o Cl^- não está disponível para promover a despassivação das armaduras no concreto. Assim, quanto maior o teor de C_3A contido nos cimentos, melhor a fixação dos cloretos, minimizando a possibilidade de despassivação das armaduras;
- fisicamente adsorvidos na superfície dos poros do concreto;
- livres na solução dos poros do concreto: em tal forma, o cloreto pode penetrar através do cobrimento do concreto sem interagir com os componentes oriundos da hidratação do cimento. Este tipo de cloreto é o mais prejudicial à durabilidade de uma estrutura, pois ao atingir a armadura, pode ocasionar a sua despassivação.

A Figura 5 ilustra as três possibilidades de ocorrência de íons Cl^- (VAN DAVEER, 1975).

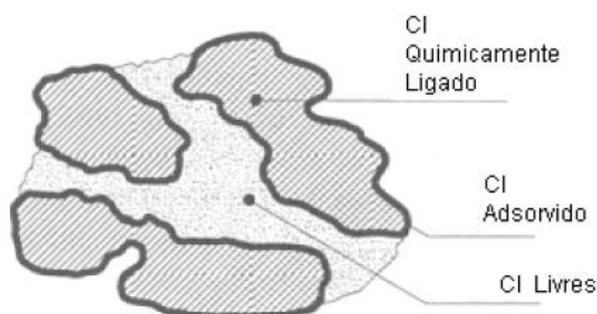


Figura 5 - Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do concreto

Fonte: Cascudo (1997).

Considerando a penetração de cloretos a partir do ambiente externo, os mecanismos de transporte que levam ao movimento e concentração iônica dos cloretos no concreto são os seguintes: absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade sob pressão e migração iônica (CASCUDO, 1997).

Segundo Helene (1993), as maiores penetrações de cloreto são observadas onde os mecanismos podem atuar simultaneamente. Cascudo (1997) afirma que na grande maioria dos casos, a absorção capilar e a difusão iônica costumam ser os mecanismos mais usuais de transporte dos cloretos presentes no concreto.

Considerando a quantificação do ingresso de cloretos no concreto, ainda não se chegou a um consenso sobre os processos que ocorrem no transporte. Porém, e de forma prática, os perfis obtidos em estruturas existentes se ajustam de modo muito satisfatório ao fenômeno de difusão, pelo que, a maioria dos autores fala de coeficientes de difusão do íon Cl^- para caracterizar o avanço deste no concreto (TC-178-TMC, 2000 *apud* Talavera, 2005).

2.3.1 Absorção capilar

A absorção capilar é um mecanismo em que os cloretos presentes em um meio líquido (névoa salina, por exemplo) penetram no concreto a partir do fluxo deste líquido, motivado pela tensão superficial atuante nos poros capilares.

Geralmente representa a primeira etapa para a contaminação por impregnação externa de estruturas de concreto e se dá na camada superficial onde ocorrem ciclos de molhagem e secagem do cobrimento de concreto pela ação da água da chuva e umidade. O concreto seco vai sendo embebido, podendo culminar na sua saturação. Quando as condições externas são mais secas, o movimento da água inverte-se e a umidade evapora pelos poros capilares superficiais da estrutura. Porém, é a água pura que evapora, permanecendo os sais cristalizados nos poros do concreto, aumentando a concentração salina nas proximidades da superfície (PEREIRA e CINOTTO, 2001).

De acordo com Kröpp (1995), esse mecanismo depende do diâmetro dos poros, da tensão superficial do líquido, da sua densidade e da sua viscosidade. Em princípio, quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maior a pressão, como consequência será maior a profundidade de penetração da água no concreto (ANDRADE, 2001).

2.3.2 Difusão

A difusão iônica é o mecanismo de transporte predominante dos cloretos no interior da estrutura de concreto, ocorrendo devido a gradientes de concentração (teor de cloretos) que promovem um deslocamento do sal para o interior. Devido à umidade relativa do ambiente e a duração do período de secagem, será possível uma maior evaporação na região mais externa, de tal forma que internamente o concreto se torna mais saturado, precipitando o excesso na forma de cristais. Este ciclo onde a água se desloca para fora e o sal para dentro do concreto faz com que o teor de cloretos diminua com a distância da superfície.

Para Crank (1975), os cloretos em regiões de maior concentração se movem para regiões de concentração mais baixa. Como resultado deste processo a concentração de cloretos decresce da superfície para o interior do concreto (CEB, 1989). Um perfil típico da concentração de cloretos ao longo do cobrimento de concreto, desde a superfície até a armadura, em uma estrutura impregnada de contaminantes do meio externo, é mostrado na Figura 6. Observa-se a predominância da absorção na camada superficial, onde o ramo da curva é crescente desde a superfície até um limite máximo. A concentração superficial tende a ser pequena em função da ação de lixiviação pelas águas das chuvas (lavagem) que ocorre nessa zona de molhagem e secagem. Na zona de difusão, a partir do ponto limite, a concentração tende a diminuir com a profundidade (CASCUDO, 1997).

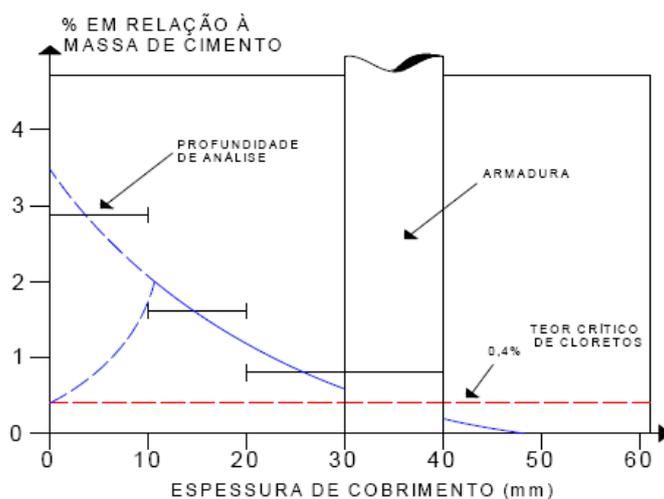


Figura 6 - Perfil típico da concentração de cloretos ao longo do cobrimento, em um concreto contaminado por impregnação externa de soluções ricas em cloreto

Fonte: Cascudo (1997)

2.3.3 Permeabilidade

A permeabilidade é um dos principais parâmetros de qualidade do concreto e representa a facilidade, ou dificuldade, com que dada substância transpõe dado volume de concreto (CASCUDO, 1997). Ela está relacionada diretamente com a composição do concreto e com as condições de cura especificadas para a estrutura, pois quanto mais tempo houver para a hidratação dos compostos do concreto, menor a permeabilidade do mesmo (ANDRADE, 2001). Concretos com poros capilares com diâmetros maiores e, havendo intercomunicação entre eles, terão maior permeabilidade. Isto ocorre quando a relação água/aglomerante for alta, acima de 0,6.

Segundo Kröpp *et al.* (1995), este é um mecanismo de penetração de cloretos importante em estruturas marinhas que são submetidas a elevadas pressões hidrostáticas.

De acordo com Guimarães (1997), geralmente a difusão pura ou a permeabilidade pura só acontecem em estruturas saturadas, onde as forças capilares não podem atuar. Já para o concreto seco ou não saturado, a sucção capilar é o fenômeno predominante.

2.3.4 Migração

A migração é um mecanismo que corresponde ao transporte de íons em eletrólitos, devido à ação de um campo elétrico, decorrente da aplicação de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa (GEIKER *et al.*, 1995).

2.4 INFLUÊNCIAS DOS MATERIAIS

Segundo Cascudo (1997), o transporte de cloretos, bem como de várias outras substâncias agressivas dissolvidas (líquidos em geral) e de gases, no interior da matriz concreto/argamassa, é decisivamente influenciado pela estrutura porosa da pasta de cimento endurecida. Observa, portanto, a necessidade de produzir um material que seja de baixa porosidade e permeabilidade para que se obtenha uma boa durabilidade.

Considerando as características da matriz do concreto, as principais variáveis que podem interferir no transporte de cloretos são: tipo de cimento, relação água/aglomerante e consumo de aglomerante, condições de cura e presença de fissuras.

2.4.1 Tipo de aglomerante

Helene (1999) considera que a escolha do cimento mais adequado a resistir à agressividade ambiental é um aspecto que irá influenciar na maior ou menor capacidade de fixação dos cloretos, sendo que para reduzir a penetração desses íons são preferíveis os cimentos com adições tipo CP III (com escória de alto forno) e CP IV (com cinza volante). GjØrv (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. Andrade (2001) ratifica a colocação apresentada por Helene (1999) no gráfico apresentado na Figura 7.

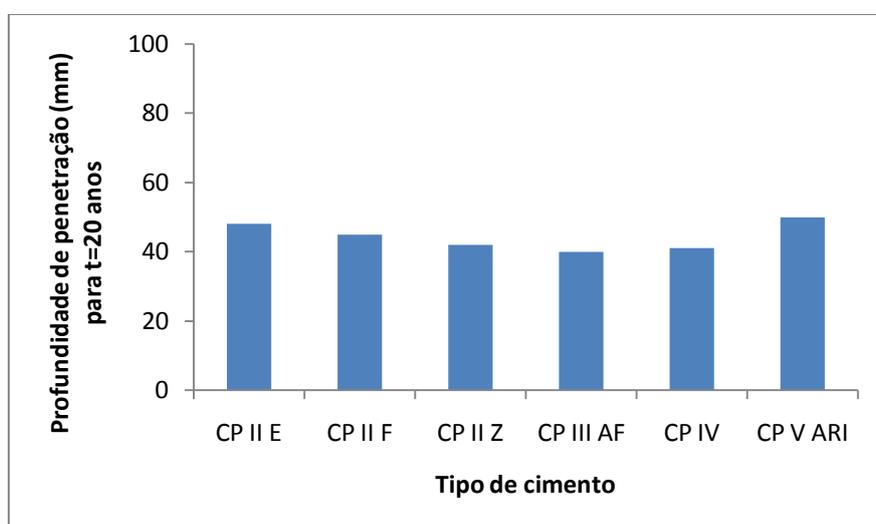


Figura 7 – Influência do tipo de cimento na profundidade de penetração de cloretos no concreto, considerando um fck = 30 MPa

Fonte: Andrade (2001).

Como a corrosão é somente induzida por íons Cl^- livres, os cimentos Portland comum ou cimentos de alta resistência inicial reduzem os efeitos do cloreto, pois reagem com parte desses íons, formando cloroaluminato de cálcio. Cimentos que possuem menor quantidade de C_3A são menos efetivos nessas reações, como é o caso de cimentos resistentes a sulfatos ou cimentos de baixo calor de hidratação (TROXELL, DAVIS e KELLY, *apud* DAL MOLIN, 1988).

Da mesma forma, cimentos com presença de cinza volante e escória de alto forno apresentam maior proteção ao concreto em relação aos outros tipos de cimento (resistentes a sulfatos e cimento Portland comum), em virtude do melhor refinamento dos poros e aos elevados teores de C_3A que possui capacidade de fixação de cloretos, formando os cloroaluminatos (PAGE *et al*, 1981).

Para Neville (1997), o uso de cimentos resistentes a sulfatos pode ser desvantajoso quando houver presença de íons Cl^- em concretos com armadura ou outro tipo de aço em seu interior, pois quando o concreto carbonata os cloroaluminatos, os mesmos se tornam instáveis e possibilitam que os cloretos, anteriormente fixos, sejam liberados para a solução aquosa do concreto.

Deve-se levar em conta, também, a dificuldade oferecida na movimentação dos cloretos no interior do concreto. O efeito do tipo de cimento no transporte de cloretos no interior do concreto está relacionado diretamente com sua porosidade. Uma matriz mais densa do concreto dificulta a entrada de agentes agressivos como os cloretos, bem como oxigênio e umidade.

Dal Molin (1995) afirma que pozolanas ultrafinas (como sílica ativa e cinza de casca de arroz), além do efeito químico, atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição, reduzindo significativamente a penetrabilidade, aumentando a resistência mecânica do concreto.

Hoffman (2001) confirma esse comportamento proporcionado pelo efeito pozolânico e microfiller, através do estudo que avaliou a influência do teor de sílica ativa no coeficiente de difusão de cloretos em concretos executados com cimento Portland CP V-ARI, empregando o método de penetração acelerada de íons cloretos segundo a ASTM C1202-97. A carga total passante através dos corpos-de-prova indica a maior ou menor resistência dos materiais frente à penetração de cloretos, ou seja, a permeabilidade do concreto. Os resultados presentes na Figura 8 mostram que tanto a redução da relação água/aglomerante quanto o aumento no teor de adição de microssílica são significantes na redução da carga total passante.

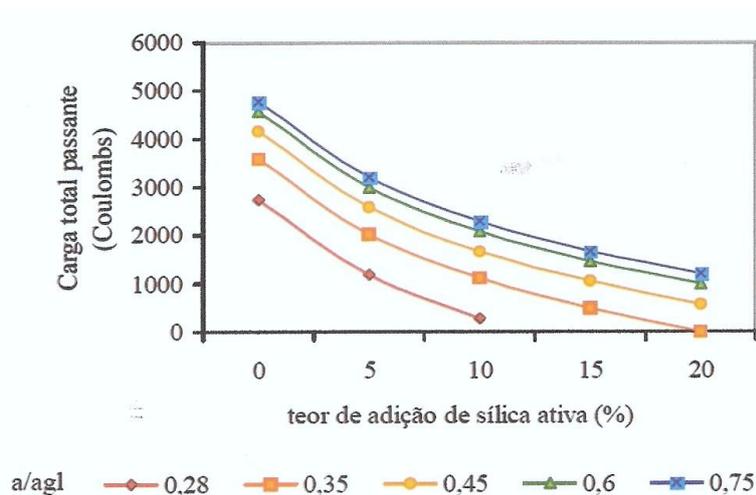


Figura 8 – Comportamento da carga total passante com a adição de sílica ativa (para a temperatura de exposição durante a cura de 25° C e idade de 28 dias).

Fonte: Hoffmann (2001).

Vieira (2003), verificando a influência do teor de adição de sílica ativa na corrosão da armadura desencadeada pelos íons Cl^- , utilizando concretos executados com cimento Portland CP V-ARI, observou que com 10% de adição o teor de cloretos livre é, em média, 15% menor que o determinado para concretos sem adição. Para o teor de 20% de sílica ativa os resultados mostram uma redução média de 17% em relação aos concretos sem adição (Figura 9).

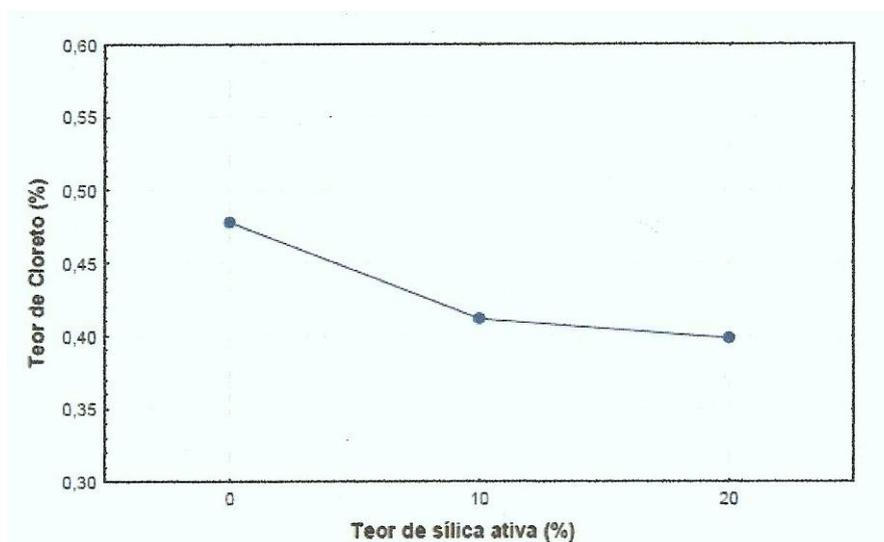


Figura 9 - Teor de íons cloreto livre e teor de adição de sílica ativa.

Fonte: Vieira (2003).

2.4.2 Relação água/aglomerante

A porosidade do concreto está intimamente ligada à relação água/aglomerante utilizada em sua confecção, sendo a mesma, o principal parâmetro que rege a durabilidade do concreto, influenciando as propriedades de absorção capilar de água, permeabilidade por gradiente de pressão, difusividade e migração de íons cloreto (CEB, 1989).

A penetração de cloretos no ambiente marítimo é fortemente influenciada pela qualidade do concreto, que está relacionada com sua estrutura porosa, que é determinada fundamentalmente pela relação água/aglomerante (COSTA e APPLETON, 1999).

A relação a/agl é o parâmetro principal que influencia a penetração de cloretos no concreto, devido ao refinamento da porosidade capilar que se obtém com baixas relações. Nesses concretos, os íons Cl^- são obrigados a se difundir por caminhos mais tortuosos e desconectos, o que dificulta o seu ingresso para o interior do concreto (NGALA *et al*, 1995, *apud* SACIOTO, 2005).

Da mesma forma, Kropp (1995) afirma que os íons Cl^- provenientes de fontes externas penetram no concreto através da rede contínua de poros da matriz cimentante e da zona de transição pasta/agregado, além de ingressarem à estrutura através de eventuais microfissuras.

Conforme Alanis *et al* (1990), dependendo do fator água/aglomerante da pasta de cimento hidratada, diferentes porcentagens em volume de poros são obtidas (Tabela 9).

Tabela 9 – Volume de poros em pastas de cimento com diferentes relações a/agl

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)

Utilizando relação água/aglomerante acima de 0,6 na confecção de concretos, há aumento significativo nos valores do coeficiente de permeabilidade, ou seja, tem-se um concreto mais poroso, como é mostrado na Figura 10 (ALVES, 2007).

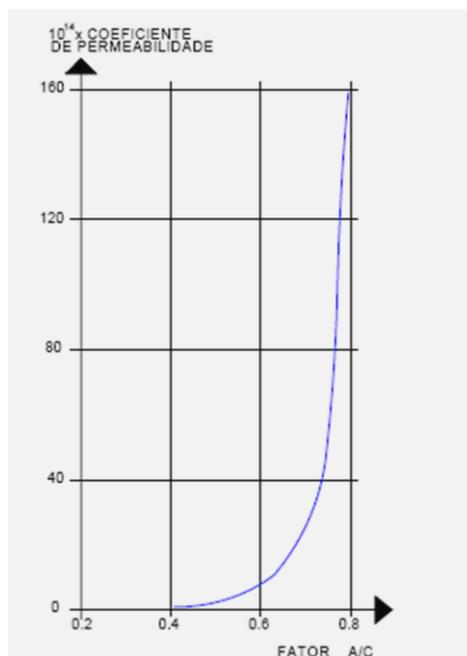


Figura 10 - Influência da relação água/aglomerante no coeficiente de permeabilidade dos concretos (Rostam (1991) apud Souza & Ripper (1998), pg. 36.

Fonte: Alves (2007).

Wolf (1991) definiu em seu trabalho sobre ensaios com adições de microssilica que quanto menor a relação a/agl, menor a profundidade de penetração da água e conseqüentemente menor a penetração de cloretos (Figura 11).

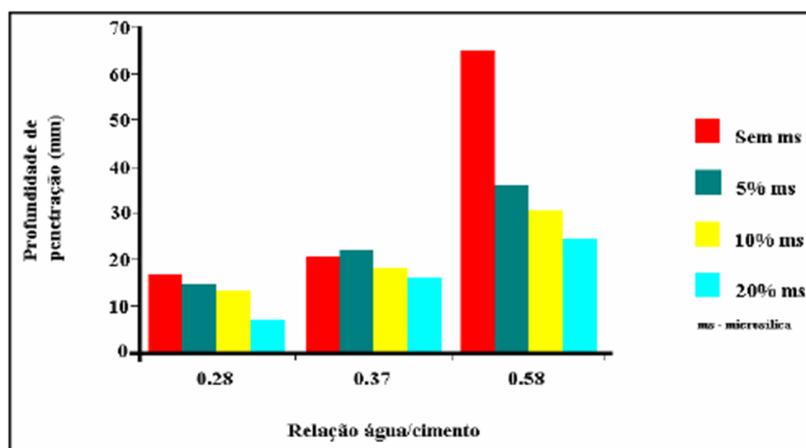


Figura 11- Profundidade de água sob pressão e relação água/aglomerante

Fonte: Wolf (1991).

Moreira (2004), em estudo utilizando concretos confeccionados com cimento Portland CP V-ARI, relações a/agl 0,40 e 0,75 e realizando ensaio de penetração de Cl^- para análise em três camadas de profundidade (camada 1: 0 a 1 cm; camada 2: 2,5 a 3,5 cm; camada 3: 5 a 6 cm), comprova que quanto menor a relação a/agl, menor a concentração de cloretos (Figura 12).

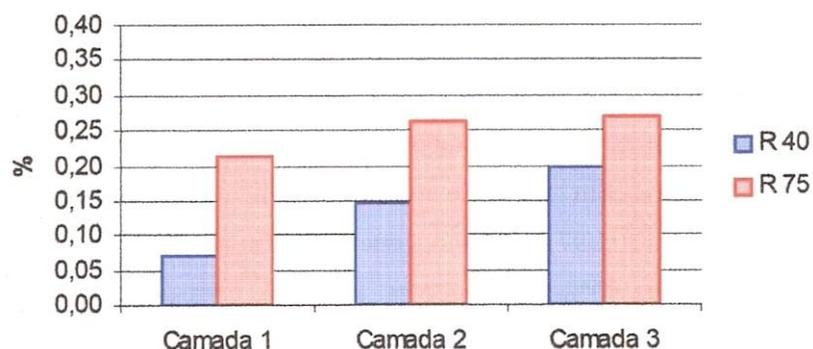


Figura 12 – Influência da relação a/agl no teor de cloretos totais.

Fonte: Moreira (2004).

Pereira (2001), estudando o coeficiente de difusão de cloretos em concretos moldados em dois tipos de cimentos Portland (CP IIF e CP IV), verificou que à medida que a relação a/agl aumenta, também aumenta o coeficiente efetivo de difusão de cloretos (Figura 13).

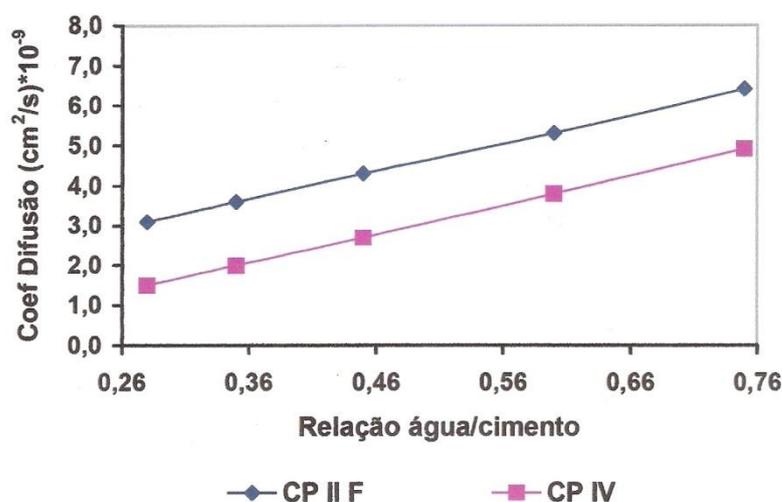


Figura 13 – Efeitos isolados da relação a/agl e do tipo de cimento sobre o coeficiente efetivo de difusão de cloretos.

Fonte: Pereira (2001).

A Tabela 10 apresenta alguns valores de relação água/aglomerante estabelecidos por normativas internacionais.

Tabela 10 – Limites normatizados de relação água/aglomerante para concreto em ambiente marinho

Norma		Concreto armado	Concreto protendido	Comentários
ABNT NBR 6118 (2003)	Submersa	0,65	0,60	---
	Aérea	0,55	0,50	
	Respingos de maré	0,45	0,45	
ACI Committee 318/318R (1996)		0,40		---
CEB-FIP, BULLETIN213/214 (1993)		0,50		Com geada (0,55 sem geada)
CPH-EHE (1999)	Submersa	0,50	0,45	Para adições: substituir A/C por A/(C+KF), sendo F = consumo de adição e K = coeficiente de eficácia. Para cinza volante, $K_{máx} = 0,3$. Por segurança, considerar zona de respingo igual à zona de maré.
	Aérea	0,50	0,50	
	Maré	0,45	0,45	

Fonte: Pontes (2006).

2.4.3 Consumo de cimento

Segundo Buenfeld e Okundi (1998), o aumento do consumo de cimento aumenta a resistência ao transporte de cloretos, aumentando a durabilidade do concreto. Ou seja, seu efeito está relacionado no maior aporte de clínquer e, conseqüentemente, maior capacidade volumétrica de fixar cloretos, conforme a quantidade de C_3A .

O consumo de cimento é a característica de menor influência na porosidade do concreto, sendo a relação água/aglomerante a de maior relevância (PONTES, 2006).

2.4.4 Tempo de cura

O tempo de cura empregado em estruturas de concreto é de fundamental importância para a determinação da porosidade em sua camada externa. O objetivo da cura é manter o concreto saturado, não permitindo a perda d'água até que os espaços da

pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, sejam ocupados pelos produtos de hidratação do cimento (GOWRIPALAN, *et al.*, 1990).

Segundo Prudêncio (1987) e Ramires (1993), citados por Hoffman (2001), o período de tempo que o concreto deve ser protegido contra a perda de água depende do tipo de cimento, das proporções da mistura, da resistência desejada, do tamanho e forma da peça e das condições ambientais.

Também deve ser considerada a influência da temperatura no processo de cura, uma vez que em temperaturas mais elevadas a perda de água na pasta de cimento será maior, alterando a distribuição dos poros e gerando micro fissuras, favorecendo o ingresso de substâncias nocivas ao concreto. Estudos realizados por Galvão *et al.* (2002) concluem que os melhores desempenhos, quanto à durabilidade, são obtidos para as misturas preparadas a 10°C, em comparação a concretagem realizadas à temperatura ambiente e a 60°C.

Uma cura deficiente gera um concreto superficial mais poroso e menos resistente ao ingresso de cloretos.

2.4.5 Fissuras

Praticamente, é impossível haver estruturas de concreto livre de fissuras, sendo aceito que algumas delas não causem conseqüências perigosas, tais como fissuras ocasionadas por deformações decorrentes das condições normais de uso ou induzidas pelas cargas atuantes. Os parâmetros mais importantes para determinação do quanto a fissura é ou não nociva, são: o projeto da estrutura, a seleção da composição do concreto e a qualidade da cura (ALANIS *et al.*, 1990).

As fissuras transversais, inerentes ao concreto armado, constituem um caminho rápido de penetração dos agentes agressivos na direção das armaduras (SARRÍA, 1997), podendo ser verificado através do perfil de cloretos no entorno das fissuras, onde há um incremento da concentração de íons Cl⁻ (BAKKER, 1988).

O CEB-FIP, Bulletin 183 (1992), descreve que as fissuras podem ocorrer devido aos seguintes fatores:

- movimentos internos do concreto (por ex.: retração por secagem);

- expansão do material no interior do concreto (por ex.: corrosão da armadura);
- condições externas (por ex.: deformações devido a recalque diferencial das fundações).

Várias normas delimitam a abertura máxima de fissura no concreto, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Limites normalizados de aberturas de fissuras para concreto em ambiente marinho

Norma	Concreto armado	Concreto protendido	Comentários
ABNT NBR 6118 (2003)	0,3	0,2	---
ACI Committee 318/318R (1996)	0,15	---	Peças tracionadas de concreto armado sujeitas a ciclos de molhagem e secagem ou aspersão da água do mar
CEB-FIP, BULLETIN213/214 (1993)	0,1		Onde há cargas fletoras (0,2 mm para outros casos)
CPH-EHE (1999)	0,1	Descompressão	Em zona de maré (0,2 mm para outros casos)

Fonte: Pontes (2006).

A NBR 6118 (ABNT, 2003) estabeleceu os valores limites da abertura característica das fissuras (W_k) e/ou os estados limites de utilização (ELS), através 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 12). A norma informa também que mesmo se respeitando os limites de fissuração impostos no item de dimensionamento dos elementos, fissuras reais podem eventualmente ultrapassar esses limites.

Tabela 12 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	CAA I	ELS-W wk \leq 0,4mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W wk \leq 0,3mm	
	CAA IV	ELS-W wk \leq 0,2mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W wk \leq 0,2mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D*	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D*	Combinação frequente

Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

*A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 25\text{mm}$.

ELS-W é o estado limite de abertura de fissuras;
 ELS-F é o estado limite de formação de fissuras;
 ELS-D é o estado limite de descompressão;
 ELS-DP é o estado limite de descompressão parcial.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2003)

2.5 INFLUÊNCIAS RELATIVAS AO AMBIENTE

2.5.1 Temperatura

A influência da temperatura no processo de difusão de cloretos nas estruturas de concreto ainda é muito discutida no meio científico. Pereira e Cincotto (2001) citam que para Helene (1993), a temperatura tem um papel crucial no processo de penetração de cloretos. Um aumento de 15°C para 30°C praticamente duplica o coeficiente de difusão de Cl⁻. Para Andrade (2001), alguns autores consideram que com o aumento da temperatura durante a cura ocorra uma minimização do coeficiente de difusão dos Cl⁻, em função de uma melhoria das condições micro estruturais do concreto.

Segundo Neville (1997), a temperatura age aumentando a cinética na maioria dos processos de natureza química. Tal fato explicaria a razão pela qual as estruturas

localizadas nas regiões quentes deterioram mais rapidamente que as estruturas inseridas em regiões frias e temperadas.

Seguindo a mesma linha, Al-Khaja (1997) observou que há um aumento significativo da penetração de cloretos quando a temperatura de exposição passa de 20°C para 45°C, principalmente em concretos convencionais quando comparados com concretos de elevada resistência, que possuem menor porosidade.

2.5.2 Grau de saturação

Basicamente, sem a presença de água não ocorre o processo de difusão de cloretos no concreto. Em ambientes com umidade relativa alta, os poros da estrutura ficam saturados, proporcionando a condição necessária para que os Cl^- possam se difundir no interior do concreto. Guimarães (2000) definiu o conceito de grau de saturação como o percentual do teor de umidade da massa de concreto em relação à absorção de água após imersão e fervura. O autor constatou que com a redução do grau de saturação de 100% para 85%, a seção transversal de difusão dos íons diminui rapidamente, restando na rede de poros apenas água adsorvida. Dessa forma, os íons têm que percorrer distâncias maiores, pois precisam circundar o poro para ultrapassá-lo.

Segundo Saetta *et al* (1993), quando a umidade relativa do ar decresce do valor crítico de 75%, a difusividade de íons apresenta uma queda acentuada.

Guimarães e Helene (2001), em ensaios realizados em região de ambiente marinho, concluíram que é grande a influência do grau de saturação (GS) da pasta de cimento endurecida. O GS da pasta de cimento é um fator mais decisivo na intensidade de penetração de cloretos que o teor de umidade, assim como a interligação dos poros é mais importante que o teor de vazios.

CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo apresenta o programa experimental desenvolvido para este trabalho, que está caracterizado por cinco etapas:

- 1ª etapa: realização de dosagem experimental, produção dos blocos de concreto e realização de ensaio de resistência à compressão axial, conforme especificações da ABNT NBR 5739 (2007). Estes procedimentos foram executados no Laboratório de Materiais do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação – NORIE, e no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais – LEME, ambos pertencentes à Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS;
- 2ª etapa: preparação e transporte dos blocos de concreto de Porto Alegre até o local onde ficariam expostos, nos municípios de Tramandaí e Imbé, localizados no estado do Rio Grande do Sul;
- 3ª etapa: instalação dos blocos de concreto em locais previamente estabelecidos (estações de monitoramento), com uma das faces voltadas na direção dos ventos predominantes da região (NE);
- 4ª etapa: seguindo cronograma para as idades de avaliação, extração de amostras dos blocos de concreto;
- 5ª etapa: análise das amostras, determinando a concentração de cloretos por massa de cimento, seguindo a norma ASTM C114-07

Serão descritos o método de pesquisa, os materiais empregados, a dosagem experimental, a produção dos concretos e os ensaios realizados.

3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Conforme já apresentado no capítulo 1, o programa experimental desta pesquisa visa coletar dados sobre o ingresso de cloretos oriundos do aerosol marinho sobre as estruturas de concreto, considerando a distância em relação ao mar e os tipos de cimento mais comumente utilizados na região. A metodologia utilizada se aplica especificamente para determinação do teor de cloretos solúveis em água, em ambiente natural.

As variáveis envolvidas nesta pesquisa são:

- a) Variáveis independentes, que foram fixadas pelo pesquisador com o intuito de observar o reflexo de suas variações sobre as variáveis dependentes. Neste trabalho foram consideradas as seguintes variáveis:

1. *Variáveis relacionadas às características do concreto*

- tipo de aglomerante: foram utilizados dois tipos de cimento para a moldagem dos concretos estudados neste trabalho, quais sejam, CP IV/RS (referência para a realização dos experimentos por ser o de maior emprego nas obras de construção civil gaúcha. Esse fato ocorre em função do elevado número de termelétricas no Estado, gerando resíduos que são adicionados como pozolanas a este cimento, tornando assim viável sua utilização) e CP V-ARI (por ser um cimento puro, sem adições pozolânicas). Além desses cimentos, foi utilizada a adição de sílica ativa;
- adição mineral: foi utilizada adição da sílica ativa para proporcionar melhorias no concreto em suas características, como alta resistência à compressão e baixa permeabilidade. A escolha de teores de 5 e 10% de adição foi baseada em estudos realizados por Mehta e Monteiro (1994), Hoffmann (2001) e Vieira (2003), entre outros, que apontam como teores ótimos valores em torno de 10%;
- relação água/aglomerante: é um parâmetro que influencia diretamente a permeabilidade do concreto, logo, foram utilizados três valores para que fosse possível avaliar o comportamento dos concretos estudados em diferentes faixas de resistência. Os valores adotados foram 0,45; 0,55 e 0,65.

2. *Variáveis relacionadas ao posicionamento territorial*

- distância em relação ao mar: a determinação das distâncias de 50, 150 e 800 metros em relação ao meio-fio da avenida Beira Mar, mais toda sua largura pavimentada, passeios, além da área de dunas até o muro de contenção da maré alta (aproximadamente 50 m), totalizando distâncias de 100, 200 e 850 metros onde foram expostos os blocos de concreto estudados, foi baseada em estudos sobre o tema apresentados por Costa (2001), Meira (2004), Guimarães, Castagno e Helene (2003) e Pontes

(2006), entre outros, bem como a restrição por locais seguros para instalação dos mesmos;

- distância em relação à lagoa: verificar a influência das lagunas formadas por água salgada nos blocos de concreto estudados, expostos a 25 metros da margem.

3. *Variáveis relacionadas ao perfil de penetração de cloretos*

- profundidade retirada de amostra: obtenção do perfil de cloretos dos blocos de concreto expostos através de amostras de pó extraídas a 5, 15 e 25 milímetros da superfície, além de amostras coletadas a 2 mm para verificar a concentração superficial de cloretos;
- idades de avaliação: para verificar a evolução da penetração de cloretos no tempo sobre os blocos de concreto expostos, coletando amostras ao longo do período de 45, 105 e 240 dias, atentando para que o tempo fosse longo o suficiente para abranger as quatro estações climáticas;
- micro clima: a direção e intensidade dos ventos têm relação direta com a geração e transporte do aerossol marinho na direção do continente, logo torna-se importante verificar a influência dos ventos predominantes na região, coletando amostras na face nordeste (NE) e em sua face oposta, sudoeste (SO).

b) Variáveis dependentes (ou de resposta), que são aquelas influenciadas pelas variáveis independentes, quais sejam:

- teor de cloretos livres presente na massa do cimento: os cloretos podem estar presentes no concreto na forma livre ou combinada, sendo o cloreto livre aquele realmente agressivo à armadura, afetando a durabilidade das estruturas de concreto. Logo, decidiu-se monitorar o ingresso de cloretos livres nos blocos de concreto utilizados nesta pesquisa, possibilitando traçar os perfis de cloretos em suas camadas superficiais;
- resistência à compressão axial: variável normalmente utilizada como critério para avaliar o desempenho de concretos, assim sendo, foi adotada como parâmetro de controle nas idades de 3, 7 e 28 dias.

c) Variáveis intervenientes, que são aquelas que também influenciam as dependentes, mas somente medidas para controle. Foram consideradas as seguintes variáveis clássicas de caracterização ambiental:

- temperatura ambiente: variável que influencia os ciclos de molhagem/secagem das superfícies dos concretos expostos ;
- umidade relativa do ar: variável indicativa da presença de água nos poros do concreto.

3.2 FLUXOGRAMA DA PROGRAMAÇÃO EXPERIMENTAL

As etapas da programação experimental deram-se da seguinte forma (Figura 14):

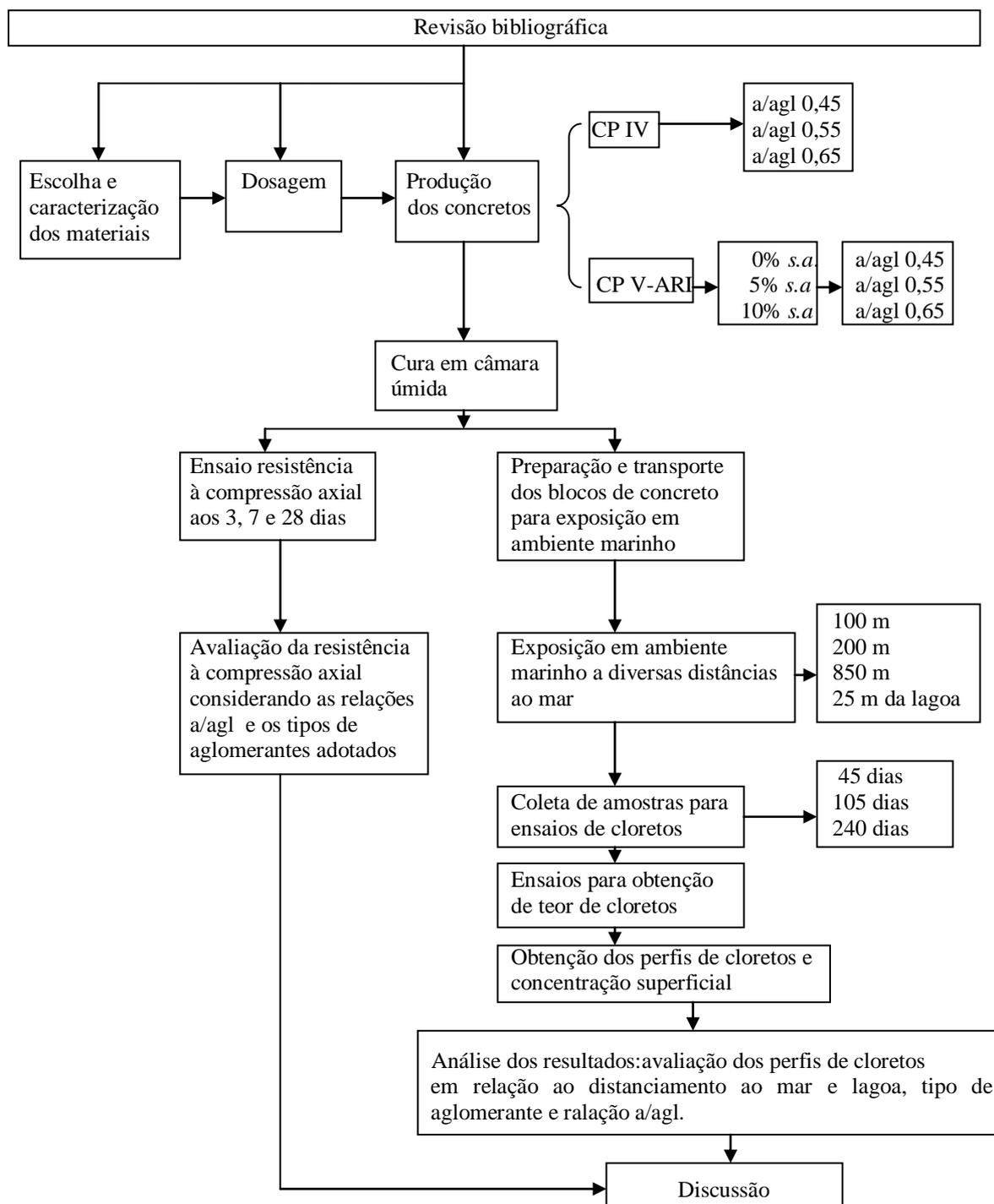


Figura 14 – Fluxograma do programa experimental

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Os materiais empregados neste trabalho, apesar de terem sido adquiridos em Porto Alegre, são de uso comum também no Litoral Norte do estado, local onde ficaram expostos os blocos de concreto e por essa razão foram adotados.

3.3.1 Agregado graúdo

A brita utilizada, facilmente encontrada no comércio local, é de origem basáltica. Após ser peneirada, utilizou-se apenas o material passante na peneira com malha de abertura de 19 mm. Sua composição granulométrica é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Composição granulométrica do agregado graúdo

Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado	Método de Ensaio (NBR)
19	2	2	NBR NM 248 (2003)
12,5	53	55	
9,5	28	83	
6,3	14	97	
4,8	2	99	
≤ 4,8	1	100	

A Tabela 14 apresenta as principais características físicas do agregado graúdo utilizado nesta pesquisa.

Tabela 14 - Caracterização física do agregado graúdo

Módulo de finura	6,84	NBR NM 248 (2003)
Dimensão máxima característica (mm)	19	NBR NM 248 (2003)
Graduação	-	7211/2009
Massa específica (g/cm ³)	2,72	9776/1987

3.3.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a confecção dos concretos é uma areia quartzosa, de origem natural, disponível comercialmente na região metropolitana de Porto Alegre, sendo proveniente do Rio Jacuí. Esta areia foi seca ao ar antes de sua utilização. Sua composição granulométrica pode ser observada na Tabela 15 e sua caracterização na Tabela 16.

Tabela 15 – Composição granulométrica do agregado miúdo

Peneiras (mm)	% Retido	% Retido Acumulado	Método de Ensaio (NBR)
4,80	0	0	NBR NM 248 (2003)
2,40	8	8	
1,20	15	23	
0,60	34	57	
0,30	29	86	
0,15	12	98	
≤ 0,15	2	100	

Tabela 16 - Caracterização física

Módulo de finura	2,72	NBR NM 248 (2003)
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	NBR NM 248 (2003)
Graduação	Zona 3	7211/2009
Massa específica (g/cm ³)	2,62	9776/1987

3.3.3 Cimento

Para a determinação do tipo de cimento empregado no estudo, considerou-se o mais usual no Litoral Norte do Estado, sendo também de uso comum na região metropolitana de Porto Alegre: cimento Portland pozolânico CP IV-RS.

Também foi considerado nesta escolha, o fato do CP IV-RS ser composto por uma mistura íntima e homogênea de clínquer Portland e pozolana fina, no qual a quantidade está entre 15 e 50%, sendo indicado para obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos, segundo a NBR 5736 (ABNT, 1999), além de ser resistente a sulfatos.

Como contraponto, foi adotado o cimento Portland CP V-ARI por ser mais puro, não apresentando adições pozolânicas. Todo o montante de cada um dos cimentos utilizados pertencia a um mesmo lote.

A caracterização desses cimentos vem a seguir, na Tabela 17.

Tabela 17 - Composição química e física dos aglomerantes

Propriedades químicas	Resultados		Exigências de Norma	
	CP IV- RS	CP V-ARI	NBR 5736:1999	NBR 5733:1991
Dióxido de silício - SiO ₂	18,93	19,59	---	---
Óxido de cálcio total – CaO	60,25	64,35	---	---
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	4,35	4,79	---	---
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃	2,57	3,07	---	---
Óxido de magnésio – MgO	5,07	1,69	≤ 6,5	≤ 6,5
Trióxido de enxofre – SO ₃	3,22	2,75	≤ 4,0	≤ 4,0
Óxido de cálcio livre – CaO Livre	1,41	1,02	≤ 3,0	≤ 3,0
Perda ao fogo	3,54	2,09	≤ 4,5	≤ 4,5
Resíduo insolúvel	3,22	0,46	---	≤ 1,0
Propriedades físicas	Resultados		Exigências de Norma	
	CP IV- RS	CP V-ARI	NBR 5736:1999	NBR 5733:1991
Blaine (cm ² /g)	4321	4230	≥ 2600	≥ 3000
Tempo de início de pega (min)	180	134	≥ 60	≥ 60
Tempo de fim de pega (min)	234	195	≤ 720	≤ 600
Finura na peneira #200 (%)	2,17	0,13	≤ 12,0	≤ 6,0
Expansibilidade a quente (mm)	0,20	0,00	≤ 5,0	≤ 5,0
Massa específica (g/cm ³)	2,72	3,11	---	---
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	21,80	35,10	≥ 10,0	≥ 24
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	27,40	41,20	≥ 20,0	≥ 34
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	39,10	49,60	≥ 32,0	---

Fonte: dados fornecidos pelo fabricante.

3.3.4 Sílica ativa

Para este trabalho utilizou-se sílica de produção nacional fornecida em pó, não densificada e proveniente de um mesmo lote.

Na Tabela 18 encontram-se as características químicas e físicas fornecidas pelo fabricante da sílica ativa.

Tabela 18 - Características químicas e físicas da sílica ativa

Elementos químicos	Teor (%)
Fe ₂ O ₃	0,10
CaO	0,24
Al ₂ O ₃	0,09
MgO	0,44
K ₂ O	0,93
Na ₂ O	0,22
SiO ₂	95,1
Perda ao fogo (%)	2,32
Massa específica (kg/cm ³)	2,22
Superfície específica (m ² /g)	14,20
pH	8,48
Umidade (%)	0,67

Fonte: dados fornecidos pelo fabricante.

3.3.5 Aditivo químico

Foi utilizado como aditivo químico um superplastificante de terceira geração a base de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando super plastificação e alta redução de água, podendo deixar o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração da relação a/agl, sendo que vários desses aditivos alteram o tempo de pega.

Conforme o fabricante, são atendidos os requisitos das normas brasileiras NBR 11768 (ABNT/1992) - tipo P e SP - e ASTM C494 (tipo A e F) e deve ser utilizado nas dosagens de 0,2 a 1,0% sobre a massa de cimento. As especificações técnicas constam na Tabela 19.

Tabela 19 - Especificações técnicas do aditivo químico

Função	Aditivo super plastificante de terceira geração para concreto.		
Base Química	Éter policarboxílico.		
Aspecto	Líquido		
Cor	Branco turvo		
Ação secundária: Redutor de água			
Solubilidade em água: Total			
Não contém cloreto de cálcio, intencionalmente adicionado, ou ingredientes a base de cloreto.			
Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761B	Líquido branco turvo	Visual
pH	TM 112 B	5 - 7	-
Densidade	TM 103 B	1,067 - 1,107	g/cm ³
Sólidos	TM 613 B	38,0 - 42,0	%
Viscosidade	TM 117	<150	cps

Fonte: dados fornecidos pelo fabricante.

3.3.6 Água

Foi utilizada água potável proveniente da rede de abastecimento público de Porto Alegre.

3.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL

O método de dosagem utilizado para determinar os traços que atendessem as relações água/aglomerante pré-determinadas para esta pesquisa (0,45; 0,55 e 0,65) nas quatro combinações de aglomerantes: CP IV-RS, CP V-ARI, CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A foi o IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1993).

A adoção desse método deu-se por ser versátil e de ampla aceitação no país, tendo como principal característica a experimentação expedita com os materiais disponíveis na obra.

A primeira etapa deste método foi a determinação experimental do teor ideal de argamassa para execução de um traço inicial, utilizando os materiais descritos anteriormente. Seguindo o procedimento recomendado por Helene e Terzian (1993), chegou-se a um teor ideal de argamassa de 51% ($\alpha = 0,51$) para um traço inicial de 1:5,0 em massa. A determinação do teor ideal de argamassa no concreto produz uma mistura adequada para o lançamento na fôrma, com menos riscos de fissuração de origem térmica ou retração por secagem (HELENE; TERZIAN, 1993).

Fixou-se o abatimento do tronco de cone em 80 ± 10 mm, medido através do ensaio descrito pela NBR NM-67 (1998). A seguir, considerando o teor de argamassa em 51% e mantendo o mesmo abatimento, foram executados mais dois traços auxiliares: um mais rico (1:3,5) e outro mais pobre (1:6,5), necessários para que se tornasse possível ajustar a curva na elaboração do diagrama de dosagem.

Este diagrama é constituído por quatro eixos representados pela resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, relação água/aglomerante, traço unitário e consumo de cimento.

Para a elaboração do diagrama de dosagem foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos com dimensão de 9,5 x 19,0 cm (diâmetro x altura) para cada traço de cada aglomerante, sendo utilizados no ensaio de resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias, seguindo o que determinam as normas ABNT NBR 5738 (2003) E ABNT 5739 (2007).

Os resultados obtidos no ajuste das curvas de dosagem para os dois cimentos utilizados nesta pesquisa encontram-se na Tabela 20 e os diagramas de dosagem são visualizados na Figura 15.

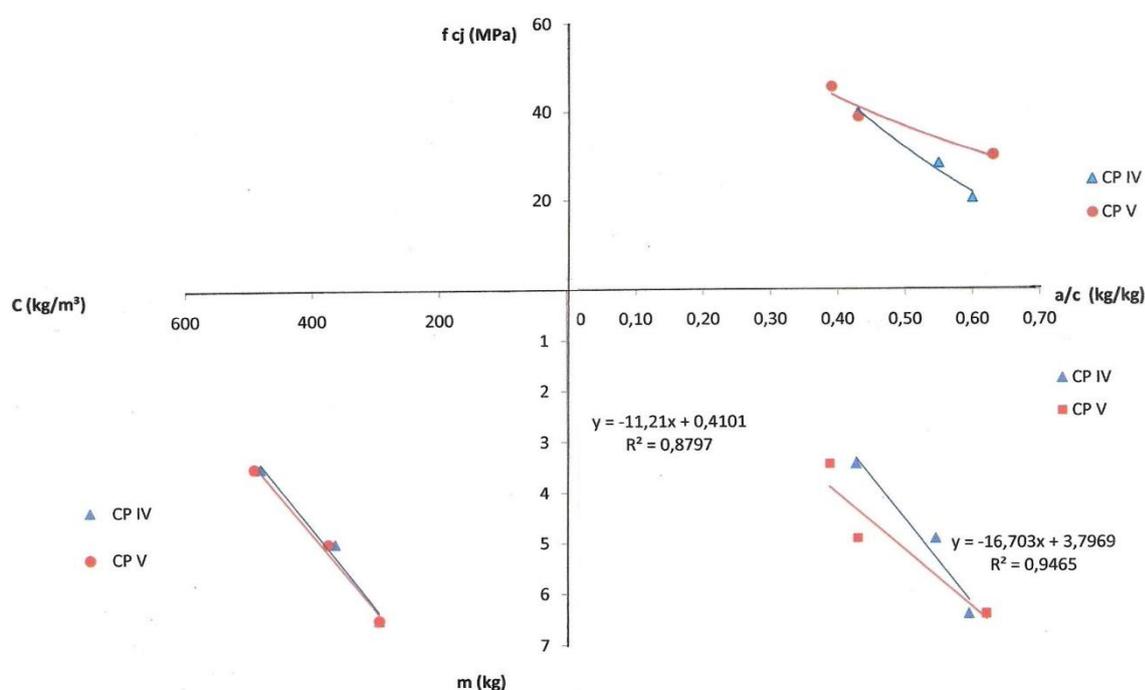


Figura 15 - Diagrama de dosagem para concretos com cimento CP IV-RS e CP V-ARI

Tabela 20 - Resultados do ajuste da curva de dosagem experimental

Aglomerante	Traço unitário	Relação água/cimento	fc 28 (MPa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)
CP IV-RS	1 : 3,5	0,43	39,93	482,76	2406
	1 : 5,0	0,55	28,57	366,11	2425
	1 : 6,5	0,60	20,64	296,67	2430
CP V-ARI	1 : 3,5	0,39	45,79	493,37	2441
	1 : 5,0	0,43	38,93	376,67	2449
	1 : 6,5	0,63	30,43	297,05	2442

A partir dos diagramas de dosagem e dos valores pré-fixados para este trabalho da relação água/aglomerante (0,45; 0,55 e 0,65), foram determinados os traços definitivos dos concretos, conforme consta na Tabela 21.

Tabela 21 - Traços utilizados na confecção dos blocos de concreto

Aglomerante	Relação água/aglomerante		
	0,45	0,55	0,65
CP IV-RS	1 : 1,41 : 2,31	1 : 2,27 : 3,14	1 : 3,12 : 3,97
CP V-ARI	1 : 1,87 : 2,76	1 : 2,44 : 3,31	1 : 3,02 : 3,86

3.5 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Para cada mistura e relação água/aglomerante foram moldados quatro blocos prismáticos com dimensão de 20x60x10 cm (largura, altura e profundidade) para serem instalados nas estações de monitoramento e seis corpos-de-prova cilíndricos (9,5x19 cm) utilizados no ensaio de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003).

3.5.1 Fôrmas

Para a confecção das fôrmas utilizadas como moldes dos blocos de concreto, foram empregadas chapas de compensado naval, com 2 mm de espessura. Essas fôrmas foram executadas em sistema de encaixe das peças, fixadas por meio de parafusos e porcas, permitindo assim seu reaproveitamento (Figura 16).



Figura 16 - Fôrmas de compensado naval para concretagem dos blocos

Cada conjunto de fôrmas é constituído por quatro moldes de blocos com as seguintes dimensões cada: 20 x 60 x 10 cm (largura, altura e profundidade) e os mesmos foram preenchidos por um mesmo tipo de traço, confeccionado em uma mesma betonada. No total foram confeccionados seis conjuntos de fôrmas, com dois reaproveitamentos.

Antes do lançamento do concreto, as fôrmas foram imprimadas com óleo mineral, usado como desmoldante.

3.5.2 Concretagem

Para a produção dos concretos foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade para 320 litros.

Tendo como fatores limitantes a quantidade de concreto a ser produzido, o número de fôrmas confeccionadas e o espaço disponível no laboratório, planejou-se a concretagem dos blocos em duas etapas, com intervalo de uma semana entre ambas, sendo que em cada etapa foram concretados 24 blocos de concreto com seus respectivos corpos-de-prova cilíndricos para a realização do ensaio de resistência à compressão axial.

Antes do início de cada sessão de concretagem, a betoneira foi imprimada com uma porção de concreto com traço (1 : 2 : 3), em massa. Inicialmente a betoneira tem seu interior molhado e acrescentam-se os materiais. Após, esse concreto foi retirado,

deixando uma camada de argamassa aderida por toda a cuba. A betoneira estava apta a receber os materiais previamente pesados e separados para a concretagem de cada traço especificado neste trabalho.

A colocação dos materiais na betoneira em movimento ocorreu seguindo esta ordem: inicialmente adicionou-se o agregado graúdo e um pouco de água, misturou-se por alguns segundos; acrescentou-se o aglomerante (mais a sílica ativa, para traços específicos) e novamente água, finalizando, adicionou-se o agregado miúdo e o restante da água, misturando até que o concreto obtivesse a consistência para a realização do abatimento de tronco de cone, conforme especificações da NBR NM 67 (ABNT, 1998). O tempo de mistura mínimo foi de três minutos.

Com o concreto preparado, o mesmo foi retirado da betoneira e colocado na fôrma para a confecção dos blocos prismáticos já lubrificados. Primeiramente preencheu-se a forma até metade de sua altura, quando foi utilizado para o adensamento dessa camada de concreto um vibrador mecânico de imersão, seguindo orientação da ABNT NBR 5738 (2003). Em seguida, completou-se a forma com concreto, sendo feito acabamento superficial com uma colher de pedreiro.

Completando essa etapa e seguindo os mesmos procedimentos, preencheram-se de concreto as fôrmas metálicas dos corpos-de-prova cilíndricos, utilizados nos ensaios de resistência à compressão (Figura 17).



Figura 17 - Lançamento e adensamento do concreto nas fôrmas

Esse roteiro foi seguido para cada traço de concreto estudado neste trabalho, ou seja, doze vezes (Figura 18).



Figura 18 - Concretagem dos blocos e corpos-de-prova

3.5.3 Cura

Foram realizados processos de cura distintos para os blocos e para os corpos-de-prova cilíndricos.

3.5.3.1 Cura dos blocos

Após a concretagem, os blocos foram cobertos com lonas plásticas por 48 horas, quando foram retiradas para ser realizada a desmoldagem dos mesmos. A seguir, os blocos foram devidamente identificados e levados à câmara úmida, projetada para atender a NBR 5738 (ABNT, 2003), onde permaneceram por sete dias.

Este período de sete dias foi adotado para representar de forma mais aproximada o que ocorre normalmente na maioria das obras de construção civil (Figura 19).



Figura 19 - Cura de blocos e corpos-de-prova em câmara úmida

3.5.3.2 Cura dos corpos-de-prova

Foi realizada cura atendendo a NBR 5738 (ABNT, 2003), onde transcorridas 24 horas da concretagem foi realizada a desmoldagem dos corpos-de-prova que foram colocados em câmara úmida, com temperatura de $23 \pm 1^\circ \text{C}$ e umidade relativa superior a 98%, permanecendo no local até as datas programadas para os ensaios de resistência à compressão axial (3, 7 e 28 dias).

3.6 ENSAIOS

3.6.1 Ensaio de Resistência à Compressão

Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias de idade. Um dia antes da realização do ensaio, os corpos-de-prova foram retirados da câmara úmida para receberem capeamento com enxofre, garantindo uma superfície lisa de contato com a prensa (Figura 20).



Figura 20 - Capeamento de corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão axial

Para cada idade de ensaio, foram utilizados dois corpos-de-prova de cada mistura. O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme especificações da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Para a realização deste ensaio foi utilizada uma prensa da marca SHIMADZU, modelo UH2000 kN, com capacidade entre 40 e 2000 kN, programada com uma carga de 1000 kN e velocidade de 0,3 m/s . Este equipamento encontra-se no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais – LEME/UFRGS (Figura 21).



Figura 21 - Ensaio de resistência à compressão axial

3.6.2 Determinação da Penetração de Cloretos

Para esta pesquisa, inicialmente foram definidos pontos de coleta, tempo de exposição, método de captação e medição a serem utilizados. Foi planejado um ensaio não acelerado por um período de oito meses. A idéia foi simular uma situação real de penetração de cloretos em estruturas de concreto expostas em ambiente natural agressivo – orla marinha, sendo que a metodologia desse ensaio se aplica especificamente para determinação do teor de cloretos solúveis em água, como os produzidos no oceano e na linha de ondas que penetram no continente.

Foram cumpridas as seguintes etapas: preparação e instalação dos blocos de concreto nas estações de monitoramento, coleta de amostras dos blocos e análise das amostras.

3.6.2.1 Preparação dos blocos de concreto para exposição

Para este procedimento os blocos de concreto receberam tratamento prévio antes de serem instalados nas estações de monitoramento. As faces expostas não trabalhadas, quais sejam: laterais, as faces de topo e fundo e mais uma faixa de 5 cm em toda volta do bloco junto à face inferior foram impermeabilizadas com emulsão asfáltica a base de água e agregados minerais inertes. Aplicaram-se três demãos do produto puro, sem diluição, sempre no sentido oposto ao da última aplicação, esperando secar uma demão da outra. Procurou-se, assim, garantir o direcionamento do fluxo de cloretos através das faces maiores, onde foram coletadas as amostras e, ainda, utilizar um material de uso comum nas obras da região para impermeabilização de estruturas (Figura 22).



Figura 22 – Impermeabilização das faces não trabalhadas do bloco de concreto

3.6.2.2 Instalação dos blocos de concreto nas estações de monitoramento

Para a escolha dos locais das estações de monitoramento foi considerado o distanciamento em relação ao mar proposto neste trabalho, a disponibilidade de área aberta com a mínima interferência de paredes, árvores ou outros elementos e a segurança dos blocos de concreto contra roubos e atos de vandalismo.

Sendo assim, não foi possível instalar uma estação de monitoramento diretamente na praia, pois não havia nenhuma segurança no local. Também foi observado que quando os ventos do quadrante sul ocorrem, há o ‘empilhamento’ de água sobre a costa, gerando o que é conhecido como *ressaca*. Quando ocorre, as águas do mar chegam até o muro de proteção existente na orla. Considerando essa questão, tomou-se como ponto inicial para o distanciamento em relação ao mar o alinhamento da Avenida Beira-Mar, em Tramandaí, junto ao lado edificável (Figura 23).



Figura 23 - Alinhamento da Av. Beira Mar, Tramandaí

Fonte: Autor

As estações de monitoramento foram instaladas nos seguintes locais:

- Estação de monitoramento I: Terminal Marítimo Almirante Soares Dutra - TEDUT (Tramandaí/RS).
- Estação de monitoramento II: Terminal Marítimo Almirante Soares Dutra - TEDUT (Tramandaí/RS).
- Estação de monitoramento III: Residência particular: Av. Flores da Cunha (Tramandaí/RS).
- Estação de monitoramento IV: Unidade Dispersa – CECLIMAR (Imbé/RS).

Na Tabela 22 são apresentadas as coordenadas geodésicas referentes às estações de monitoramento.

Tabela 22 - Localização geodésica das estações de monitoramento

Estação	Latitude	Longitude	Distância (m)
E – I	30°00'32,99" S	50°08'06,72" O	100,00
E – II	30°00'31,43" S	50°08'08,25" O	200,00
E – III	29°59'41,86" S	50°08'11,94" O	850,00
E - IV	29°58'25,39" S	50°08'17,68" O	1850,00 (do mar) 25,00 (da lagoa)

Os blocos instalados nas estações de monitoramento foram assentados diretamente sobre piso pavimentado nas estações II, III e IV, e na estação I, para que não ficasse sobre a leiva de grama, foram colocados sobre mureta com altura aproximada de 60 cm do solo. Em cada estação foi disposto aleatoriamente um bloco de cada mistura concretada em laboratório, totalizando doze blocos instalados.

O posicionamento desses blocos em todas as estações de monitoramento seguiu a direção dos ventos predominantes na região, ou seja, nordeste. Tomou-se o cuidado para que os mesmos ficassem, no mínimo, 50 cm distantes entre si para que houvesse uma adequada circulação de ar entre eles (Figuras 24 a 29).



Figura 24 - Localização das estações de monitoramento I e II, em Tramandaí

Fonte: Google. Disponível em: <<http://www.google.com.br>> Acesso em: 10 jun. 2009.



Figura 25 - Localização da estação de monitoramento IV, em Imbé

Fonte: CECLIMAR/IB/UFRGS



Figura 26 – Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento I



Figura 27 - Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento II



Figura 28 - Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento III



Figura 29 - Instalação dos blocos de concreto na estação de monitoramento IV

3.6.2.3 Coleta de amostras dos blocos

Para a determinação do teor de cloretos foram coletadas amostras de concreto, seguindo o que foi estipulado para as idades de avaliação, tanto na face nordeste como na sudoeste, de cada bloco em cada estação de monitoramento.

Os blocos de concreto foram retirados das estações, sendo levados a um local protegido contra o vento e colocados sobre uma bancada para a extração das amostras.

Essas amostras foram extraídas, sob a forma pulverulenta, utilizando um martetele industrial da marca BOSH, modelo GBH 2-24 DSE, com broca IRWIN/SDS-13 mm. Para que não houvesse dispersão de pó coletado, foi instalada uma proteção em plástico transparente, com orifícios somente para a entrada da broca e a saída da amostra (Figura 30).



Figura 30 - Bloco preparado para perfuração

Previamente foram traçadas nas faces maiores de cada bloco uma grade de referência, com espaçamento de 5 cm e afastada 2,5 cm das laterais, para demarcar os mesmos pontos de coleta em todos os blocos. Esses pontos foram escolhidos de forma aleatória, porém sempre de forma que em cada coleta fossem retiradas amostras das áreas mais próximas das laterais e do meio do bloco (Figura 31).



Figura 31 - Marcação de grade de referência no bloco de concreto

Inicialmente, após determinar três pontos distintos em cada face do bloco (nordeste e sudoeste), realizou-se a extração da amostra na superfície, sendo utilizado o marteleto na função sem impacto, com baixa velocidade de rotação, fazendo uma raspagem com 2 mm de profundidade, aproximadamente. A seguir, foram realizadas perfurações com as seguintes profundidades em relação à superfície: 5, 15 e 25 mm, necessárias para realizar o traçado do perfil de penetração de cloretos em função da profundidade.

O pó de concreto coletado em cada amostra foi acondicionado em saco plástico, lacrado e devidamente identificado. Após a retirada do material para análise, os orifícios foram selados com filme adesivo transparente, evitando assim contaminação do concreto para novas análises.

3.6.2.4 Análise das amostras

Para a análise das amostras extraídas dos blocos de concreto instalados nas quatro estações de monitoramento, foi utilizado o procedimento adotado pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME/UFRGS para estruturas existentes, o Sistema CL-2000 de Ensaio de Cloretos Para Uso em Obras, da NDT JAMES INSTRUMENTS INC. Consiste de um laboratório portátil contendo: contador eletrônico de alta impedância, acionado por bateria com circuitos para compensação de temperatura e um microprocessador para conversão direta a percentual de cloretos;

conjunto de frascos com líquidos para calibração do aparelho; eletrodo com sensor de temperatura e balança para pesagem das amostras (Figura 32).



Figura 32 - Laboratório portátil para análise de amostras: Sistema CL-2000 de Ensaio de Cloretos Para Uso em Obras, da NDT JAMES INSTRUMENTS INC.

O método consiste em determinar a concentração iônica de cloretos utilizando o eletrodo com um sensor de temperatura que converte a voltagem gerada pela reação dos cloretos com o ácido. O equipamento aplica automaticamente a correção de temperatura e se correlaciona com a norma ASTM C114-09. Por meio do visor de LCD do equipamento, apresenta-se a concentração de cloretos por percentual de cloretos em massa de concreto, sendo necessário fazer a conversão para percentual de cloretos por massa de cimento.

Inicialmente, para a aplicação do método, realizou-se a calibração do contador eletrônico utilizando as concentrações de cloretos fornecidas, com os seguintes teores: 0,005%; 0,010%; 0,050%; 0,100% e 0,300%. Foi estabelecida uma curva de calibração. A seguir, preparou-se o eletrodo adicionando em seu interior solução líquida fornecida com o equipamento. A balança também foi ajustada para a massa das amostras. Conforme o fabricante pode-se usar água deionizada como líquido de extração de cloretos.

Para cada amostra, o roteiro da análise foi o seguinte:

- pesagem de 3g de amostra de pó extraído;
- diluição da amostra pesada em 20 ml de água deionizada;
- mistura da solução por três minutos em um agitador centrífugo;

- inserção do eletrodo na solução, esperando um minuto para estabilizar e fazer a leitura;
- para nova análise, lavar o eletrodo com água deionizada e secar com papel toalha.

3.7 MONITORAMENTO AMBIENTAL

A fim de atingir os objetivos deste trabalho, necessitava-se expor os blocos de concretos a serem estudados em pontos que representassem a área urbana de Tramandaí, viabilizando a pesquisa.

Para tanto, alguns parâmetros foram estabelecidos para escolha da época de exposição dos blocos de concreto e os respectivos locais de instalação dos mesmos:

- época de exposição: as quatro estações do ano foram contempladas, sendo que no inverno houve um menor tempo de exposição;
- área de instalação: zona urbana, tendo como ponto de referência inicial (marco zero) o alinhamento da Av. Beira-Mar de Tramandaí;
- pontos de disposição: escolhidos de acordo com a incidência dos ventos predominantes (nordeste) e facilidade de acesso;
- período de exposição: oito meses;
- segurança: para inibir a ação de vândalos, optou-se por colocar os blocos em propriedade privadas, necessitando de autorização dos proprietários, ou públicas que fossem fechadas com vigilância.

3.7.1 Localização do ambiente

A pesquisa da penetração de Cl⁻ em estruturas de concreto foi realizada na área urbana dos municípios de Tramandaí e Imbé.

Tramandaí tem sua sede localizada na latitude 29°59'05" Sul e na longitude 50°08'01" Oeste, altitude de 1,80 m. Já a sede de Imbé está localizada na latitude 29°58'31" Sul e na longitude 50°07'41" Oeste, altitude de 0,50 m (Figura 33).

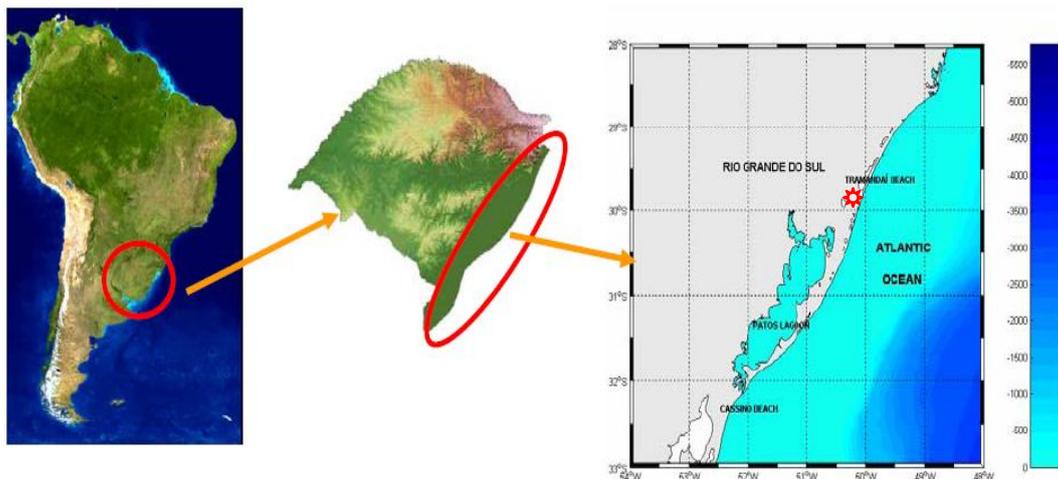


Figura 33 – Localização de Tramandaí

Fonte: Cuchiara *et al*, 2006

A região apresenta domínio climático Mesotémico Brando Superúmido, sem seca, do tipo temperado e as temperaturas médias anuais ficam entre 16° e 20° C e as temperaturas dos meses mais quentes superiores a 20°C (VIEIRA e RANGEL, 1988).

Em Tramandaí a temperatura oscila entre 22 a 35°C nos meses mais quentes de verão e entre 3 e 18°C no inverno e as precipitações pluviométricas médias anuais da região são as mais baixas do Estado, com valores entre 1200 e 1300mm (COTRIM *et al*, 2007).

Quanto à umidade relativa, Hasenack e Ferraro (1989) indicam uma variação média entre 76% a 81%, evidenciando a influência das massas de ar Tropical Atlântica (Ta) e Polar Atlântica (Pa), sendo a primeira caracterizada por temperatura e umidade elevadas e, a segunda, por ser uma massa de ar fria e úmida.

O caráter aberto da costa torna o ambiente exposto e dominado pela ação direta de ondas de energia média à elevada, sendo esta a principal fonte de energia construtora das feições morfológicas da região (TOMAZELLI e VILLWOCK, 1992).

O relevo da região costeira é plano, porém na faixa litorânea existe a predominância de dunas com até 20 metros de altura, que naturalmente tem mobilidade, mas que atualmente, em muitos locais, foram fixadas por vegetação (Figura 34). A ação eólica no litoral, principalmente do vento nordeste no verão e do vento sudoeste no inverno, facilmente deslocam as partículas finas de areia, causando erosão (BELLOMO, 1992). É uma característica da região a presença de fortes ventos.



Figura 34 – Relevo da região costeira de Tramandaí

Fonte: Autor

A principal lagoa de Tramandaí e Imbé é a Laguna de Tramandaí. Ela possui uma comunicação com o mar, sendo o local de esgotamento das drenagens de toda a bacia hidrográfica do rio Tramandaí (Figura 35).



Figura 35 - Comunicação com o mar da Laguna de Tramandaí

Fonte: CECLIMAR/IB/UFRGS

Essa bacia abrange uma área total na região de 2.700 km², tendo em sua faixa costeira um tamanho de aproximadamente 115 km lineares. Ela estende-se desde as nascentes dos rios Maquiné e Três Forquilhas a oeste, ao norte até a Lagoa Itapeva e ao sul até da lagoa da Cerquinha. Esse ponto de contato entre as águas das lagoas e o mar gera uma zona estuarina com salinidade de água entre 0,05 e 3% (COMITE DE BACIAS, 2005 *apud* COTRIM *et al*, 2007).

Essa particularidade das águas da Laguna de Tramandaí fez com que este trabalho verificasse o quanto essa salinidade influenciaria na penetração de Cl⁻ em estruturas de concreto instaladas próxima a sua margem (estação de monitoramento IV).

3.7.2 Características climatológicas

Os dados referentes às características climatológicas da região estudada foram obtidos junto a Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda. Essa caracterização foi definida em função da temperatura, umidade relativa, precipitação e velocidade dos ventos predominantes no período de exposição dos blocos de concreto nas estações de monitoramento, que compreende o intervalo de setembro de 2008 a junho de 2009.

3.7.2.1 Temperatura

Na Tabela 23 e Figura 36 são apresentados os valores médios mensais compensados da temperatura para o período de execução deste trabalho.

Analisando os dados, verifica-se que os meses mais quentes (nov/08 a abr/09) apresentaram uma temperatura média de 23°C e nos meses mais frios, a média ficou em 17°C. Esses valores estão de acordo com o observado por Cotrim *et al* (2007).

Tabela 23- Temperatura média no período de set/08 a jun/09

ANO	TEMPERATURA MÉDIA (°C)									
	set/08	out/08	nov/08	dez/08	jan/09	fev/09	mar/09	abr/09	mai/09	jun/09
2008/2009	16	19	21	22	23	24	24	22	19	15

Fonte: Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda

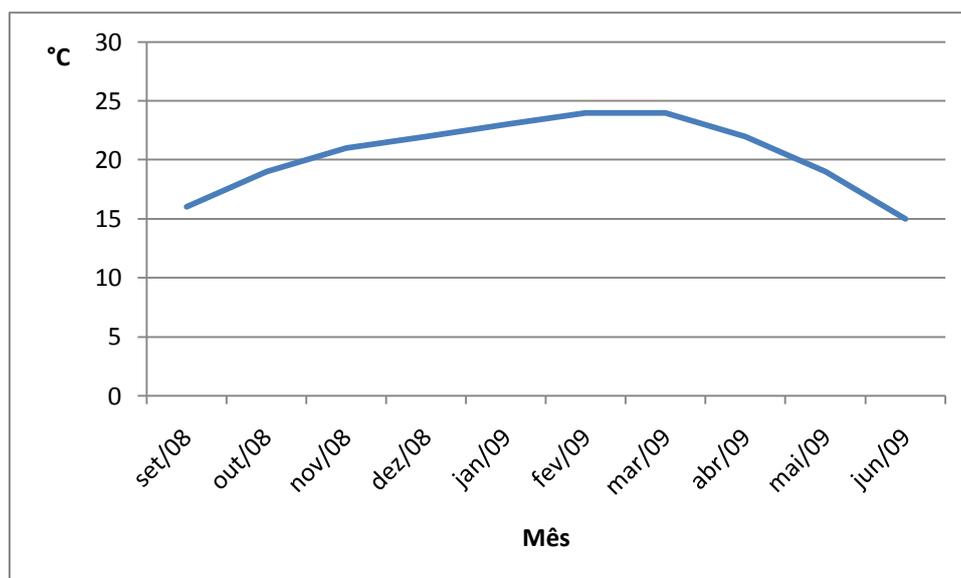


Figura 36 - Temperatura média compensada no período de set/08 a jun/09

Fonte: Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda

3.7.2.2 Umidade relativa

Na Tabela 24 e Figura 37 são apresentados os valores médios mensais da umidade relativa do ar para o período de execução deste trabalho, verificando-se uma umidade relativa do ar média de 77%.

Tabela 24 - Umidade relativa do ar média no período de set/08 a jun/09

ANO	UMIDADE RELATIVA MÉDIA (%)									
	set/08	out/08	nov/08	dez/08	jan/09	fev/09	mar/09	abr/09	mai/09	jun/09
2008/2009	76	79	75	75	77	76	78	76	80	80

Fonte: Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda

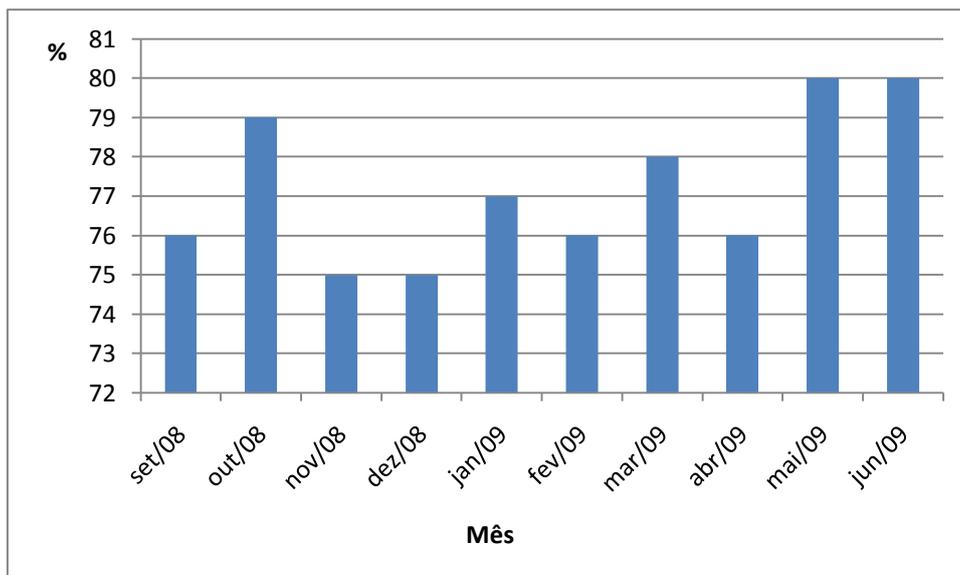


Figura 37 - Umidade relativa do ar média no período de set/08 a jun/09

Fonte: Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda

3.7.2.3 Precipitação

Como referência aos valores observados no período de estudo, é apresentado na Figura 38 o gráfico com a Climatologia de Tramandaí, com dados coletados no período de 1961-1990. Estes dados, fornecidos pela Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda, tem como fonte o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

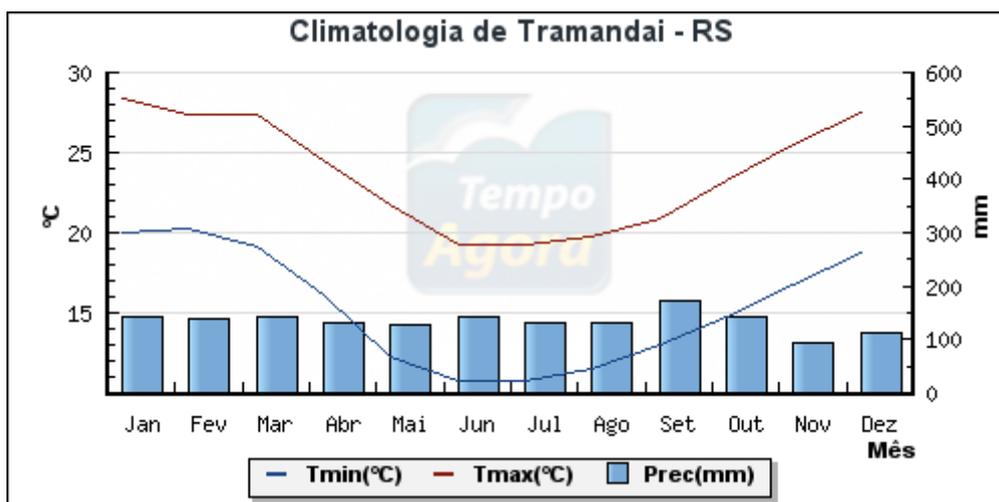


Figura 38 - Climatologia de Tramandaí

Fonte: Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda (INMET)

Na Tabela 25 e Figura 39 são apresentados os valores acumulados mensais da precipitação para o período de execução deste trabalho.

Tabela 25 - Precipitação acumulada no período de set/08 a jun/09

ANO	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (mm)									
	set/08	out/08	nov/08	dez/08	jan/09	fev/09	mar/09	abr/09	mai/09	jun/09
2008/2009	169	193	77	62	128	104	66	42	101	33

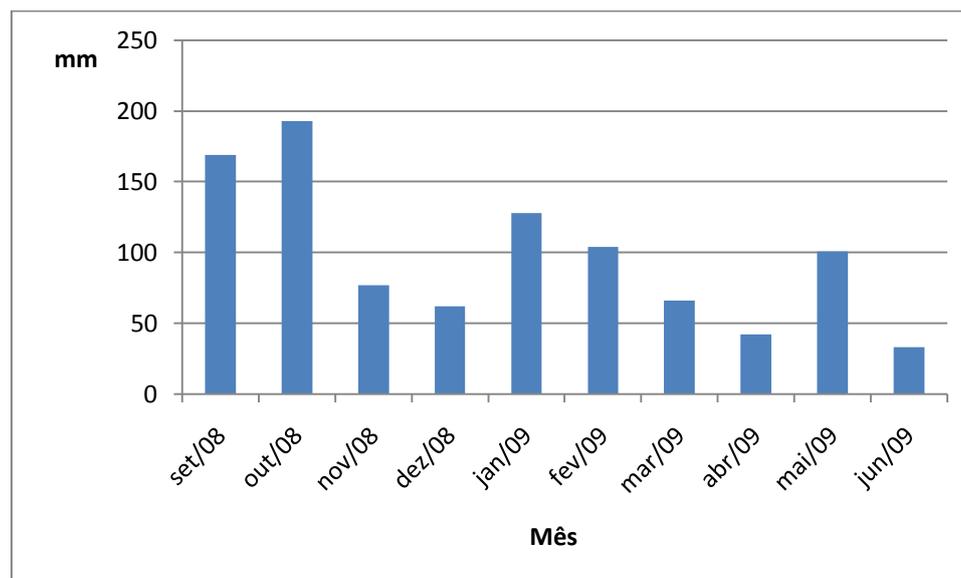


Figura 39 - Precipitação acumulada no período de set/08 a jun/09

Fonte: Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda

Observa-se que no período estudado, com exceção dos meses de setembro e outubro de 2008, que tiveram um valor acumulado de 169 mm e 193 mm, respectivamente, bem acima do valor de referência (aproximadamente 140 mm), todos os meses estiveram na média ou abaixo dela.

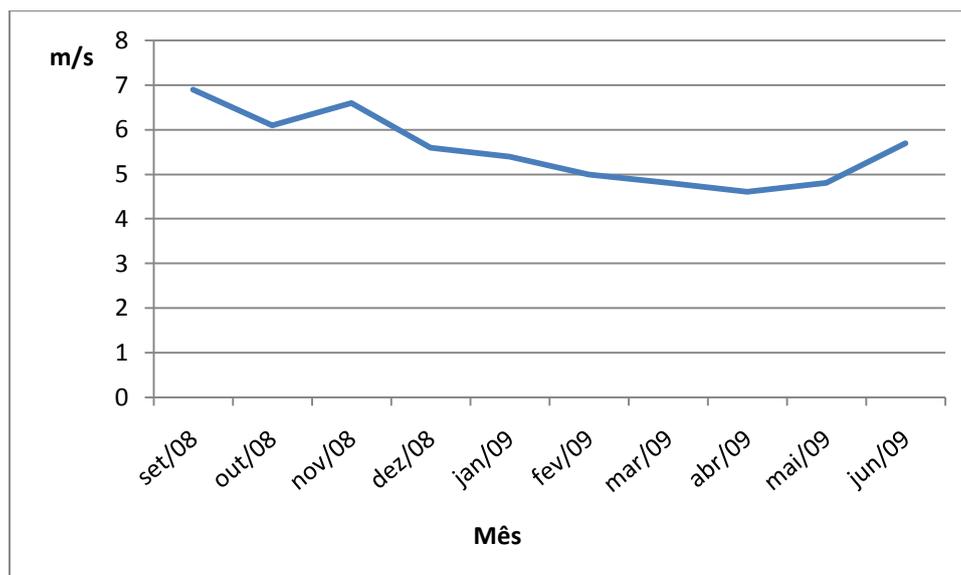
3.7.2.4 Velocidade e direção do vento predominante

Na Tabela 26 e Figura 40 são apresentados os valores médios mensais da velocidade do vento para o período de execução deste trabalho.

Tabela 26- Velocidade média do vento no período de set/08 a jun/09

ANO	VELOCIDADE DO VENTO (m/s)									
	set/08	out/08	nov/08	dez/08	jan/09	fev/09	mar/09	abr/09	mai/09	jun/09
2008/2009	6,9	6,1	6,6	5,6	5,4	5,0	4,8	4,6	4,8	5,7

Fonte: Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda

**Figura 40 - Velocidade média do vento no período de set/08 a jun/09**

Fonte: Somar Meteorologia - Southern Marine Services S/S Ltda

Segundo Motta (1969), o regime de ventos predominante na região é o de nordeste, associado ao anticiclone sobre o Oceano Atlântico, sendo mais frequentes e violentos de setembro a abril e mais raros e fracos de maio a agosto. No inverno, o aumento da frequência de passagem de sistemas frontais provoca maior ocorrência de ventos do quadrante sul, apresentando-se, sobretudo, de maio a outubro e sendo raros de novembro a abril. As velocidades médias de vento nordeste e sudoeste para a região situam-se entre 3 e 5 m/s (GANDRA, 2005).

Observa-se para o período estudado uma velocidade média de 5,6 m/s, atingindo uma média maior, na ordem de 6,5 m/s, nos meses de setembro a novembro de 2008 e, de dezembro de 2008 a junho de 2009, uma média de 5,1 m/s.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussão dos ensaios detalhados no Capítulo 3, quais sejam:

- ensaio de resistência à compressão axial;
- ensaio não acelerado de penetração de cloretos.

Também, são analisados os resultados obtidos ao longo da pesquisa e serão feitas as seguintes considerações:

- análise da resistência à compressão axial dos concretos produzidos em relação ao tipo de aglomerante, tempo de cura e relação água/aglomerante;
- análise do comportamento do transporte de cloretos no interior do concreto, ponderando-se aspectos como tempo de exposição, distância do mar, tipo de aglomerante e relação água/aglomerante;
- análise da concentração superficial de cloretos em relação às variáveis climatológicas: temperatura, umidade, velocidade e direção dos ventos e precipitação.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Na Tabela 27 são apresentados os resultados médios e seus respectivos coeficientes de variação (CV), obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial (f_c) realizados nos corpos-de-prova (duas repetições de cada mistura) moldados no momento da produção dos blocos de concreto utilizados nesta pesquisa. O coeficiente de variação foi obtido dividindo o desvio padrão, pela média dos resultados obtidos. Estes resultados são relativos aos rompimentos em 3, 7 e 28 dias, após cura feita em câmara úmida calibrada com temperatura de $23\pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa maior que 98%.

Tabela 27 - Resultados da resistência à compressão axial

Tipo de cimento do bloco de concreto	Idade de ruptura (dias)	Médias da resistência á compressão axial (f_c) e coeficiente de variação (CV)					
		a/agl 0,45		a/agl 0,55		a/agl 0,65	
		f_c (MPa)	CV (%)	f_c (MPa)	CV (%)	f_c (MPa)	CV (%)
CP IV- RS	3	13,90	14,36	10,12	10,35	6,95	7,90
	7	22,33	6,48	15,91	4,08	10,55	5,20
	28	29,52	5,91	20,85	0,24	17,39	12,91
CP V- ARI	3	28,15	2,84	20,39	3,43	14,85	1,68
	7	38,90	0,90	28,53	2,62	21,06	4,97
	28	45,85	3,92	34,35	1,74	30,76	1,62
CP V- ARI + 5% s.a.	3	28,57	18,86	26,63	0,94	16,22	1,23
	7	37,03	3,23	35,80	0,14	22,96	1,52
	28	52,17	3,37	39,82	9,10	32,48	2,00
CP V- ARI + 10% s.a.	3	33,33	4,64	23,38	1,92	20,74	1,92
	7	38,59	16,55	31,25	1,28	28,15	0,35
	28	53,26	5,45	46,06	7,39	39,64	2,52

Analisando os resultados acima apresentados, comprova-se, conforme esperado, que a resistência à compressão do concreto é inversamente proporcional à relação água/aglomerante, isto é, à medida que o valor da relação a/agl aumenta o valor da resistência tende a diminuir, o que se confirma sempre que o concreto é plenamente adensado, confirmando a teoria de Abrams (1918).

Nas Figuras 41 a 44 são apresentados os resultados da Tabela 27, considerando a resistência à compressão axial e as idades dos concretos moldados para cada tipo de aglomerante utilizado. Nas Tabelas 28 a 31, mostram-se as funções propostas e os coeficientes de determinação para a resistência à compressão dos respectivos concretos.

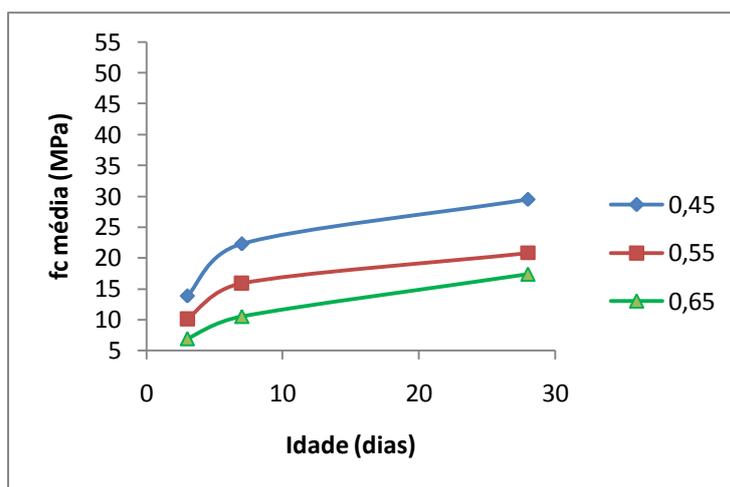


Figura 41 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento CP IV-32 RS.

Tabela 28 – Funções propostas como relação entre a resistência à compressão axial e as idades para concretos com cimento CP IV-32 RS

Tipo de cimento	Relação água/aglomerante	Função	Coefficiente de determinação (r^2)
CP IV-RS	0,45	$y = 6,6424 \ln(x) + 9,28$	0,82
	0,55	$y = 0,3978x + 11,028$	0,86
	0,65	$y = 0,3925x + 6,7948$	0,96

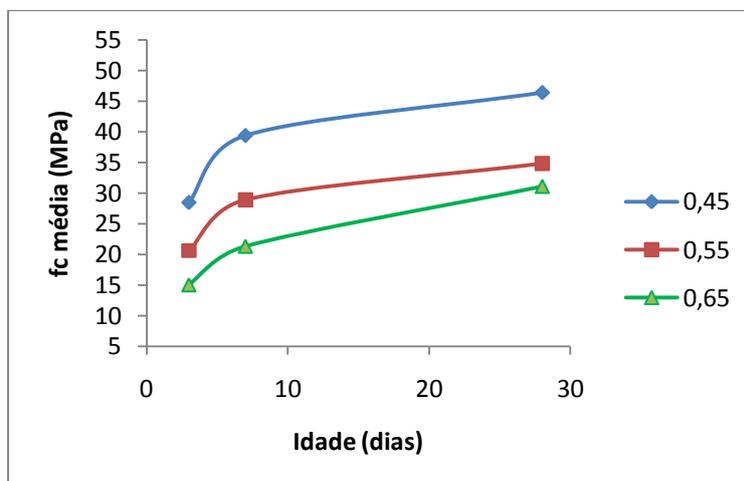


Figura 42 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento CP V-ARI.

Tabela 29 - Funções propostas como relação entre a resistência à compressão axial e as idades para concretos com cimento CP V-ARI

Tipo de cimento	Relação água/aglomerante	Função	Coefficiente de determinação (r^2)
CP V-ARI	0,45	$y = 7,7236 \ln(x) + 21,68$	0,93
	0,55	$y = 6,1516 \ln(x) + 15,02$	0,94
	0,65	$y = 0,5855x + 15,05$	0,94

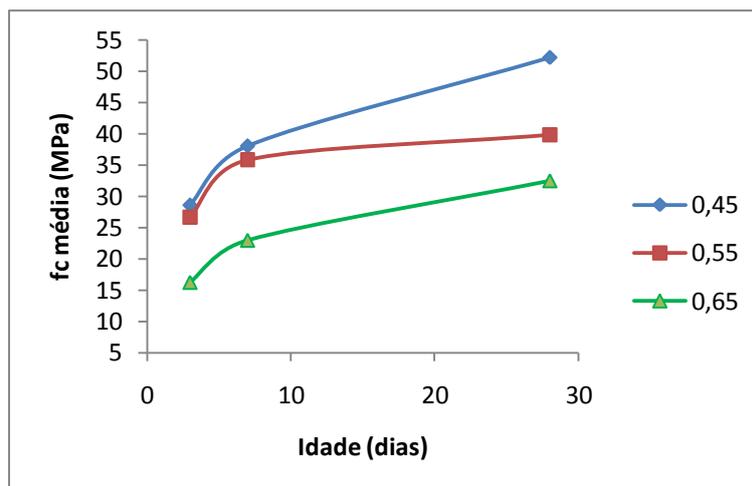


Figura 43 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento CP V-ARI + 5% S.A.

Tabela 30 - Funções propostas como relação entre a resistência à compressão axial e as idades para concretos com cimento CP V-ARI + 5% S.A.

Tipo de cimento	Relação água/aglomerante	Função	Coefficiente de determinação (r^2)
CP V-ARI + 5% S.A.	0,45	$y = 0,9277x + 28,349$	0,96
	0,55	$y = 0,6872x + 27,929$	0,89
	0,65	$y = 0,5931x + 16,688$	0,92

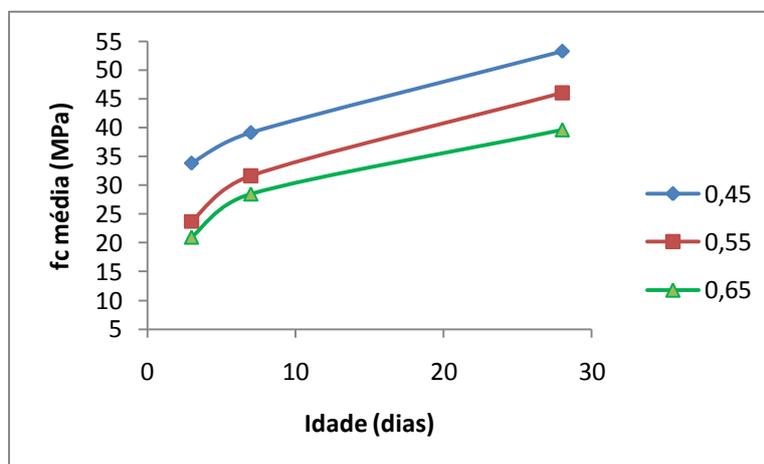


Figura 44 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos com cimento CP V-ARI + 10% S.A.

Tabela 31 - Funções propostas como relação entre a resistência à compressão axial e as idades para concretos com cimento CP V-ARI + 10% S.A.

Tipo de cimento	Relação água/aglomerante	Função	Coefficiente de determinação (r^2)
CP V-ARI + 10% S.A.	0,45	$y = 0,7245x + 32,723$	0,98
	0,55	$y = 0,5816x + 24,50$	0,88
	0,65	$y = 0,6942x + 21,074$	0,94

Observa-se, conforme o esperado, que as reações de hidratação da pasta de cimento e das adições pozolânicas acontecem de forma mais intensa nas primeiras idades e, após, nota-se uma tendência de estabilização da curva ao longo do tempo.

Os concretos produzidos com cimento CP V-ARI, com adição de teores de sílica ativa de 5 e 10%, e relação a/agl de 0,45 são os que apresentam melhores resultados de resistência à compressão axial em relação à idade. Estes concretos apresentam um comportamento similar, uma vez que demonstra acentuada tendência de aumento da resistência após os 28 dias de idade, situação que se verifica de forma menos significativa nos concretos com cimentos CP V-ARI sem adição. Já os concretos com o cimento CP IV-RS apresentam uma tendência a estabilizar a partir dessa idade, fato este que não deveria acontecer, porém, podendo ser justificado pela elevada superfície específica do CP IV-RS, maior que a do CP V-ARI, o que pode explicar este comportamento.

Isso pode ser explicado, segundo Mehta e Monteiro (1994), onde a determinação da resistência em concretos que a apresentam em nível baixo e médio é decorrência da porosidade da zona de transição e da matriz cimentante, porém, em concretos de alta resistência, com baixa relação a/agl (0,30), o aumento da resistência devido à diminuição da relação a/agl é atribuído principalmente à melhoria significativa da zona de transição, pois o tamanho dos cristais de hidróxido de cálcio diminui com a redução da relação a/agl . O incremento de sílica ativa proporciona um maior refinamento da estrutura de poros devido ao efeito pozolânico, assim como a densificação da pasta ocasionada pelo efeito microfíler, atestando a afirmação de Dal Molin (1995), onde o aumento da resistência é atribuído à formação de uma estrutura mais densa e homogênea na zona de transição entre a pasta e o agregado.

Seguindo o que é consenso em tecnologia do concreto, verificou-se que quanto maior o tempo de cura, melhores as condições para que se atinjam as propriedades esperadas do concreto através das reações de hidratação das partículas de cimento anidro e das adições pozolânicas, que continuam ocorrendo, diminuindo o volume de poros grandes na pasta de cimento hidratada.

Considerando a idade de 28 dias e o aumento da relação a/c de 0,45 para 0,65, constatou-se uma diminuição na resistência à compressão axial do concreto produzido

com cimento CP IV- RS em 59%, com CP V-ARI em 67%, com CP V-ARI e adição de 5% de sílica ativa em 62% e o mesmo cimento com adição de 10%, uma diminuição de 74% (Figura 41).

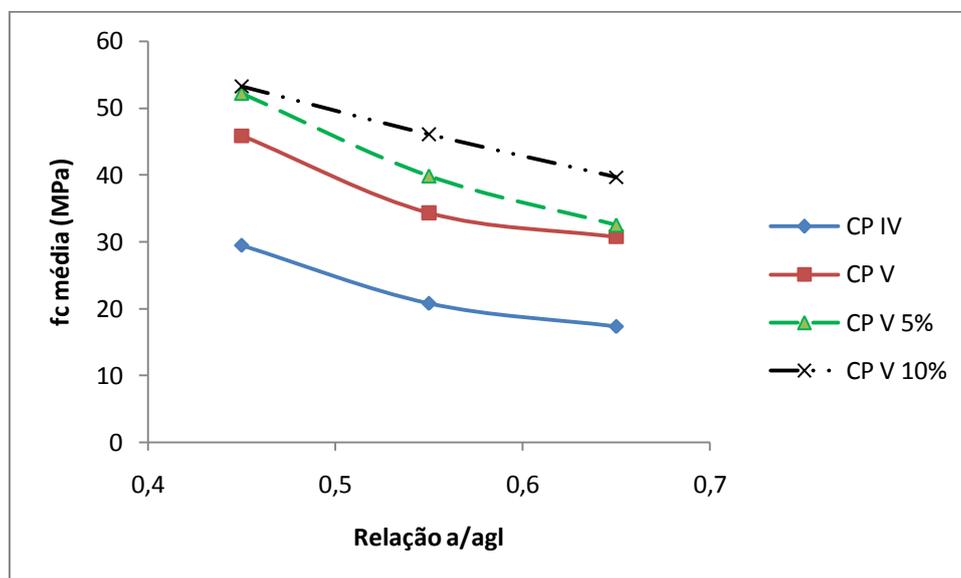


Figura 45 – Resistência à compressão axial aos 28 dias em função da relação a/agl para concretos com diversas misturas.

Considerando uma análise em igualdade de resistência para os diversos tipos de aglomerantes utilizados em cada relação a/agl, obteve-se os resultados mostrados nas figuras 46 a 48.

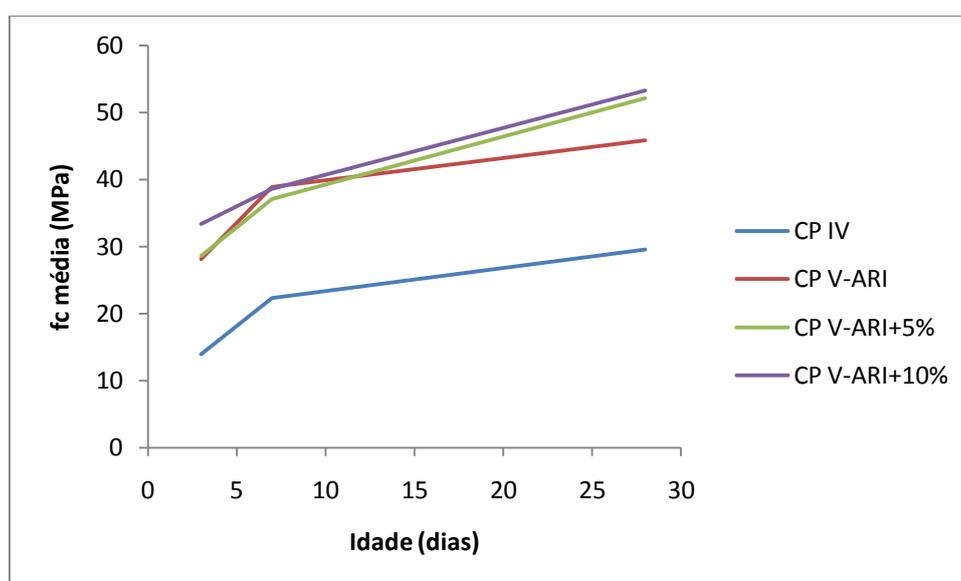


Figura 46 - Evolução da resistência à compressão axial para concretos com diversos aglomerantes, com relação a/agl 0,45

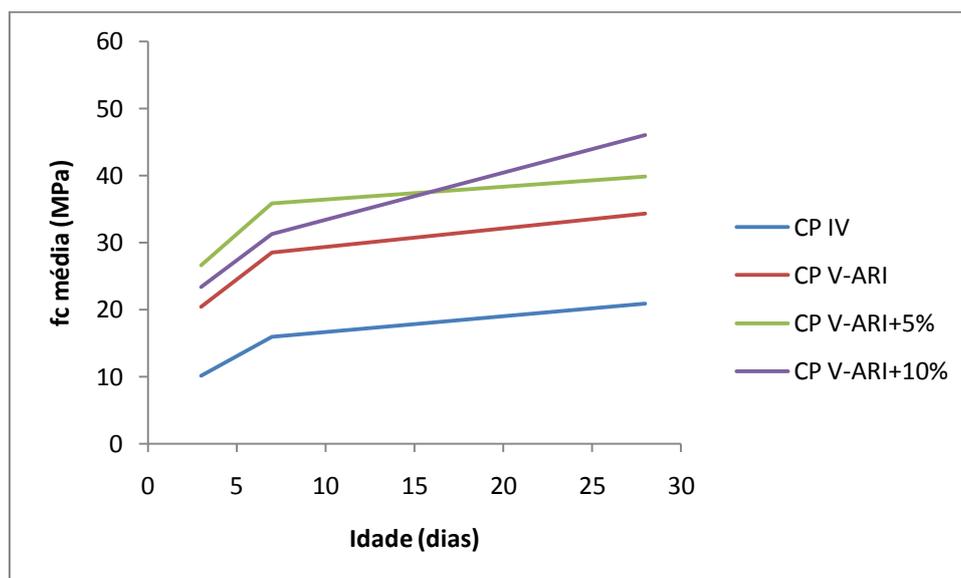


Figura 47 - Evolução da resistência à compressão axial para concretos com diversos aglomerantes, com relação a/agl 0,55

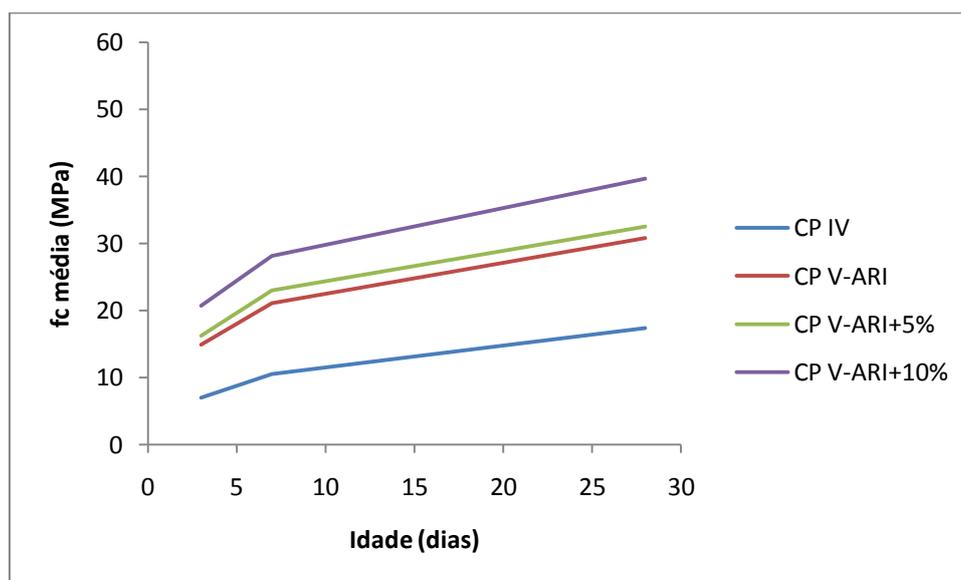


Figura 48 - Evolução da resistência à compressão axial para concretos com diversos aglomerantes, com relação a/agl 0,65

Constata-se, novamente, que concretos com relação a/agl 0,45 apresentam resultados mais significativos em relação ao aumento da resistência axial quanto maior o tempo de cura, sendo os concretos moldados com cimento CP V-ARI com adição de 10% de sílica ativa aqueles que alcançam maiores valores de resistência nas três relações a/agl adotadas.

4.2 PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Os resultados dos ensaios de teor de concentração dos cloretos foram obtidos utilizando o Sistema CL-2000 de Ensaio de Cloretos Para Uso em Obras, da NDT JAMES INSTRUMENTS INC, sendo apresentados no Apêndice A.

Com esses valores, foram traçados os perfis de penetração de cloretos em função do teor de concentração de cloretos e profundidade em relação à superfície do concreto, considerando o tipo de aglomerante, relação a/agl, distância ao mar e direção dos ventos predominantes (nordeste), bem como de seu oposto a sudoeste.

Como esta pesquisa foi realizada em ambiente natural, o ingresso de cloretos nos blocos de concreto se dá de forma mais lenta. Portanto, para as análises dos diversos fatores que influenciam esse processo, serão considerados os perfis com tempo de exposição de 240 dias, ou seja, a última coleta registrada (Figuras 49 a 56).

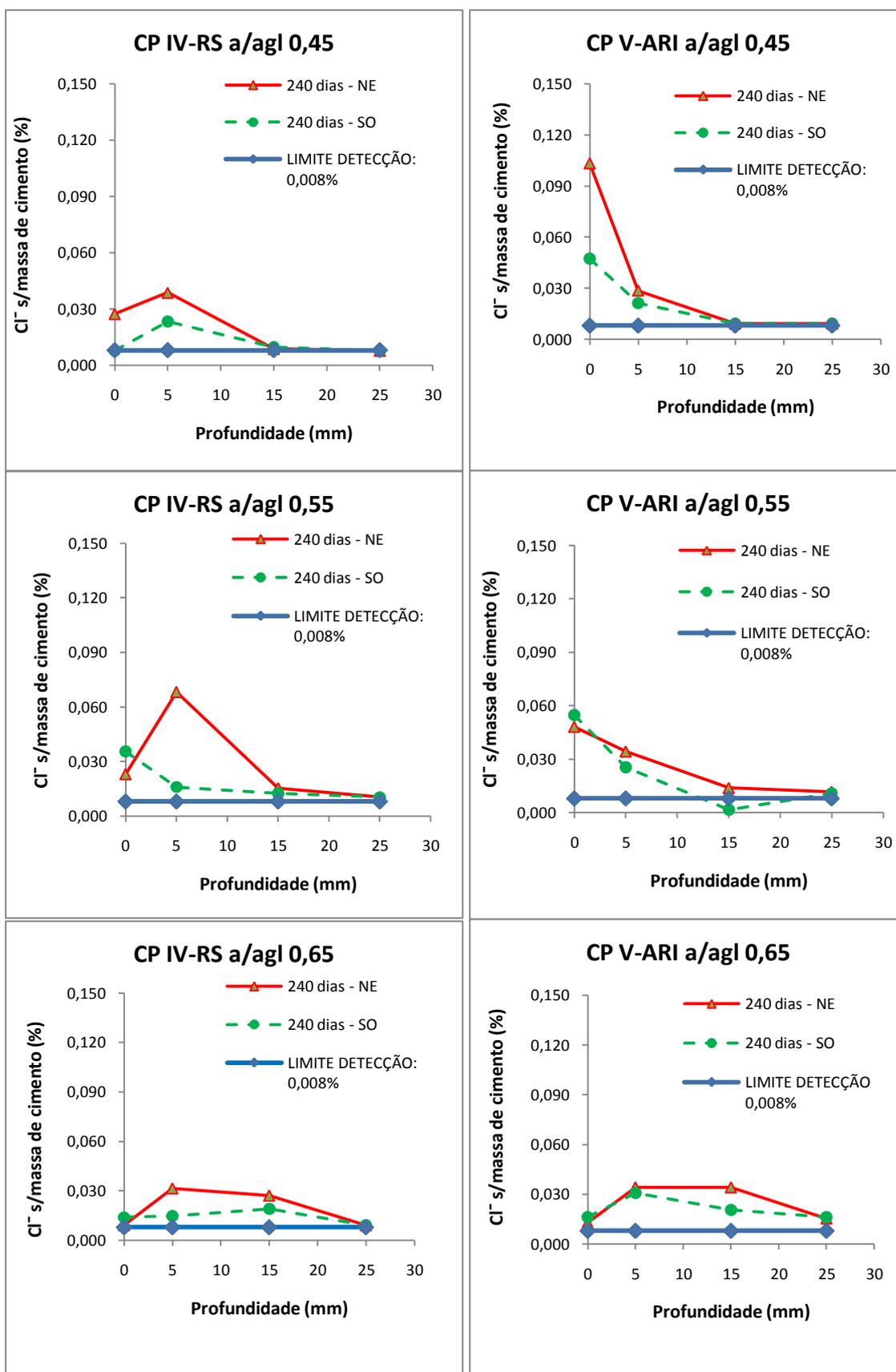


Figura 49 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V-ARI, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 100 m do mar

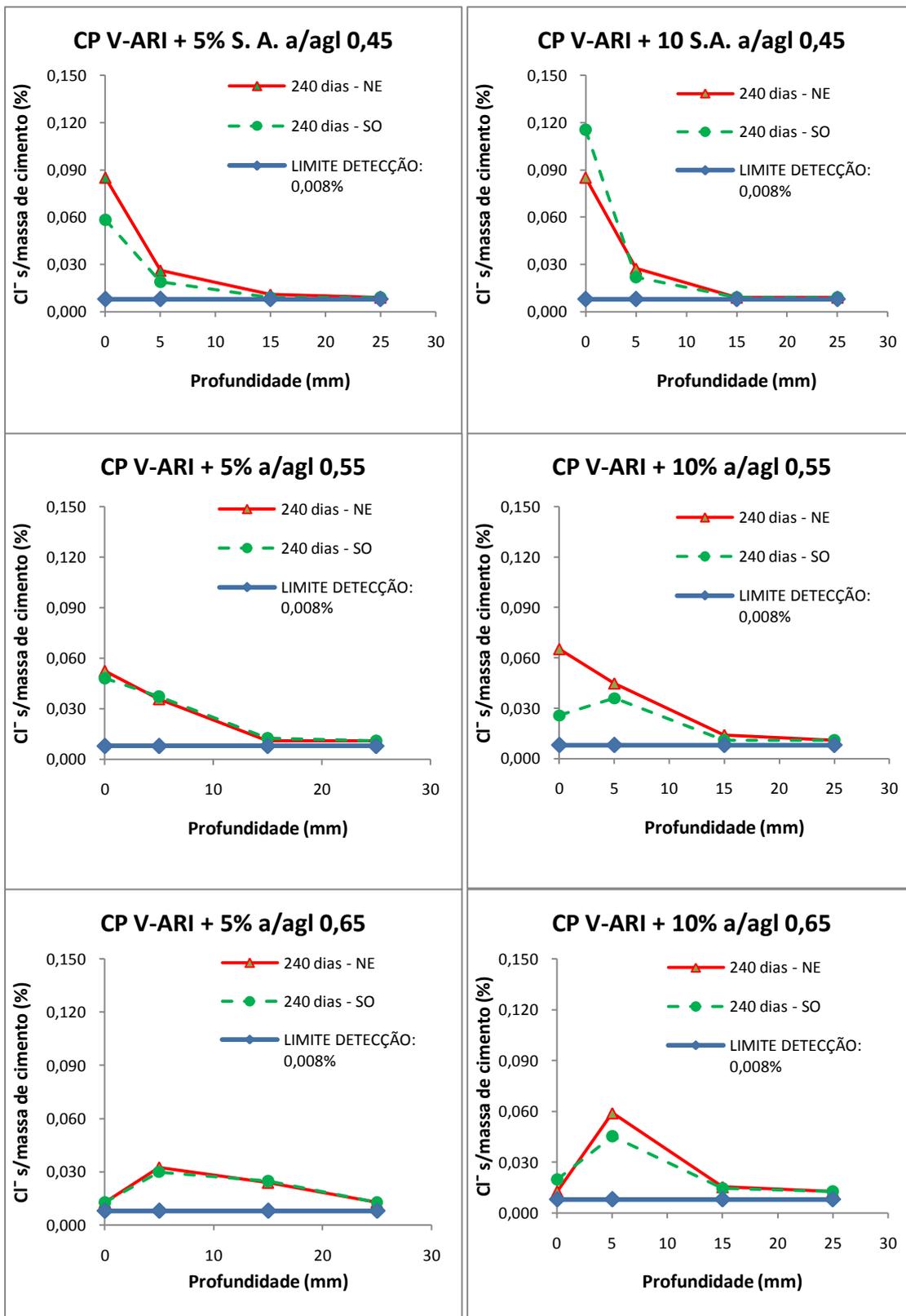


Figura 50 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A., posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 100 m do mar

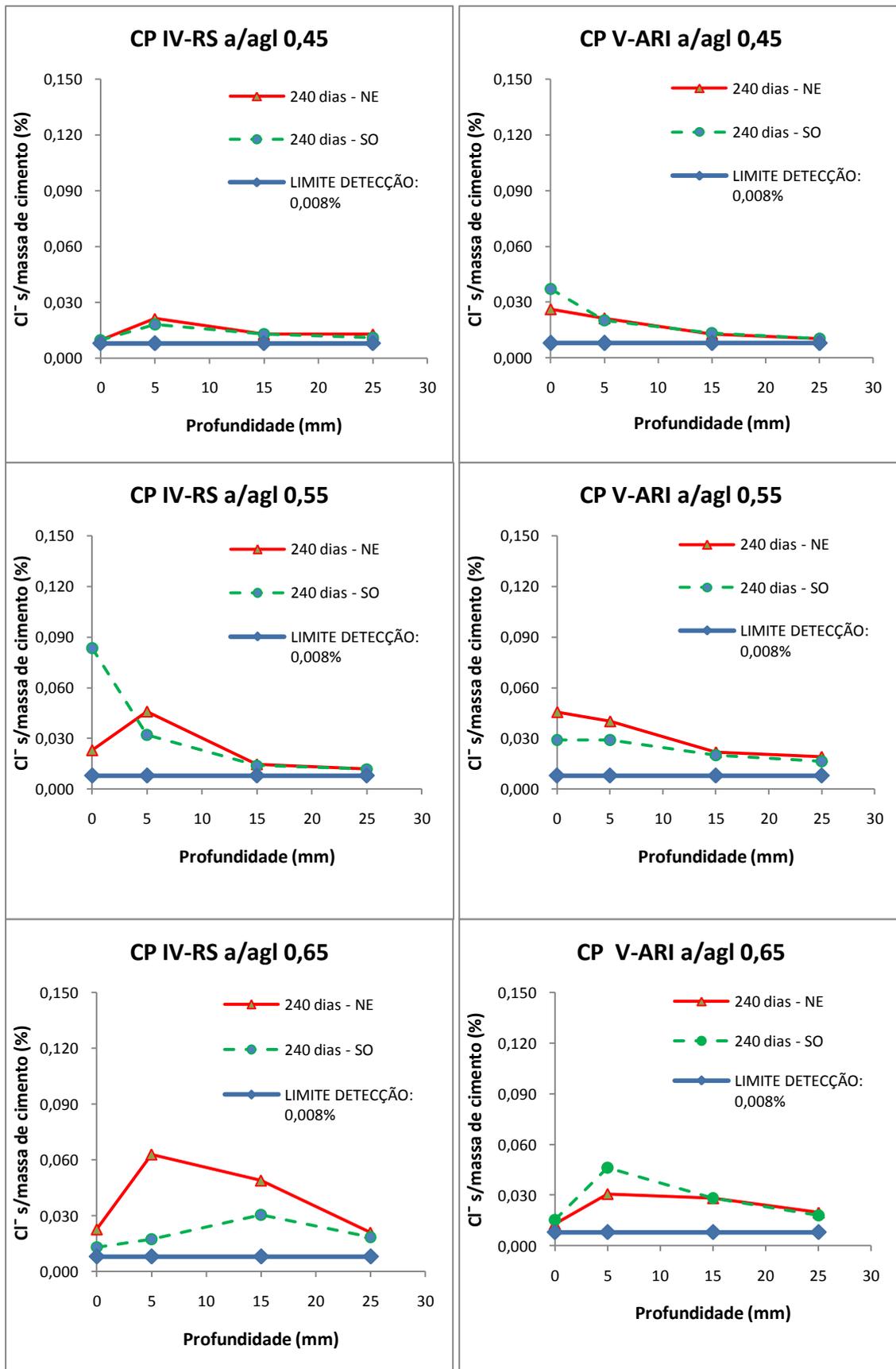


Figura 51 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V- ARI, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 200 m do mar

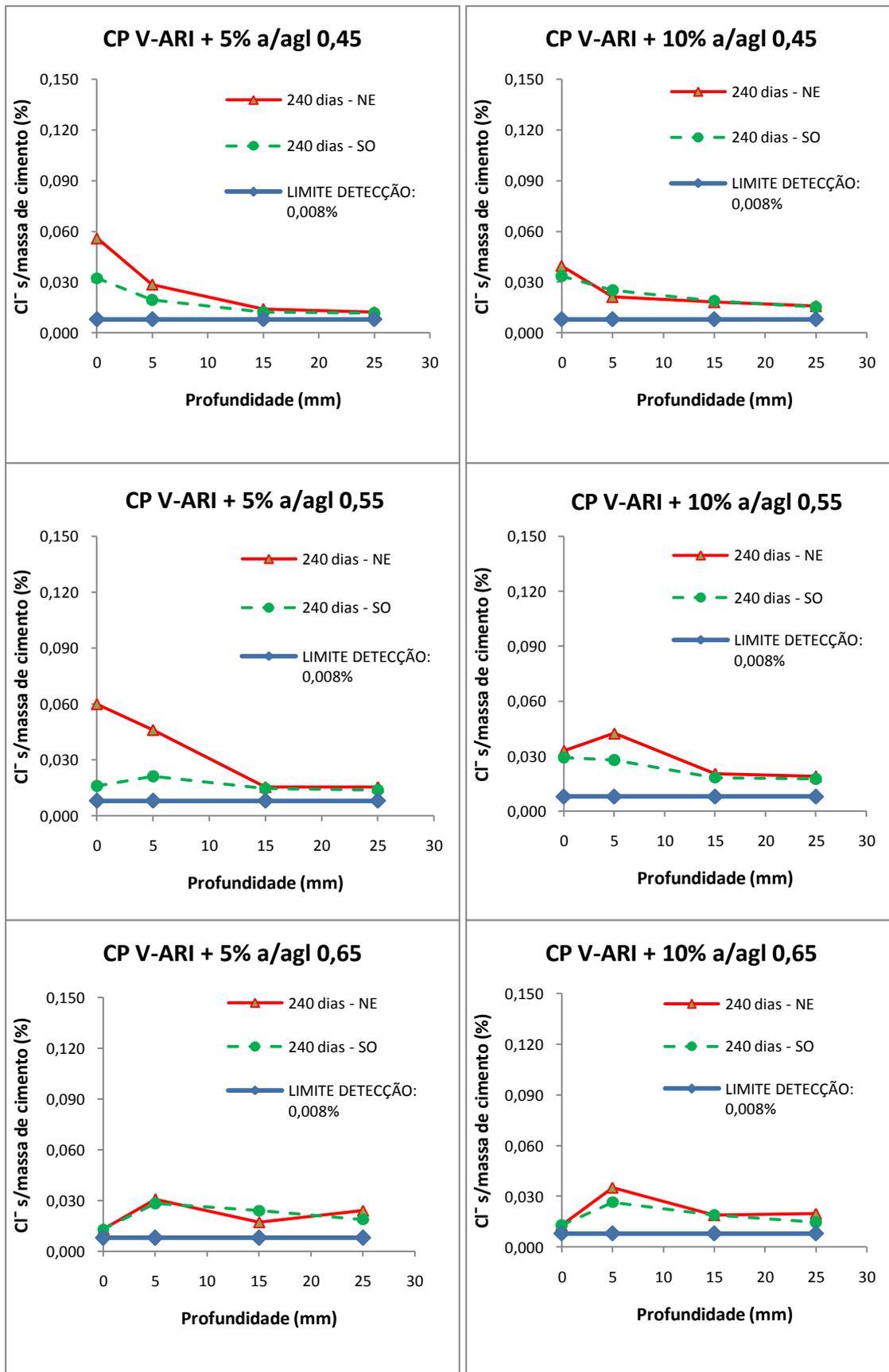


Figura 52 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A, posicionado anordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 200 m do mar

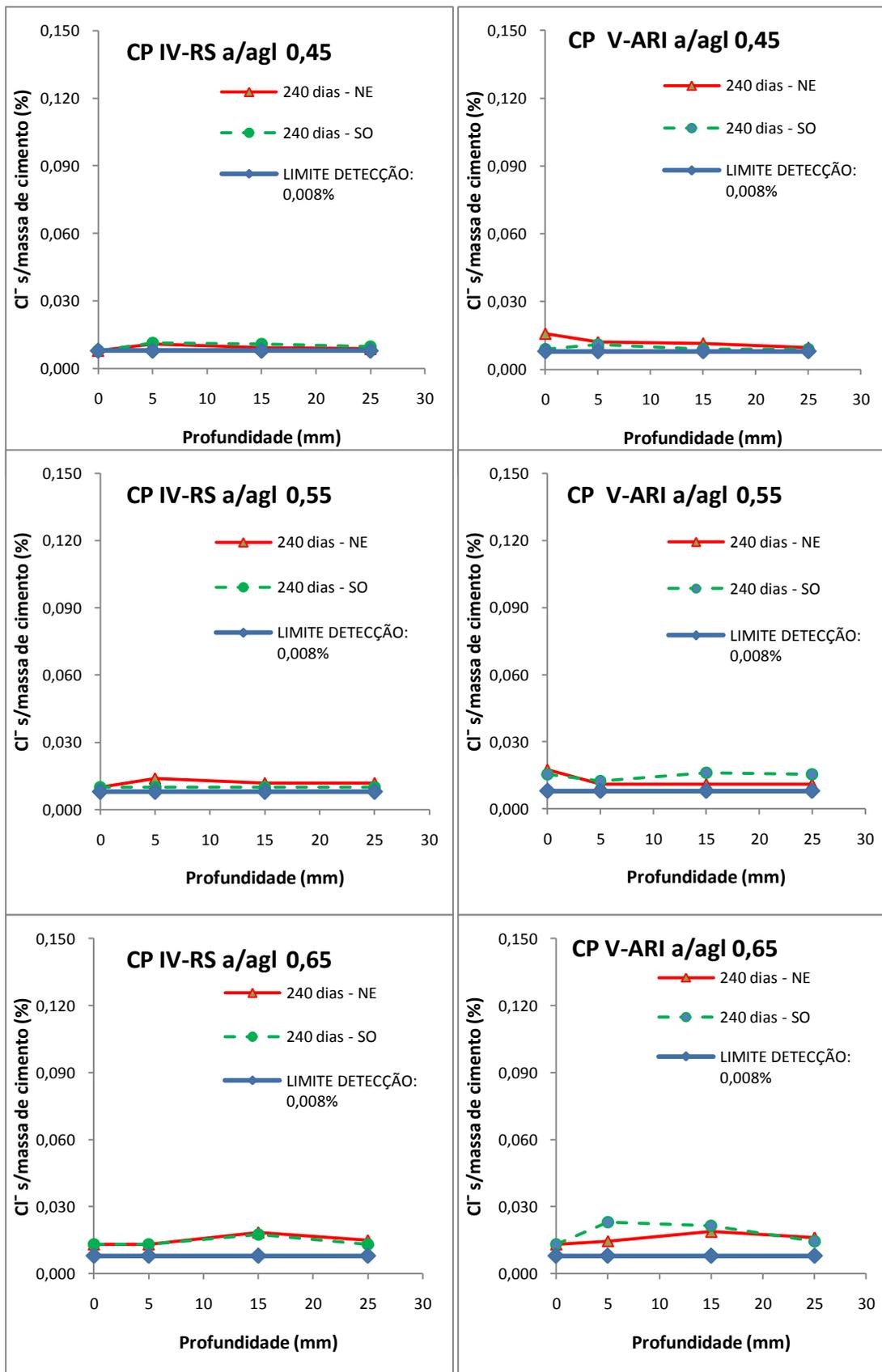


Figura 53 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V-ARI , posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 850 m do mar

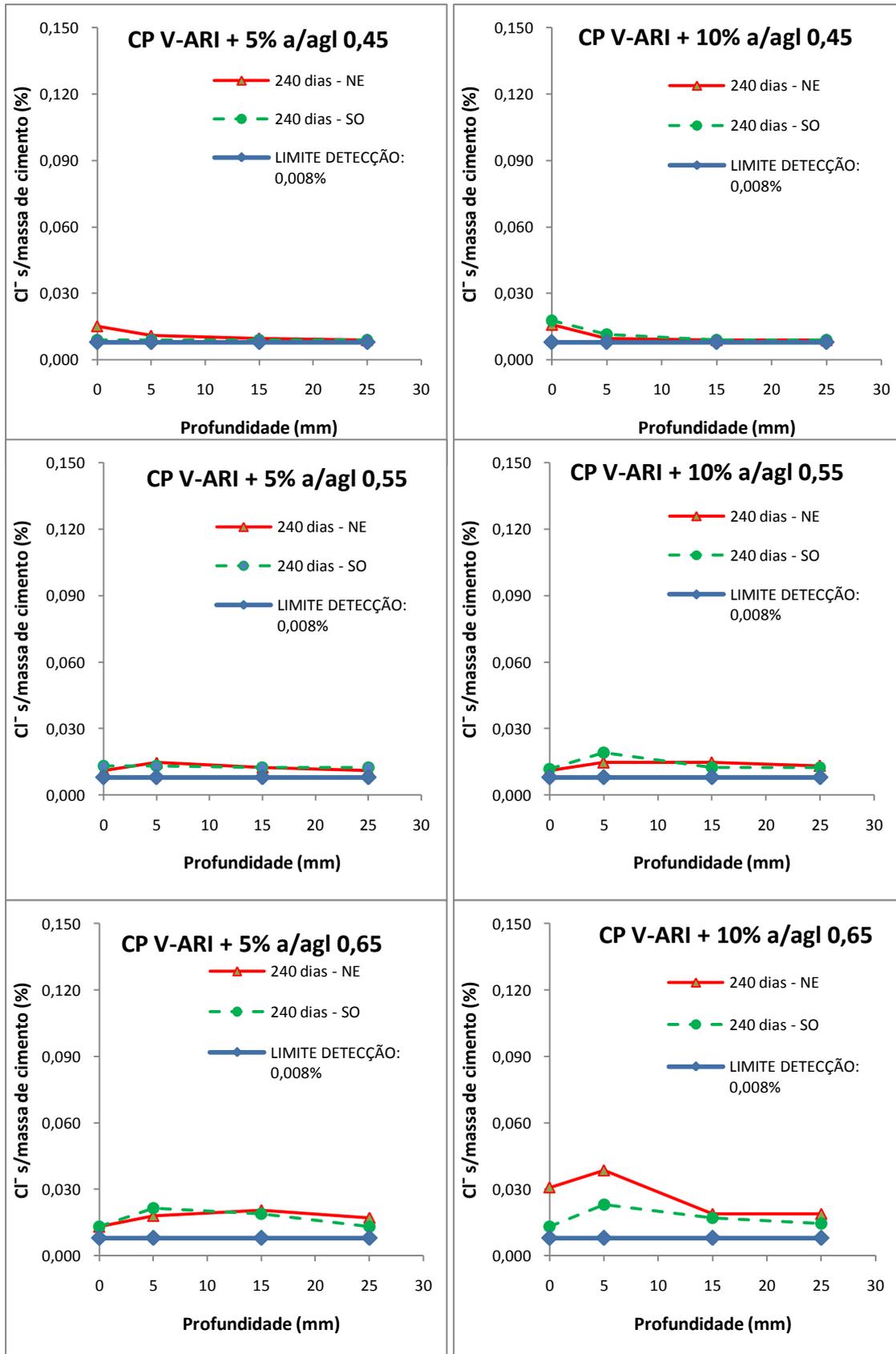


Figura 54 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 850 m do mar

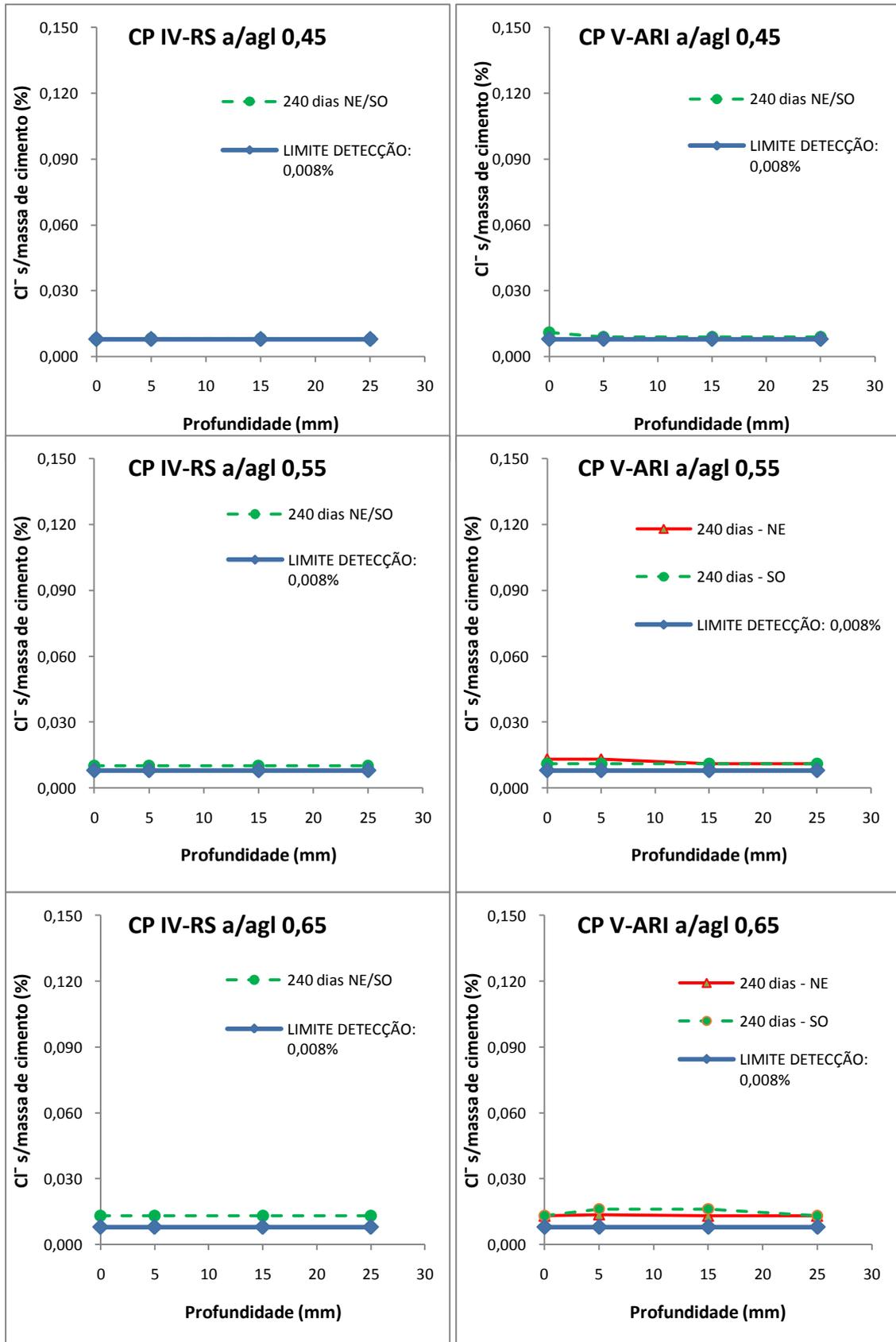


Figura 55 - Perfis de cloretos para concreto executado com CP IV- RS e CP V-ARI, posicionado a nordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 1850 m do mar (25 m da lagoa)

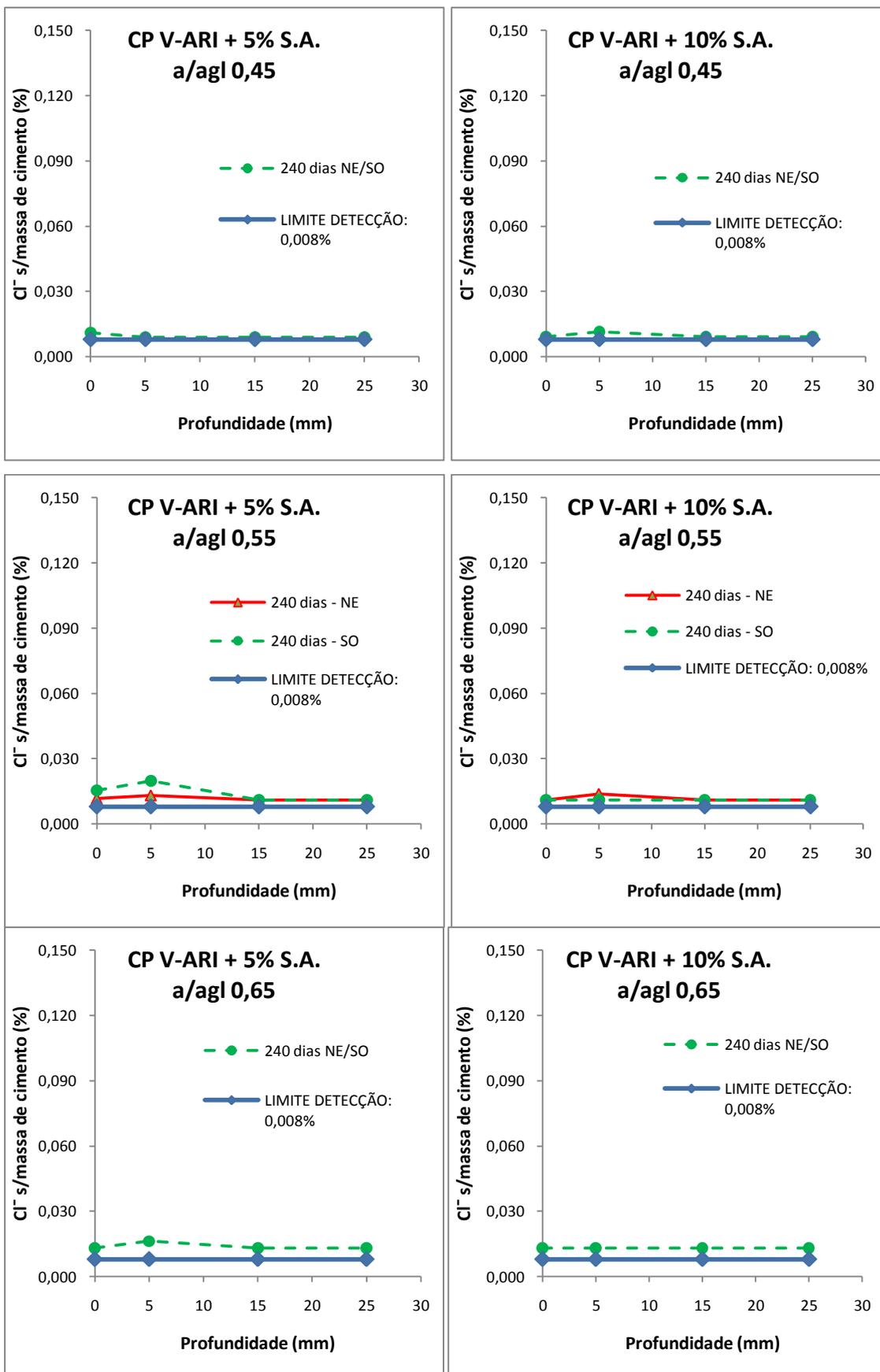


Figura 56 – Perfis de cloretos para concreto executado com CP V-ARI + 5% S.A. e CP V-ARI + 10% S.A, posicionado anordeste e sudoeste, relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65 e distância de 1850 m do mar (25 m da lagoa)

Considerando os perfis de penetração de cloretos, observa-se que, até a distância de 200 m em relação ao mar, o teor de Cl^- sobre a massa de cimento a 5 mm de profundidade tem um valor médio de 0,03%, independente do tipo de aglomerante utilizado na confecção dos concretos. A partir de 15 mm de profundidade no concreto, o teor de Cl^- dificilmente ultrapassa o valor de 0,02%. Para maiores distâncias, esses valores ficam bem abaixo dos já citados.

O efeito das variáveis estudadas na penetração de cloretos foi verificado através da Análise de Variância (ANOVA), sendo utilizada como técnica estatística a Regressão Linear Múltipla, mesmo levando em conta que nem todos os efeitos são lineares. Considerou-se um nível de confiança de 95%, utilizando para os cálculos o *software* Excel 2007. O objetivo dessa técnica é estimar uma função que descreve, o mais próximo possível, a relação entre essas variáveis e assim poder prever o valor que a variável dependente irá assumir para um determinado valor da variável independente.

Nesta análise foi utilizada a codificação das variáveis, com a finalidade de unificar as escalas de cada uma delas. A Tabela 32 apresenta a codificação de cada variável considerada na análise estatística.

Tabela 32 – Codificações utilizadas na análise estatística

Variável							
Aglomerante (tipo)		Distância ao mar		a/agl		Profundidade	
Real	Codificado	Real	Codificado	Real	Codificado	Real	Codificado
CP IV-RS	0,500	100	0,500	0,45	0,500	1	0,500
CP V-ARI	1,000	200	0,585	0,55	1,250	5	0,750
CP V-ARI+5% S.A.	1,500	850	1,150	0,65	2,000	15	1,375
CP V-ARI+10% S.A.	2,000	1850	2,000	-	-	25	2,000

As tabelas com os resultados da Análise de Variância (ANOVA) e da Regressão Linear Múltipla são apresentados no Apêndice B.

O resultado da análise de Regressão Linear Múltipla para a penetração de cloretos contempla apenas as variáveis e suas combinações que foram significativas, com coeficiente de determinação $R^2 = 41,3\%$ e coeficiente de determinação ajustado $R^2_{AJUST} = 39,5\%$ e está demonstrado na Equação 4.1.

$$\begin{aligned}
 Cl = & 0,0758 + 0,0057 \times cim - 0,0231 \ a/agl - 0,0413 \ dist - 0,0018 \ ven - 0,0425 \ prof + \\
 & 0,0151 \ a/agl \times dist + 0,0201 \ a/agl \times prof + 0,0249 \ dist \times prof - 0,0018 \ cim \times \\
 & a/agl \times prof - 0,0008 \ cim \times dist \times prof - 0,0101 \ a/agl \times dist \times prof
 \end{aligned}$$

(4.1)

Onde: *Cl* – teor de concentração de cloretos sobre massa de cimento (%);

ven – direção do vento (NE e SO);

dist – distância em relação ao mar (m);

a/agl – relação água/aglomerante (0,45, 0,55 e 0,65);

prof – profundidade de ingresso no concreto (0, 5, 15 e 25 mm);

cim – tipo de aglomerante (CP IV-RS, CP V-ARI, CP V-ARI + 5% SA e CP V-ARI +10% AS).

Apesar de, aparentemente, os coeficientes de determinação (R^2) serem baixos, os mesmos estão de acordo com o tamanho da amostra estudada. Segundo Hair *et al.* (2007), o tamanho da amostra tem um impacto direto sobre a adequação e o poder estatístico da regressão múltipla. Ainda, segundo o autor, considerando cinco variáveis independentes, nível de significância de 0,05 ($\alpha = 5\%$) e estando o pesquisador satisfeito em detectar o R^2 80% (que corresponde a probabilidade de uma relação significativa ser encontrada se ela realmente existir), uma amostra de 100 respondentes detectará valores de R^2 iguais ou maiores de 12% (Tabela 33). Sendo assim, como nesta pesquisa foram utilizadas cinco variáveis independentes, adotado nível de significância de 0,05, o tamanho da amostra é de 384 observações e aceitando R^2 80%, pode-se considerar que o coeficiente de determinação encontrado na análise de regressão (41,3%) é plenamente aceitável.

Tabela 33- R² mínimo considerado estatisticamente significativo com um poder de 0,80 para diversos números de variáveis e tamanhos de amostra

Nível de significância ($\alpha=0,01$)					Nível de significância ($\alpha=0,05$)			
Número de variáveis independentes					Número de variáveis independentes			
Tamanho da amostra	2	5	10	20	2	5	10	20
20	45	56	71	NA	39	48	64	NA
50	23	29	36	49	19	23	29	42
100	13	16	20	26	10	12	15	21
250	5	7	8	11	4	5	6	9
500	3	3	4	6	3	4	5	8
1000	1	2	2	3	1	1	2	2

NA – não aplicável

Fonte: Hair *et al.* (2007)

As variáveis que se apresentaram significativas na análise estatística foram a direção dos ventos predominantes, a distância em relação ao mar, relação a/agl, profundidade de ingresso no concreto, tipo de aglomerante, além das interações da relação a/agl com distância ao mar, relação a/agl com profundidade de ingresso, distância ao mar com profundidade de ingresso, tipo de aglomerante com distância ao mar e profundidade de ingresso, relação a/agl com distância ao mar e profundidade de ingresso e, tipo de aglomerante com relação a/agl e profundidade de ingresso.

Em virtude baixo valor de R², salienta-se que o modelo não deve ser utilizado para fins de previsão de valores, mas sim para verificar uma tendência de comportamento em função das variáveis estudadas

4.2.1 Influência da relação água/aglomerante

O efeito isolado da relação a/agl sobre o teor de Cl⁻ no concreto, fixando a distância ao mar em 200 m, a profundidade de ingresso em 5 mm, para os diversos aglomerantes utilizados, na direção dos ventos predominantes (NE) e seu oposto (SO), é apresentado nas Figura 57 e 58.

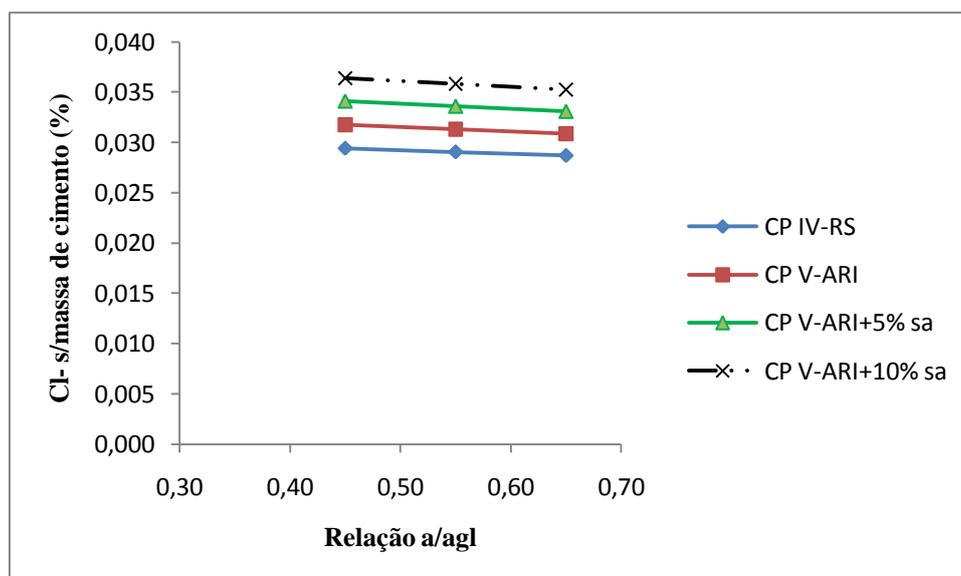


Figura 57 – Efeito isolado da relação a/agl sobre o teor de cloretos no concreto, direção Nordeste

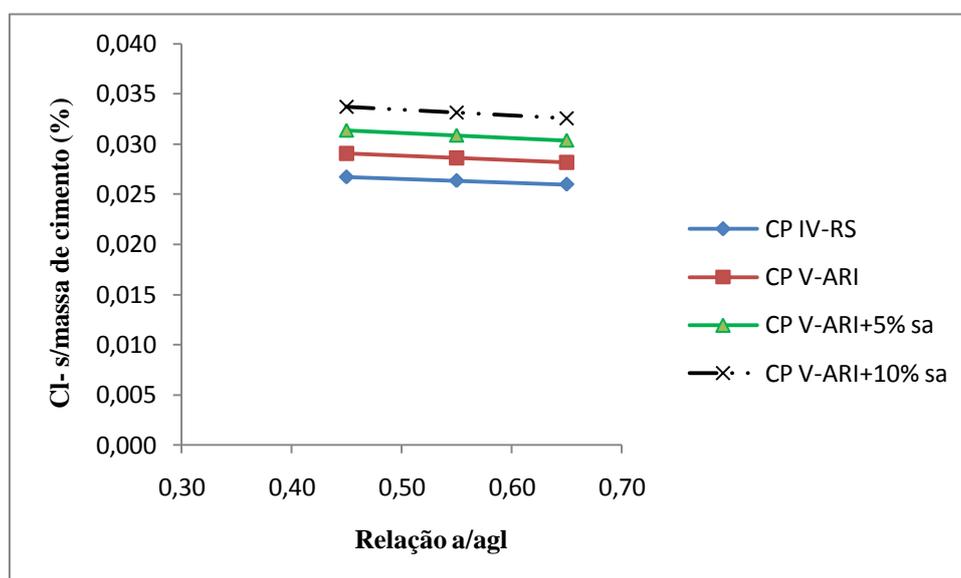


Figura 58 - Efeito isolado da relação a/agl sobre o teor de cloretos no concreto, direção Sudoeste

Conforme esperado, a relação a/agl é um dos parâmetros que influencia a penetração de cloretos no concreto, devido ao refinamento da porosidade capilar com a redução da relação a/agl, tornando a estrutura da pasta mais densa e fechada. Em concretos com baixas relações a/agl, os cloretos são obrigados a difundir-se por caminhos mais tortuosos e desconectados (HOFFMANN, 2001).

Observou-se que o teor de concentração de cloretos, independente do tipo de aglomerante utilizado, nos concretos moldados com relação a/agl 0,45 apresentaram uma maior penetração de cloretos, aos 5 mm de profundidade, em relação aos concretos

com relação a/agl 0,65, na ordem de 4%. Esse baixo valor pode ser considerado em função de o ensaio ser em ambiente natural, onde as reações são mais lentas.

Também foi verificado o teor de cloretos nos concretos direcionados a Nordeste um pouco mais acentuado. Esse fato pode ser explicado, segundo Lovett (1978), uma vez que a velocidade do vento aumenta a quantidade de partículas no aerosol, facilitando a geração daquelas de maior tamanho e massa, ou seja, aquelas que se depositam mais rapidamente sobre a superfície da estrutura.

Analisando os perfis de penetração de cloretos traçados, mesmo os concretos com cimento CP V-ARI, inclusive com adição de sílica ativa, mas com relação a/agl 0,65, tiveram comportamento similar daqueles com cimento CP IV-RS, ou seja, apesar da pasta mais densa ainda há uma conectividade entre os vazios presentes, fazendo com que a difusão dos cloretos se apresente de forma mais acentuada.

4.2.2 Influência da distância ao mar

O efeito isolado distância ao mar sobre o teor de cloretos no concreto, fixando a relação a/agl em 0,55 e a profundidade de ingresso em 5 mm, independente do tipo de aglomerante, na direção dos ventos predominantes (NE) e seu oposto (SO), é apresentado nas Figura 59 e 60.

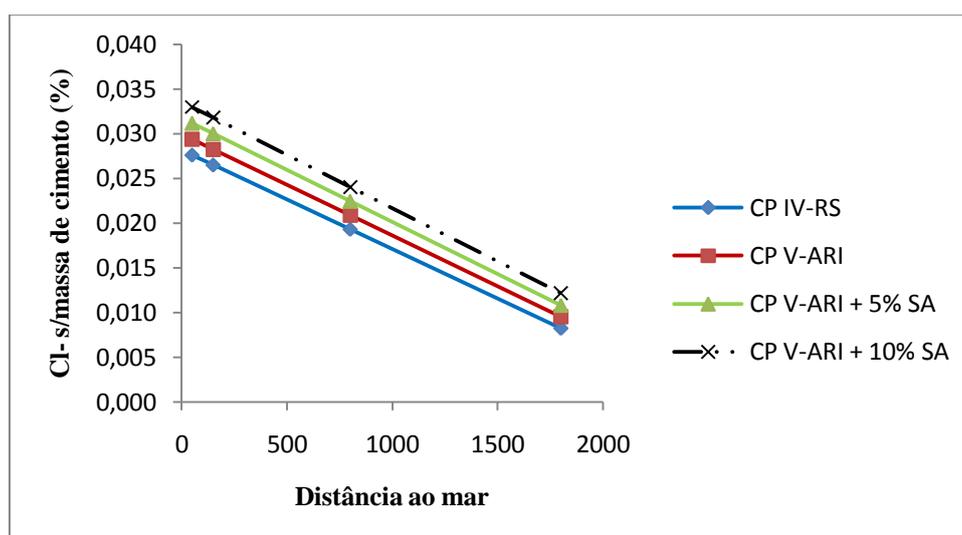


Figura 59 - Efeito isolado da distância ao mar sobre o teor de cloretos no concreto, na direção NE

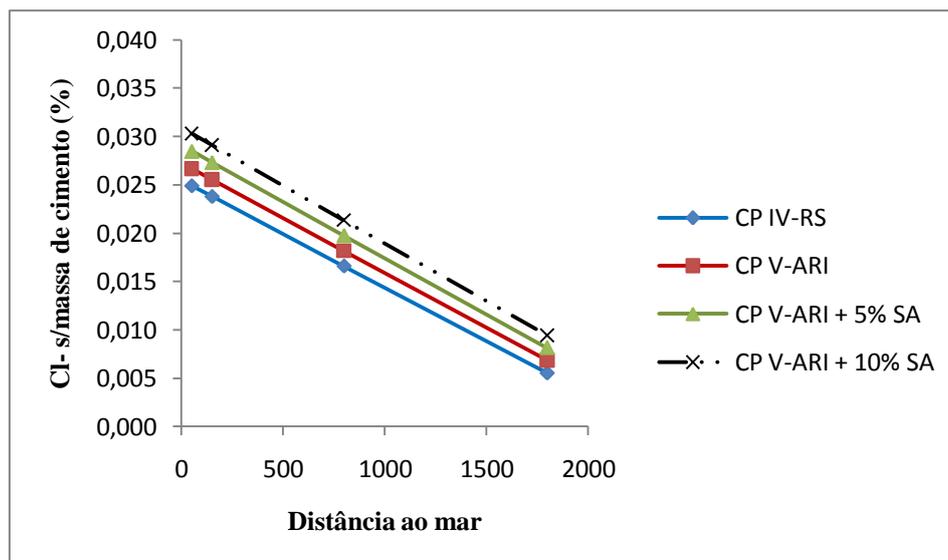


Figura 60 - Efeito isolado da distância ao mar sobre o teor de cloretos no concreto, na direção SO

Conforme esperado, e comprovado pela análise de variância através das comparações das médias, a agressividade por cloretos é mais importante nas primeiras faixas de terra, onde nos primeiros 100 a 200 m de distância ao mar não houve diferença significativa entre as médias, porém, a partir de 200 m, verificaram-se diferenças significativas.

Novamente, comprova-se que na direção Nordeste há maior ingresso de teor de cloretos em relação à direção Sudoeste. Tal situação pode ser explicada pelo efeito gravimétrico, onde as maiores partículas logo se depositam nas primeiras faixas de terra e, conforme as velocidades dos ventos conseguem chegar a distâncias maiores no continente.

4.2.3 Influência do tipo de cimento e uso de adição de sílica ativa

Considerando os resultados apresentados pela análise de variância, constatou-se que o tipo de aglomerante utilizado na moldagem dos concretos utilizados nesta pesquisa mostrou-se significativo, influenciando no ingresso de cloretos no concreto.

Segundo a NBR 12655 (2006), o teor crítico de íons Cl^- para o concreto armado exposto a cloretos nas condições de uso da estrutura é 0,15% sobre a massa de cimento, sendo este o teor crítico adotada nesta pesquisa. A mesma norma estabelece em 0,4% o teor crítico de concentração de cloretos para concreto armado em condições de

exposição não severas, sendo este um valor de consenso para a maioria das normas internacionais.

Conforme a Regressão Linear Múltipla, considerando as variáveis da relação a/agl e distância ao mar e analisando as figuras 54 a 57, constatou-se que os concretos moldados com cimento CP IV-RS apresentam uma menor concentração de teor de cloretos comparando com aqueles moldados com cimento CP V-ARI, sendo que os que possuem 10% de teor de adição de sílica ativa são os que apresentam maior concentração de cloretos a uma profundidade de até 5 mm no concreto exposto a 200 metros de distância do mar.

Essa menor concentração nos concretos moldados com cimento CP IV-RS ocorre em função da presença das pozolanas na pasta de cimento, que promovem a redução do tamanho e do volume dos vazios e microfissuras, produzindo maior coesão da estrutura interna do concreto e redução da permeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os concretos com cimento CP V-ARI, com relação a/agl 0,45 e 0,55, apresentam uma concentração superficial mais alta, tendendo a diminuir com o aumento da profundidade. Esse fato pode ser explicado pela maior finura dos grãos do cimento, deixando a estrutura do concreto mais compacta. Com a adição de sílica ativa, há redução significativa na penetrabilidade, aumentando a resistividade do concreto, proporcionando uma matriz mais densa e dificultando a entrada de agentes agressivos como os cloretos (NEVILLE, 1997).

Observa-se que os concretos moldados com cimento CP IV-RS apresentam um perfil típico da concentração de cloretos ao longo do cobrimento de concreto, conforme relatado por Cascudo (1997), onde a contaminação ocorre por impregnação de contaminantes do meio externo e, na camada superficial onde predomina a absorção, o ramo da curva é crescente desde a superfície até um limite máximo, quando entrando na zona de difusão a concentração tende a diminuir com a profundidade. Este comportamento foi visto também com os concretos moldados com cimento CP V-ARI, com e sem adição de sílica ativa, para relação a/agl 0,65.

4.2.4 Influência da temperatura, umidade, velocidade do vento e precipitação

Com relação ao monitoramento ambiental, a Tabela 34 apresenta os dados climatológicos levantados referentes aos períodos de coleta das amostras nos blocos de concreto expostos em ambiente natural.

Tabela 34 - Dados climatológicos referentes aos períodos de coleta das amostras

Período (dias)	Temperatura média (°C)	Umidade média (%)	Velocidade média do vento (m/s)	Precipitação acumulada (mm)
45	17	77	6,1	224
105	21	77	6,4	269
240	21	78	5,1	474

Percebe-se que, com exceção da precipitação acumulada, não houve muita variação nos valores médios das variáveis em relação aos períodos de exposição.

Neste estudo é necessário considerar que as variáveis climatológicas foram analisadas em conjunto, porém cabe salientar que para que os cloretos penetrem e se difundam é necessário que os poros do concreto contenham água. Verifica-se que é nas condições de exposição que apresentam uma umidade mais elevada que o concreto tem maior coeficiente de difusão de cloretos (COSTA e APPLETON, 1999).

Analisando os dados, verifica-se que os primeiros 45 dias de exposição dos blocos de concreto foram marcados por elevada precipitação acumulada no período, com média de 5,0 mm diários, muito superior aos períodos de 105 e 240 dias onde se obtiveram, respectivamente, 3,0 e 2,0 mm diários. Conforme Talavera (2005), a chuva direta sobre o concreto confere quantidade de umidade superior em comparação a um simples aumento de umidade relativa do ar, devendo ser considerado tanto a duração da precipitação como sua quantidade, uma vez que delas dependerá a saturação de todos os poros por processo de capilaridade.

O primeiro período, além da alta precipitação, também apresentou a menor temperatura, mantendo uma umidade relativa constante em relação aos outros períodos. Com todos esses fatores associados, foi possível comprovar que apesar de um curto período de exposição, os concretos moldados com cimento CP IV-RS, nas três relações a/agl, foram os que apresentaram um menor perfil de penetração de cloretos em relação aos concretos moldados com CP V-ARI, com ou sem adição de sílica ativa. Isto pode ocorrer, segundo Buenfeld e Okundi (1998) citados por Hoffmann (2001), uma vez que

o pico de temperatura gerado pela hidratação do cimento em elementos de concreto é função do consumo de cimento, e esta temperatura elevada aumenta o risco de fissuras térmicas nas primeiras idades. Para os outros períodos o perfil de penetração seguiu a tendência de aumentar os teores em função do tempo de exposição.

Considerando o exposto, conclui-se que a menor concentração superficial de cloretos e, conseqüentemente, um menor perfil de penetração desses íons nos concretos moldados com cimento CP IV-RS, em oposto ao que ocorre com o cimento CP V-ARI, deve-se à permeabilidade do concreto e aos ciclos alternados de molhagem e secagem

Quando ocorre a precipitação, a água da chuva faz com que os cloretos dissolvidos penetrem no concreto por absorção capilar, passando, alguns deles, para a pasta cimentícia por difusão e durante a secagem permanecem no interior dos poros fixos por absorção juntamente com moléculas de água que formam a película que reveste o interior dos mesmos, continuando o processo de difusão dos cloretos, mesmo no período de secagem, mas com menor velocidade. Na próxima chuva, com o ingresso de mais água impregnada por cloretos, os íons absorvidos e ainda não difundidos para o interior do concreto fazem aumentar a concentração de cloretos na superfície dos poros e o processo de difusão para o interior da estrutura é mais intenso. Logo, o perfil de cloretos é, geralmente, diferente para a alternância dos ciclos de molhagem/secagem.

Considerando a direção dos ventos, a mesma se manteve dentro das características da região com ventos predominantes nordeste, ocorrendo períodos de ventos do quadrante sul. Isto pode ser verificado nos concretos com maior perfil de penetração de cloretos na face sudoeste. Como houve pouca variabilidade nos valores da velocidade dos ventos, apesar de apresentarem uma média alta entre 5,0 e 6,0 m/s, não foi possível determinar o quanto essa variável interferiu considerando os diversos concretos moldados para a pesquisa.

4.3 CONCENTRAÇÃO SUPERFICIAL DE CLORETOS

Nas Figuras 61 a 72 são apresentados os comportamentos de concentração superficial de cloretos ao longo do tempo de exposição, para os diversos tipos de aglomerantes e distâncias estabelecidas para este trabalho.

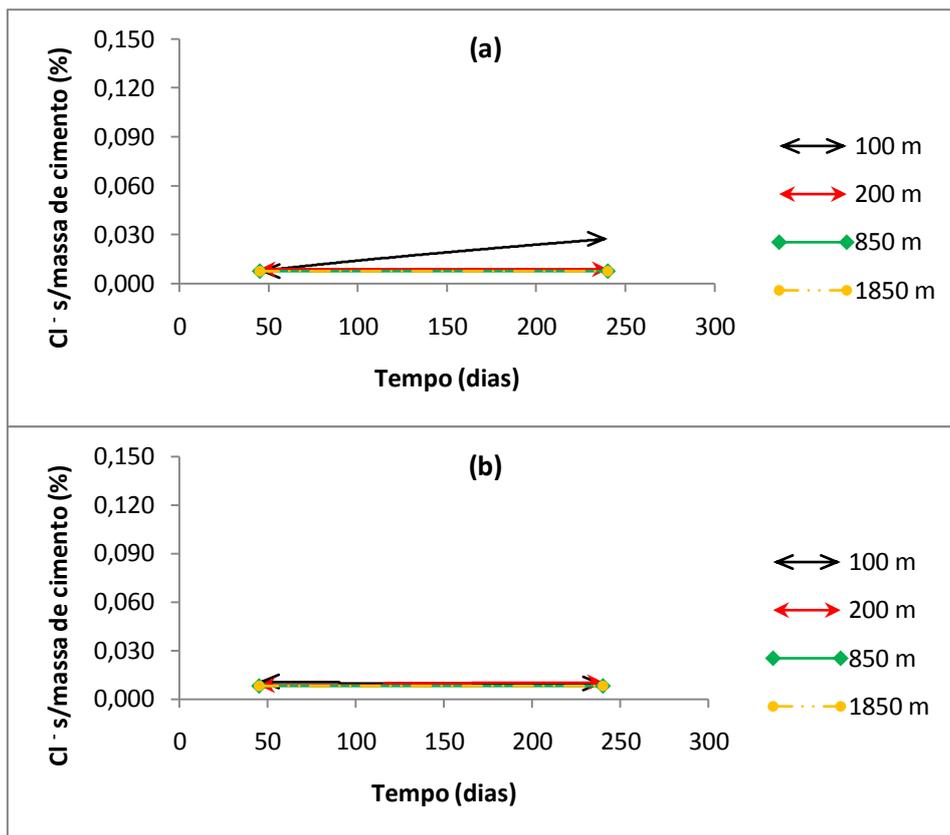


Figura 61 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP IV- RS, relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

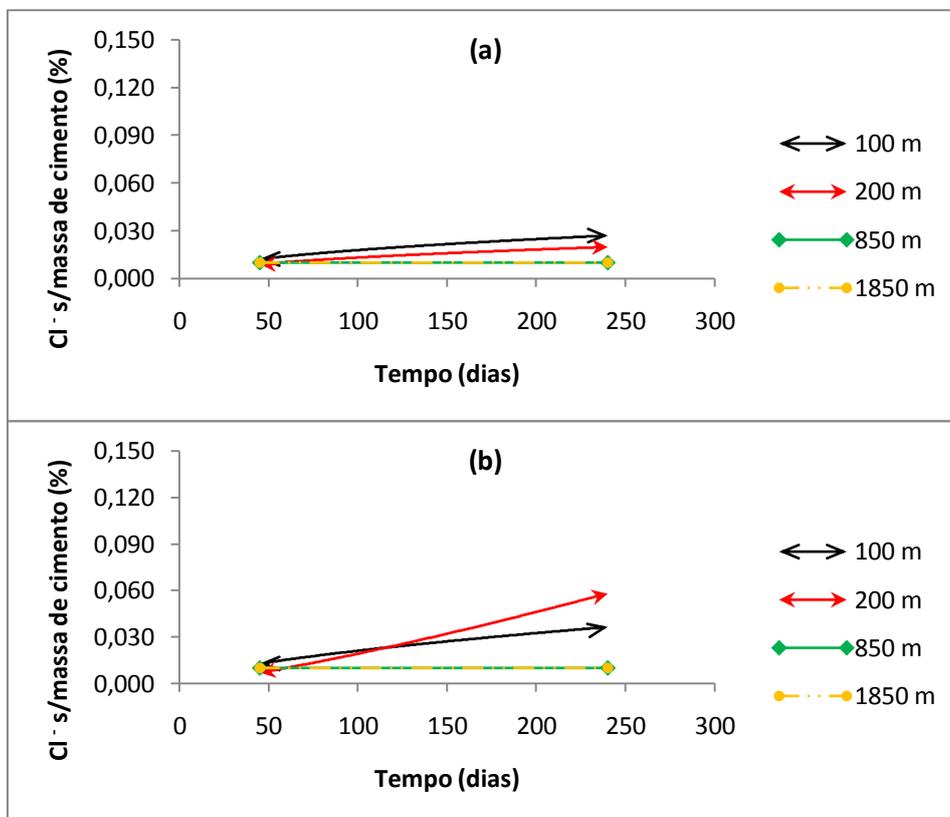


Figura 62 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP IV- RS, relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

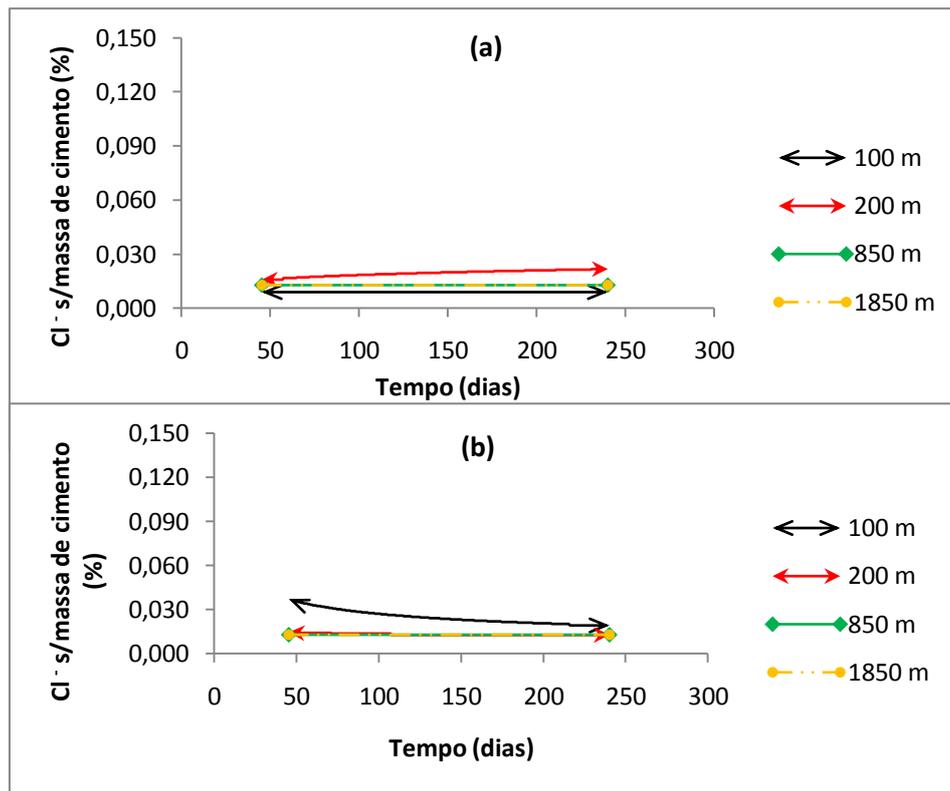


Figura 63 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP IV-RS, relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

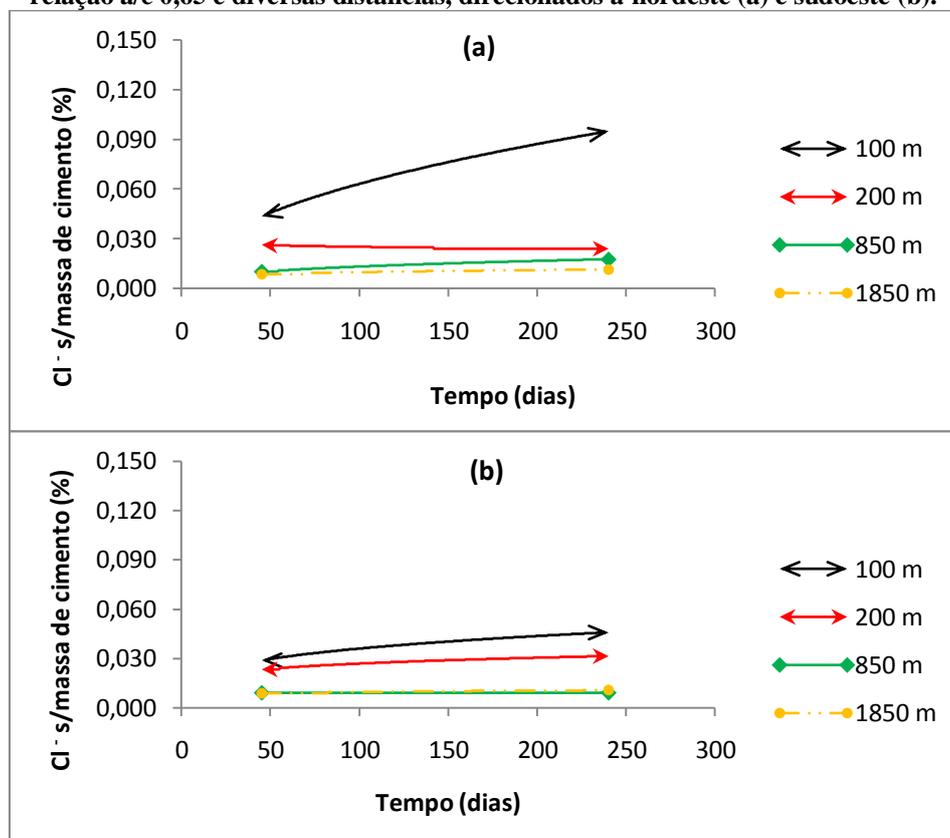


Figura 64 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI, relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

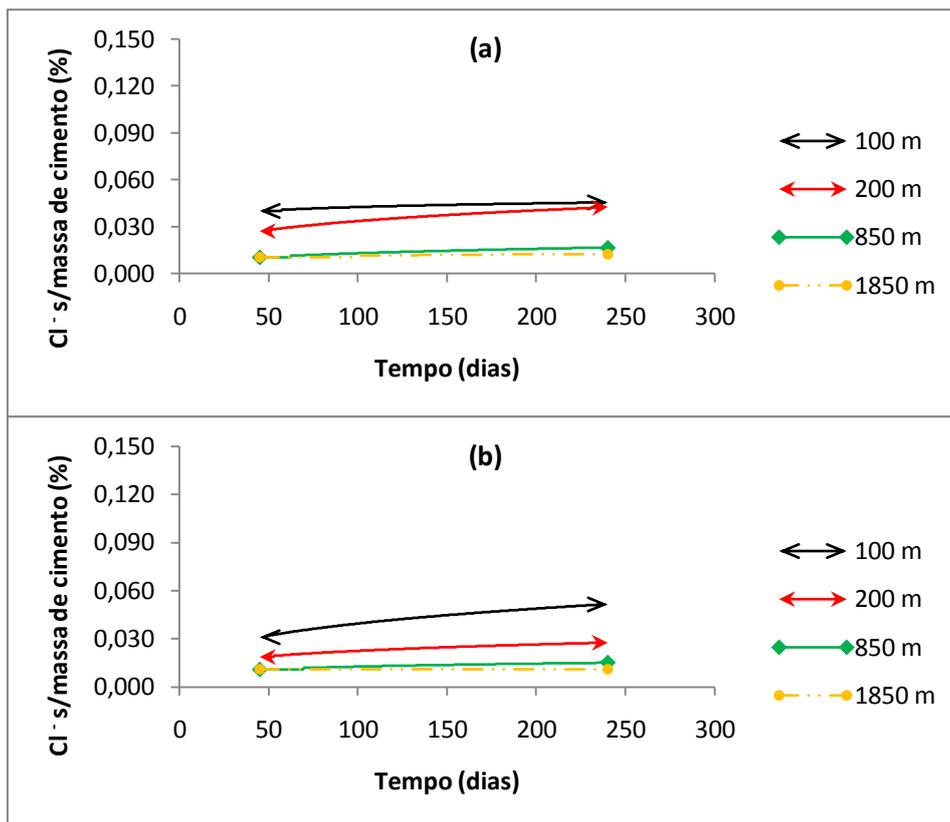


Figura 65 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI, relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

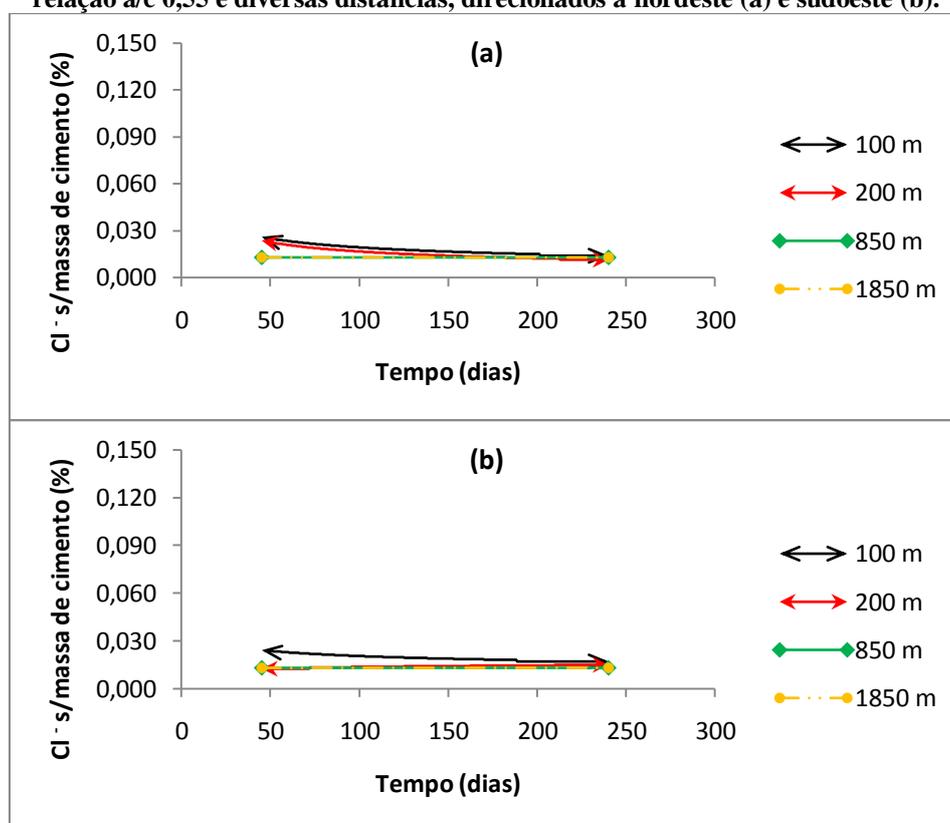


Figura 66 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI, relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

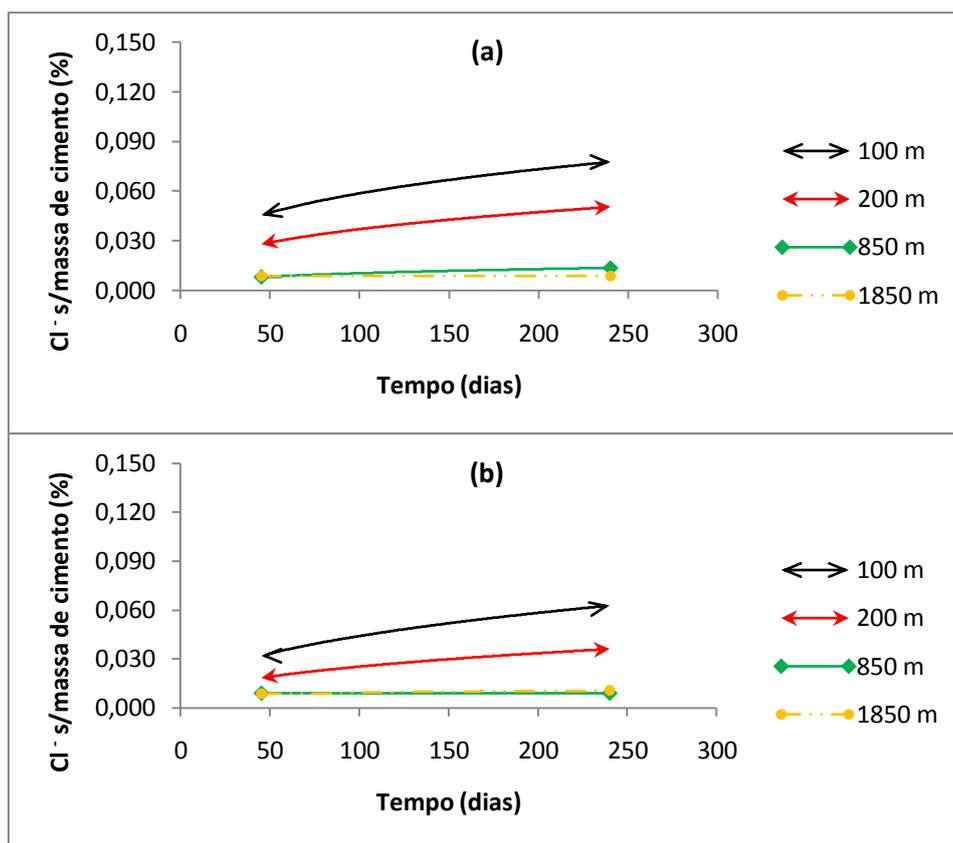


Figura 67 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 5% S. A., relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

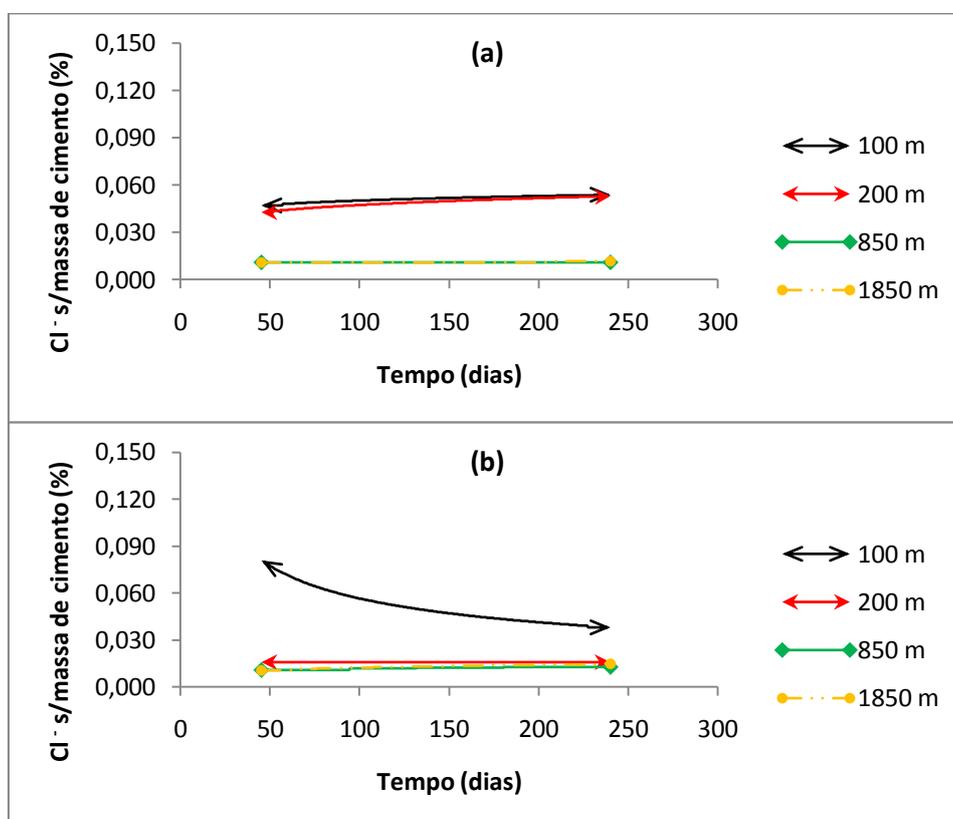


Figura 68 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 5% S. A., relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

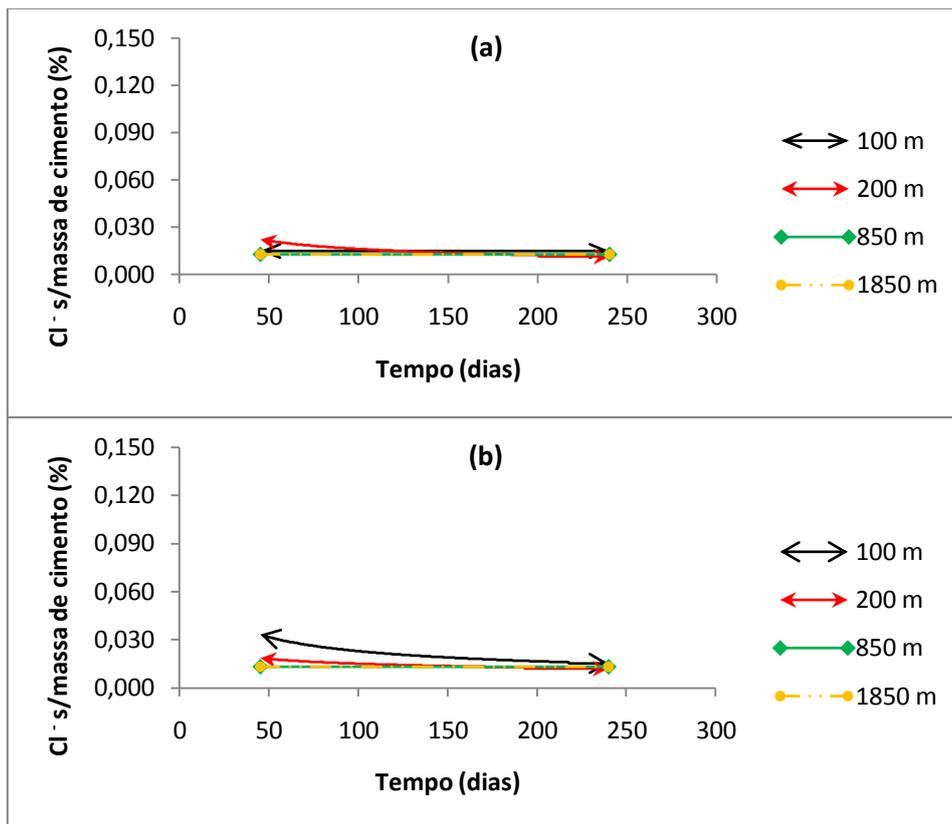


Figura 69 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 5% S. A., relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

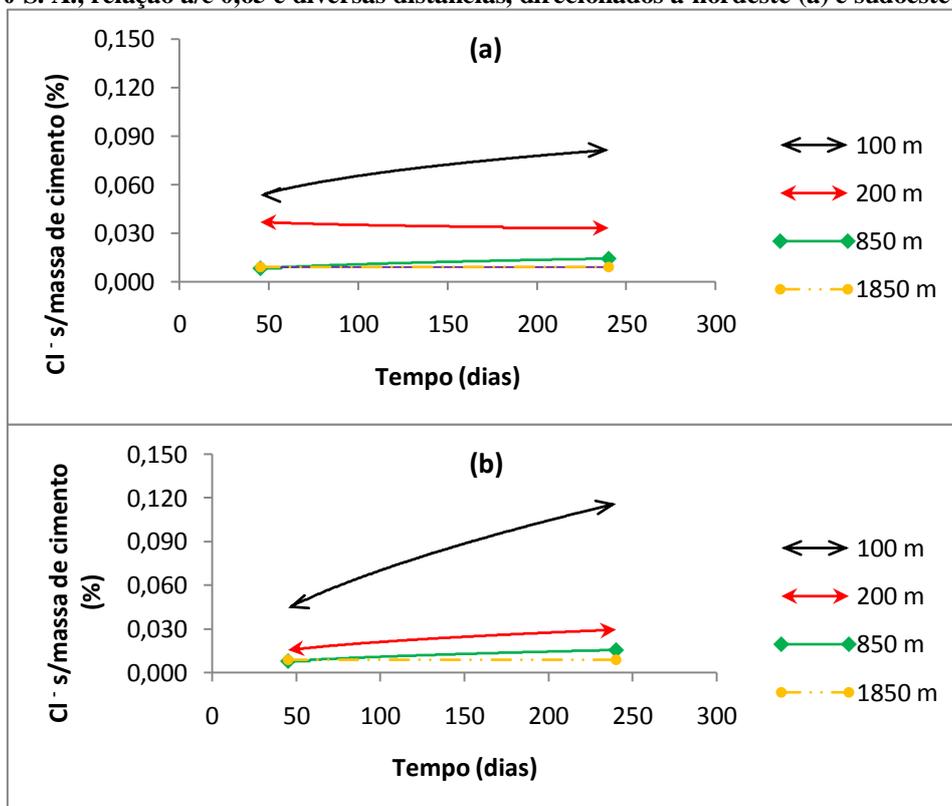


Figura 70 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 10% S. A., relação a/c 0,45 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

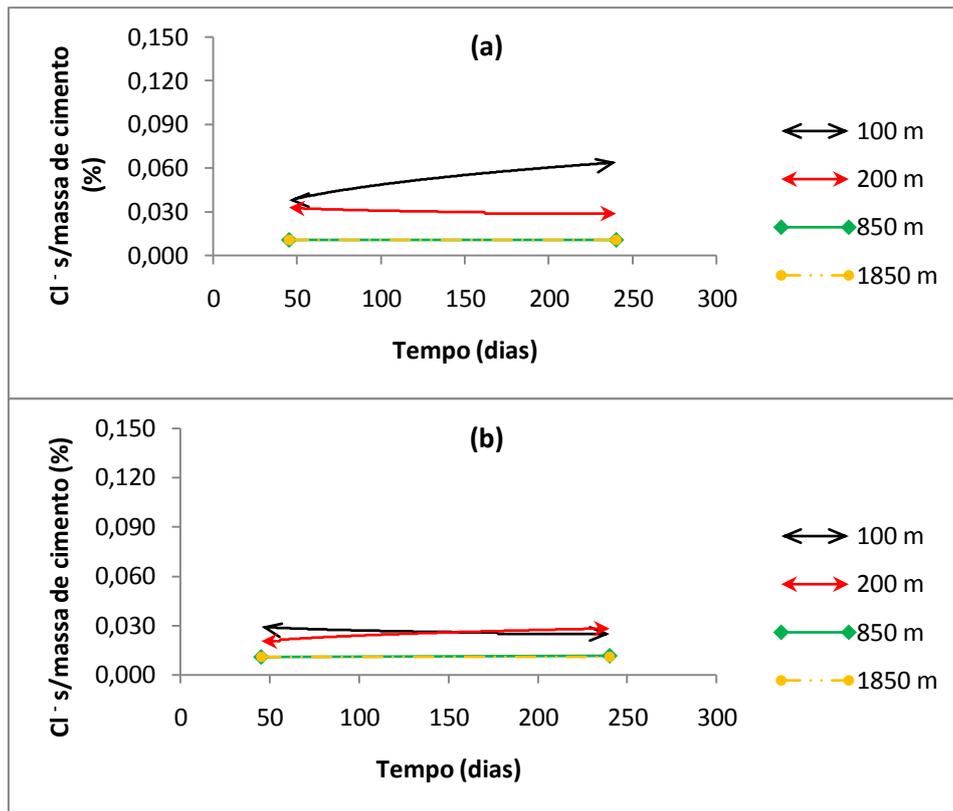


Figura 71 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 10% S. A., relação a/c 0,55 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

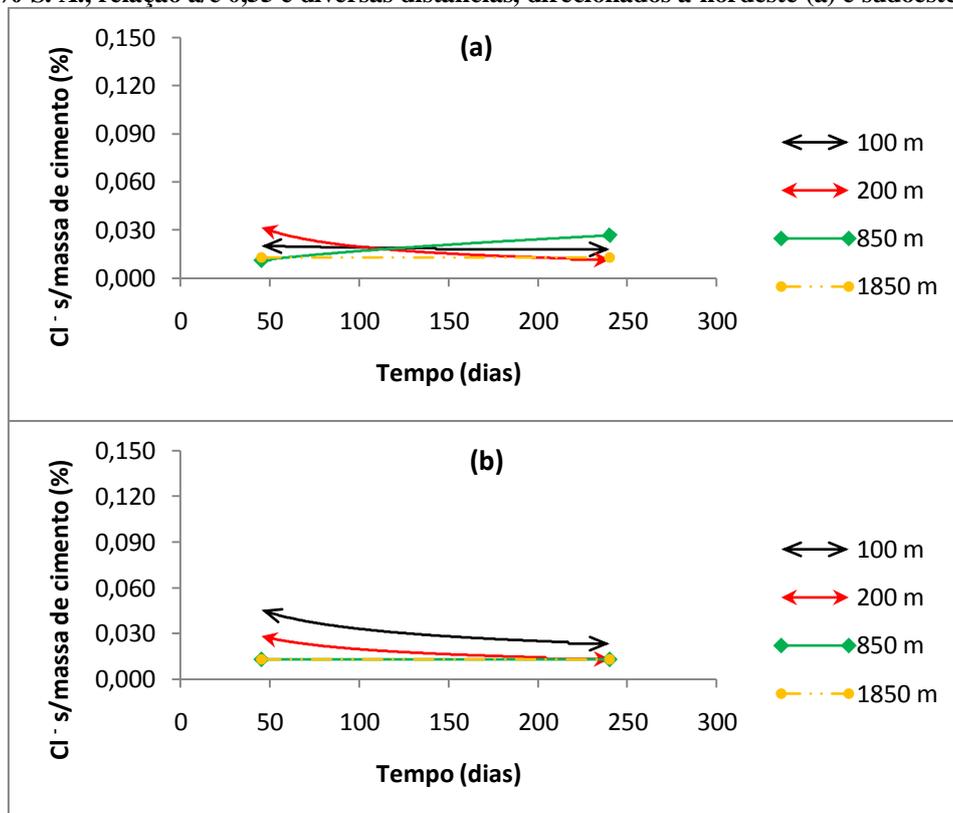


Figura 72 - Comportamento de Cs ao longo do tempo de exposição para concretos com CP V-ARI + 10% S. A., relação a/c 0,65 e diversas distâncias, direcionados a nordeste (a) e sudoeste (b).

De uma forma geral, concretos com relação a/agl 0,45 apresentam uma concentração superficial que aumenta com o passar do tempo e é, normalmente, maior que em concretos de maior relação a/agl e menor quanto mais distante em relação ao mar. Já concretos com relação a/agl 0,65, a concentração superficial apresenta-se muito baixa, independentemente da distância em relação ao mar e do tempo de exposição.

Segundo vários autores (COSTA e APPLETON, 1999; SWAMY *et al*, 1994; TANG e ANDERSEN, 2000), a concentração superficial de cloretos apresenta um crescimento com o tempo de exposição. Rizzon (2006), citando Castro *et al* (1999), comentam que a concentração superficial é baixa para uma estrutura recém construída, mas na medida em que a estrutura fica exposta à ação do ambiente, em área salina, os valores de concentração começam a aumentar.

Contudo, como já exposto anteriormente, nem sempre tal fato ocorreu nesta pesquisa, sendo que este comportamento de aumento da concentração superficial com o tempo de exposição basicamente não se deu em concretos com elevada relação a/agl (0,65), independente do posicionamento em relação aos ventos predominantes. Isto se deve a uma maior absorção dos cloretos na primeira camada de concretos com maior porosidade capilar (concretos com de maior relação a/agl), quando os cloretos migram da camada superficial para o interior da massa de concreto, podendo ser explicado pelo efeito lavagem ocasionado pelas chuvas que, em conjunto com o maior diâmetro dos capilares, provoca uma menor ascensão capilar ao interior do concreto.

Em concretos com baixa relação a/agl , os cloretos permanecem na superfície e aumentam com o passar do tempo. Além disso, esses concretos possuem maior volume de pasta, o que leva a uma maior absorção superficial.

Conforme Guimarães e Helene (2000), junto à superfície externa do concreto têm-se apenas argamassa, que apresenta maior consumo de cimento, considerando que há uma diminuição linear do consumo de cimento até a profundidade de 5 mm.

Analisando os resultados obtidos verificou-se que para todos os aglomerantes utilizados (CP IV- RS, CP V-ARI e adições de 5 e 10% de sílica ativa) nos blocos de concreto instalados a 850 e 1850 m distantes do mar (25 m distante da lagoa), a concentração superficial tem uma linha de tendência constante média de 0,010% de

cloretos sobre a massa de cimento, para o tempo de exposição adotado neste trabalho. Comprova-se assim, uma tendência de atenuação de concentração superficial ao longo do tempo, considerando a influência do distanciamento em relação ao mar neste comportamento.

O período referente aos meses de setembro a janeiro (105 dias de exposição) apresentou umidade relativa média do ar de 76%. Setembro e outubro foram os meses com maior precipitação acumulada durante esta pesquisa (372 mm), apresentando uma temperatura média de 17,5°C, seguidos por novembro e dezembro com índices de precipitação acumulada de 77 e 62 mm. Nos meses subsequentes desse período (novembro a janeiro) houve um aumento da temperatura média para 22°C.

Analisando esses dados, comprova-se o aumento da concentração superficial em concretos produzidos com relação a/agl 0,45 e distanciados a 100 m do mar. Estes concretos foram mais afetados pelo ciclo de molhagem e secagem, ou seja, nos meses de setembro e outubro os blocos, através do processo de absorção, foram embebidos pela água da chuva salinizada, ocorrendo sua saturação. Nos meses seguintes, com condições externas mais secas e com o aumento da temperatura ambiente, há uma inversão do movimento da água no interior do concreto quando a umidade evapora pelos poros capilares superficiais. Porém, o que evapora é a água pura existente no concreto, permanecendo os sais cristalizados nos poros da estrutura, aumentando assim o teor de concentração de íons cloreto, uma vez que ao ocorrer um novo ciclo de lavagem e secagem, novos íons serão absorvidos, aumentando o processo de difusão desses íons para o interior do concreto.

4.4 CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS

A penetração de cloretos no concreto depende de vários fatores relacionados ao material utilizado e ao ambiente em que se encontra inserido. Comprovou-se anteriormente que a concentração superficial está diretamente relacionada a essa penetração, porém com a finalidade de visualizar o total de íons Cl^- que se encontram no interior do concreto e seu comportamento em relação a um incremento da distância ao mar foram traçados gráficos para os diversos aglomerantes utilizados nesta pesquisa.

É evidente a diminuição das concentrações em função da distância em relação ao mar, contudo, segundo Meira (2004), esse comportamento não segue uma relação linear entre os cloretos da névoa e aqueles que penetram no concreto uma vez que quanto maior a disponibilidade de cloretos na atmosfera, menor a velocidade relativa com que os mesmos ingressam.

Sendo assim, utilizou-se uma linha de tendência exponencial para melhor visualizar esse comportamento, confirmando o descrito por Morcillo *et al* (1999) e Meira (2004a) citados por Pontes (2006). Nas Figuras 70 a 81 são apresentados os gráficos de comportamento de concentração de cloretos livres para as camadas superficiais até uma profundidade de 25 mm, considerando as distâncias em relação ao mar estabelecidas para este trabalho, posicionamento em função dos ventos predominantes (NE) e seu oposto (SO) e sua evolução no tempo, bem como as funções e o coeficiente de determinação para cada tipo de concreto estudado (Tabelas 35 a 46).

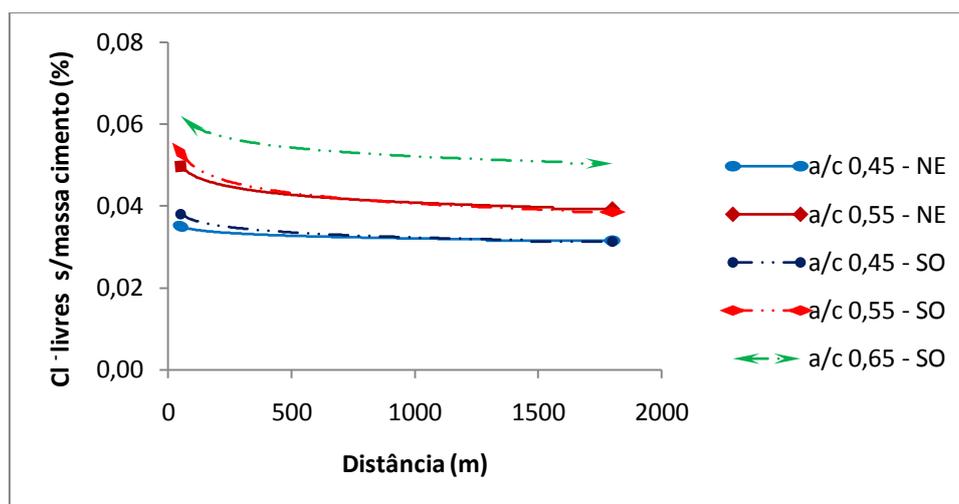


Figura 73 - Concentração de Cl livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 45 dias de exposição

Tabela 35 - Funções representativas da concentração de Cl livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 45 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,0392x^{-0,029}$	0,7653
0,55 - NE	$y = 0,0643x^{-0,066}$	0,8879
0,45 - SO	$y = 0,047x^{-0,054}$	0,9142
0,55 - SO	$y = 0,0748x^{-0,089}$	0,9149
0,65 - SO	$y = 0,0778x^{-0,058}$	0,7434

Observação: Concretos com a/agl 0,65 – NE não apresentaram uma estimativa adequada

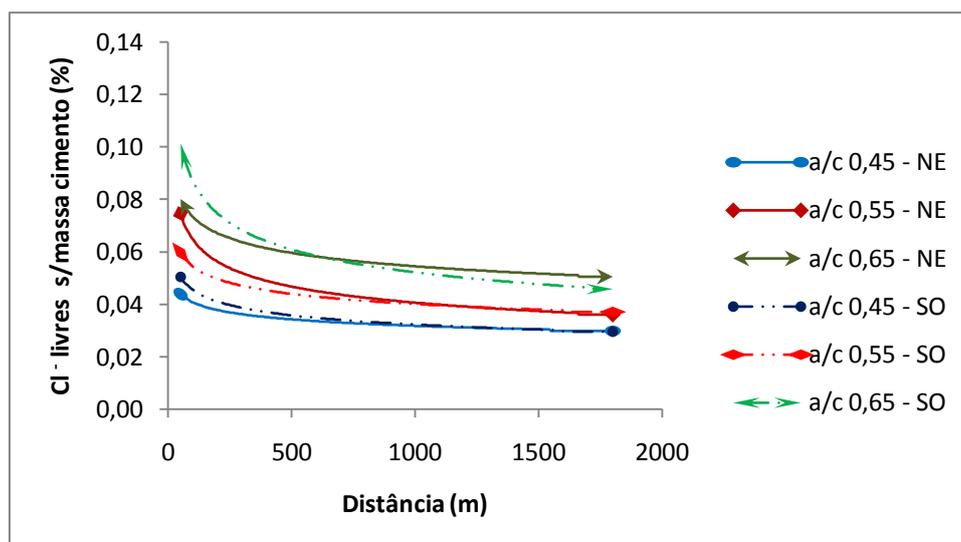


Figura 74 - Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 105 dias de exposição

Tabela 36 - Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 105 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,0669x^{-0,107}$	0,8117
0,55 - NE	$y = 0,1639x^{-0,201}$	0,8454
0,65 - NE	$y = 0,1328x^{-0,129}$	0,8564
0,45 - SO	$y = 0,0904x^{-0,149}$	0,8328
0,55 - SO	$y = 0,1002x^{-0,132}$	0,7730
0,65 - SO	$y = 0,241x^{-0,221}$	0,7518

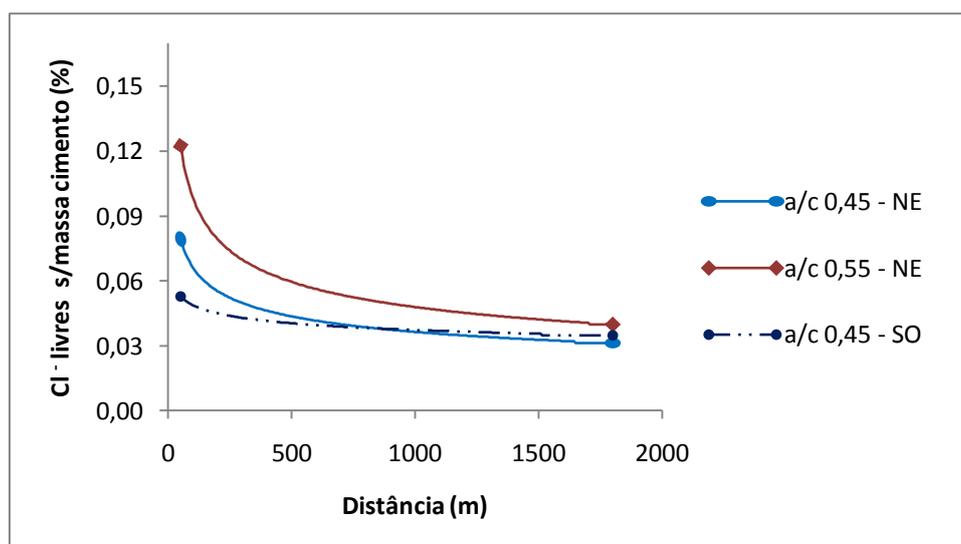


Figura 75 - Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 240 dias de exposição

Tabela 37 - Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP IV-RS aos 240 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,2189x^{-0,26}$	0,9846
0,55 - NE	$y = 0,4167x^{-0,313}$	0,9773
0,45 - SO	$y = 0,0835x^{-0,117}$	0,8134

Observação: Concretos com a/agl 0,65 – NE, 0,55 – SO e 0,65 – SO não apresentaram uma estimativa adequada.

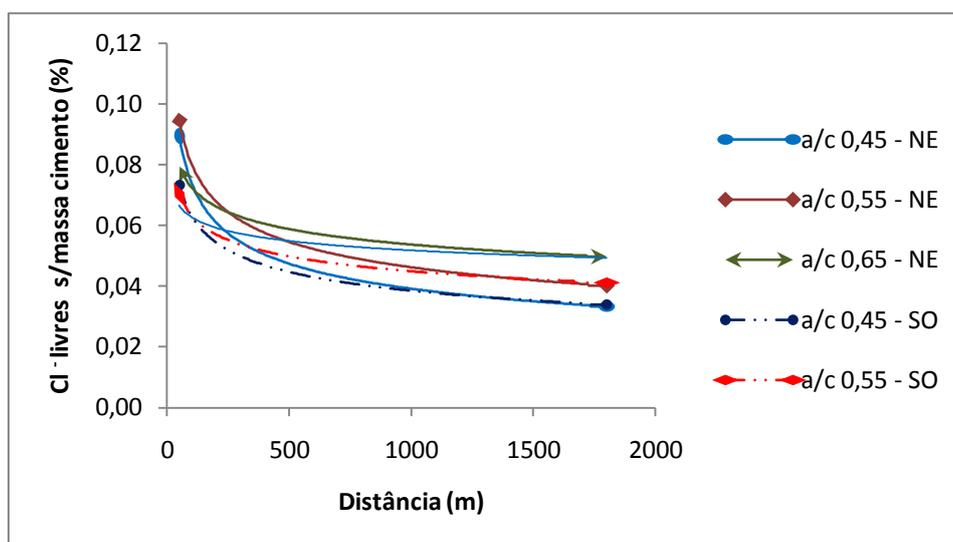


Figura 76 - Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 45 dias de exposição

Tabela 38 - Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 45 dias de exposição

a/c	Equação	r ²
0,45 - NE	$y = 0,2634x^{-0,276}$	0,9482
0,55 - NE	$y = 0,2412x^{-0,24}$	0,9489
0,65 - NE	$y = 0,1322x^{-0,131}$	0,9559
0,45 - SO	$y = 0,1702x^{-0,216}$	0,9389
0,55 - SO	$y = 0,1254x^{-0,149}$	0,8819

Observação: Concretos com a/agl 0,65 – SO não apresentaram uma estimativa adequada

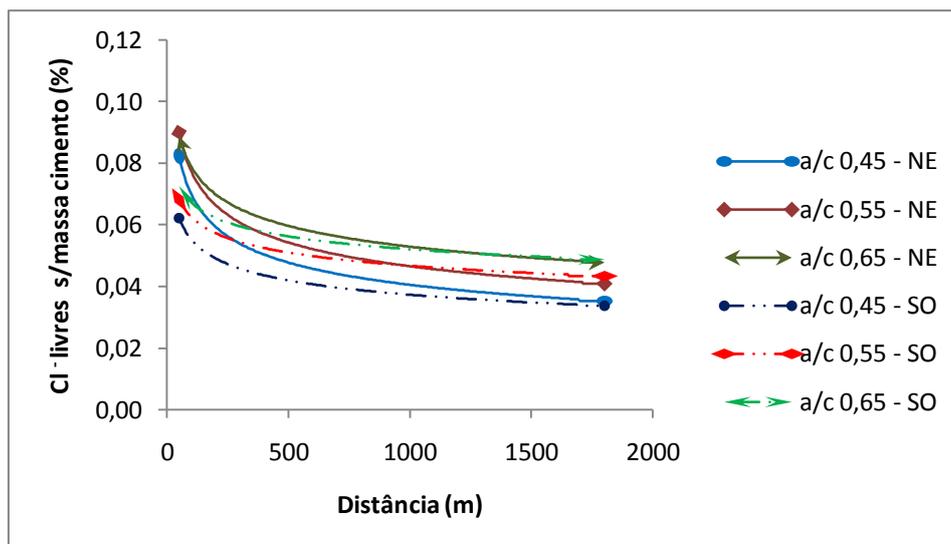


Figura 77 - Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 105 dias de exposição

Tabela 39- Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 105 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,2067x^{-0,236}$	0,9473
0,55 - NE	$y = 0,2125x^{-0,22}$	0,9524
0,65 - NE	$y = 0,1744x^{-0,172}$	0,8673
0,45 - SO	$y = 0,121x^{-0,17}$	0,9563
0,55 - SO	$y = 0,1119x^{-0,126}$	0,9215
0,65 - SO	$y = 0,1121x^{-0,111}$	0,7497

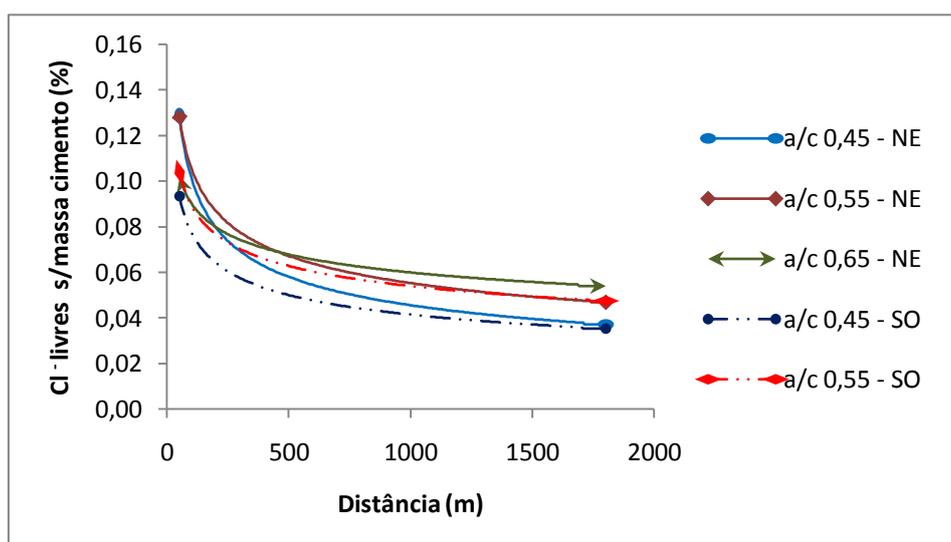


Figura 78 - Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 240 dias de exposição

Tabela 40 - Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI aos 240 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,4985x^{-0,346}$	0,9238
0,55 - NE	$y = 0,3836x^{-0,28}$	0,8127
0,65 - NE	$y = 0,2046x^{-0,178}$	0,9579
0,45 - SO	$y = 0,2693x^{-0,271}$	0,9112
0,55 - SO	$y = 0,24319x^{-0,218}$	0,8967

Observação: Concretos com a/agl 0,65 – SO não apresentaram uma estimativa adequada

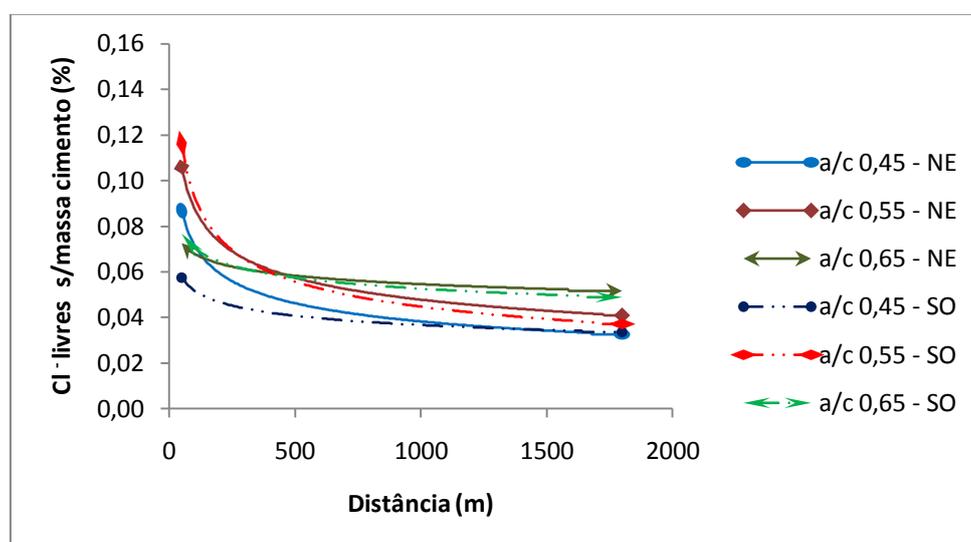


Figura 79 - Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 45 dias de exposição

Tabela 41 - Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 45 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,2534x^{-0,274}$	0,9489
0,55 - NE	$y = 0,2985x^{-0,265}$	0,9318
0,45 - SO	$y = 0,1035x^{-0,15}$	0,8694
0,55 - SO	$y = 0,404x^{-0,319}$	0,7797
0,65 - SO	$y = 0,126x^{-0,127}$	0,8319

Observação: Concretos com a/agl 0,65 – NE não apresentaram uma estimativa adequada

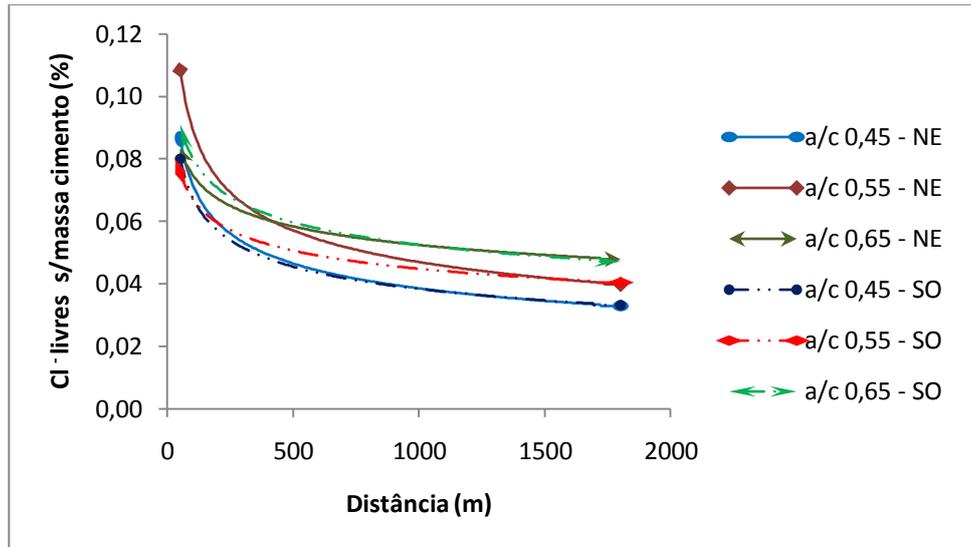


Figura 80 - Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 105 dias de exposição

Tabela 42 - Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 105 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,2472x^{-0,269}$	0,9569
0,55 - NE	$y = 0,3236x^{-0,279}$	0,9578
0,65 - NE	$y = 0,152x^{-0,154}$	0,7903
0,45 - SO	$y = 0,209x^{-0,245}$	0,9561
0,55 - SO	$y = 0,1505x^{-0,175}$	0,8631
0,65 - SO	$y = 0,1864x^{-0,183}$	0,7922

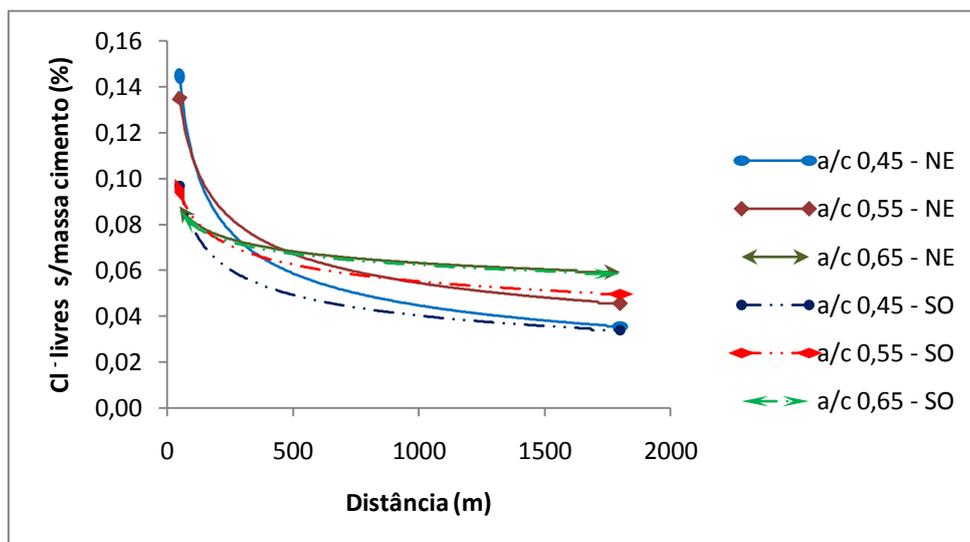


Figura 81- Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 240 dias de exposição

Tabela 43- Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 5% SA aos 240 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,6686x^{-0,392}$	0,9654
0,55 - NE	$y = 0,4409x^{-0,303}$	0,7912
0,65 - NE	$y = 0,1354x^{-0,11}$	0,8292
0,45 - SO	$y = 0,303x^{-0,292}$	0,9311
0,55 - SO	$y = 0,1912x^{-0,18}$	0,7598
0,65 - SO	$y = 0,1317x^{-0,108}$	0,8398

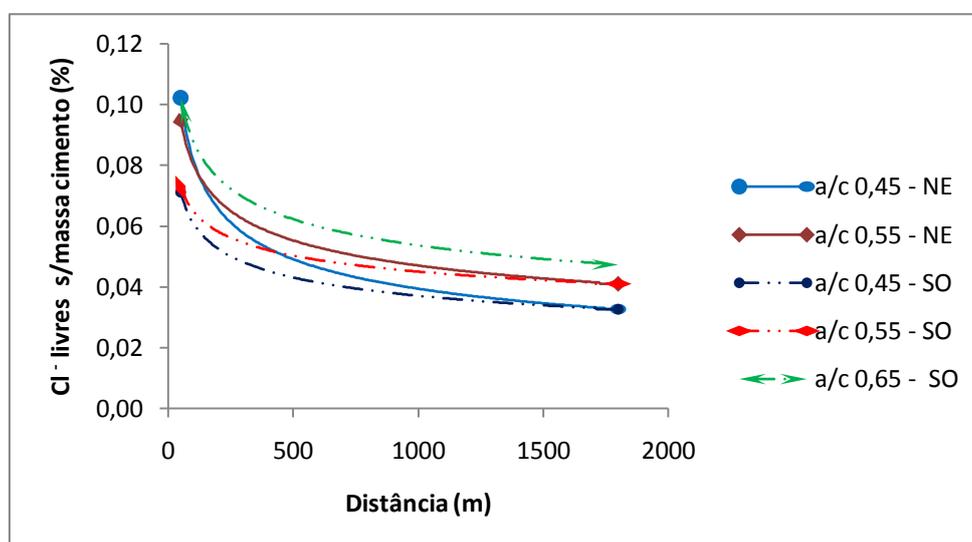


Figura 82 - Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 45 dias de exposição

Tabela 44 - Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 45 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,1084x^{-0,82}$	0,8765
0,55 - NE	$y = 0,0984x^{-0,597}$	0,8560
0,45 - SO	$y = 0,0765x^{-0,601}$	0,9612
0,55 - SO	$y = 0,0764x^{-0,439}$	0,9618
0,65 - SO	$y = 0,1097x^{-0,593}$	0,9618

Observação: Concretos com a/agl 0,65 – NE não apresentaram uma estimativa adequada

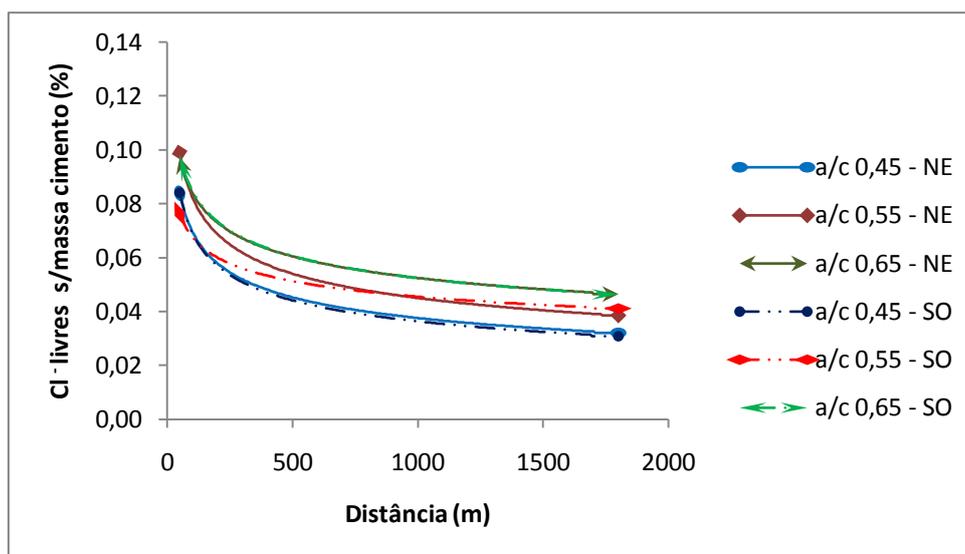


Figura 83 - Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 105 dias de exposição

Tabela 45 - Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 105 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,0913x^{-0,733}$	0,9605
0,55 - NE	$y = 0,1098x^{-0,746}$	0,9452
0,65 - NE	$y = 0,1063x^{-0,595}$	0,9129
0,45 - SO	$y = 0,0953x^{-0,812}$	0,9093
0,55 - SO	$y = 0,0798x^{-0,46}$	0,9451
0,65 - SO	$y = 0,1077x^{-0,606}$	0,9125

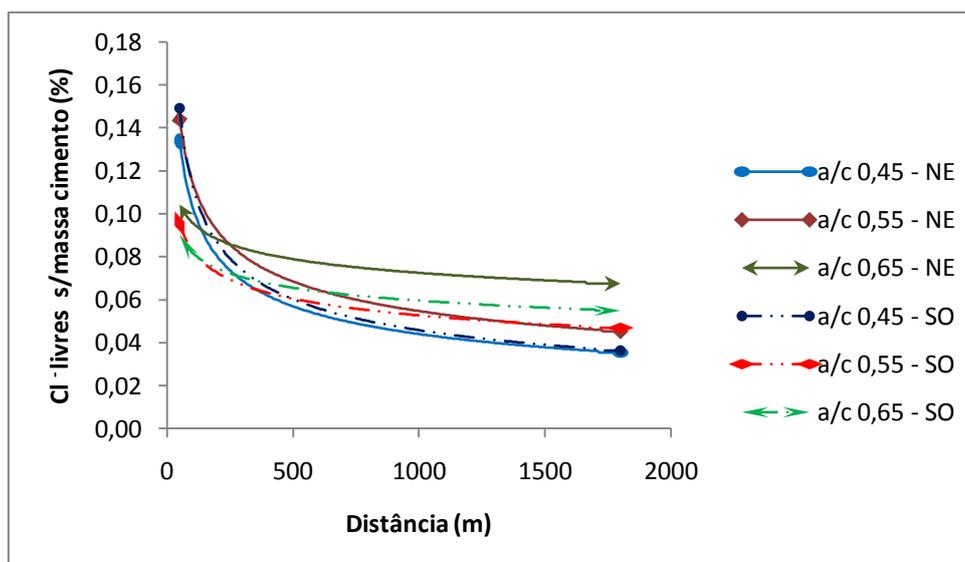


Figura 84- Concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 240 dias de exposição

Tabela 46 - Funções representativas da concentração de Cl⁻ livres até 25 mm de profundidade, em função da distância ao mar dos concretos com CP V-ARI + 10% SA aos 240 dias de exposição

a/c	Equação	R ²
0,45 - NE	$y = 0,5715x^{-0,371}$	0,9850
0,55 - NE	$y = 0,5088x^{-0,323}$	0,9628
0,45 - SO	$y = 0,6961x^{-0,394}$	0,9914
0,55 - SO	$y = 0,2068x^{-0,198}$	0,8398
0,65 - SO	$y = 0,155x^{-0,138}$	0,8979

Observação: Concretos com a/agl 0,65 – NE não apresentaram uma estimativa adequada

Analisando os gráficos constatou-se que a concentração de cloretos livres no interior do concreto está diretamente relacionada com a relação a/agl, obtendo-se menores concentrações para a relação a/agl 0,45, independente do aglomerante utilizado.

Em relação à direção dos ventos predominantes, observou-se que as faces dos concretos voltadas para sudoeste foram mais desfavoráveis relacionadas à concentração de cloretos livres até 25 mm de profundidade, porém de forma não acentuada.

Considerando o distanciamento em relação ao mar, os resultados confirmam o que já foi amplamente estudado, ou seja, a concentração de cloretos livres para uma profundidade até 25 mm no concreto tende a diminuir de forma significativa com o aumento da distância.

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Dentro do objetivo principal desta pesquisa, que é avaliar o perfil de penetração de cloretos no interior do concreto na zona atmosférica marinha, especificamente no Litoral Norte do estado do Rio Grande do Sul (*Tramandaí e Imbé*), em função da distância ao mar, direção do vento, tipo de aglomerante e relação água/aglomerante, são apresentadas as seguintes conclusões:

- a) os concretos moldados com cimento CP V-ARI, com adição de 5 e 10% de sílica ativa, relação a/agl 0,45 e 0,55 apresentaram maior concentração de cloretos livres para uma profundidade até 25 mm em relação aos concretos moldados com outros aglomerantes, apesar de possuírem uma resistência mais elevada;
- b) os concretos moldados com cimento CP V-ARI apresentaram concentração superficial superior em relação aqueles moldados com cimento CP IV-RS, havendo incremento dessa concentração com adição de sílica ativa.
- c) considerando o período estudado (oito meses), nenhum concreto atingiu o teor crítico de cloretos (0,15%) estipulado pela NBR 6118 (ABNT/2003) para o ambiente de atmosfera marítima onde foram expostos, tanto na concentração superficial como na concentração de cloretos livres para uma profundidade até 25 mm;
- d) considerando os diversos tipos de aglomerantes utilizados, constatou-se que concretos com cimento CP V-ARI com relação a/agl 0,65, com e sem adição de sílica ativa, apresentaram perfil de penetração de cloretos similar aos concretos moldados com cimento CP IV-RS;
- e) concretos com relação a/agl 0,65, independente do posicionamento em relação aos ventos predominantes, apresentaram baixa concentração superficial ocasionada pelo efeito *lavagem* provocado pelas chuvas que, em conjunto com o maior diâmetro dos capilares, provoca uma menor ascensão capilar ao interior do concreto;

- f) considerando os perfis de penetração de cloretos, os que apresentaram resultados menos danosos para os concretos estudados foram aqueles com menor relação a/agl , independente do aglomerante utilizado;
- g) considerando a direção dos ventos predominantes na região, a sudoeste constatou-se pequena redução na concentração de cloretos livres ingressando nos concretos, independente do tipo de aglomerante utilizado;
- h) em função da pouca variabilidade da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos predominantes observada no período de oito meses desta pesquisa, não foi possível delimitar a influência dessas variáveis no ingresso de cloretos nos concretos. Exceção feita à precipitação acumulada no primeiro período de exposição que se mostrou significativa para o perfil de penetração de cloretos;
- i) considerando os perfis de penetração de cloretos obtidos para os diversos concretos moldados para esta pesquisa, constatou-se a diminuição do ingresso de cloretos com o distanciamento em relação ao mar, ou seja, uma menor concentração total de cloretos, havendo um decréscimo significativo até os 850 m na ordem de 50% para os concretos com cimento CP IV-RS com relação a/agl 0,45 e 70% com cimento CP V-ARI, com e sem adição de sílica ativa, mesma relação a/agl . Para concretos com relação a/agl 0,55, utilizando todos os aglomerantes desta pesquisa, a redução média foi de 58%. Para a relação a/agl 0,65, para todos os concretos, a redução foi de 25%.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com a finalidade de aprofundar mais o estudo do ingresso de cloretos em estruturas de concreto na orla marítima do Rio Grande do Sul, considerando o distanciamento ao mar, sugere-se alguns temas para pesquisas futuras:

- a) analisar o grau de saturação dos concretos expostos em ambiente marítimo;
- b) aumentar o número de estações de monitoramento entre as distâncias de 200 a 850 m em relação ao mar para melhor determinação do ponto onde os íons cloreto deixam de afetar o concreto;

- c) estudar a deposição de íons cloreto pela névoa salina através do ensaio de vela úmida, fazendo um comparativo com a penetração de cloretos no concreto;
- d) analisar a possibilidade da corrosão das armaduras inseridas nos concretos expostos nas estações de monitoramento em ambiente natural desta pesquisa;
- e) analisar a previsão de vida útil dos concretos, baseando-se nos dados obtidos nesta pesquisa;
- f) estudar a influência da chuva dirigida na superfície do concreto.

REFERÊNCIAS

- ABRAMS, D. A. **Design of concrete mixtures**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory. Lewis Institute Bulletin, n. 1, 1918.
- ALANIS, I. L. *et al.* **Corrosión y protección Del acero en el hormigón armado**. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 1990.
- AL-KHAJA, A. W. **Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes**. Construction and Building Materials, v. 11, n. 1, p. 9-13, 1997.
- ALVES, T. L. **Estudo da formação de incrustações inorgânicas em membranas de nanofiltração utilizadas em processos de dessulfatação**. Dissertação de mestrado. Ciência dos Materiais e Metalurgia do Centro de Tecnologia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.
- ALVES, A. M. C. **Contribuição à análise da perspectiva de vida útil de estruturas em concreto face ao teor de cloreto registrado em Maceió-AL**. Dissertação de mestrado. Centro de Tecnologia – CTEC. Departamento de Engenharia Estrutural. Universidade federal de Alagoas, 2007.
- AMBLER, H. R; BAIN, A. A. J. **Corrosion of metals in the tropics**. J. Appl. Chem., p. 437 – 467, 1955.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and commentary (ACI 318R-02)**. Michigan: ACI, p.443, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**. 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C114-09. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement**. 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C494 / C494M - 08a. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete**. 2008.
- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**, 1ª Edição Ed. Pini – São Paulo, 1992. .
- ANDRADE, C. **Procesos de corrosión em el hormigón y métodos modernos de cálculo de la carbonatación, penetración de cloruros y propagación de la corrosión**. In: Curso de Estudios Mayores de La Corrosión (CEMCO), 15, 2001, Madrid. Seminário sobre Durabilidade Del hormigón e evaluación de estructuras corroídas. Madrid: IETcc, abr. 2001.
- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade de estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:1998. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2003. Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:1991. Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736:1991 Versão corrigida: 1999. Cimento Portland pozolânico.** Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737:1992. Cimento Portland resistentes a sulfatos.** Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2003 Emenda 1:2008. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2007. Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2003: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2009. Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776:1987. Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768:1992. Aditivos para concreto de cimento Portland.** Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2006. Concreto de cimento Portland. Preparo, controle e recebimento – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2006.
- BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: SCHIESSL, P (Ed.) **Corrosion of steel in concrete.** New York: RILEM/ Chapman and Hall, p. 22-55, 1988.

- BELLOMO, H.R. *et al.* **Rio Grande do Sul: aspectos da geografia**. Porto Alegre: Martins Livreiros, 2a ed. 1992.
- BICZOK, I. **La corrosion y su protección** – 8ª Edição, Bilbao, Urmo. Ed. Espanha, 1972.
- BLANCHARD, D. C. *et al.* **The vertical distribution of the concentration of sea salt in the marine atmosphere near Hawaii**. *Tellus* 36B:118–125, 1984.
- BUENFELD, N. R.; OKUNDI, E. **Effect of cement content on transport in concrete**. Magazine of Concret Research, V. 50, n. 4, p. 339-351, 1998.
- CARMONA, A.; MERENGA, A. **retrospectiva da patologia no Brasil – estudo estatístico**. Colloquia'88 (Jornada em espanhol y portugués sobre estructuras y materiales), p. 101-123. Madrid, 1988.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto**. São Paulo: Pini, Universidade Federal de Goiás, 1997.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZACIÓN. **EN 206-1:2000/A-2:2007**– Specification, performance, production and conformity. Brussels: CEN, 2007.
- CEB BULLETIN D'INFORMATION N° 182. **Durable Concrete Structures**. CEB Design Guide second edition. Paris, 1989.
- CEB BULLETIN D'INFORMATION N° 183. **Durable Concrete Structures**. CEB Design Guide. Paris, 1992.
- COMITÊ DE BACIA DO RIO TRAMANDAÍ. **Plano de bacia hidrográfica do rio Tramandaí**. Osório RS. 2005. <http://www.comitetramandai.com.br/> consultado em 07/02/07.
- COSTA, A.; APPLETON, J. **Chloride penetration into concrete in marine environment – part II: prediction of long term chloride penetration**. Materials and Structures, v.32, p. 354-359, 1999.
- COSTA, E. A. L. **Determinação do potencial de agressão dos sais marinhos sobre as argamassas de revestimento na região metropolitana de Salvador**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- COTRIM, D. S. *et al.* **Sistemas pesqueiros e a pesca artesanal: O caso de Tramandaí - RS**. In: Agricultura familiar, políticas públicas e inclusão social, 2007, Fortaleza. Agricultura familiar, políticas públicas e inclusão social: anais do 7º Congresso Brasileiro de Sistemas de Produção, 4 a 6 de setembro de 2007. Fortaleza : Embrapa, 2007.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2ª Edição, Oxford: Oxford University Press, 1975.
- CUCHIARA D. C. *et al.* **Modelagem numérica do comportamento das ondas na costa do Rio Grande do Sul**. II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, NOV/2006, Rio Grande, 15 p. 2006.

- 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.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. 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 microssilica.** Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4030 – Part 1. Assessment of water, soil and gases for their aggressiveness to concrete; principles and limiting values.** 1991.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Status of the Nation's Highways, Bridges, and Transit: Conditions & Performance.** Report to congress. Executive Summary. U.S. Department of Transportation, 2006.
- GALVÃO, J. C. A. *et al.* **Desempenho elétrico e mecânico de concretos fabricados sob diferentes temperaturas de mistura e condições de cura: estudo preliminar.** In: 44 Congresso Brasileiro do Concreto, 2002, Belo Horizonte. Anais 44 Congresso Brasileiro do Concreto, 2002.
- GANDRA, T. B. R. **Elaboração de um SIG (SITARS) para os encalhes e capturas incidentais de tartarugas marinhas no Rio Grande do Sul.** Graduação em Oceanologia. Núcleo de Educação e Monitoramento Ambiental. Fundação Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2005.
- GARCIA, R. B. **Avaliação da atmosfera marinha em estruturas de concreto na região de Florianópolis – SC.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- GEIKER, M. *et al.* **Performance criteria for concrete durability (report 12 – RILEM).** Laboratory test methods. In: KROPP, J. HILSDORF, H. K. London: E & FN Spon, 1995.
- GJØRV, O. E. **Effect of condensed silica fume on steel corrosion in concrete.** ACI Materials Journal, v. 92, n. 6, p. 591-598, 1995.
- GOWRIPALAN, N. *et al.* **Effect of curing on durability.** Concrete International, v.12, n.2, p.47-54, 1990.
- GUIMARÃES, A. T. C. **Desempenho do concreto em ambiente marítimo na região do extremo sul do Brasil. Rio Grande.** Dissertação de Mestrado, Fundação Universidade do Rio Grande, Engenharia Oceânica, 1997.
- GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. **Difusão de cloretos e a influência do grau de saturação do concreto: Ensaio em laboratório e medição de obra em uso.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/265. São Paulo, 2000.

- GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. **Grau de saturação do concreto: um importante fator na difusão de cloretos.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 2, p.55-64, Editora Dunas. Rio Grande, 2001.
- GUIMARÃES, A. T. C.; CASTAGNO JR, R.; HELENE, P. R. L. **Intensidade de ataque de cloretos: considerações sobre a distância do concreto em relação à água do mar.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.3, p.73-79, Junho, 2003.
- GUSTAFSSON, M. E. R.; FRANZÉN, L. G. **Dry deposition and concentrations of marine aerosols in a coastal area.** SW-Sweden. Atmos Environ, v.30, n.6, pp.977-989, 1996.
- HAIR, J. F. *et al.* **Análise Multivariada de Dados.** p.148, 5 ed, 600 p. Artmed Editora AS, 2007.
- HASENACK, H.; FERRARO, L. W. **Considerações sobre o clima da região de Tramandaí.** Pesquisas em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, v. 22, p. 53-70, 1989.
- HELENE, P. R. L. **Durabilidade do concreto versus agressividade do meio ambiente.** 1ª parte IPT/D. Ed. 43. Editora. Pini, 1980.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição do estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 1993.
- HELENE, P. R. L. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: IV Congresso Ibero Americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. Anais. Porto Alegre, v.1, p. 1-30, 1997.
- HELENE, P. R. L. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: International Conference on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures. Proceedings CD Room. Gramado, 1999.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** Editora Pini, 349 p. 1 ed. São Paulo, 1993
- 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.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais. Gerência de Estudos e Análises da Dinâmica Demográfica. **Tendências Demográficas: uma análise aos resultados da sinopse preliminar do Senso Demográfico 2000.** Tabela 12, p. 32. 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Censo Demográfico 2007.** População recenseada e estimada, segundo os municípios - Rio Grande do Sul. Tabela 1.1.23, 2007.

- JOUKOSKI, A. **Estudo do desempenho de concretos para artefatos de redes de distribuição de energia elétrica destinada à ambientes litorâneos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2003.
- KRÖPP, J. *et al.* **Transport mechanisms and definitions**. In: KRÖPP, J.; HILSDORF, H. K. Performance criteria for concrete durability (report 12 – RILEM). London: E & FN Spon, 1995.
- LOVETT, R. F. **Quantitative measurement of airborne sea-salt in the North Atlantic**. *Tellus*, v. 30, p. 358-364, 1978.
- MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- MEIRA, *et al.* **Deposição de Cloretos em Zona de Atmosfera Marinha: Comportamento Sazonal e sua Relação com Estruturas de Concreto**. Trabalho apresentado no XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, p. 3020 – 3028. Florianópolis, 2006.
- MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J. **Custos de recuperação e prevenção em estruturas de concreto armado: uma análise comparativa**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu: ANTAC, 2002.
- MEHTA, P. K.; MANMOHAN, D. **Pore size distribution and permeability of hardened cement paste**. In: 7th International Congress on the Chemistry of Cement. Proceedings. Vol. III. Paris, 1980.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. São Paulo: Ed. PINI, 573p, 1994.
- MIDGLEY, H.; ILLSTON, J. M. **The penetration of chlorides into hardened cement pastes**. *Cement and Concrete Research*, v.14, n.4, p.546-58, 1984.
- MOREIRA, B. P. **Estudo da penetração de cloretos na camada de cobrimento do concreto com altos teores de cinza volante**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2004.
- MOTTA, V. F. **Relatório-diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela Barra do Rio Grande**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 1969.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Ed. Pini, São Paulo, 1997.
- NDT JAMES INSTRUMENTS INC. **Sistemas de Pruebas no Destructoras. Sistema CL-2000 de Ensayo de Cloruros Para Uso en Obra**. <http://www.ndtjames.com>. Chicago, 2009.
- NINCE, A. A.; CLÍMACO, J. C. T. S. **Levantamento de dados sobre deterioração de estruturação na região centro-oeste do Brasil**. In: International Congress on High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete

- Structures (1996: Florianópolis). Proceedings... Florianópolis: UFSC, p. 414-424, 1996.
- NUNES, J. L. O. *et al.* **Zona de névoa: Intensidade do ataque de cloretos em função da distância do concreto em relação a água do mar.** In.: Congresso Brasileiro Do Concreto, 46. 2004, Florianópolis. Anais. Florianópolis: IBRACON – Volume III – Obras de Saneamento em Concreto, p. 1 – 11, 2004.
- ODRIOZOLA, M. A. B.; GUTIÉRREZ, P.A. **Permeabilidad a los cloruros del hormigón armado situado em ambiente marino sumergido.** Revista Ingeniería de Construcción v. 22 n.1, p. 15-22. Abril de 2007
- PAGE, C. L. *et al.* **Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes.** Cement and concrete research. V. 11, p. 395-406, 1981.
- PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- PEREIRA, L. F. L. C.; CINCOTTO, M. A. **Determinação de Cloretos em Concreto de Cimentos Portland: Influência do tipo de Cimento.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- PIAZZOLA, J.; DESPIAU, S. **Contribution of marine aerosols in the particle size distributions observed in Mediterranean coastal zone.** Atmospheric Environment. Stockolm: CBI (report 1:97), 1997.
- PONTES, R. B. **Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife – PE.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, 2006.
- PORTELLA, K. F. *et al.* **Avaliação da degradação, corrosão e sistemas de impermeabilização de estruturas de concreto armado.** Relatório final de projeto. Relatório Técnico. LACTEC, Curitiba, 2001.
- RINCÓN *et al.* **Avaliação/reabilitação de estruturas em ambientes marítimos. Caso histórico: ponte de Maracaibo.** Corros. Prot. Mater., Vol. 25 N.º 3, 2006.
- RIZZON, A. C. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de projeto de concretos moldados com cimento Portland branco.** Dissertação de mestrado. Universidade Luterana do Brasil, 2006.
- SACILOTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2005.
- SAETTA, A. V. *et al.* **Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete.** ACI Materials Journal, v. 90, n. 5, p. 441-451, 1993.
- SARRÍA, J. O. **Efecto de los parâmetros ambientales em la velocidad de corrosión del acero embebido em El hormigón. Incidencia de la fisuración Del**

- recubrimiento.** Tesis de Doctorado em Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 1997.
- SPIEL, D. E.; LEEUW, G. **Formation and production of sea spray aerosol.** J. Aerosol Sci., v. 27, s. 1, p. S65 – S66, 1996.
- SWAMY, R. N.; HAMADA, H.; LAIW, J. C. **A critical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment.** In: Proceedings of the international conference on corrosion and corrosion protection of steel in concrete. Sheffield Academic Press, 1994.
- SOMAR METEOROLOGIA. **Southern Marine Services S/S Ltda.** <http://tempogora.uol.com.br/previsaodotempovip.html/brasil/Tramandai-RS/>. Consultado entre setembro/2008 a junho/2009.
- TALAVERA, A. C. **Modelado del efecto de las acciones climáticas en la cantidad de agua en estado líquido del hormigón para la estimación de la corrosión de la armadura.** Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, España, 2005
- TANG, L.; ANDERSEN, A. **Chloride ingress data from live years field exposure in a Swedish marine environment.** In: Second International Rilem Workshop On Testing And Modelling Chloride Ingress Into Concrete. Proceeding. Paris: RILEM, 2000.
- TAVARES, R. J. M. **Influência de fatores naturais e estruturais na corrosão das estruturas de concreto armado através de íons cloreto.** Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Católica do Salvador. Orientador: Edilson Machado de Assis. 2008.
- TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. **Considerações sobre o ambiente praial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil.** Pesquisas 19 (1): 3 – 12. 1992.
- VAN DAVEER, J. R. **Techniques for evaluating reinforced concrete bridge decks.** Journal of the American Concrete Institute, v. 72, n. 12, p. 697-704, Dec. 1975.
- VIEIRA, E.; RANGEL, S. S. **Planície costeira do Rio Grande do Sul: geografia física, vegetação e dinâmica sócio-demográfica.** Porto Alegre: Sagra, p. 256, 1988.
- VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa.** Tese de doutorado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- WARNECK, P. **Chemistry of the natural atmosphere.** Academic Press, Inc. New York, 1988.
- WOLF, J. **Estudo Sobre a Durabilidade de Concretos de Alta Resistência com Adições de Microsílica.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

ZEZZA, F. MACRI, F. **Marine aerosol and stone decay.** The science of the total environment, v. 167, p. 123-143, 1995.

**APÊNDICE A – Teor de penetração de cloretos na
Estação de Monitoramento I/Tramandaí (Distância ao mar: 100 m)**

Teor de penetração de cloretos (%) na
Estação de Monitoramento I/Tramandaí (Distância ao mar: 100 m)

Tipo de cimento	Relação a/agl	Tempo de exposição	Direção dos ventos							
			NE				SO			
			Profundidade de coleta				Profundidade de coleta			
			0 mm	5 mm	15 mm	25 mm	0 mm	5 mm	15 mm	25 mm
CP IV-RS	0,45	45 dias	0,008	0,011	0,008	0,008	0,009	0,014	0,008	0,008
		105 dias	0,015	0,017	0,008	0,008	0,015	0,025	0,008	0,008
		240 dias	0,027	0,039	0,009	0,008	0,008	0,023	0,010	0,008
	0,55	45 dias	0,010	0,020	0,010	0,010	0,013	0,022	0,010	0,010
		105 dias	0,025	0,034	0,015	0,010	0,023	0,023	0,010	0,010
		240 dias	0,023	0,068	0,015	0,010	0,035	0,016	0,013	0,010
	0,65	45 dias	0,009	0,015	0,009	0,009	0,027	0,020	0,009	0,009
		105 dias	0,009	0,033	0,024	0,009	0,051	0,045	0,019	0,009
		240 dias	0,009	0,031	0,027	0,009	0,014	0,015	0,019	0,009
CP V-ARI	0,45	45 dias	0,047	0,022	0,009	0,009	0,030	0,023	0,009	0,009
		105 dias	0,055	0,016	0,009	0,009	0,034	0,012	0,009	0,009
		240 dias	0,103	0,029	0,009	0,009	0,047	0,021	0,009	0,009
	0,55	45 dias	0,042	0,036	0,011	0,011	0,033	0,021	0,011	0,011
		105 dias	0,039	0,036	0,011	0,011	0,036	0,015	0,011	0,011
		240 dias	0,048	0,034	0,014	0,012	0,055	0,026	0,002	0,011
	0,65	45 dias	0,024	0,026	0,016	0,013	0,023	0,025	0,013	0,013
		105 dias	0,022	0,048	0,015	0,013	0,022	0,032	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,034	0,034	0,015	0,016	0,031	0,020	0,016
CP V-ARI + 5% SÍLICA ATIVA	0,45	45 dias	0,050	0,024	0,009	0,009	0,030	0,015	0,009	0,009
		105 dias	0,050	0,019	0,009	0,009	0,052	0,010	0,009	0,009
		240 dias	0,085	0,026	0,011	0,009	0,058	0,019	0,009	0,009
	0,55	45 dias	0,046	0,033	0,011	0,011	0,102	0,026	0,011	0,011
		105 dias	0,053	0,034	0,014	0,011	0,034	0,028	0,011	0,011
		240 dias	0,053	0,036	0,011	0,011	0,048	0,037	0,012	0,011
	0,65	45 dias	0,013	0,027	0,013	0,013	0,028	0,030	0,013	0,013
		105 dias	0,020	0,042	0,019	0,013	0,031	0,048	0,014	0,013
		240 dias	0,013	0,032	0,024	0,013	0,013	0,030	0,025	0,013
CP V-ARI + 10% SÍLICA ATIVA	0,45	45 dias	0,056	0,026	0,009	0,009	0,044	0,016	0,009	0,009
		105 dias	0,061	0,013	0,009	0,009	0,073	0,015	0,009	0,009
		240 dias	0,085	0,027	0,009	0,009	0,116	0,022	0,009	0,009
	0,55	45 dias	0,039	0,031	0,011	0,011	0,030	0,026	0,011	0,011
		105 dias	0,048	0,041	0,017	0,011	0,026	0,031	0,011	0,011
		240 dias	0,065	0,045	0,014	0,011	0,026	0,036	0,011	0,011
	0,65	45 dias	0,015	0,024	0,013	0,013	0,038	0,048	0,013	0,013
		105 dias	0,037	0,050	0,015	0,013	0,045	0,045	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,059	0,015	0,013	0,020	0,045	0,015	0,013

Teor de penetração de cloretos (%) na
Estação de Monitoramento II/Tramandaí (Distância ao mar: 200 m)

Tipo de cimento	Relação a/c	Tempo de exposição	Direção dos ventos							
			NE				SO			
			Profundidade de coleta				Profundidade de coleta			
			0 mm	5 mm	15 mm	25 mm	0 mm	5 mm	15 mm	25 mm
CP IV-RS	0,45	45 dias	0,010	0,009	0,008	0,008	0,008	0,011	0,008	0,008
		105 dias	0,008	0,011	0,008	0,008	0,010	0,011	0,008	0,008
		240 dias	0,010	0,021	0,013	0,013	0,010	0,018	0,013	0,011
	0,55	45 dias	0,010	0,014	0,010	0,010	0,010	0,016	0,010	0,010
		105 dias	0,010	0,019	0,011	0,010	0,010	0,015	0,010	0,010
		240 dias	0,023	0,046	0,015	0,012	0,083	0,032	0,014	0,012
	0,65	45 dias	0,017	0,015	0,013	0,013	0,015	0,013	0,013	0,013
		105 dias	0,017	0,029	0,018	0,013	0,013	0,016	0,019	0,013
		240 dias	0,023	0,063	0,049	0,021	0,013	0,017	0,031	0,018
CP V-ARI	0,45	45 dias	0,029	0,024	0,009	0,009	0,027	0,017	0,009	0,009
		105 dias	0,021	0,016	0,009	0,009	0,019	0,013	0,009	0,009
		240 dias	0,026	0,021	0,013	0,010	0,037	0,020	0,013	0,010
	0,55	45 dias	0,029	0,018	0,011	0,011	0,020	0,012	0,011	0,011
		105 dias	0,030	0,014	0,011	0,011	0,020	0,012	0,011	0,011
		240 dias	0,046	0,040	0,022	0,019	0,029	0,029	0,020	0,016
	0,65	45 dias	0,026	0,018	0,013	0,013	0,013	0,015	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,022	0,017	0,013	0,013	0,018	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,031	0,028	0,020	0,015	0,046	0,028	0,018
CP V-ARI + 5% SÍLICA ATIVA	0,45	45 dias	0,031	0,012	0,009	0,009	0,016	0,009	0,009	0,009
		105 dias	0,031	0,017	0,009	0,009	0,032	0,013	0,009	0,009
		240 dias	0,056	0,029	0,014	0,012	0,032	0,019	0,012	0,012
	0,55	45 dias	0,048	0,018	0,011	0,011	0,015	0,020	0,011	0,011
		105 dias	0,037	0,018	0,014	0,011	0,017	0,016	0,011	0,011
		240 dias	0,060	0,046	0,015	0,015	0,016	0,021	0,015	0,014
	0,65	45 dias	0,025	0,026	0,013	0,013	0,020	0,015	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,021	0,013	0,013	0,013	0,023	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,031	0,017	0,024	0,013	0,028	0,024	0,019
CP V-ARI + 10% SÍLICA ATIVA	0,45	45 dias	0,044	0,016	0,009	0,009	0,018	0,014	0,009	0,009
		105 dias	0,025	0,013	0,009	0,009	0,017	0,010	0,009	0,009
		240 dias	0,040	0,021	0,018	0,016	0,033	0,025	0,019	0,015
	0,55	45 dias	0,037	0,020	0,011	0,011	0,021	0,013	0,011	0,011
		105 dias	0,024	0,014	0,011	0,011	0,023	0,017	0,011	0,011
		240 dias	0,033	0,042	0,020	0,019	0,029	0,028	0,018	0,018
	0,65	45 dias	0,035	0,026	0,013	0,013	0,027	0,020	0,013	0,013
		105 dias	0,015	0,021	0,013	0,013	0,021	0,016	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,035	0,019	0,020	0,013	0,026	0,019	0,015

Teor de penetração de cloretos (%) na
Estação de Monitoramento III/Tramandaí (Distância ao mar: 850 m)

Tipo de cimento	Relação a/c	Tempo de exposição	Direção dos ventos								
			NE				SO				
			Profundidade de coleta				Profundidade de coleta				
			0 mm	5 mm	15 mm	25 mm	0 mm	5 mm	15 mm	25 mm	
CP IV-RS	0,45	45 dias	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
		105 dias	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
		240 dias	0,008	0,011	0,009	0,009	0,008	0,011	0,011	0,010	0,010
	0,55	45 dias	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
		105 dias	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
		240 dias	0,010	0,014	0,012	0,012	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	0,65	45 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,013	0,018	0,015	0,013	0,013	0,017	0,013	0,013
CP V-ARI	0,45	45 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		105 dias	0,017	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		240 dias	0,016	0,012	0,012	0,010	0,009	0,011	0,009	0,009	0,009
	0,55	45 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		105 dias	0,012	0,012	0,011	0,011	0,012	0,015	0,011	0,011	0,011
		240 dias	0,018	0,011	0,011	0,011	0,015	0,012	0,016	0,015	0,015
	0,65	45 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,015	0,019	0,016	0,013	0,023	0,021	0,015	0,015
CP V-ARI + 5% SÍLICA ATIVA	0,45	45 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		105 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		240 dias	0,015	0,011	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
	0,55	45 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		105 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		240 dias	0,011	0,015	0,012	0,011	0,013	0,013	0,012	0,012	0,012
	0,65	45 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,018	0,020	0,017	0,013	0,021	0,019	0,013	0,013
CP V-ARI + 10% SÍLICA ATIVA	0,45	45 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		105 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		240 dias	0,016	0,010	0,009	0,009	0,018	0,012	0,009	0,009	0,009
	0,55	45 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		105 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		240 dias	0,011	0,015	0,015	0,013	0,012	0,019	0,012	0,012	0,012
	0,65	45 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		240 dias	0,031	0,038	0,019	0,019	0,013	0,023	0,017	0,015	0,015

Teor de penetração de cloretos (%) na Estação de Monitoramento IV/Tramandaí (Distância ao mar: 1850 m – distância à lagoa: 25 m)

Tipo de cimento	Relação a/c	Tempo de exposição	Direção dos ventos							
			NE				SO			
			Profundidade de coleta				Profundidade de coleta			
			0 mm	5 mm	15 mm	25 mm	0 mm	5 mm	15 mm	25 mm
CP IV-RS	0,45	45 dias	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
		105 dias	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
		240 dias	0,008	0,009	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
	0,55	45 dias	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
		105 dias	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
		240 dias	0,010	0,011	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	0,65	45 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
CP V-ARI	0,45	45 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		105 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		240 dias	0,012	0,010	0,009	0,009	0,011	0,009	0,009	0,009
	0,55	45 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		105 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		240 dias	0,013	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
	0,65	45 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,014	0,013	0,013	0,013	0,016	0,016	0,013
CP V-ARI + 5% SÍLICA ATIVA	0,45	45 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		105 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		240 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,011	0,009	0,009	0,009
	0,55	45 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		105 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		240 dias	0,012	0,013	0,011	0,011	0,015	0,020	0,011	0,011
	0,65	45 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,016	0,013	0,013	0,013	0,016	0,013	0,013
CP V-ARI + 10% SÍLICA ATIVA	0,45	45 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		105 dias	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
		240 dias	0,009	0,010	0,009	0,009	0,009	0,012	0,009	0,009
	0,55	45 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		105 dias	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
		240 dias	0,011	0,014	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
	0,65	45 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		105 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
		240 dias	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013

APÊNDICE B – Resultados de Análise de Variância e Regressão

Linear Múltipla

Resultados da Análise de Variância (ANOVA)

FONTE	SQ	GL	MQ	F calc	F crít. ($\alpha = 5\%$)	EFEITO	F crít. ($\alpha = 1\%$)
A (tipo de aglom)	0,000601	3	0,000200	2,97	2,78	significativo	4,17
B (relação a/c)	0,000481	2	0,000241	3,56	3,17	significativo	5,02
C (distância ao mar)	0,013478	3	0,004493	66,52	2,78	significativo	4,17
D (direção dos ventos)	0,000600	1	0,000600	8,89	4,02	significativo	7,13
E (prof. de medição)	0,009105	3	0,003035	44,94	2,78	significativo	4,17
AB	0,000608	6	0,000101	1,50	2,27	não significativo	3,16
AC	0,000262	9	0,000029	0,43	2,06	não significativo	2,76
AD	0,000021	3	0,000007	0,10	2,78	não significativo	4,17
AE	0,001228	9	0,000136	2,02	2,06	não significativo	2,76
BC	0,002257	6	0,000376	5,57	2,27	significativo	3,16
BD	0,000006	2	0,000003	0,04	3,17	não significativo	5,02
BE	0,007611	6	0,001269	18,78	2,27	significativo	3,16
CD	0,000484	3	0,000161	2,39	2,78	não significativo	4,17
CE	0,009977	9	0,001109	16,41	2,06	significativo	2,76
DE	0,000320	3	0,000107	1,58	2,78	não significativo	4,17
ABC	0,001798	18	0,000100	1,48	1,80	não significativo	2,29
ABD	0,000534	6	0,000089	1,32	2,27	não significativo	3,16
ABE	0,002630	18	0,000146	2,16	1,80	significativo	2,29
ACD	0,001028	9	0,000114	1,69	2,06	não significativo	2,76
ACE	0,003117	27	0,000115	1,71	1,69	significativo	2,11
ADE	0,000972	9	0,000108	1,60	2,06	não significativo	2,76
BCD	0,000156	6	0,000026	0,38	2,27	não significativo	3,16
BCE	0,007891	18	0,000438	6,49	1,80	significativo	2,29
BDE	0,000282	6	0,000047	0,70	2,27	não significativo	3,16
CDE	0,000415	9	0,000046	0,68	2,06	não significativo	2,76
ABCD	0,001012	18	0,000056	0,83	1,80	não significativo	2,29
ABCE	0,002728	54	0,000051	0,75	1,57	não significativo	1,90
ABDE	0,001050	18	0,000058	0,86	1,80	não significativo	2,29
ACDE	0,000544	27	0,000020	0,30	1,69	não significativo	2,11
BCDE	0,000408	18	0,000023	0,34	1,80	não significativo	2,29
ABCDE	0,0036473	54					
ERRO	0,0036473	54	0,00006754				
TOTAL	0,075251	383					

Resultados da Regressão Linear Múltipla

RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,6428829
R-Quadrado	0,4132985
R-quadrado ajustado	0,3959498
Erro padrão	0,0112445
Observações	384

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	11	0,0331339	0,0030122	23,82302078	0,00000000%
Resíduo	372	0,0470355	0,0001264		
Total	383	0,0801694			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>
Interseção	0,0758	0,00654	11,5864	0,000%	0,062944709	0,088676889
Variável X 1	0,0057	0,00190	2,9959	0,292%	0,001959094	0,009442625
Variável X 2	-0,0231	0,00432	-5,3364	0,000%	-0,0315832	-0,014574755
Variável X 3	-0,0413	0,00496	-8,3380	0,000%	-0,051079518	-0,031584686
Variável X 4	-0,0018	0,00077	-2,2923	2,245%	-0,003258255	-0,000249353
Variável X 5	-0,0425	0,00460	-9,2457	0,000%	-0,051577584	-0,033486268
Variável X 6	0,0151	0,00356	4,2472	0,003%	0,008122758	0,022128258
Variável X 7	0,0201	0,00355	5,6458	0,000%	0,013075272	0,027050701
Variável X 8	0,0249	0,00405	6,1448	0,000%	0,016902913	0,032811821
Variável X 9	-0,0018	0,00104	-1,6952	9,088%	-0,003826005	0,000283362
Variável X 10	-0,0008	0,00114	-0,6751	50,001%	-0,00299983	0,001466381
Variável X 11	-0,0101	0,00272	-3,7238	0,023%	-0,015485248	-0,004782794

