

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: CONSTRUÇÃO E
INFRAESTRUTURA

LAURA SILVESTRO

VALIDAÇÃO DE MODELO PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS
DE CONCRETO ARMADO: INICIAÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETOS

PORTO ALEGRE

2018

LAURA SILVESTRO

**VALIDAÇÃO DE MODELO PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS
DE CONCRETO ARMADO: INICIAÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

PORTO ALEGRE

2018

LAURA SILVESTRO

**VALIDAÇÃO DE MODELO PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS
DE CONCRETO ARMADO: INICIAÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETOS**

Esta Dissertação de Mestrado foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^ª. Dra. Denise C. C. Dal Molin

Prof. Dr. Carlos Torres Formoso

BANCA EXAMINADORA

Fernanda Macedo Pereira (Prof. Dra.) – Ulbra _____

Jairo José de Oliveira Andrade (Prof. Dr.) – PUCRS _____

Monica Regina Garcez (Prof. Dra.) – UFRGS _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Mariza e Nilson, à minha irmã Bruna e ao meu avô Valdomiro, por todo o apoio e suporte durante toda a minha vida acadêmica. Obrigada por me mostrarem a importância do estudo e pelos diversos sacrifícios feitos para me proporcionar esta oportunidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade e à CAPES e ao CNPq pela provisão da bolsa de mestrado.

À Prof^a. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin, pela orientação ao trabalho realizado. Um exemplo de pessoa e profissional a seguir.

Agradeço também ao Professor Jairo José de Oliveira de Andrade por todas as contribuições ao trabalho.

Aos demais professores e funcionários do NORIE que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Agradeço também a todos os amigos que fiz em Porto Alegre, principalmente aos meus colegas de turma.

“Na convivência, o tempo não importa. Se for um minuto, uma hora, uma vida. O que importa é o que ficou deste minuto, desta hora, desta vida. Lembra que o que importa é tudo que semeares colherás. Por isso, marca a tua passagem, deixa algo de ti, do teu minuto, da tua hora, do teu dia, da tua vida”

Mario Quintana

RESUMO

É crescente a preocupação mundial com a durabilidade e o atendimento da vida útil de projeto estabelecida pelas normativas para estruturas de concreto armado. Desta maneira, torna-se fundamental a utilização de modelos representativos dos processos de degradação para uma correta previsão da vida útil deste tipo de estrutura. Isto posto, esta pesquisa teve como objetivo a validação, com base em dados de exposição natural, do modelo para a previsão da vida útil de estruturas de concreto armado proposto por Andrade (2001). Para esta validação foram coletados dados na literatura referentes à penetração de cloretos em estruturas de concreto e foram obtidos dados experimentais da concentração de cloretos em prismas de concreto e argamassa moldados com cimento CP II – F, CP III, CP IV e CP V – ARI, com relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65, expostos por um período de 3, 2 e 1 ano, respectivamente, em ambiente protegido e desprotegido da chuva em zona de atmosfera marinha, na cidade de Vitória. Também foram avaliados os perfis de cloretos de blocos de concreto moldados com cimento CP IV, CP V, CP V + 5% SA e CP V + 10% SA e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65, que permaneceram expostos por 9 anos na cidade de Tramandaí. Paralelamente, foram avaliadas a influência do tipo de cimento, da relação a/c, da condição de exposição (protegido e desprotegido da chuva) e da adição de sílica ativa na penetração de cloretos em matrizes cimentícias, bem como a diferença desta penetração em concretos e argamassas moldados com os mesmos materiais e relações a/c. Para isto foram retiradas, dos prismas e blocos de concreto e argamassa, amostras sob a forma pulverulenta, para posterior determinação da concentração de cloretos utilizando o equipamento CL - 2000 da NDT *James Instruments*. Os resultados obtidos indicaram que o tipo de cimento que determinou maiores concentrações de cloretos foi o CP III; que prismas de concreto tendem a apresentar concentrações superiores aos de argamassa, em função da existência da zona de transição entre a pasta e o agregado graúdo. No tocante à corrosão de armaduras desencadeada por cloretos, o ambiente desprotegido mostrou-se mais danoso; a utilização de teores de sílica ativa em percentuais de 5 e 10% é eficiente na redução do ingresso de cloretos; baixas relações a/c apresentaram concentrações superficiais mais elevadas, em contrapartida, a medida que a profundidade em relação à superfície do concreto aumenta, há uma redução nestes teores. Por fim, em relação à validação do modelo de Andrade (2001) constatou-se que, para os dados com pequenos tempos de exposição, o modelo apresentou níveis de resposta similares à penetração de cloretos *in situ*, com bons resultados dentro de um faixa de variação de 35%, associados a diferenças máximas de apenas 4,6 mm entre os valores observados e calculados. Para os dados com tempos de exposição superiores, as diferenças foram expressivas, indicando a necessidade de um ajuste no sentido de melhor descrever o crescimento da concentração superficial ao longo do tempo.

Palavras-chave: Corrosão de armaduras. Cloretos. Zona de atmosfera marinha. Previsão de vida útil.

ABSTRACT

International concern about durability and service life design established by regulations is growing. Therefore, the use of representative models of degradation processes for a correct prediction of service life of reinforced concrete structures become fundamental. Moreover, this research aimed to validate, based on natural exposure data, the model for the prediction of service life of reinforced concrete structures proposed by Andrade (2001). For this validation, data were collected in the literature regarding the chloride penetration in concrete structures and experimental data were obtained in concrete and mortar prisms molded with cement CP II – F, CP III, CP IV and CP V, with w/b ratios of 0,45, 0,55 and 0,65, exposed for a period of 3, 2 and 1 year, respectively, in a rainfall protected and unprotected environment in a marine atmosphere zone, in the city of Vitória. The profiles of concrete blocks molded with cement CP IV, CP V, CP V + 5% SA and CP V + 10% SA, and w/b ratios of 0,45, 0,55 and 0,65, who remained exposed for 9 years in the city of Tramandaí, were also evaluated. At the same time, were evaluated the influence: of the cement type, the w/b ratio, the exposure condition (protected and unprotected from rainfall) and the addition of silica fume in chloride penetration in cementitious matrixes, as well as the difference of this penetration in concretes and mortars molded with the same materials and w/b ratios. For this purpose, pulverulent samples were removed from the prisms and blocks of concrete and mortar for further determination of chloride concentration using the CL – 2000 equipment of the NDT James Instruments. The results indicated the type of cement with highest chloride concentrations was CP III; that concrete prisms tend to have higher concentration than mortar, due to the exist of the transition zone between the past and the coarse aggregate; with regard to corrosion triggered by chlorides the unprotected environment is more damaging; the use of silica fume in percentages of 5 and 10% is efficient to reduce the chloride ingress; low w/b ratios showed higher surface concentration, in contrast, as the depth in relation to the concrete surface increases, there is a reduction in theses contents. Finally, in relation to the validation of Andrade's model (2001), it was found that, for data with small exposure times, the model showed similar response levels to chloride penetration in situ, with good results within a range of variation of 35%, associated with maximum differences of only 4,6 mm between the observed and calculated values. For the data with longer exposure times, the differences were expressive, indicating the need for an adjustment in order to best describe the growth of the surface concentration over time.

Keywords: Corrosion in reinforced concrete. Chlorides. Marine atmosphere zone. Service life prediction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Efeito da relação a/c na profundidade de penetração de concretos de cimento Portland expostos em ambiente marinho por 2, 3, 4, 5, 7 e 10 anos.....	26
Figura 2 - Perfis de cloretos para concretos com relação a/c de 0,50, 0,57 e 0,65 expostos por 18 meses em atmosfera marinha.....	27
Figura 3 – Perfil da penetração de cloretos em concretos com diversos teores de substituição de cinza volante, expostos em ambiente marinho por um período de 7 anos	30
Figura 4 - Evolução no tempo da concentração superficial de cloretos para diferentes tipos de concreto e condições de exposição.....	33
Figura 5 - Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar	35
Figura 6 - Deposição de cloretos em dispositivos de vela úmida localizados a distâncias de 10 m, 100 m, 200 m, 500 m e 1.100 m do mar.....	36
Figura 7 - Isolinhas da taxa de deposição de cloretos (mg/m ² .dia) para a cidade de Maceió ..	38
Figura 8 - Variação do coeficiente de difusão de argamassas de cimento Portland e relação a/c=0,5 em função da umidade relativa do ambiente	39
Figura 9 - Perfil de cloretos no concreto a diferentes temperaturas	41
Figura 10 - Mudanças na liberação de cloretos em pastas com cimento Portland, adições de 10% de sílica ativa e 50% de escória de alto forno, com relações a/c de 0,32 e faixas de temperatura de (a) 0 - 20 °C e (b) 20 - 40 °C	42
Figura 11 - Perfil da concentração de cloretos em pontos com diferentes alturas e profundidades na ponte sobre o Lago Maracaibo	43
Figura 12 - Modelos para previsão de vida útil que consideram a despassivação das armaduras por cloretos	55
Figura 13 - Etapas que constituem a pesquisa.....	69
Figura 14 - Etapas do programa experimental.....	71
Figura 15 - Configurações dos prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória.....	73
Figura 16 – Prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória (a) em local externo protegido da chuva; (b) em local externo desprotegido da chuva	74
Figura 17 – Procedimento padrão para determinação da profundidade de carbonatação (a) quebra do prisma na prensa; (b) prisma fatiado; (c) fatias dos prismas; (d) aspersão de fenolftaleínas nas fatias dos prismas	75

Figura 18 - Curva granulométrica do agregado miúdo e os limites superiores e inferiores das zonas utilizável e ótima estabelecidas pela ABNT NBR 7211:2009	77
Figura 19 - Curva granulométrica do agregado graúdo e os limites superior e inferior estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2009 para a zona granulométrica 9,5/25	78
Figura 20 - Diagrama de dosagem para os concretos aos 28 dias	80
Figura 21 - Diagrama de dosagem para as argamassas aos 28 dias	83
Figura 22 - Mapa com a localização das estações de monitoramento e meteorológica em Vitória	85
Figura 23 -Pontos de perfuração das fatias dos primas de concreto e argamassa	86
Figura 24 - Desenho esquemático dos intervalos de profundidade em que as amostras foram coletadas	86
Figura 25 - Etiqueta padrão para a identificação das amostras retiradas dos prismas de concreto e argamassa.....	87
Figura 26 – Etapas do procedimento para determinação do teor de cloretos	89
Figura 27 - Etapas do programa experimental.....	90
Figura 28 - Mapa com a localização das estações de monitoramento e meteorológica em Tramandaí.....	92
Figura 29 - Reticulado para extração das amostras	93
Figura 30 - Precipitação acumulada mensal da estação de monitoramento localizada em Vitória	97
Figura 31 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos das argamassas moldadas com relação $a/c=0,45$, expostas em ambiente desprotegido da chuva	101
Figura 32 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos das argamassas moldadas com relação $a/c=0,55$, expostas em ambiente desprotegido da chuva	102
Figura 33 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 1 ano das argamassas moldadas com relação $a/c=0,65$, expostas em ambiente desprotegido da chuva	102
Figura 34 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com relação $a/c=0,45$, expostos em ambiente desprotegido da chuva	103
Figura 35 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos dos concretos moldados com relação $a/c=0,55$, expostos em ambiente desprotegido da chuva	103
Figura 36 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 1 ano dos concretos moldados com relação $a/c=0,65$, expostos em ambiente desprotegido da chuva	103

Figura 37 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos do concreto e argamassa moldados com cimento CP III e relação $a/c=0,45$, expostos em ambiente desprotegido da chuva	108
Figura 38 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos do concreto e argamassa moldados com cimento CP III e relação $a/c=0,55$, expostos em ambiente desprotegido da chuva	108
Figura 39 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 1 ano do concreto e argamassa moldados com cimento CP III e relação $a/c=0,65$, expostos em ambiente desprotegido da chuva	108
Figura 40 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos das argamassas moldadas com cimento CP III e relação $a/c = 0,45$, expostas em ambiente desprotegido e protegido da chuva	111
Figura 41 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos das argamassas moldadas com cimento CP III e relação $a/c = 0,55$, expostas em ambiente desprotegido e protegido da chuva	111
Figura 42 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 1 ano das argamassas moldadas com cimento CP III e relação $a/c = 0,65$, expostas em ambiente desprotegido e protegido da chuva	112
Figura 43 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com cimento CP II – F e relação $a/c = 0,45$, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva	113
Figura 44- Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com cimento CP III e relação $a/c = 0,45$, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva	113
Figura 45 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com cimento CP IV e relação $a/c = 0,45$, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva	114
Figura 46 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com cimento CP V - ARI e relação $a/c = 0,45$, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva.....	114
Figura 47 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos dos concretos moldados com cimento CP IV e relação $a/c = 0,55$, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva	115

Figura 48 – Decréscimo na concentração superficial de cloretos	116
Figura 49 – Variação ao longo do tempo da concentração superficial de cloretos das argamassas moldadas com cimento CP II – F e relação $a/c = 0,45$, que permaneceram em ambiente desprotegido e protegido da chuva	117
Figura 50 – Variação ao longo do tempo da concentração superficial de cloretos dos concretos moldados com cimento CP II – F e relação $a/c = 0,45$, que permaneceram em ambiente desprotegido e protegido da chuva	117
Figura 51- Precipitação acumulada mensal da estação meteorológica localizada em Tramandaí	119
Figura 52- Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com relação $a/c=0,45$	121
Figura 53 - Perfis de cloretos na com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com relação $a/c=0,55$	121
Figura 54 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com relação $a/c=0,65$	121
Figura 55 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com cimento CP IV	124
Figura 56 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com cimento CP V - ARI	124
Figura 57 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com cimento CP V – ARI e adição de 5% de sílica ativa	124
Figura 58 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com cimento CP V – ARI e adição de 10% de sílica ativa	125
Figura 59 - Perfil de cloretos dos dados de Vitali (2013) e ajuste com base na 2ª Lei de Fick	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação do coeficiente de difusão ao longo do tempo	25
Tabela 2 - Concentração de cloretos livres para os teores de C ₃ A de 2,43%, 9,1% e 14%	28
Tabela 3 - Valores de coeficiente de difusão efetivo em função do grau de saturação	32
Tabela 4 - Teor de Cl permitido no concreto armado de acordo com diversas normativas	45
Tabela 5 - Teor de Cl permitido no concreto protendido de acordo com diversas normativas	46
Tabela 6 - Vida útil de projeto mínima estabelecida por diversas normativas	47
Tabela 7 - Valores de <i>DRCM</i> , 0 para diversas combinações de tipo de cimento e relação a/c	50
Tabela 8- Concentração de cloretos na superfície do concreto (kg/m ³)	53
Tabela 9 - Parâmetros de entrada de alguns modelos para previsão de vida útil de estruturas de concreto	54
Tabela 10 - Valores da constante c em função da % de adições no cimento	61
Tabela 11 - Valores da constante K1 em função da temperatura (T)	61
Tabela 12 - Valores da constante K2 em função da umidade relativa (UR)	61
Tabela 13 - Valores do parâmetro d em função da relação r (relação entre a concentração crítica = 0,4% em relação à massa de cimento e a concentração superficial de cloretos)	61
Tabela 14 - Valores de K1 em função do tipo de cimento	63
Tabela 15 - Valores de K2 em função do tipo de adição	63
Tabela 16 - Valores de <i>kCl</i> para distintas condições de exposição da norma EN 206-1 (2007)	65
Tabela 17 - Parâmetros de entrada de alguns modelos existentes na literatura para previsão de vida útil de estruturas de concreto	66
Tabela 18 - Vantagens e desvantagens de alguns modelos existentes na literatura para previsão de vida útil de estruturas de concreto	68
Tabela 19 - Intervalo de exposição dos prismas de concreto e argamassa	73
Tabela 20 - Caracterização química dos cimentos e exigências normativas	76
Tabela 21 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo	76
Tabela 22 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo	77
Tabela 23 – Dosagem e quantidade de materiais para os concretos com cimento CP II - F	78
Tabela 24 - Dosagem e quantidade de materiais para os concretos com cimento CP III	79
Tabela 25 - Dosagem e quantidade de materiais para os concretos com cimento CP IV	79
Tabela 26 - Dosagem e quantidade de materiais para os concretos com cimento CP V - ARI79	

Tabela 27 - Dosagem e quantidade de materiais para as argamassas com cimento CP II - F..	82
Tabela 28 - Dosagem e quantidade de materiais para as argamassas com cimento CP III.....	82
Tabela 29 - Dosagem e quantidade de materiais para as argamassas com cimento CP IV.....	82
Tabela 30 - Dosagem e quantidade de materiais para as argamassas com cimento CP V - ARI	82
Tabela 31 - Localização da estação de monitoramento de Vitória.....	84
Tabela 32 - Estação meteorológica que forneceu os dados para a caracterização ambiental de Vitória.....	84
Tabela 33 - Localização da estação de monitoramento de Tramandaí.....	91
Tabela 34 - Estação meteorológica que forneceu os dados para a caracterização ambiental de Tramandaí.....	91
Tabela 35 - Resistência à compressão média dos concretos usados nesta pesquisa.....	96
Tabela 36 - Resistência à compressão média das argamassas usados nesta pesquisa.....	97
Tabela 37 - Análise estatística das configurações com relação $a/c = 0,45$	99
Tabela 38 - Análise estatística das configurações com relação $a/c = 0,55$	100
Tabela 39 - Análise estatística das configurações com relação $a/c = 0,65$	100
Tabela 40 - Resultados da resistência à compressão axial	118
Tabela 41 - Caracterização ambiental das estações de monitoramento localizadas em Tramandaí	119
Tabela 42 - Análise estatística dos dados de concentração de cloretos dos blocos de concreto expostos em Tramandaí por um período de 9 anos	120
Tabela 43 - Profundidade da concentração crítica de cloretos medida e calculada pelo modelo de Andrade (2001).....	128

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul

Fib – International Federation for Structural Concrete

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

GOAMet – Estação Meteorológica do Gaturamo Observatório Astronômico

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

JSCE – Japan Society of Civil Engineers

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a/c – Relação água/cimento

$CaCO_3$ – Carbonato de cálcio

C_3A – Aluminato tricálcico

C_4AF – Aluminato tetracálcico

C_2S – Silicato dicálcico

C_3S – Silicato tricálcico

C_s – Concentração superficial de cloretos

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

CP's – Corpos de prova

CP II - F – Cimento Portland Composto com Fíler

CP III – Cimento Portland de Alto-forno

CP IV – Cimento Portland Pozolânico

CP V – ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

D – Coeficiente de Difusão

f_{ck} – Resistência à Compressão Característica

$Mg(OH)_2$ – Hidróxido de Magnésio

Sal de Friedel - $C_3A.CaCl_2.10H_2O$

T – Temperatura

UR – Umidade Relativa

ZAM – Zona de Atmosfera Marinha

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	19
1.2. OBJETIVOS	22
1.2.1. Objetivo Geral	22
1.2.2. Objetivos Específicos	22
1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA	22
2. FATORES INTERVENIENTES NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	24
2.1. FATORES INTRÍNSECOS.....	24
2.1.1. Coeficiente de difusão	24
2.1.2. Relação a/c.....	25
2.1.3. Tipos de cimento	27
2.1.4. Adições minerais	29
2.1.5. Grau de saturação do concreto.....	31
2.2. FATORES EXTRÍNSECOS.....	32
2.2.1. Concentração superficial de cloretos	32
2.2.2. Distância horizontal em relação ao mar	34
2.2.3. Umidade relativa.....	38
2.2.4. Precipitação	39
2.2.5. Temperatura.....	40
2.2.6. Altura.....	42
2.2.7. Velocidade e direção dos ventos	43
3. COMPARATIVO ENTRE NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS NO QUE TANGE À CORROSÃO DE ARMADURAS EM AMBIENTES COM CLORETOS.....	45
3.1. TEOR CRÍTICO DE ÍONS CLORETO.....	45

3.2. VIDA ÚTIL DE PROJETO.....	47
3.3. MODELAGEM DA DESPASSIVAÇÃO DE ARMADURAS POR CLORETOS	48
3.3.1. Fib 34 (2006)	48
3.3.2. ACI 365.1R-00	50
3.3.3. JSCE N° 15 (2007)	51
3.3.4. Considerações finais sobre os modelos das normativas	53
4. MODELOS PARA A PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO QUE CONSIDERAM A INICIAÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETOS.....	55
4.1. LEIS DE FICK	56
4.2. MODELO DE UJI, MATSUOKA E MARUYA (1990)	58
4.3. MODELO DE TANG E NILSSON (1996).....	59
4.4. MODELO DE BOB (1996).....	60
4.5. MODELO DE ANDRADE (2001)	62
4.6. MODELO DE ANDRADE <i>et al.</i> (2009)	64
4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS MODELOS	66
5. MATERIAIS E MÉTODOS	69
5.1. COLETA DE DADOS NA LITERATURA	69
5.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	70
5.2.1 Prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória - ES	70
5.2.2. Blocos de concreto expostos em Tramandaí - RS	90
5.3. VALIDAÇÃO DO MODELO DE ANDRADE (2001).....	93
6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
6.1. COLETA DE DADOS NA LITERATURA.....	95
6.2. PRISMAS DE CONCRETO E ARGAMASSA EXPOSTOS EM VITÓRIA - ES ..	96
6.2.1. Caracterização dos concretos e argamassas.....	96
6.2.2. Caracterização ambiental da estação de monitoramento.....	97

6.2.3. Penetração de cloretos	98
6.3. BLOCOS DE CONCRETO EXPOSTOS EM TRAMANDAÍ - RS	118
6.3.1. Caracterização dos concretos.....	118
6.3.2. Caracterização ambiental da estação de monitoramento	118
6.3.3. Penetração de cloretos	119
6.4. VALIDAÇÃO DO MODELO DE ANDRADE (2001)	126
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	131
7.1. CONCLUSÕES	131
7.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	132
8. REFERÊNCIAS	134
ANEXO A – DADOS DA LITERATURA – PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	145
ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE VITÓRIA – ES.....	152
APÊNDICE A – PERFIS DE CLORETOS DOS PRISMAS DE VITÓRIA	153
APÊNDICE B – PERFIS DE CLORETOS DOS CONCRETO EXPOSTOS EM TRAMANDAÍ.....	157
APÊNDICE C – VALIDAÇÃO DO MODELO DE ANDRADE (2001)	158

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, principalmente devido a sua versatilidade e custo relativamente baixo (SHI *et al.*, 2012). A capacidade deste material de resistir à ação de intemperismos, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração é denominada durabilidade (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2016), a qual é definida em função de três fatores principais, sendo estes: os materiais constituintes, as etapas de projeto, construção e manutenção da estrutura e as condições ambientais de exposição (APOSTOLOPOULOS; PAPADAKIS, 2008).

Frente aos problemas de degradação observados no concreto, é crescente a preocupação mundial com a durabilidade e extensão da vida útil de estruturas constituídas por este material. Isto deve-se principalmente ao fato de que os custos com reparos e substituições destas estruturas vem se tornando cada vez mais significativos. Estima-se que em países desenvolvidos cerca de 40% dos recursos investidos na indústria da construção são aplicados no reparo e manutenção de estruturas existentes (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em 2004, países como a Inglaterra, França e Alemanha gastaram com manutenções e reparos aproximadamente 50% do total investido na construção (UEDA; TAKEWAKA, 2007). Cita-se ainda que nos Estados Unidos os custos anuais associados à corrosão metálica representam 3,1% do produto interno bruto do país, o que corresponde a um valor de 276 bilhões de dólares. Deste total, 22,6 bilhões são destinados ao setor de infraestrutura, sendo que 37% deste valor é referente aos custos com corrosão das pontes do sistema de transportes americano (GERHARDUS *et al.*, 2002).

Aliado a isto, as normativas (FIB 34, 2006; EUROCODE 2, 2005; AS 4997, 2005; ABNT NBR 15575:2013) também estão mais exigentes no que se refere à construção de estruturas de concreto mais duráveis, estabelecendo parâmetros mínimos de desempenho ligados à durabilidade, usualmente mensurados através da vida útil, que corresponde ao período de tempo compreendido entre o início da operação e uso de uma edificação até o momento que ela deixa de atender sua finalidade. Neste contexto, o critério de desempenho referente à durabilidade, estabelecido pela norma ABNT NBR 15575 (2013), determina uma vida útil de projeto mínima de 50 anos para os sistemas estruturais de edificações habitacionais, entretanto não fornece modelos de previsão para estimativa da vida útil destes sistemas.

Dentre os mecanismos de degradação que afetam a vida útil das estruturas de concreto armado, a corrosão de armaduras é um dos mais frequentes (BRANDÃO, 2007; MILANI; KRIPKA, 2012; SILVA; CABRAL, 2014; MUTHULINGAM; RAO, 2015; PINTAN *et al.*, 2015; WEERDT *et al.*, 2016), sendo responsável por grande parte dos danos nestas estruturas. Estes danos manifestam-se na forma de manchas superficiais, seguidas por fissuras, destacamento do concreto de cobrimento, redução da seção e perda de aderência das armaduras principais (RIBEIRO *et al.*, 2014), podendo levar a um comprometimento da segurança estrutural ao longo do tempo (SHODJA; KIANI; HASHEMIAN, 2010). Choi *et al.* (2014) citam que os produtos formados no processo corrosivo são expansivos e induzem a um aumento das tensões no interior do concreto, resultando na sua deterioração, o que contribui para uma drástica redução da vida útil destas estruturas.

A problemática de degradação de estruturas de concreto armado devido à corrosão de armaduras desperta maior preocupação em regiões costeiras, em razão da elevada agressividade deste ambiente provocada pela presença de cloretos. Como agravante, a extensão da costa brasileira é de 7.367 km (IBGE, 2017) e muitas das capitais brasileiras estão ali localizadas, tais como Fortaleza, Natal, João Pessoa, Recife, Maceió, Salvador, Vitória, Rio de Janeiro e Florianópolis (ROMANO, 2009).

Em grande parte dos estudos que avaliam o comportamento do concreto armado frente à ação de cloretos, o processo corrosivo é acelerado aplicando-se uma corrente externa (TORRES-ACOSTA; NAVARRO-GUTIERREZ; TERÁN-GUILLÉN, 2007; YILDIRIM; ILICA; SENGUL, 2011; SPIESZ; BROUWERS, 2013; OTIENO; BEUSHAUSEN; ALEXANDER, 2014), adicionando substâncias como o CaCl_2 ou o NaCl na mistura do concreto (PRUCKNER; GJORV, 2004; OH; JANG, 2005; XU *et al.*, 2011; LIU *et al.*, 2016) ou através de ciclos de molhagem e secagem com solução de NaCl , uma vez que não se dispõe do tempo necessário para que o fenômeno ocorra de forma natural. Estes ensaios acelerados recebem inúmeras críticas porque são caracterizados pela aplicação de condições bastante agressivas, que visam minimizar o tempo para a obtenção dos resultados e que usualmente não condizem com as reais condições de exposição ao fenômeno natural. Normalmente, são utilizados para analisar comparativamente o desempenho de diferentes materiais e, como são aplicadas condições para acelerar o processo corrosivo, torna-se difícil utilizá-los para a previsão da vida útil de estruturas reais. Paralelamente, alguns estudos vêm sendo realizados em ambientes marítimos, com condições de exposição naturais (CHALEE; JATURAPITAKKUL; CHINDAPRASIRT, 2009; VALIPOUR *et al.*, 2013; DASAR *et al.*, 2017; MARIC *et al.*, 2017). Estes estudos são considerados mais adequados para avaliar a

penetração de íons cloreto no concreto e para a previsão de vida útil deste tipo de estrutura, apesar de demandarem períodos de exposição superiores aos necessários em ensaios acelerados.

O mecanismo de corrosão de armaduras pode ser representado através do modelo proposto por Tuutti (1982), o qual subdivide o processo corrosivo nas etapas de iniciação e propagação. O período de iniciação, correspondente à vida útil da estrutura, é definido como o tempo em que os agentes agressivos levam para atravessar o revestimento, atingir a armadura e provocar a sua despassivação. Já o período de propagação corresponde ao tempo necessário para a deterioração evoluir até atingir um limite aceitável de dano. Desta forma, parte-se do pressuposto de que, para a previsão da vida útil de estruturas de concreto, tem-se a necessidade de um modelo representativo da degradação que, no caso desta pesquisa, está associado ao período de iniciação da corrosão de armaduras.

Neste contexto, existem diversos modelos na literatura para a estimativa da vida útil de estruturas de concreto em relação à corrosão de armaduras desencadeada por cloretos (CLEAR; HAY, 1973; UJI; MATSUOKA; MARUYA, 1990; TANG; NILSSON, 1996; MEJLBRO, 1996; BOB, 1996; ANDRADE, 2001; SUGIYAMA; RITTHICHAUY; TSUJI, 2008; ANDRADE *et al.*, 2009; ANACTA, 2009; MAZER, 2009; MARSAVINA *et al.*, 2009; DU; JIN; MA, 2014). Entretanto, a grande maioria dos modelos supracitados são complexos e de baixa aplicabilidade prática e muitos demandam dados de entrada que usualmente são determinados através de ensaios laboratoriais, como o coeficiente de difusão, que normalmente é obtido através de ensaios acelerados.

Neste âmbito, destaca-se o modelo para a previsão de vida útil de estruturas de concreto proposto por Andrade (2001), que possui dados de entrada simples e de fácil obtenção. Este modelo foi obtido através de um experimento em grupos focais realizado com especialistas da área de Durabilidade das Estruturas e Tecnologia dos Materiais. Em 2001, quando Andrade publicou seu trabalho, existiam poucos dados de campo disponíveis para a validação de seu modelo. Desta maneira, ainda é necessário realizar a análise da aplicação do mesmo em diferentes estruturas, a fim de validá-lo com base no maior número de combinações possíveis.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é validar, com base em dados de exposição natural, o modelo para previsão de vida útil de estruturas de concreto armado que considera a iniciação da corrosão por cloretos proposto por Andrade (2001).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento dos diferentes tipos de cimentos utilizados no mercado nacional (CP II – F, CP III, CP IV e CP V-ARI) em relação à penetração de cloretos em prismas de concreto e argamassa expostos em atmosfera marinha;
- avaliar a diferença na penetração de cloretos em concretos e argamassas moldados com os mesmos materiais e relações a/c;
- verificar a penetração de cloretos em concretos e argamassas expostos em atmosfera marinha em diferentes idades;
- investigar a influência do ambiente de exposição (protegido e desprotegido da chuva) na penetração de cloretos em concretos e argamassas;
- avaliar a influência da adição de sílica ativa na penetração de cloretos em concretos;
- verificar o efeito da relação água/cimento na penetração de cloretos em concretos.

1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa é composta por sete capítulos. No primeiro capítulo são apresentados o contexto e a justificativa deste estudo, bem como seus objetivos.

Nos capítulos dois, três e quatro é realizada uma revisão de literatura, a qual aborda assuntos de interesse desta pesquisa, como os fatores intervenientes na penetração de cloretos em estruturas de concreto armado; um comparativo entre normas nacionais e internacionais no que diz respeito ao teor de cloretos permitido, à vida útil de projeto mínima estabelecida e uma análise para verificar quais destas normas e recomendações técnicas fornecem equações para a modelagem do ingresso de cloretos e, por fim, modelos de previsão de vida útil que consideram a iniciação da corrosão por cloretos

O quinto capítulo contempla a metodologia utilizada. São explorados e descritos os métodos e procedimentos utilizados.

No sexto capítulo são apresentados os resultados da caracterização dos concretos e argamassas utilizados para a moldagem dos prismas expostos em Vitória e dos concretos dos blocos expostos em Tramandaí, a caracterização ambiental dos locais de exposição destes materiais, bem como os dados encontrados na literatura referentes à penetração de cloretos em estruturas de concreto. Também foram discutidos aspectos relacionados aos fatores intervenientes na penetração de cloretos avaliados nesta pesquisa e foi realizada a validação do modelo de Andrade (2001).

No sétimo capítulo são apresentadas as principais conclusões a respeito do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

2. FATORES INTERVENIENTES NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Os fatores intervenientes na penetração de cloretos em estruturas de concreto armado podem ser classificados em dois grupos: intrínsecos e extrínsecos. Os fatores intrínsecos são aqueles relacionados às características da matriz cimentícia. Já os fatores extrínsecos são aqueles associados às condições de exposição da estrutura e do meio ambiente que a circunda. Nos subitens a seguir alguns destes fatores serão abordados com maiores detalhes.

2.1. FATORES INTRÍNSECOS

2.1.1. Coeficiente de difusão

A difusão é o mecanismo de transporte predominante dos íons cloretos no concreto. É função da diferença de concentração de cloretos entre duas zonas e ocorre da região de maior concentração para a região de menor concentração (POULSEN; MEJLBRO, 2006). Isto posto, o coeficiente de difusão (D) é considerado um indicador que mede a intensidade de penetração de cloretos no concreto por difusão (ver item 4.1. *Leis de Fick*). No geral, depende de muitos fatores como o tempo, condições de exposição e composição do concreto (POULSEN; MEJLBRO, 2006). Helene (1993) destaca que além das características do material, o coeficiente de difusão também depende da natureza do íon que se difunde.

É um parâmetro que diminui ao longo do tempo (NOKKEN *et al.*, 2006; AUDENAERT; YUAN; SCHUTTER, 2010; SUN; LIANG; CHANG, 2012; MEDEIROS JUNIOR *et al.*, 2015). De acordo com Costa e Appleton (1999a) este comportamento é função de três efeitos principais:

- hidratação do cimento, que leva a uma redução da porosidade do concreto e, conseqüentemente, uma redução do coeficiente de difusão. Esse efeito tem influência particular nas primeiras idades do concreto;
- formação de uma camada de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$) que colmatam os poros da região superficial do concreto e reduzem o ingresso de cloretos;
- reação entre o aluminato tricálcico (C_3A), produto da hidratação do cimento, e os íons cloreto formando cloroaluminato de cálcio, também conhecido como sal de Friedel.

Esta tendência de redução do coeficiente de difusão ao longo do tempo pode ser verificada nos resultados obtidos por Thomas e Matthews (2004) apresentados na Tabela 1. Os autores avaliaram o coeficiente de difusão de concretos com níveis de resistência à compressão nominais de 25, 35 e 45 MPa e diferentes porcentagens de cinza volante, de 0, 15, 30 e 50%, que foram expostos em zona de variação de maré no estuário do Tâmis na cidade de Shoeburyness, por um período de 10 anos.

Tabela 1 – Variação do coeficiente de difusão ao longo do tempo

Nível de Resistência	Porcentagem de Cinza Volante	Coeficiente de Difusão (10E-13 m ² /s)		
		2 anos	4 anos	10 anos
C25	0	153,0	162,0	-
	15	33,6	23,9	9,9
	30	33,4	16,7	5,5
	50	24,6	24,8	4,2
C35	0	92,9	56,6	-
	15	29,2	14,8	9,1
	30	16,0	10,9	4,5
	50	19,8	9,4	3,5
C45	0	44,7	63,9	-
	15	18,3	13,0	5,4
	30	14,4	5,8	2,0
	50	14,5	8,5	2,0

Fonte: Thomas e Matthews (2004), adaptada pela autora

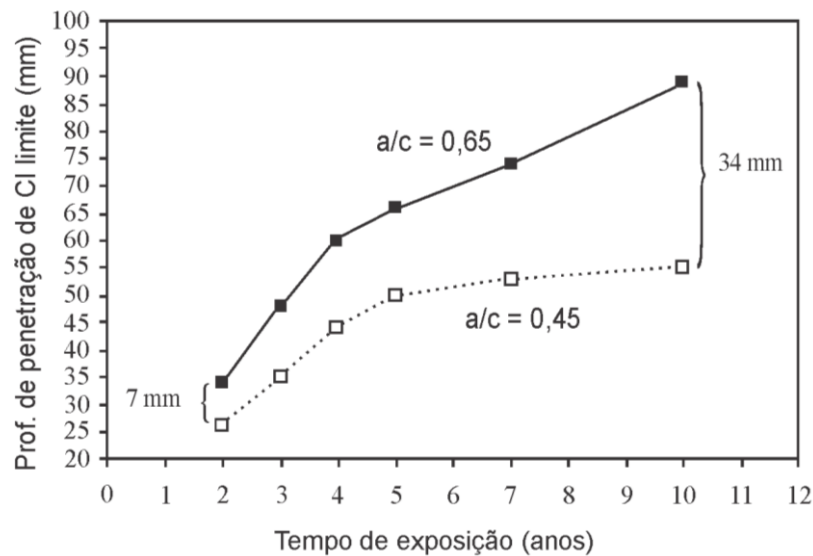
2.1.2. Relação a/c

A relação a/c é um dos parâmetros mais significativos no contexto de durabilidade de estruturas de concreto armado, pelo fato de estar relacionada com a porosidade da matriz cimentícia e, conseqüentemente, associada à penetração de agentes agressivos para o interior do concreto. Concretos com baixa relação a/c dificultam o ingresso de cloretos, uma vez que estes íons precisam se difundir por caminhos mais tortuosos e desconectados (SACILOTO, 2005). Diversos pesquisadores observaram um acréscimo na penetração de cloretos com o aumento da relação a/c (PECH-CANUL; CASTRO, 2002; CHALEE *et al.*, 2007; MEIRA *et al.*, 2010).

Cheewaket, Jaturapitakkul e Chalee (2012) avaliaram a profundidade de penetração de cloretos em corpos de prova de concreto de cimento Portland e relação a/c de 0,45 e 0,65, que foram expostos por 10 anos em região de variação de maré no Golfo da Tailândia. Na Figura 1 são apresentados os resultados obtidos pelos autores. Os mesmos evidenciam que a

relação a/c tem um grande efeito na profundidade de penetração dos cloretos em concretos. Para um tempo de exposição de 2 anos, a configuração com relação a/c = 0,45 apresentou uma profundidade de penetração associada à concentração de cloretos limite 7 mm inferior em comparação à configuração de relação a/c=0,65. Para um tempo de exposição de 10 anos esse valor foi 34 mm inferior.

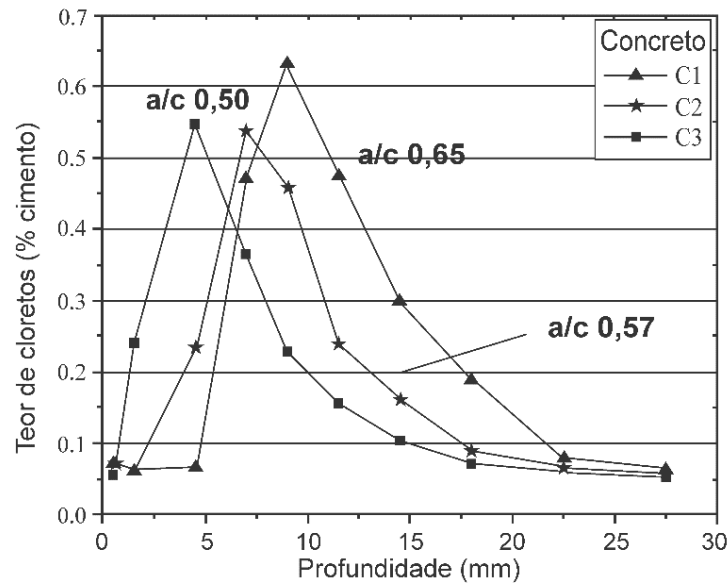
Figura 1 - Efeito da relação a/c na profundidade de penetração de concretos de cimento Portland expostos em ambiente marinho por 2, 3, 4, 5, 7 e 10 anos



Fonte: Cheewaket, Jaturapitakkul e Chalee (2012), adaptada pela autora

Meira *et al.* (2007) também encontraram comportamento semelhante. Os autores avaliaram a concentração de cloretos em concretos moldados com cimento CP IV e relações a/c de 0,50, 0,57 e 0,65 que foram expostos por um período de 18 meses em zona de atmosfera marinha, afastados 10 metros do mar. Através da Figura 2, que apresenta os resultados encontrados pelos autores anteriormente citados, é possível verificar a influência da relação a/c na penetração de cloretos. O concreto com a maior relação a/c (0,65) apresentou um maior pico de concentração de cloretos e uma maior profundidade de penetração associada a este pico.

Figura 2 - Perfis de cloretos para concretos com relação a/c de 0,50, 0,57 e 0,65 expostos por 18 meses em atmosfera marinha



Fonte: Meira *et al.* (2007), adaptada pela autora

Entretanto, Cheewaket, Jaturapitakkul e Chalee (2012) destacam que a relação a/c tem um maior efeito na redução da penetração de cloretos em concretos com apenas cimento Portland do que em concretos com adição de cinza volante. Tais autores observaram que a redução da relação a/c de 0,65 para 0,45 em concretos com teor de substituição de cinza volante em relação à massa de cimento de 0%, 15% e 50%, expostos em ambiente marinho por 10 anos, resultou na redução da profundidade do teor de cloretos crítico em 34 mm, 22 mm e 10 mm, respectivamente. Os autores acreditam que esses resultados são explicados pelo fato de que as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com apenas cimento Portland são basicamente dependentes da relação a/c, enquanto que as propriedades de concretos com cinza volante não dependem somente da relação a/c, mas também das características físicas e químicas deste tipo de adição.

2.1.3. Tipos de cimento

Os cloretos encontram-se presentes no concreto de três formas: quimicamente ligados ao aluminato tricálcico (C_3A) ou ao ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), formando o cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel ($C_3A.CaCl_2.10H_2O$) e o cloroferrato de cálcio hidratado; adsorvidos fisicamente na estrutura do C-S-H; e sob a forma de íons livres. Apenas os cloretos na forma de íons livres são responsáveis pela despassivação das armaduras e

ocasionam prejuízos à durabilidade das estruturas de concreto armado (MOHAMMED; HAMADA, 2003; RIBEIRO *et al.*, 2014).

Diversos estudos que investigaram a interação entre os cloretos e os constituintes do cimento apontam que quanto maior o teor de C_3A maior a capacidade de fixação de cloretos de um cimento (OH; JANG, 2005; YUAN *et al.*, 2009a). Rasheeduzzafar, Hussain e Al-Saadoun (1991) avaliaram o efeito do teor de C_3A na capacidade de fixação de cloretos em pastas de cimento com percentuais de C_3A de 2,43%, 9,1% e 14%. Os resultados encontrados pelos pesquisadores para uma concentração de 0,5% de cloreto são apresentados na Tabela 2. Os cimentos com teores de C_3A mais elevados fixaram uma maior quantidade de cloretos, reduzindo assim a concentração destes íons nos poros. De acordo com Enevoldsen e Hansson (1994), outro aspecto que deve ser levado em consideração, e que influencia a reação entre estes íons e o C_3A , é o teor de gipsita utilizado no cimento, uma vez que o C_3A reage preferencialmente com os sulfatos e não com os cloretos.

Tabela 2 - Concentração de cloretos livres para os teores de C_3A de 2,43%, 9,1% e 14%

Teor de C_3A	Concentração de cloretos livres
2,43%	62,00%
9,10%	40,00%
14,00%	16,00%

Fonte: Rasheeduzzafar, Hussain e Saadoun (1991), adaptada pela autora

Cabe citar que durante a vida útil das estruturas de concreto pode ocorrer uma conversão dos cloretos ligados na forma de sal de Friedel em íons livres. Sabe-se que a estabilidade do sal de Friedel é dependente do pH do concreto, e que pequenas reduções do pH são suficientes para a liberação dos cloretos ligados (REDDY *et al.*, 2002). Desta forma, a carbonatação, responsável pela redução do pH do concreto, pode ocasionar essa conversão de cloretos ligados em cloretos livres, contribuindo para o processo corrosivo. Para Zhu *et al.* (2016a), durante a carbonatação, o sal de Friedel reage com o dióxido de carbono liberando íons cloreto na solução dos poros, o que aumenta significativamente a concentração de cloretos na forma de íons livres.

Yuan *et al.* (2009a) ainda destacam que além da ligação química de cloretos associada ao C_3A e ao C_4AF acima mencionada, existe a ligação física destes cloretos, os quais podem estar adsorvidos na estrutura dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Desta forma, cimentos constituídos por maiores teores de silicato dicálcico (C_2S) e de silicato tricálcico (C_3S) apresentarão uma maior ligação física de cloretos.

2.1.4. Adições minerais

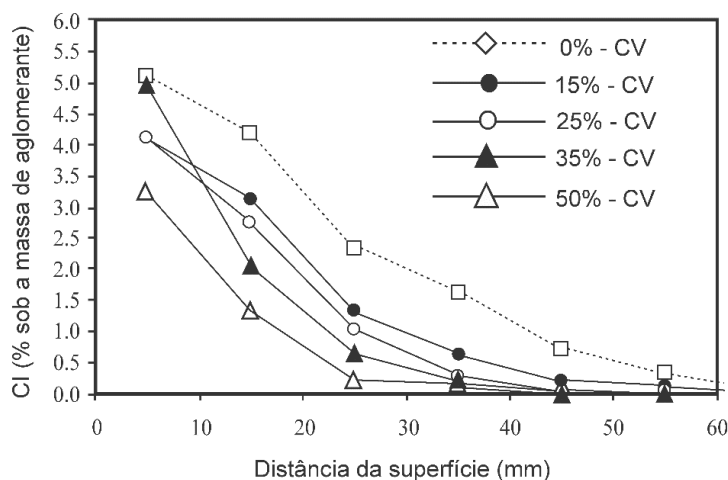
Adições minerais são materiais silicosos ou aluminosilicosos finamente divididos que usualmente são incorporados ao concreto, em forma de cimento Portland composto ou como adição mineral, para melhorar a resistência à fissuração térmica, aumentar a resistência à compressão em idades avançadas e reduzir a permeabilidade, fortalecer a zona de transição e melhorar a durabilidade frente ao ataque por sulfatos e reação álcali-agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com a sua ação físico-química as adições minerais podem ser classificadas em três categorias (DAL MOLIN, 2011):

- material pozolânico - que quando finamente moído e na presença de água reage com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) para a formação de produtos cimentantes. A cinza volante com baixo teor de cálcio, a sílica ativa e o metacaulim são exemplos deste tipo de adição;
- material cimentante - caracterizado por formar produtos cimentantes sem a presença de $Ca(OH)_2$. A escória granulada de alto forno e a cinza volante com alto teor de cálcio pertencem a esse grupo;
- fíler - não possui atividade química, apenas um efeito físico associado ao fato de que atua como ponto de nucleação para a hidratação do cimento e possui uma ação de empacotamento granulométrico.

A adição de cinza volante no concreto é considerada uma medida eficaz para mitigar a corrosão de armaduras por cloretos (SHI *et al.*, 2012). Chalee, Ausapanit e Jaturapitakkul (2010) avaliaram a penetração de cloretos em cubos de concreto, com teores de substituição de cinza volante em relação à massa de cimento dentro do intervalo de 15%-50%, que foram expostos por 7 anos em uma zona de variação de maré no Golfo da Tailândia. Os resultados mostram que o aumento do teor de substituição de cinza volante claramente reduz a penetração de cloretos, conforme indicado na Figura 3.

Figura 3 – Perfil da penetração de cloretos em concretos com diversos teores de substituição de cinza volante, expostos em ambiente marinho por um período de 7 anos



Fonte: Chalee, Ausapanit e Jaturapitakkul (2010), adaptada pela autora

Em relação à substituição parcial do cimento por sílica ativa, Selvaraj, Muralidharan e Srinivasan (2003) citam que a incorporação desta adição é responsável pelo refinamento da microestrutura do concreto em função de dois mecanismos principais: a) a reação com o hidróxido de cálcio, formando C-S-H e b) sua ação como fíler, reduzindo a porosidade da matriz cimentícia. Isto contribui para a redução na penetração de cloretos, conforme reportado em estudos prévios (PAPADAKIS, 2000; SONG *et al.*, 2007; RAMEZANIANPOUR; REZAEI; SAVOJ, 2015). Algumas pesquisas também reportaram que a utilização de sílica ativa ocasiona uma redução na capacidade de fixação de cloretos da pasta de cimento endurecida (DOUSTI; SHEKARCHI; TADAYON, 2009; THOMAS *et al.*, 2012). Isto, de acordo com Shi *et al.* (2012), ocorre porque a sílica ativa reduz as fases de aluminatos, as responsáveis por tal fixação. Para Yuan *et al.* (2009a), a substituição do cimento Portland por sílica ativa pode levar a uma redução do pH, o que impacta no aumento da proporção de cloretos livres. Entretanto, mesmo com uma menor fixação de cloretos, a adição de sílica ativa reduz a difusão da matriz cimentícia aumentando a resistência a penetração de cloretos de concretos e argamassas. Beaudoin, Ramanchandran e Feldman (1990) ainda citam que a concentração de cloretos livres em cimentos com sílica ativa é consideravelmente maior por causa da baixa relação C/S do C-S-H existente nestas pastas, uma vez que este C-S-H, em comparação com o formado pela hidratação do cimento, possui uma menor capacidade de adsorção de cloretos.

Da mesma forma, a substituição do cimento por metacaulim, em teores entre 10% e 20% em relação à massa do cimento, podem reduzir significativamente a permeabilidade de cloretos. Isto ocorre devido à redução do diâmetro médio dos poros e uma maior uniformidade da distribuição do tamanho destes poros (BADOGIANNIS; TSIVLLIS, 2009). Dado

comportamento foi encontrado por Shekarchi *et al.* (2010); os autores constataram que a substituição do cimento por 15% de metacaulim aumentou em 20% a resistência a compressão de concretos e reduziu a penetração de água e a difusão de íons para o interior destes concretos em 50% e 47%, respectivamente. Além disso, como possui aluminatos em sua composição química, favorece a fixação dos cloretos livres para a formação do Sal de Friedel.

A adição de escória granulada de alto forno em matrizes cimentícias melhora a resistência à penetração de cloretos quando comparada a concretos com apenas cimento Portland (CHENG *et al.*, 2005; YEAU; KIM, 2005). Muitos pesquisadores identificaram que a substituição parcial do cimento por escória de alto forno aumenta a capacidade de fixação de cloretos (LUO *et al.*, 2003; SIDDIQUE; BENNACER, 2012). Para Thomas *et al.* (2012), esta alta capacidade de fixação é função do elevado teor de alumina das escórias, resultando na formação de uma maior quantidade de sal de Friedel. Leng, Feng e Lu (2000) ainda acrescentam que a resistência à penetração de cloretos aumenta porque a escória de alto forno pode melhorar a distribuição do tamanho dos poros e formar mais C-S-H, composto que adsorve cloretos em sua estrutura, reduzindo a quantidade de íons livres.

2.1.5. Grau de saturação do concreto

Guimarães (2000) buscou avaliar a influência do grau de saturação do concreto na difusão de cloretos. Para isto, o autor moldou corpos de prova de pasta de cimento Portland (CP V - ARI) que foram divididos em quatro grupos com graus de saturação previstos de 55%, 75%, 90% e 100%. Inicialmente foi verificado se os valores de grau de saturação obtidos estavam próximos aos valores previstos e, posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a uma capa de contaminação, a qual era composta por uma pasta de cimento igual à utilizada para a moldagem dos CP's, com adição de 5% de NaCl em relação à massa de cimento. Em seguida, determinou-se o coeficiente de difusão para cada valor de grau de saturação avaliado, através da aplicação da 1ª Lei de Fick. Os resultados encontrados por Guimarães (2000) são apresentados na Tabela 3. Estes indicam uma maior penetração de íons cloreto com o aumento do grau de saturação, o que reforça a importância de se considerar tal parâmetro na estimativa do coeficiente de difusão de cloretos e em modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto. Contudo, conforme apontado por Bretanha (2004), o método de avaliação utilizado por Guimarães (2000) deve passar por algumas modificações, uma vez que considera que o fenômeno ocorre de acordo com 1ª Lei de Fick. Porém, sabe-se que este fenômeno, na realidade,

ocorre em um fluxo de regime não estacionário, sendo, portanto, mais adequado a aplicação da 2ª Lei de Fick.

Tabela 3 - Valores de coeficiente de difusão efetivo em função do grau de saturação

Grupos	Grau de saturação previsto (%)	Grau de saturação obtido* (%)	Coeficiente de difusão efetivo (cm ² /s)
I	55	57,2 ± 9,8	18,30E-10
II	75	74,8 ± 9,8	56,60E-10
III	90	90,2 ± 9,8	65,09E-10
IV	100	97,7 ± 9,8	203,81E-10

* Grau de saturação obtido com intervalo de confiança de 95%

Fonte: Guimarães (2000), adaptada pela autora

2.2. FATORES EXTRÍNSECOS

A atmosfera circundante pode ter grande influência tanto na redução do período de iniciação, contribuindo para a despassivação precoce das armaduras, como na taxa de corrosão durante o período de propagação da corrosão (HELENE, 1993). Dentre as condições de exposição que influenciam na penetração de cloretos em estruturas localizadas em zona de atmosfera marinha, serão abordadas: concentração superficial de cloretos, temperatura, umidade relativa, precipitação, distância horizontal em relação ao mar, altura, velocidade e direção dos ventos.

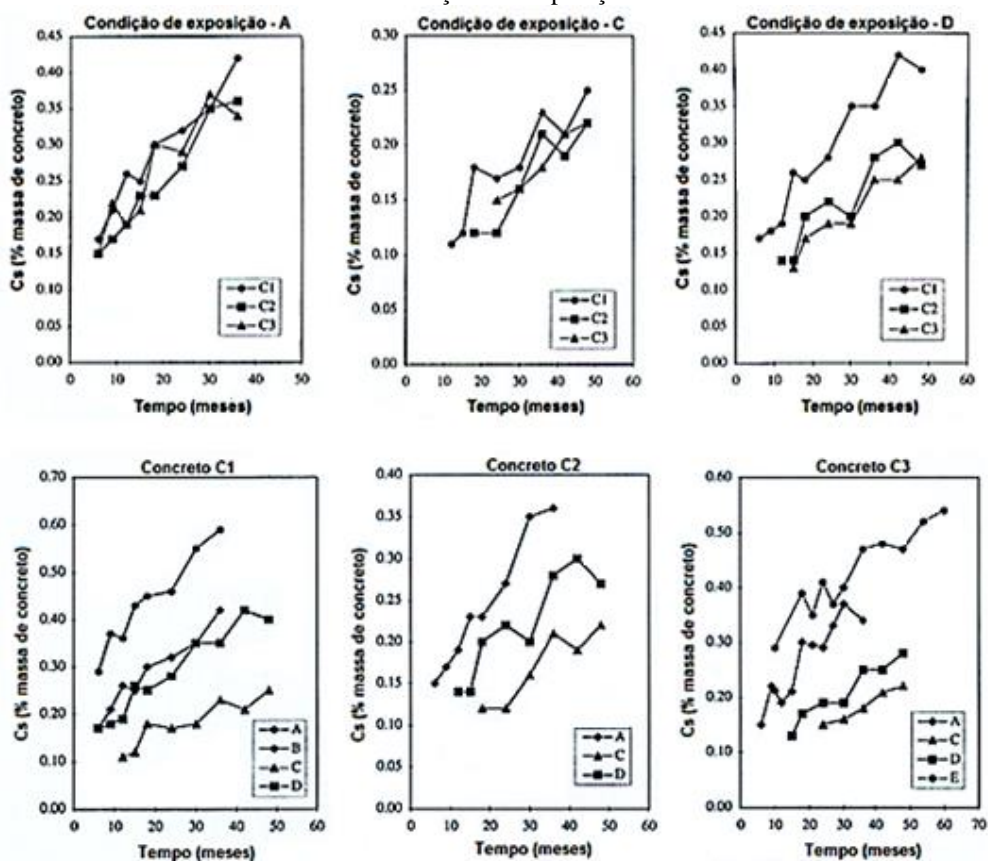
2.2.1. Concentração superficial de cloretos

A concentração superficial de cloretos (C_s) em um elemento de concreto armado tem correlação com vários fatores referentes ao concreto e ao meio ambiente, tais como: concentração de aerossol marinho, temperatura, consumo e capacidade de fixação do tipo de cimento, relação a/c, umidade, direção da estrutura, entre outros (CHEN *et al.*, 2013). Conforme constatado por diversos autores, é um parâmetro que possui tendência de crescimento com o tempo e, após períodos significativamente longos, apresenta uma estabilização (COSTA; APPLETON, 1999a; TANG, 2003). Entretanto, Son, Lee e Ann (2008), após avaliarem diversas publicações existentes na literatura a respeito do assunto, constataram que os dados de concentração superficial de cloretos não fornecem uma relação clara com o tempo de exposição. Os autores acreditam que isto é função da existência de vários outros fatores impactantes no

transporte de cloretos para o interior do concreto, tais como tipo de aglomerante, relação a/c e condições de cura.

Na Figura 4 são apresentados os valores de concentração superficial obtidos por Costa e Appleton (1999a) para diferentes tipos de concretos (C1 – a/c=0,5, C2 – a/c=0,3 e C3 – a/c=0,35) e condições de exposição (A - zona de respingo de maré, B – zona de variação de maré, C – zona atmosférica, D – estaleiro 20, E – estaleiro 21). Os autores verificaram que em todos os casos avaliados na pesquisa a Cs apresentou uma tendência de crescimento ao longo do tempo. Os mesmos ainda salientam que este parâmetro é consideravelmente afetado pelas condições de exposição, reduzindo da zona de variação de maré para a zona atmosférica.

Figura 4 - Evolução no tempo da concentração superficial de cloretos para diferentes tipos de concreto e condições de exposição



Fonte: Costa e Appleton (1999a), adaptada pela autora

Tang (2003) acompanhou a penetração de cloretos em concretos expostos em ambiente marinho por um período de 10 anos. Os resultados obtidos indicaram que a concentração superficial de cloretos cresceu gradualmente nos primeiros 5 anos de exposição e, após isso, manteve-se praticamente inalterada. O autor acredita que esse acréscimo é função do aumento

da capacidade de ligação dos cloretos e do aumento do grau de saturação do ar nos poros do concreto.

Um dos modelos mais conhecidos e utilizados para descrever a concentração superficial é o elaborado por Uji, Matsuoka e Maruya (1990). O modelo, que propõe um comportamento que segue uma função linear da raiz quadrada do tempo, conforme Equação 1, foi obtido através de dados de estruturas no Japão, com tempos de exposição entre 17 e 58 anos. Avaliando a Equação 1, infere-se que no primeiro ano de exposição, o parâmetro absorção de cloretos é igual à concentração superficial de cloretos.

$$C_s = k_{CS} \times \sqrt{t} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

C_s – Concentração superficial de cloretos (% massa de concreto);

k_{CS} – Absorção de cloretos (% massa de concreto/ \sqrt{s}), parâmetro dependente do material e da zona de exposição;

t – Tempo (s).

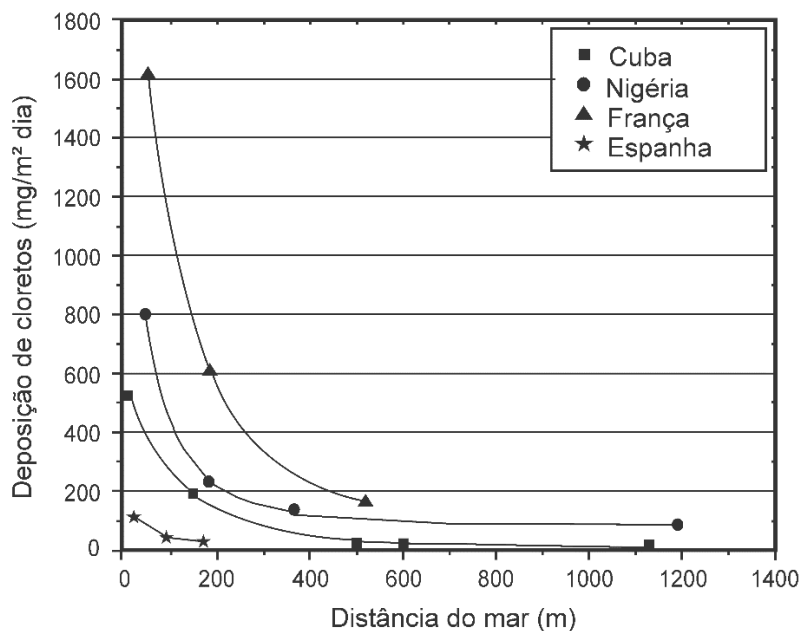
Andrade (2001) destaca que existem problemas como o processo adotado para a retirada de amostras de concreto para a determinação da concentração superficial, uma vez que usualmente não se coleta material referente ao teor de cloretos na superfície do concreto, mas sim em uma camada superficial do material, normalmente com espessura de 0,5 cm. Neste mesmo contexto, Song, Lee e Ann (2008) acreditam que a medição direta não é confiável, porque a C_s refere-se ao teor de cloretos na superfície de exposição do concreto. Os autores defendem que a melhor abordagem para obtenção deste parâmetro é o ajuste de uma curva para o perfil de cloretos, considerando a concentração superficial e o coeficiente de difusão variáveis independentes.

2.2.2. Distância horizontal em relação ao mar

Segundo Gustafsson e Franzén (1996), a redução da quantidade de cloretos disponíveis na atmosfera em pontos mais distantes do mar está associada à força da gravidade. Esta força causa a deposição das partículas mais pesadas na região próxima ao mar enquanto que as partículas menores, por serem mais leves e não sofrerem a influência do efeito gravimétrico, são carregadas para regiões mais afastadas e acabam sendo depositadas por colisão. Meira *et al.*

(2007) apresentam na Figura 5 qual o comportamento da deposição de cloretos em função da distância em relação ao mar em alguns países.

Figura 5 - Relação entre a deposição de cloretos e a distância em relação ao mar



Fonte: Meira *et al.* (2007), adaptada pela autora

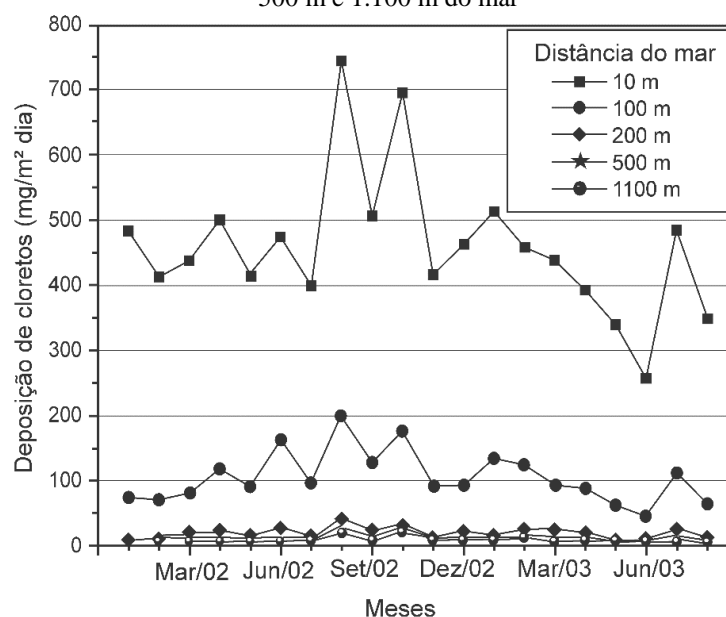
No Brasil diversas pesquisas foram desenvolvidas objetivando determinar a concentração de cloretos na atmosfera e o perfil de cloretos em corpos de prova de concreto ou argamassa em função da distância horizontal em relação ao mar. Estes estudos são aplicáveis para as regiões em que foram desenvolvidos, uma vez que, além da distância em relação ao mar, também existe a influência de características específicas destas regiões como a direção e velocidade dos ventos, topografia, existência de obstáculos, entre outros. Alguns destes estudos estão descritos a seguir:

- Costa (2001) avaliou a deposição de cloretos pelo método da vela úmida e a penetração destes íons em corpos de prova de argamassa que ficaram expostos por cinco meses em diversas estações de monitoramento em Salvador – BA, com distâncias em relação à praia dentro do intervalo de 71,6 m a 4704,7 m. O autor constatou que a influência do mar é mais significativa nos primeiros 500 metros de distância, tanto em relação à deposição de cloretos na vela úmida como nos corpos de prova.
- Pontes (2006) desenvolveu seu estudo em Recife – PE. O autor mediu a taxa de deposição de cloretos pelo método da vela úmida em cinco pontos com distâncias dentro

do intervalo de 7 m a 320 m em relação ao mar. Ele concluiu que a deposição de cloretos decresce com o aumento do distanciamento do mar, sendo significativa até 400 m.

- Meira *et al.* (2007) avaliaram a deposição de cloretos pelo método da vela úmida e a concentração de cloretos em corpos de prova de concreto expostos em João Pessoa – PB e localizados a distâncias de 10 m, 100 m, 200 m, 500 m e 1.100 m em relação ao mar. Os corpos de prova ficaram expostos por um período de 18 meses. Na Figura 6 são apresentados os resultados de deposição de cloretos obtidos pelos autores. Consta-se que há um forte decréscimo da concentração nos primeiros 200 m. Em relação aos corpos de prova de concreto, os autores verificaram que os concretos mais próximos do mar, por estarem em um ambiente com uma maior disponibilidade de cloretos, apresentaram perfis de cloretos com concentrações superiores.

Figura 6 - Deposição de cloretos em dispositivos de vela úmida localizados a distâncias de 10 m, 100 m, 200 m, 500 m e 1.100 m do mar



Fonte: Meira *et al.* (2007), adaptada pela autora

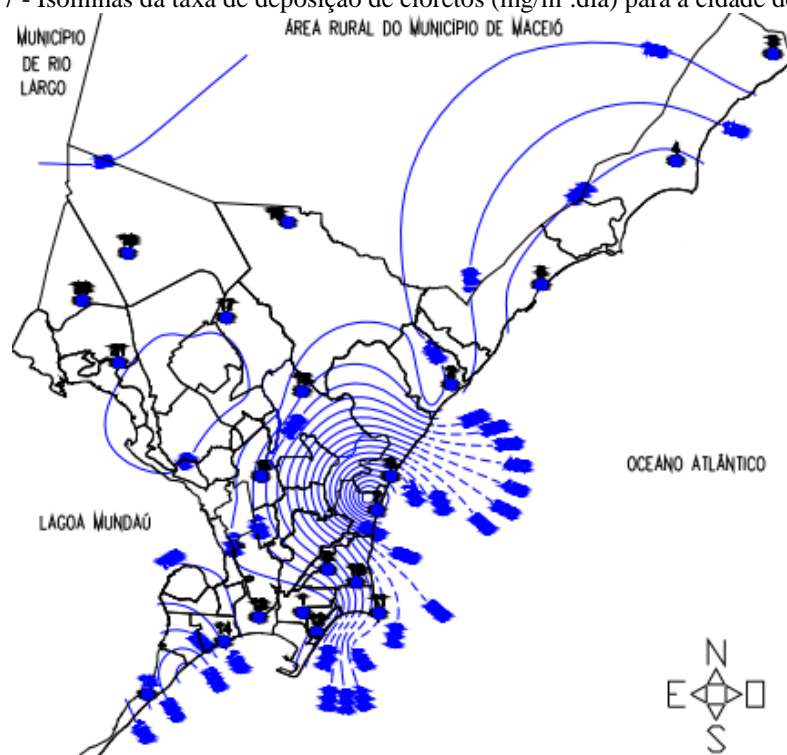
- Romano (2009) determinou o teor de cloretos em corpos de prova de concreto expostos em Tramandaí – RS, com distâncias de 100 m, 200 m, 850 m e 1.850 m em relação ao mar. Os resultados da autora indicam que quanto maior o distanciamento do mar menor é a concentração de cloretos nos concretos, e que a partir de 800 m essa agressividade não é significativa.
- Borba Junior (2011) selecionou cinco pontos na região metropolitana de Vitória – ES, com distância ao mar de 10 m, 65 m, 120 m, 240 m e 520 m para medir a concentração de aerossol marinho pelo método da vela úmida. Também avaliou a concentração de

cloretos em corpos de prova de concreto, que ficaram expostos por 10 meses nos últimos três pontos de monitoramento citados. Os resultados mostraram uma baixa correlação entre a deposição de cloretos na atmosfera e a concentração de cloretos no concreto para a região estudada. O autor notou uma queda significativa na deposição de cloretos na atmosfera a partir dos 200 m e uma baixa concentração de cloretos nos corpos de prova de concreto em função do pouco tempo de exposição e da baixa oferta de cloretos na atmosfera.

- Vitali (2013) desenvolveu seu estudo em São Francisco do Sul - SC. A autora avaliou a deposição de cloretos através do método de vela úmida e, paralelamente, avaliou o ingresso de cloretos em prismas de concreto que permaneceram expostos por 18 meses nos mesmos locais das velas úmidas, situados em seis estações de monitoramento a distâncias de 50 m, 100 m, 200 m, 400 m, 650 m e 1.100 m em relação ao mar. Os resultados da pesquisa apontaram que a taxa de deposição de cloretos a 50 m do mar é 10 vezes maior que a deposição a 100 m, e 17 vezes maior que a deposição a 200 m. A autora também notou uma significativa redução de cloretos no interior do concreto a 100 m.
- Campos (2016) avaliou o teor de cloretos no ar atmosférico da cidade de Fortaleza (Ceará) por meio do método da vela úmida. A autora definiu uma malha sobre o mapa da cidade, com 46 pontos de coleta com distâncias em relação ao mar dentro do intervalo de 50 – 8000 m. Estes pontos apresentaram taxas de deposição de cloretos média variando entre 9,56 mg/m².dia e 2081,25 mg/m².dia. Os resultados indicaram que o teor de cloretos decai em função da distância do mar.

Compilando todas as informações anteriormente mencionadas, a distância em relação ao mar em que a concentração de cloretos deixa de ser significativa fica dentro do intervalo de 200 m a 800 m. Contudo, é importante salientar que esse comportamento não pode ser generalizado para todas as situações, já que pontos mais distantes do mar podem apresentar concentrações superiores quando comparados a pontos mais próximos, e que subestimar a agressividade do ambiente pode trazer graves consequências para a durabilidade de estruturas de concreto armado em zona de atmosfera marinha. Como exemplo, são apresentados os resultados encontrados por Alves (2007) para a cidade de Maceió – AL. Na Figura 7 a autora utiliza isolinhas para representar a taxa de deposição de cloretos, as quais indicam pontos de diferentes distâncias em relação ao mar, mas com mesma concentração de cloretos.

Figura 7 - Isolinhas da taxa de deposição de cloretos ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$) para a cidade de Maceió



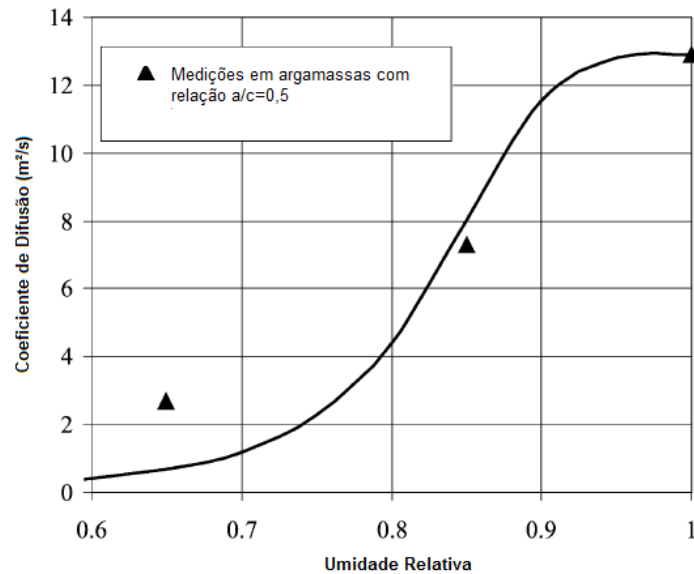
Fonte: Alves (2007)

2.2.3. Umidade relativa

A presença de água é uma das condições necessárias para a ocorrência da corrosão e para a mobilidade dos íons no eletrólito. Neste contexto, a umidade que efetivamente influi nos processos corrosivos é aquela contida no interior dos poros do concreto, a qual é função da umidade relativa do ambiente, desde que o concreto não esteja imerso ou saturado. Apenas a existência de uma quantidade mínima de água nos poros irá desencadear a corrosão. Contudo, quando o concreto está completamente saturado, condição característica de regiões de zona submersa, o risco de corrosão cai drasticamente, o que pode ser justificado pelo acesso limitado de oxigênio (RIBEIRO *et al.*, 2014).

De acordo com Andrade (2001), o comportamento acima mencionado representa a influência da umidade na etapa de propagação. O autor ainda acrescenta que na etapa de iniciação, quanto maior o teor de umidade ambiental maior a quantidade de água no interior dos poros, o que favorece a mobilidade dos íons cloreto para o interior do concreto. Dado comportamento foi encontrado por Nielsen e Geiker (2003). Os autores avaliaram o coeficiente de difusão de argamassas de cimento Portland e relação a/c de 0,5, condicionadas em ambientes de umidade relativa de 65%, 85% e 100% e, conforme ilustrado pela Figura 8, constataram o aumento deste parâmetro com o acréscimo da umidade relativa do ambiente.

Figura 8 - Variação do coeficiente de difusão de argamassas de cimento Portland e relação a/c=0,5 em função da umidade relativa do ambiente



Fonte: Nielsen e Geiker (2003), adaptada pela autora

2.2.4. Precipitação

Segundo Talavera (2005), em concretos protegidos embora a chuva não chegue diretamente até a estrutura, ela ocasiona um aumento brusco da umidade relativa do ambiente e, através da penetração do vapor d'água por difusão, aumenta a umidade no interior do concreto. Em concretos desprotegidos, a chuva atua diretamente sobre a estrutura e fornece quantidades de umidade superiores às fornecidas pelo simples aumento da umidade relativa do ambiente, devendo, portanto, ser considerado tanto a duração da precipitação quanto sua intensidade.

Neste mesmo contexto, Andrade e Castillo (2003) avaliaram o comportamento de concretos protegidos e desprotegidos da chuva. Para os autores, o comportamento do concreto não protegido é de um material poroso, ou seja, funciona como uma esponja que retém água em seu interior e perde água por evaporação, principalmente em função de um aumento da temperatura. Já o concreto protegido da chuva absorve pequenas quantidades de água, sendo a umidade no seu interior influenciada pela umidade relativa do ambiente. Os autores acreditam que esta condição de protegido ou desprotegido da chuva deve ser levada em consideração nas classificações de exposição em códigos e normativas, uma vez que caracteriza a quantidade de umidade no tocante à corrosão.

A precipitação também tem influência na concentração superficial de cloretos em estruturas de concreto. De acordo com Castro-Borges *et al.* (2013), a chuva tem um efeito

denominado de “lavagem superficial” que tende a lixiviar a camada externa do concreto, reduzindo a concentração superficial de cloretos nesta região. Neste âmbito, Meira (2004) expôs concretos moldados com cimento CP IV e CP II - F e relações a/c de 0,5, 0,57 e 0,65 em zona de atmosfera marinha com distâncias de 10, 100, 200 e 500 m do mar e mediu a Cs após 6, 10, 14 e 18 meses. O autor verificou que a Cs apresentou um decréscimo no trecho compreendido entre as medidas realizadas com 14 e 18 meses de exposição, coincidindo com um período de precipitações mais intensas e concentradas, o que leva a crer que a chuva contribuiu para a redução da Cs.

2.2.5. Temperatura

A temperatura atua aumentando a cinética de reação de grande parte dos processos na natureza. Este comportamento, na penetração de cloretos em estruturas de concreto, fica evidente a partir da Equação de Arrhenius (Equação 2), a qual, dentro de certa faixa de temperatura, postula um aumento progressivo no coeficiente de difusão com o aumento da temperatura (MEDEIROS, 2008).

$$D_{(T)} = D_0 e^{\frac{-B}{RT}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$D_{(T)}$ – Coeficiente de difusão à temperatura T ;

D_0 – Constante pré-exponencial independente da temperatura (m^2/s);

R – Constante dos gases ($8,31 \text{ J/molK}$);

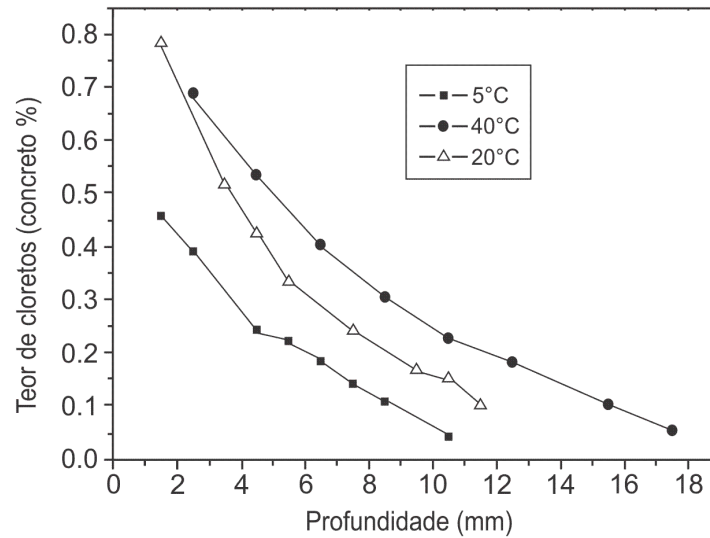
T - Temperatura absoluta (K);

B – Energia de ativação para a difusão¹ (J/mol).

Em relação à influência desta variável na penetração de cloretos em concretos, Yuan *et al.* (2009b) acreditam que a temperatura não altera a tendência de comportamento dos perfis de cloretos, afetando apenas a concentração e a profundidade de penetração destes íons, conforme ilustrado pela Figura 9. Observando esta figura, é possível constatar que temperaturas superiores resultam em teores e profundidades de penetração superiores.

¹ Considerada como a energia necessária para produzir o movimento difusivo de um mol de átomos (CALLISTER, 2008).

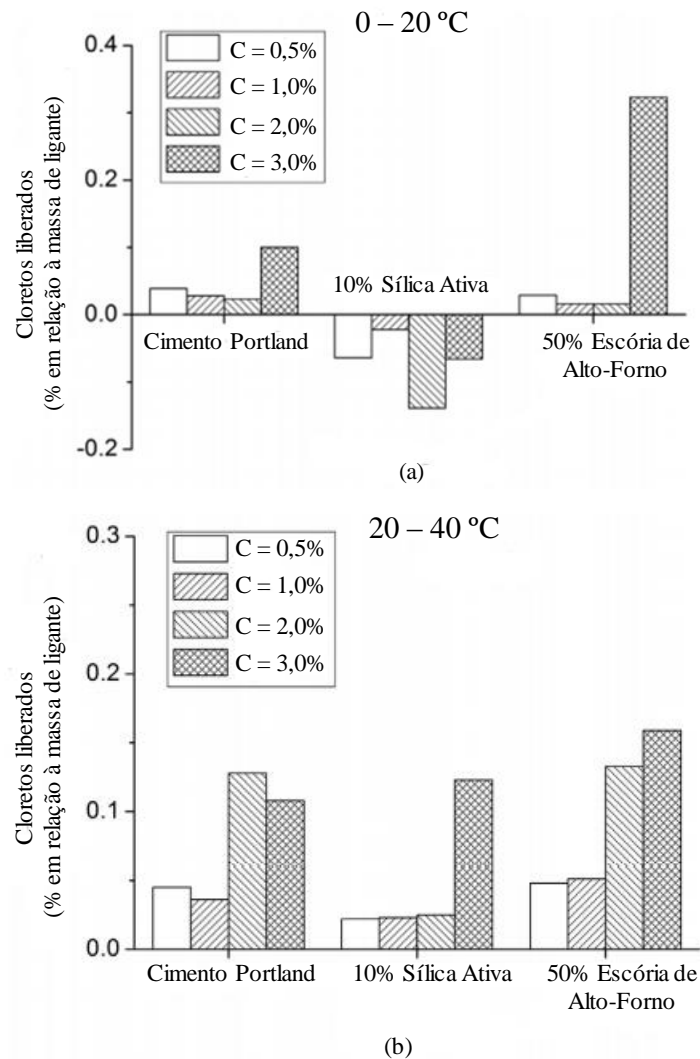
Figura 9 - Perfil de cloretos no concreto a diferentes temperaturas



Fonte: Yuan *et al.* (2009), adaptada pela autora

Neste contexto, Xu *et al.* (2016) avaliaram a influência da temperatura na liberação dos cloretos quimicamente ligados. Na Figura 10 são apresentados os resultados obtidos pelos autores para as pastas de cimento Portland e pastas com 10% de sílica ativa e 50% de escória de alto forno, com relações a/c de 0,32, concentrações totais de cloretos de 0,5%, 1,0%, 2,0% e 3,0% em relação à massa de ligante e faixas de temperatura de 0-20 °C e 20-40 °C. Estes resultados indicam que o aumento da temperatura, no geral, pode liberar parcialmente os cloretos ligados, sendo a quantidade liberada função da relação a/c, da concentração de cloretos total e da faixa de temperatura.

Figura 10 - Mudanças na liberação de cloretos em pastas com cimento Portland, adições de 10% de sílica ativa e 50% de escória de alto forno, com relações a/c de 0,32 e faixas de temperatura de (a) 0 - 20 °C e (b) 20 - 40 °C

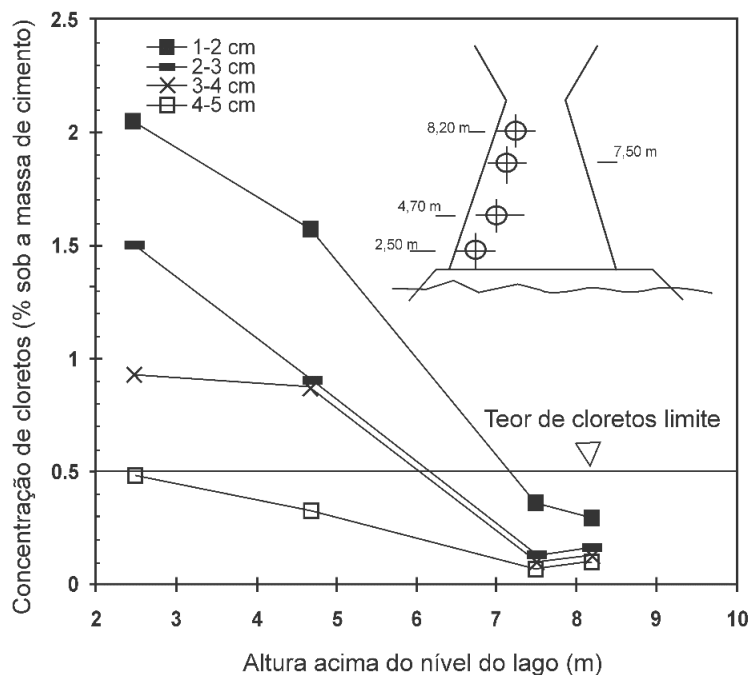


Fonte: Xu *et al.* (2016), adaptada pela autora

2.2.6. Altura

Há um consenso na literatura a respeito da variação da concentração de cloretos em relação à altura. Diversos autores constataram que tal concentração decresce à medida que a altura aumenta (BARBOSA *et al.*, 2004; GUIMARÃES; CASTRO; NUNES, 2007). Castro, Rincon e Pazini (2001) determinaram a concentração de cloretos em pontos com altura de 2,5 m, 4,7 m, 7,5 m e 8,2 m na ponte sobre o Lago Maracaibo na Venezuela. Os resultados encontrados pelos autores são apresentados na Figura 11. Pode-se observar que a partir dos 7,5 m há uma redução significativa nas concentrações de cloretos em todas as profundidades avaliadas.

Figura 11 - Perfil da concentração de cloretos em pontos com diferentes alturas e profundidades na ponte sobre o Lago Maracaibo



Fonte: Castro; Rincon; Pazini (2001), adaptada pela autora

Medeiros e Meira (2012) avaliaram a deposição de cloretos em velas úmidas localizadas em pontos verticais com 3, 6 e 9 m em relação ao solo e também constataram que o ponto de coleta mais baixo recebeu uma quantidade maior de cloretos e que esse valor diminuiu gradativamente no segundo e terceiro pontos analisados. Este comportamento pode ser justificado pelo efeito gravimétrico, que impede que partículas maiores atinjam alturas superiores.

2.2.7. Velocidade e direção dos ventos

O aumento da velocidade do vento acarreta um aumento no número e no tamanho das partículas de aerossol marinho e, conseqüentemente, um aumento na quantidade de cloretos disponíveis. Este efeito é mais pronunciado em regiões próximas ao mar, sendo caracterizado por uma menor influência com o aumento da distância em relação ao mar (CHEN *et al.*, 2013). Para Morcillo *et al.* (2000) e O'Dowd *et al.* (1997) existe uma velocidade crítica dos ventos, acima da qual a concentração de aerossol marinho na atmosfera aumenta notadamente, a qual está dentro do intervalo de 3 – 4 m/s.

Outro aspecto que merece destaque diz respeito à direção dos ventos, uma vez que isto determina quais estruturas ou até mesmo quais os elementos de uma mesma estrutura estarão

submetidos a uma maior concentração de cloretos. Tal comportamento foi constatado na pesquisa de Garcia *et al.* (2005), em que os autores verificaram que os elementos estruturais localizados na direção dos ventos predominantes foram mais afetados pela penetração de íons cloretos. Neste contexto, pode-se mencionar o estudo realizado por Romano (2009). A autora analisou a penetração de cloretos em duas faces de blocos de concreto expostos em zona de atmosfera marinha em Tramandaí - RS, sendo a face nordeste localizada no mesmo sentido do vento predominante e a face sudoeste no sentido oposto. Os resultados da autora indicam que, no geral, as faces do concreto posicionadas a nordeste (de mesmo sentido dos ventos predominantes) apresentaram maior penetração de cloretos.

3. COMPARATIVO ENTRE NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS NO QUE TANGE À CORROSÃO DE ARMADURAS EM AMBIENTES COM CLORETOS

Este capítulo visa um comparativo entre normas nacionais e internacionais no que diz respeito ao teor crítico de cloretos e ao valor estabelecido para vida útil de projeto mínima de estruturas de concreto e, por fim, uma análise de quais destas normativas ou recomendações técnicas já fornecem equações para a modelagem da vida útil, considerando a despassivação das armaduras por cloretos.

3.1. TEOR CRÍTICO DE ÍONS CLORETO

O teor crítico de cloretos pode ser definido como a quantidade de cloretos necessária para romper a película passivadora das armaduras e, assim, iniciar o processo corrosivo. Na Tabela 4 são apresentados os máximos teores de cloretos permitidos para estruturas de concreto armado, de acordo com a ABNT NBR 12655 (2015), ACI 318 (2014), EN 206-1 (2007) e JSCE N° 16 (2007).

Tabela 4 - Teor de Cl permitido no concreto armado de acordo com diversas normativas

Norma	País	Categoria de Exposição	Condições de serviço da estrutura	Máximo teor de Cl (% sobre a massa de cimento)
ABNT NBR 12655 (2015)	Brasil	I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade)	0,40
		II	Concreto armado não exposto a cloretos	0,30
		III	Concreto armado exposto a cloretos (classe de agressividade - forte)	0,15
		IV	Concreto armado exposto a cloretos (classe de agressividade - muito forte)	0,15
ACI 318 (2014)	Estados Unidos	C0	Concreto seco ou protegido de umidade	1,00
		C1	Concreto exposto à umidade, mas não a fontes externas de cloretos	0,30
		C2	Concreto exposto à umidade e a fontes externas de cloretos	0,15
EN 206-1 (2007)	Europa	Cl 1,0	Concreto sem armaduras ou outros metais, com exceção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	1,00
		Cl 0,20	Concreto com armaduras de aço ou outros metais incorporados	0,20
		Cl 0,40	Concreto com armaduras de aço ou outros metais incorporados	0,40
JSCE N° 16 (2007)	Japão	-	Concreto armado	< 0,3 kg/m³
		-	Concreto não estrutural	< 0,6 kg/m³

Fonte: ABNT NBR 12655(2015), ACI 318 (2014), EN 206-1 (2007) e JSCE N° 16 (2007), elaborada pela autora

Percebe-se que não existe um consenso entre as normativas a respeito deste valor. As normas brasileira e americana fazem uma distinção do máximo teor de cloretos em função da agressividade do ambiente em que a estrutura se encontra localizada. Para concreto armado protegido de umidade a norma brasileira é mais conservadora, estabelecendo um teor máximo

de cloretos de 0,4%, enquanto que na norma americana este valor é de 1,0%. Para concreto armado não exposto a fontes externas de cloretos e concreto armado exposto a fonte externas de cloreto ambas as normas adotam os mesmos limites para o teor máximo destes íons, os quais são 0,3% e 0,15%, respectivamente.

Já a norma europeia não considera as condições de exposição para a determinação do teor máximo de cloretos. Apenas faz uma diferenciação entre concretos sem armaduras (teor de 1,0%) e concretos com armadura, estabelecendo para o segundo grupo citado duas subclasses: a Cl 0,20, com teor de 0,20% e a Cl 0,40, com teor de 0,40%. Contudo não define quais os critérios adotados para a classificação nestas duas subclasses, apenas cita que isto depende das disposições válidas no local de utilização do concreto. Cita-se ainda que a norma japonesa limita a concentração de cloretos em 0,3 kg/m³, permitindo concentrações superiores para concretos que não possuem função estrutural.

Na Tabela 5 constam os máximos teores de cloretos permitidos para estruturas de concreto protendido, de acordo com as normas ABNT NBR 12655 (2015), ACI 318 (2014), EN 206-1 (2007) e JSCE N° 16 (2007).

Tabela 5 - Teor de Cl permitido no concreto protendido de acordo com diversas normativas

Norma	País	Classe	Máximo teor de Cl no concreto (% sobre a massa de cimento)
ABNT NBR 12655 (2015)	Brasil	-	0,05
ACI 318 (2014)	Estados Unidos	-	0,06
EN 206-1 (2007)	Europa	Cl 0,10	0,10
		Cl 0,20	0,20
JSCE N° 16 (2007)	Japão	-	< 0,3 kg/m ³

Fonte: ABNT NBR 12655(2015), ACI 318 (2014), EN 206-1 (2007) e JSCE N° 16 (2007), elaborada pela autora

Constata-se que, com exceção da JSCE N° 16 (2007), as normas são mais conservadoras para estruturas de concreto protendido, estabelecendo limites inferiores aos especificados para estruturas de concreto armado, uma vez que o processo corrosivo nesse tipo de estrutura é mais crítico. As normas brasileira e americana possuem critérios mais rigorosos quando comparadas com a norma europeia, sendo que o teor máximo de cloretos estabelecido por estas normas é cerca de duas vezes inferior ao determinado na EN 206-1 (2007).

Da mesma forma que para estruturas de concreto armado, a norma europeia define duas subclasses para estruturas de concreto protendido, a subclasse Cl 0,10 com um teor

máximo de cloretos de 0,10% e a subclasse Cl 0,20, com um valor de 0,20%. Contudo não estabelece quais os critérios adotados para a classificação nestas duas subclasses, citando apenas que isto depende das disposições válidas no local de utilização do concreto.

3.2. VIDA ÚTIL DE PROJETO

Na Tabela 6 são apresentados os valores de vida útil de projeto mínima estabelecidos para diferentes tipos de estruturas, de acordo com o boletim técnico Fib 34 (2006), Eurocode (2005), ABNT NBR 15575 (2013), AS 4997 (2005) e JSCE N° 15 (2007).

Tabela 6 - Vida útil de projeto mínima estabelecida por diversas normativas

Tipo de estrutura	Vida útil de projeto mínima (anos)				
	Europa	Europa	Brasil	Austrália	Japão
	fib 34 (2006)	Eurocode (2005)	ABNT NBR 15575 (2013)	AS 4997 (2005)	JSCE N° 15 (2007)
Estruturas temporárias	10	10	-	< 5	-
Partes estruturais substituíveis	10 a 25	10 a 25	-	-	-
Estruturas para agricultura	15 a 30	15 a 30	-	-	-
Edifícios e outras estruturas comuns	50	50	50	50	-
Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil	100	100	-	100	-

Fonte: Fib 34 (2006), Eurocode (2005), ABNT NBR 15575:2013, AS 4997 (2005) e JSCE N° 15 (2007), elaborada pela autora

O boletim Fib 34 (2006), Eurocode (2005) e AS 4997 (2005) estabelecem uma vida útil de projeto mínima para uma maior quantidade de tipos de estruturas em comparação com a norma brasileira, a qual engloba apenas edifícios e estruturas comuns. Isto representa uma lacuna de especificações das normativas brasileiras, uma vez que se referem apenas a edificações habitacionais, não estabelecendo valores de vida útil mínima para outras estruturas de grande importância, como por exemplo pontes e viadutos. Acrescenta-se ainda que a norma japonesa, apesar de não estabelecer exigências para a vida útil das estruturas de concreto, apresenta equações do fenômeno de degradação que possibilitam a previsão deste período, conforme será apresentado posteriormente.

Mesmo a norma brasileira ABNT NBR 15575:2013 especificando uma vida útil mínima de projeto de 50 anos para o sistema estrutural de edificações, no que se refere à modelagem matemática para a determinação deste período, a mesma não dá indicativos de como conduzi-la, tampouco existem normas ou recomendações técnicas no Brasil para este fim (DAL MOLIN *et al.*, 2016). A mesma consideração é feita para as normativas australianas, uma

vez que não foram encontradas outras normas neste país que fornecem indicativos para o cálculo da vida útil de estruturas de concreto. Diferentemente do que ocorre em outros países, aonde existem normas ou recomendações técnicas que fornecem equações para a modelagem deste período, tais como o boletim Fib 34 (2006), a ACI 365.1R-00 e a norma japonesa JSCE N° 15 (2005), que serão abordados a seguir.

3.3. MODELAGEM DA DESPASSIVAÇÃO DE ARMADURAS POR CLORETOS

3.3.1. Fib 34 (2006)

O modelo Fib 34 (2006), desenvolvido pelo projeto DuraCrete, consiste em uma abordagem probabilística para a modelagem da corrosão induzida por cloretos em concretos não fissurados. É baseado na Equação 3, na qual a concentração crítica de cloretos (C_{crit}) é comparada com a concentração de cloretos atual $C(x = a, t)$ na profundidade da armadura no tempo t .

$$C_{crit} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right] \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

C_{crit} - concentração crítica de cloretos (% em relação à massa de cimento);

$C(x, t)$ - concentração de cloretos no concreto na profundidade x (superfície da estrutura, $x = 0$) e no tempo t (% em relação à massa de cimento);

C_0 - concentração inicial de cloretos no concreto (% em relação à massa de cimento);

$C_{S,\Delta x}$ - concentração de cloretos a uma profundidade Δx (% em relação à massa de cimento);

x - profundidade correspondente à concentração de cloretos $C(x, t)$ (mm);

a - espessura de cobrimento (mm);

Δx - profundidade da zona de convecção, é a camada de concreto na qual o processo de penetração de cloretos difere da 2ª Lei de Fick de difusão (mm);

$D_{app,c}$ - coeficiente de difusão aparente (mm²/ano), calculado a partir da Equação 4;

t - tempo (anos);

erf - função de erro.

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

k_e – variável ambiental (Equação 5);

$D_{RCM,0}$ – coeficiente de migração de cloretos (mm²/ano);

k_t – parâmetro de transferência;

$A(t)$ – função que considera o envelhecimento (Equação 6).

$$k_e = \exp\left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

b_e – variável de regressão (3500 K – 5500 K);

T_{ref} – temperatura padrão de ensaio (293 K);

T_{real} – temperatura do elemento estrutural ou do ambiente (K).

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad \text{Equação 6}$$

t – tempo de exposição do concreto (anos);

t_0 – ponto de referência do tempo de exposição do concreto (anos);

a – expoente de envelhecimento.

O modelo é baseado na 2ª Lei de Fick, levando em conta que o transporte de cloretos para o interior do concreto é majoritariamente dominado pela difusão. Também leva em consideração que a camada superficial é frequentemente exposta a um molhamento e evaporação subsequente e que, devido a isso, nessa região o transporte de cloretos não é controlado pela difusão. Desta forma, para descrever a penetração de cloretos usando a 2ª Lei de Fick, a camada superficial é negligenciada e a 2ª Lei de Fick é aplicada a partir de uma profundidade Δx com uma concentração $C_{S,\Delta x}$ (FIB 34, 2006).

A modelagem considera como fatores intervenientes na penetração de cloretos em estruturas de concreto características relacionadas às propriedades do material e às condições de exposição, através da variável temperatura. O modelo também considera que o coeficiente de difusão do concreto decresce com o tempo, comportamento que efetivamente se observa nas estruturas.

Contudo é um modelo complexo que engloba um grande número de variáveis como dados de entrada, o que torna a sua resolução complexa e, conseqüentemente, reduz a sua aplicabilidade prática. Outro aspecto negativo do mesmo é a necessidade de ensaios acelerados realizados em laboratório para a determinação do coeficiente de difusão e, aliado a isso, todos os problemas associados a ensaios acelerados, como as condições de realização do ensaio que muitas vezes não condizem com as reais condições de exposição da degradação natural e a dificuldade em correlacionar os fenômenos naturais com os acelerados.

O boletim Fib 34 (2006) fornece valores de coeficiente de difusão obtidos no ensaio de migração de cloretos para algumas combinações de tipo de cimento e relação a/c, conforme Tabela 7. Isto facilita a aplicação do modelo pois elimina a necessidade da realização de ensaio. Contudo, como são poucas as combinações apresentadas, para muitos casos a realização do ensaio ainda é necessária.

Tabela 7 - Valores de $D_{RCM,0}$ para diversas combinações de tipo de cimento e relação a/c

Tipo de cimento	Relação a/c					
	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
CEM I 42.5 R	-	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$10,0 \cdot 10^{-12}$	$15,8 \cdot 10^{-12}$	$19,7 \cdot 10^{-12}$	$25,0 \cdot 10^{-12}$
CEM I 42.5 R + Cinza volante	-	$5,6 \cdot 10^{-12}$	$6,9 \cdot 10^{-12}$	$9,0 \cdot 10^{-12}$	$10,9 \cdot 10^{-12}$	$14,9 \cdot 10^{-12}$
CEM I 42.5 R + Sílica ativa	$4,4 \cdot 10^{-12}$	$4,8 \cdot 10^{-12}$	-	-	$5,3 \cdot 10^{-12}$	-
CEM III/B 42.5	-	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-12}$	$3,0 \cdot 10^{-12}$	$3,4 \cdot 10^{-12}$

Fonte: Fib 34 (2006), adaptada pela autora

Onde:

$D_{RCM,0}$ - coeficiente de migração de cloretos;

CEM I 42.5 R - equivalente ao cimento brasileiro CP II – F;

CEM III/B 42.5 - equivalente ao cimento brasileiro CP III.

3.3.2. ACI 365.1R-00

O modelo presente na ACI 365.1R-00 considera que a concentração superficial de cloretos varia com o tempo. Duas equações são apresentadas, na Equação 7 a concentração superficial segue uma função linear de crescimento, e na Equação 8 um crescimento proporcional à raiz do tempo.

$$C(x, t) = k\sqrt{t} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2 \cdot D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D}} \right) - \frac{x}{\sqrt{\pi D}} e^{-\frac{x^2}{4D}} \right\} \quad \text{Equação 7}$$

$$C(x, t) = k\sqrt{t} \cdot \left\{ e^{\frac{-x^2}{4D}} - \left[\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D}} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D}} \right) \right] \right\} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$C(x, t)$ – concentração de cloretos na profundidade x a partir da superfície do concreto com um dado tempo t (%);

k – constante de crescimento linear ou de crescimento proporcional à raiz quadrada do tempo;

x – espessura de cobrimento (cm);

D – coeficiente de difusão de cloretos (cm²/ano);

t – tempo (anos);

erfc – função complementar de erro.

O modelo adota a hipótese de crescimento da concentração superficial de cloretos ao longo do tempo, o que corresponde ao comportamento que efetivamente se observa nas estruturas de concreto armado. Contudo, o coeficiente de difusão é considerado constante ao longo do tempo, o que pode levar a erros grosseiros na previsão de vida útil (QUE, 2007; MEDEIROS JUNIOR, 2011).

O modelo não possui aplicabilidade prática e envolve parâmetros como o coeficiente de difusão que necessitam ser determinados através de ensaios laboratoriais. Adicionalmente, não leva em consideração a influência das condições ambientais de exposição na penetração de cloretos em estruturas de concreto. A ACI-365.1R-00 também deve ser mais clara a respeito do valor da constante k ; a norma apenas cita que é uma constante que possui crescimento linear ou crescimento proporcional à raiz quadrada do tempo, não especificando quais os valores que devem ser considerados ou a qual parâmetro ela se refere. Contudo, a partir da revisão de literatura realizada sobre os modelos para previsão de vida útil de estruturas de concreto que consideram a despassivação das armaduras por cloretos (Capítulo 4), constata-se que o modelo da ACI-365.1R-00 é o proposto por Uji, Matsuoka e Maruya (1990), no qual a constante k corresponde à concentração superficial de cloretos após o primeiro ano de exposição.

3.3.3. JSCE N° 15 (2007)

Para avaliar a corrosão de armaduras devido ao ingresso de íons cloreto, a norma japonesa fornece o modelo representado pela Equação 9.

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1,0 \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

γ_i – fator da estrutura. Pode ser adotado como 1,0 para estruturas comuns e 1,1 para estruturas importantes;

C_{lim} – valor limite da concentração de cloretos para o início do processo corrosivo. Se não forem realizadas medições ou não existirem resultados em estruturas semelhantes, a norma recomenda adotar uma concentração de 1,2 kg/m³;

C_d – concentração de cloretos na profundidade da armadura. Pode ser estimada pela Equação 10.

$$C_d = \gamma_{cl} \times C_o \times \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0,1 \times c_d}{2 \sqrt{D_d \times t}} \right) \right\} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

γ_{cl} – fator de segurança que leva em consideração a dispersão da concentração de cloretos na profundidade da armadura (C_d). No geral, adota-se um valor de 1,3;

C_o - concentração de cloretos na superfície do concreto (kg/m³);

c_d – cobrimento do concreto utilizado para a verificação de durabilidade (mm). É calculado considerando o erro de construção, de acordo com a Equação 11;

D_d – coeficiente de difusão de cloretos no concreto (cm²/ano). Pode ser estimado por meio da Equação 12;

t – tempo (anos).

$$c_d = c - \Delta c_e \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

c – cobrimento do concreto (mm);

Δc_e – erro de construção (mm).

$$D_d = \gamma_c D_k \left(\frac{w}{l} \right) \left(\frac{w}{w_a} \right)^2 D_o \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

γ_c – fator relacionado ao material. No geral, pode ser considerado igual a 1,0;

D_k – valor característico do coeficiente de difusão de cloretos no concreto (cm^2/ano);

D_o – constante que representa o efeito da fissuração no transporte de cloretos para o interior do concreto. Deve ser considerado apenas nos casos em que fissuras de flexão são permitidas. No geral, é adotado o valor de $200 \text{ cm}^2/\text{ano}$;

w – abertura da fissura (mm);

w_a – valor limite para a abertura da fissura (mm);

$\frac{w}{l}$ – relação entre a abertura e o comprimento da fissura.

Quando não existirem dados de desempenho ou medições em estruturas similares relacionados à concentração de cloretos na superfície do concreto, a norma japonesa fornece alguns valores em função da localização da estrutura e da distância da costa, conforme apresentado na Tabela 8. A norma também poderia apresentar uma tabela semelhante para o coeficiente de difusão, estabelecendo alguns valores para diferentes combinações de tipo de cimento e relação a/c, como faz o boletim Fib 34 (2006).

Tabela 8- Concentração de cloretos na superfície do concreto (kg/m^3)

Região		Distância da costa (km)				Zona de respingo de maré
		Próximo a costa	0,1	0,25	0,5	
Região com alta concentração de cloretos	Hokkaido, Tohoku, Hokuriku, Okinawa	9,0	4,5	3,0	2,0	1,5
Região com baixa concentração de cloretos	Kanto, Tokai, Kinki, Chugoku, Shikoku, Kyushu	4,5	2,5	2,0	1,5	1,0

Fonte: JSCE N° 15 (2007), adaptada pela autora

3.3.4. Considerações finais sobre os modelos das normativas

Na Tabela 9 é apresentado um comparativo dos parâmetros de entrada do modelo de Andrade (2001), objeto de estudo deste trabalho, e dos três modelos fornecidos pelas normativas para a estimativa da vida útil de estruturas de concreto apresentados anteriormente. Inicialmente destaca-se o fato que dentre os quatro modelos apresentados na Tabela 9, apenas o modelo de Andrade (2001) não possui como dado de entrada o coeficiente de difusão, o que aumenta a sua aplicabilidade prática, uma vez que tal parâmetro usualmente demanda dados prévios de estruturas semelhantes ou, em muitos casos, a realização de ensaios laboratoriais, aonde, usualmente, emprega-se condições para acelerar o processo corrosivo. Esta variável é

considerada indiretamente através de parâmetros de fácil obtenção, tais como: resistência à compressão do concreto, tipo de cimento, tipo de adição, porcentagem de adição e até mesmo as características ambientais do local de exposição. Entretanto, as quatro formulações consideram no cálculo de vida útil a concentração superficial de cloretos, a qual, de maneira semelhante ao coeficiente de difusão, caracteriza-se por ser um parâmetro de difícil estimativa, dependendo da existência de dados prévios de estruturas semelhantes.

Tabela 9 - Parâmetros de entrada de alguns modelos para previsão de vida útil de estruturas de concreto

Parâmetros de entrada	Andrade (2001)	FIB 34 (2006)	ACI 365-1R-00	JSCE N° 15 (2007)
Concentração superficial de cloretos		X		X
Concentração superficial de cloretos (1º ano de exposição)	X		X	
Coefficiente de difusão		X	X	X
Espessura de cobrimento		X	X	X
Tempo	X	X	X	X
Abertura da fissura				X
Comprimento da fissura				X
Resistência à compressão do concreto	X			
Tipo de cimento	X			
Tipo de adição	X			
Teor de adição	X			
Temperatura do ambiente	X	X		
Unidade relativa do ambiente	X			

Fonte: Andrade (2001), Fib 34 (2006), ACI 365-1R-00, JSCE N° 15 (2007), elaborada pela autora

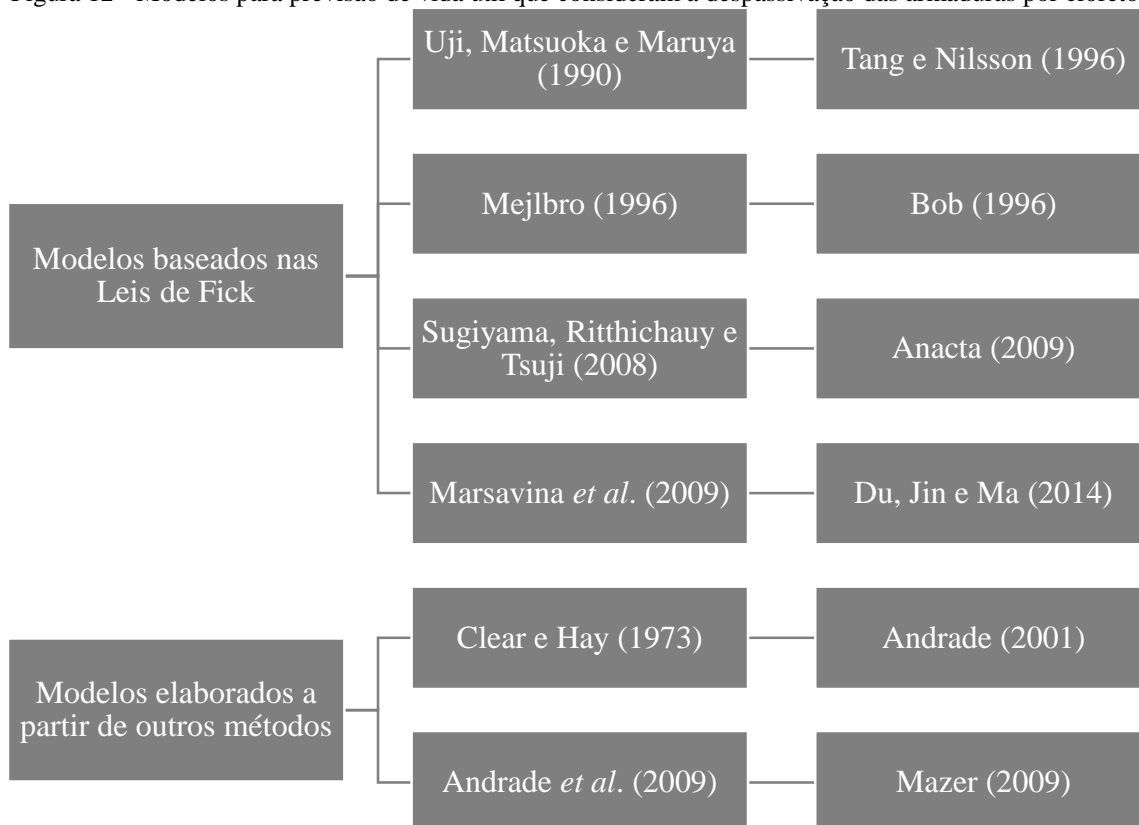
Desta forma, o modelo FIB 34 (2006), ACI 365-1R-00 e JSCE N° 15 (2007) possuem aplicação voltada para estruturas de concreto já existentes dado que, quando se trata da previsão de vida útil de novas estruturas, os modelos possuem baixa confiabilidade, visto que existem diversos parâmetros envolvidos na análise e que a correlação entre eles é questionável (ANDRADE; POSSAN; DAL MOLIN, 2017), principalmente no que diz respeito ao coeficiente de difusão e à concentração superficial de cloretos.

Constata-se também que os modelos da ACI 365-1R-00 e JSCE N° 15 (2007) não possuem como parâmetros de entrada características associadas às condições ambientais dos locais de exposição das estruturas. Contudo, conforme apresentado no Capítulo 2, as variáveis ambientais são significativas no ingresso de cloretos para o interior do concreto. Desta forma, a não consideração de tais parâmetros pode trazer erros grosseiros na estimativa de vida útil. Por fim, cita-se que apenas a formulação fornecida pela norma japonesa JSCE N° 15 (2007) leva em consideração a influência de fissuras na penetração de cloretos e apresenta valores tabelados para a concentração superficial de cloretos para os casos em que não existem dados prévios de estruturas semelhantes.

4. MODELOS PARA A PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO QUE CONSIDERAM A INICIAÇÃO DA CORROSÃO POR CLORETOS

Existe uma grande variedade de modelos para a previsão de vida útil de estruturas de concreto armado que consideram a despassivação das armaduras por cloretos. De acordo com Medeiros Junior (2011), grande parte destes modelos é resultante da resolução da 2ª Lei de Fick considerando diferentes condições de contorno. Há, porém, alguns que são elaborados através de outros métodos e hipóteses, como, por exemplo, baseados em ajustes de dados de laboratório ou campo, baseados na experiência de especialistas, entre outros. A Figura 12 contém um esquema com alguns dos modelos existentes, classificando-os quanto a sua origem. Nos subitens a seguir alguns destes modelos serão apresentados, destacando-se aspectos positivos e negativos da aplicação dos mesmos.

Figura 12 - Modelos para previsão de vida útil que consideram a despassivação das armaduras por cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

4.1. LEIS DE FICK

A difusão de íons cloreto para o interior dos poros do concreto ocorre devido à existência de um gradiente químico, função da diferença de concentrações destes íons entre o concreto e o ambiente que o circunda, ou até mesmo entre pontos dentro do próprio concreto. De acordo com a 1ª Lei de Fick, o fluxo de íons pode ser calculado pela Equação 13 (POULSEN; MEJLBRO, 2006).

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

F – fluxo de massa dos íons;

D – coeficiente de difusão;

C – concentração de cloretos;

x – profundidade a partir da superfície do concreto.

Já a 2ª Lei de Fick, diferentemente da 1ª Lei de Fick, considera que o fluxo de íons varia com o tempo, conforme expresso pela Equação 14 (POULSEN; MEJLBRO, 2006).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Equação 14}$$

Neste sentido, são estabelecidos dois estágios do fluxo por difusão, o estágio estacionário, caracterizado pelo fluxo constante das substâncias em difusão, e o estágio não-estacionário, caracterizado por um fluxo dependente do tempo e da profundidade de penetração, os quais são descritos, respectivamente, pela 1ª e 2ª Leis de Fick. O estágio não estacionário da difusão representa o período em que transporte dos íons ocorre de forma combinada com a sua fixação aos constituintes do cimento. Já o estágio estacionário engloba o período em que a fixação não ocorre mais, e o fluxo de íons ocorre a uma taxa constante. (SANTOS, 2006; RIBEIRO *et al.*, 2014). Desta forma, são definidos coeficientes de difusão específicos para cada estágio: o coeficiente de difusão efetivo (obtido pela Equação 3) para o caso de regime estacionário e o coeficiente de difusão aparente para o caso de regime não estacionário (obtido pela Equação 4).

A solução analítica da 2ª Lei de Fick adotando o coeficiente de difusão e a concentração superficial de cloretos constantes resulta na Equação 15 (POULSEN; MEJLBRO, 2006).

$$C(x, t) = C_i + (C_{sa} - C_i) \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4(t - t_{ex})D_a}} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$C(x, t)$ – concentração de cloretos a uma distância x da superfície, no tempo t ;

C_i – concentração de cloretos inicial no concreto;

C_{sa} – concentração superficial de cloretos;

x – profundidade de penetração;

t – tempo da inspeção;

t_{ex} – tempo de exposição;

D_a – coeficiente de difusão de cloretos do concreto;

erfc – função complementar de erro de Gauss.

De acordo com Que (2007), modelos baseados na hipótese de que o coeficiente de difusão é constante ao longo do tempo apresentam erros grosseiros. O mesmo ainda destaca que essa hipótese tem aplicabilidade limitada a estruturas com um longo tempo de exposição, uma vez que o coeficiente de difusão tende a apresentar um comportamento constante com uma exposição significativamente longa. Para Poulsen e Mejlbro (2006), em estruturas expostas por mais de 20 - 30 anos é possível obter uma estimativa aproximada da penetração de cloretos negligenciando a dependência do coeficiente de difusão ao tempo.

Destaca-se ainda que a solução da 2ª Lei de Fick acima apresentada possui aplicação voltada para a previsão de vida útil de estruturas de concreto existentes, dado que, para a obtenção de algumas variáveis de entrada, como a concentração superficial de cloretos e o coeficiente de difusão, a realização de inspeção prévia para determinação do perfil de concentração de cloretos é necessária. A aplicação de tal formulação para a previsão de vida útil de novas estruturas é mais complexa, uma vez que a estimativa de ambos os parâmetros citados anteriormente é difícil, e muitas vezes depende da existência de dados prévios de estruturas semelhantes ou, em muitos casos, para o caso do coeficiente de difusão, demanda a realização de ensaios laboratoriais, aonde, usualmente, empregam-se condições para acelerar o processo corrosivo. Andrade, Possan e Dal Molin (2017) citam ainda, que quando se trata da

previsão de vida útil de novas estruturas o modelo possui baixa confiabilidade, dado que existem diversos parâmetros envolvidos na análise e que a correlação entre eles é questionável.

4.2. MODELO DE UJI, MATSUOKA E MARUYA (1990)

O modelo de Uji, Matsuoka e Maruya (1990) foi obtido a partir da resolução da 2ª Lei de Fick considerando a variação da concentração superficial de cloretos no tempo. O modelo é representado pela Equação 16, que considera o crescimento da concentração superficial linear com o tempo, e pela Equação 17, aonde este crescimento é proporcional à raiz quadrada do tempo.

$$C(x, t) = k\sqrt{t} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2 \cdot D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D}} \right) - \frac{x}{\sqrt{\pi D}} e^{-\frac{x^2}{4D}} \right\} \quad \text{Equação 16}$$

$$C(x, t) = k\sqrt{t} \cdot \left\{ e^{-\frac{x^2}{4D}} - \left[\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D}} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D}} \right) \right] \right\} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

$C(x, t)$ – concentração de cloretos na profundidade x a partir da superfície do concreto com um dado tempo t (%);

k – concentração superficial de cloretos, correspondente ao teor de cloretos ao final do primeiro ano de exposição (%);

x – profundidade (cm);

D – coeficiente de difusão de cloretos (cm²/ano);

t – tempo (anos);

erfc – função complementar de erro de Gauss.

De acordo com Andrade (2001), a adoção da hipótese de crescimento da concentração superficial de cloretos ao longo do tempo corresponde ao comportamento que efetivamente se observa nas estruturas de concreto armado. Contudo, o coeficiente de difusão é considerado constante ao longo do tempo, o que pode levar a erros grosseiros na previsão de vida útil (QUE, 2007; MEDEIROS JUNIOR, 2011).

O modelo não possui aplicabilidade prática e envolve parâmetros como o coeficiente de difusão, que usualmente são determinados através de ensaios laboratoriais. Adicionalmente, não leva em consideração a influência das condições ambientais na penetração de cloretos em estruturas de concreto.

4.3. MODELO DE TANG E NILSSON (1996)

O modelo de Tang e Nilsson (1996) considera a variação do coeficiente de difusão ao longo do tempo e o efeito da fixação química e física dos cloretos no interior do concreto. É expresso pela Equação 18.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{1 + ABC^{B-1}} \left[\frac{\partial D(x, t)}{\partial x} \frac{\partial c}{\partial x} + D(x, t) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right] \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

C – concentração de cloretos livres nos poros do concreto na profundidade x;

A – constante calculada através da Equação 19;

B – constante de adsorção, função do tipo de cimento e do íon envolvido no transporte;

D(x, t) -variação do coeficiente de difusão no tempo (Equação 20).

$$A = \frac{(1 + W_n^0) \propto f_a}{\frac{1}{f_c} + W_n^0 \propto} \frac{f_a}{V_p} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

W_n^0 – fração de água não evaporável = 0,25;

\propto - grau de hidratação;

f_a - constante de adsorção, função do tipo de cimento e do íon envolvido no transporte;

f_c – conteúdo de cimento no concreto em massa;

V_p – volume de poros por unidade de massa de amostra seca;

$$D(x, t) = \frac{D_0}{\epsilon_p} f(x)g(t)e^{\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

D_0 – coeficiente de difusão do concreto hidratado;

ϵ_p – porosidade da matriz de uma amostra de concreto, definida pela Equação 21;

$f(x)$ – função que relaciona a variação da profundidade;

$g(t)$ – função que relaciona a idade do material;

E – energia de ativação do processo de difusão (KJ/mol);

R – constante de Boltzman para gases (KJ/mol°K);

T – temperatura do concreto (°K);

T₀ – temperatura no momento da determinação de D₀ (= 298 °K).

$$\varepsilon_p = \frac{\left(\frac{1}{f_c} + W_n^0 \alpha\right) V_p}{\frac{(1-\alpha)}{\gamma_{\text{cimento}}} + \frac{(1 + W_n^0) \alpha}{\gamma_{\text{gel}}} + \left(\frac{1}{f_c} + W_n^0 \alpha\right) V_p} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

γ_{cimento} – massa específica do cimento Portland = 3,15 g/cm³;

γ_{gel} – massa específica do gel = 2,34 g/cm³.

O modelo acima apresentado faz diversas considerações que representam bem o comportamento que efetivamente se observa nas estruturas de concreto armado, tais como: coeficiente de difusão variando no tempo, o efeito da fixação dos cloretos e a influência da temperatura no coeficiente de difusão. Em contrapartida, é um modelo muito complexo que envolve diversas equações e variáveis, sendo que muitas são determinadas apenas através de ensaios laboratoriais. Todos estes fatores dificultam a aplicação prática do modelo e limitam o seu uso para situações em que há tempo e disponibilidade de um laboratório para a realização dos ensaios.

4.4. MODELO DE BOB (1996)

O modelo de Bob (1996) originalmente foi elaborado para a modelagem da carbonatação, porém após algumas verificações com base em dados experimentais de longa duração, verificou-se que o modelo também poderia ser aplicado para a penetração de cloretos. Este modelo é representado pela Equação 22.

$$x_m = 150 \left(\frac{c K_1 K_2 d}{f_c} \right) \sqrt{t} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

x_m – profundidade média de penetração de cloretos;

f_c – resistência à compressão do concreto;

t – tempo de exposição;

c – capacidade de fixação de cloretos em função do tipo de cimento (Tabela 10);

K_1 - constante que representa a influência da temperatura no modelo (Tabela 11);

K_2 – constante que representa a influência da umidade relativa no modelo (Tabela 12);

d – parâmetro que depende da relação (r) entre a concentração crítica (0,4% em relação à massa de cimento) e a concentração superficial de cloretos na estrutura (Tabela 13).

Tabela 10 - Valores da constante c em função da % de adições no cimento

c	(%) adições no cimento
1,00	0,0
0,90	15,0
0,75	30,0
0,67	50,0

Fonte: Bob (1996), adaptada pela autora

Tabela 11 - Valores da constante K1 em função da temperatura (T)

K1	T (°C)
0,67	0,0 - 5,0
0,75	10,0 - 15,0
1,00	15,0 - 25,0
1,25	25,0 - 35,0
1,50	35,0 - 45,0

Fonte: Bob (1996), adaptada pela autora

Tabela 12 - Valores da constante K2 em função da umidade relativa (UR)

K2	UR (%)
0,75	50,0
1,00	85,0
0,75	100,0

Fonte: Bob (1996), adaptada pela autora

Tabela 13 - Valores do parâmetro d em função da relação r (relação entre a concentração crítica = 0,4% em relação à massa de cimento e a concentração superficial de cloretos)

d	r (%)
2,00	0 - 19
1,00	20,0
0,50	50,0
0,33	65,0
0,16	85,0

Fonte: Bob (1996), adaptada pela autora

É possível constatar que o modelo proposto por Bob (1996) é de fácil utilização. Não envolve cálculos complexos e nem ensaios laboratoriais para a determinação das variáveis

consideradas na modelagem da penetração de cloretos. O modelo também considera a influência das condições de exposição na penetração de cloretos. Contudo, como a concentração superficial de cloretos é adotada como constante ao longo do tempo, o modelo não representa corretamente este aspecto quando comparado ao fenômeno natural que efetivamente se observa nas estruturas de concreto.

4.5. MODELO DE ANDRADE (2001)

Andrade (2001) desenvolveu um modelo matemático de elevada aplicabilidade prática para representar a penetração de cloretos em estruturas de concreto. Este modelo foi obtido através de um experimento em grupos focais realizado com especialistas da área de Durabilidade das Estruturas e Tecnologia dos Materiais. Possui como dados de entrada parâmetros associados às características do concreto e às condições ambientais, conforme Equação 23.

$$y = 7,35 \cdot \frac{UR^{0,7} \cdot T^{0,1} \cdot Cl^{0,7}}{K_1 \cdot f_{ck} \cdot K_2 \cdot (1 + Ad)^{0,2}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

y - posição da frente de penetração de íons cloreto (equivalente a um teor de cloretos igual a 0,4% em relação à massa de cimento), em mm;

UR – umidade relativa média do ambiente, em %;

T – temperatura média ambiental, em °C;

Cl – concentração superficial de cloretos, correspondente ao teor de cloretos ao final do primeiro ano de exposição, em % sobre a massa do cimento;

K_1 – fator que varia em função do tipo de cimento empregado na fabricação do concreto (Tabela 14);

f_{ck} – resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

K_2 – fator que varia em função do tipo de adição utilizada no concreto (Tabela 15);

Ad – teor de adição no concreto, em % sobre a massa de cimento; e

t – tempo, em anos.

Tabela 14 - Valores de K_1 em função do tipo de cimento

K1	Tipo de Cimento
0,98	CP II - E
1,00	CP II - F
1,05	CP II - Z
1,21	CP III - AF
1,17	CP IV - Poz
0,95	CP V - ARI

Fonte: Andrade (2001)

Tabela 15 - Valores de K_2 em função do tipo de adição

K2	Tipo de Adição
1,00	Sílica ativa
0,97	Metacaulim
0,76	Cinza de casca de arroz

Fonte: Andrade (2001)

Como apresentado anteriormente, é um modelo simples e de fácil aplicação; envolve variáveis de fácil compreensão por todos os projetistas e engenheiros, com parâmetros de fácil obtenção. Como exemplo disso, pode-se citar o fato de que o modelo não possui como parâmetro de entrada o coeficiente de difusão. Este coeficiente é indiretamente considerado através das variáveis associadas ao tipo de cimento, tipo e porcentagem de adição utilizada, resistência à compressão característica do concreto e condições ambientais de exposição.

Diferentemente de diversos modelos para previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, o modelo proposto por Andrade (2001) leva em consideração a interação entre a estrutura de concreto e o meio ambiente em que está inserida, através das variáveis: temperatura média e umidade relativa média. Esse é um aspecto bastante importante a ser considerado, uma vez que as condições ambientais influenciam na penetração de cloretos em estruturas de concreto.

Conforme apontado pelo pesquisador, algumas hipóteses simplificadoras foram estabelecidas como condições de contorno do modelo: admite-se que o concreto é homogêneo e isotrópico; as possíveis variações locais da frente de penetração de cloretos não foram consideradas, estabelecendo-se que a penetração é uniforme; admite-se que a estrutura de concreto foi bem executada. Cita-se também o fato de considerar a concentração superficial de cloretos constante ao longo do tempo. Desta forma, essas simplificações podem trazer imprecisões e erros para a previsão de vida útil de estruturas de concreto e todas as consequências atreladas a estes problemas.

Outro ponto destacado por Andrade (2001) é o fato de o modelo não se adequar muito bem a dados de pontos localizados em regiões de respingos e variação de maré. Isto porque o mesmo foi elaborado considerando estruturas sob a ação de névoa salina. Para Brito (2008) o modelo de Andrade é limitado, devido aos parâmetros ambientais serem utilizados em médias anuais. O autor ainda salienta que tal modelo não considera as diferentes orientações de uma estrutura e zonas de exposição (microclima), entre outras variáveis que podem interferir na durabilidade de uma estrutura.

Por fim, é importante enfatizar que em 2001, ano que Andrade publicou seu trabalho, existiam poucos dados de campo disponíveis para a validação de seu modelo. Desta maneira, ainda é necessário realizar a análise da aplicação do modelo em diferentes estruturas, a fim de validá-lo para o maior número de combinações possíveis e, se necessário, ajustá-lo.

4.6. MODELO DE ANDRADE *et al.* (2009)

O modelo de Andrade *et al.* (2009) é baseado na resistividade elétrica como principal parâmetro para a determinação do tempo de iniciação da corrosão de armaduras, conforme apresentado pela Equação 24.

$$t_i = \frac{x_i^2 \cdot \rho_{es} \cdot r_{Cl}}{2 \cdot k_{Cl}} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

t_i – período de iniciação da corrosão (anos);

x_i – espessura de cobrimento do concreto (cm);

ρ_{es} – resistividade elétrica do concreto saturado de água ($\Omega \cdot \text{cm}$);

r_{Cl} – fator de ligação que leva em consideração o retardamento da penetração dos cloretos devido à fixação de parte destes íons na matriz do cimento, calculado a partir da Equação 25.

k_{Cl} – fator que leva em consideração as condições de exposição, de acordo com a classificação da EN 206-1 2007 (Tabela 16).

$$r_{Cl} = \frac{D_{ef}}{D_{ap} \cdot \epsilon} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

D_{ef} – coeficiente de difusão em regime estacionário, obtido pelo ensaio de migração de cloretos (cm^2/ano);

D_{ap} – coeficiente de difusão em estado não estacionário, obtido pelo ensaio de migração de cloretos (cm^2/ano);

ε – porosidade, determinada pelo ensaio de intrusão de mercúrio (% em volume).

Tabela 16 - Valores de k_{Cl} para distintas condições de exposição da norma EN 206-1 (2007)

Corrosão	Classe de exposição	Descrição do Ambiente	Kcl ($\text{cm}^2\Omega/\text{ano}$)
Sem risco de corrosão	X0	Para concreto não armado exceto exposto a gelo/degelo, a abrasão ou ataque químico. Para concreto armado em ambiente muito seco	200
Induzida por carbonatação	XC1	Seco ou permanentemente úmido	1000
	XC3	Moderadamente úmido	3000
Induzida por cloretos presentes na água do mar	XS1a	Ar transportando sais marinhos sem contato direto com a água do mar, distância entre a estrutura e o mar > 500 m	5000
	XS1b	Ar transportando sais marinhos sem contato direto com a água do mar, distância entre a estrutura e o mar < 500 m	10000
	XS2	Submersão permanente	17000
	XS3	Zona de maré, de rebentação ou salpicos	25000

Fonte: Andrade e d' Andrea (2010) e norma EN 206 -1 (2007), elaborada pela autora

A utilização da resistividade elétrica como principal parâmetro para a determinação do tempo de iniciação da corrosão torna a aplicação do modelo de Andrade *et al.* (2009) bastante prática, uma vez que este ensaio não destrutivo corresponde a uma técnica de baixo custo e de fácil execução e que pode ser empregada para o monitoramento ao longo do tempo, sem causar danos às estruturas. Outros pontos positivos do modelo supracitado estão relacionados com a consideração da influência das condições de exposição e da fixação de cloretos.

Contudo, para a determinação do parâmetro r_{Cl} , razão entre os coeficientes de difusão em estado estacionário e não estacionário, é necessária a realização do ensaio de migração de cloretos. A necessidade de ensaio laboratorial reduz a aplicabilidade prática do modelo e, por se tratar de um ensaio acelerado, possui associado diversos aspectos negativos, como, por exemplo, condições de realização do ensaio muito mais agressivas que as condições de exposição do fenômeno natural de degradação.

4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS MODELOS

Conforme mostrado neste capítulo, existem inúmeros modelos para a previsão de vida útil de estruturas de concreto armado que consideram a iniciação da corrosão por cloretos. Na Tabela 17 é apresentado um comparativo dos parâmetros de entrada do modelo de Andrade (2001), objeto de estudo deste trabalho, e de alguns dos modelos existentes na literatura. Observa-se que grande parte destes modelos são complexos e visam modelar o fenômeno de degradação com fidelidade, demandando dados prévios de estruturas semelhantes ou variáveis de entrada que geralmente são obtidas a partir de ensaios laboratoriais que avaliam características mais específicas do concreto e que muitas vezes não são compreendidas por todos os engenheiros e projetistas. Além disto, por envolverem ensaios laboratoriais não usuais, tais modelos possuem aplicação bastante limitada. Estas características restringem a utilização destes modelos para o meio científico, evidenciando a baixa aplicabilidade prática dos mesmos.

Tabela 17 - Parâmetros de entrada de alguns modelos existentes na literatura para previsão de vida útil de estruturas de concreto

Parâmetros de entrada	Andrade (2001)	Solução 2ª Lei de Fick	Uji, Matsuoka e Maruya (1990)	Tang e Nilsson (1996)	Bob (1996)	Andrade <i>et al.</i> (2009)
Concentração superficial de cloretos		X			X	
Concentração superficial de cloretos (1º ano de exposição)	X		X			
Concentração de cloretos livres nos poros				X		
Coefficiente de difusão		X	X	X		X
Espessura de cobrimento		X	X			X
Tempo	X	X	X	X	X	
Resistência à compressão do concreto	X				X	
Tipo de cimento	X			X	X	
Consumo de cimento				X		
Tipo de adição	X					
Teor de adição	X					
Resistividade elétrica do concreto						X
Volume dos poros do concreto				X		
Porosidade do concreto por intrusão de mercúrio						X
Temperatura	X			X	X	
Umidade relativa	X				X	
Microclima (atmosfera marinha, submersa, variação de maré)						X

Fonte: Andrade (2001), Uji, Matsuoka e Maruya (1990), Tang e Nilsson (1996), Bob (1996) e Andrade *et al.* (2009), elaborada pela autora

Adicionalmente, com exceção do modelo de Andrade (2001) e de Bob (1996), as demais formulações têm como parâmetro de entrada o coeficiente de difusão, o qual usualmente é obtido a partir de ensaios acelerados realizados em laboratório. Meira *et al.* (2007) citam que, no geral, as condições de laboratório não reproduzem com precisão as reais condições de

exposição, onde os parâmetros que influenciam a penetração de cloretos no concreto atuam simultaneamente. Adicionalmente, os ensaios acelerados recebem diversas críticas visto que são aplicados alguns fatores de aceleração a fim de minimizar o tempo para a obtenção dos resultados, ou seja, condições de exposição que podem não representar efetivamente as reais condições de exposição de uma estrutura, principalmente no tocante às oscilações ambientais (ANDRADE, 2001).

Tendo isto em vista, o modelo de Andrade (2001) possui outro foco; trata-se de um modelo de elevada aplicabilidade prática e de fácil entendimento, uma vez que envolve variáveis de entrada de fácil obtenção e já usuais em projetos, que são compreendidas por todos os engenheiros e projetistas, tais como relação a/c, resistência à compressão aos 28 dias, tipo de cimento, entre outros. Isto posto, a validação do modelo proposto por Andrade (2001) para o maior número de combinações possíveis é fundamental, dado que irá contribuir para a consolidação de uma ferramenta de simples aplicação para a modelagem do ingresso de cloretos para o interior do concreto e, conseqüentemente, auxiliará engenheiros e projetistas a garantir a vida útil de projeto exigida pelas normativas brasileiras. Também permitirá avaliar a influência dos diversos parâmetros de projeto na vida útil destas estruturas, tais como tipo de cimento, relação a/c e resistência à compressão. E, por fim, auxiliará no cálculo do tempo remanescente da vida útil de estruturas de concreto, possibilitando a realização de intervenções e manutenções preventivas que assegurem a durabilidade de tais estruturas.

A Tabela 18 contém um resumo das informações acima apresentadas, sintetizadas em vantagens e desvantagens associadas aos modelos analisados neste trabalho. Enfatiza-se a elevada aplicabilidade prática do modelo de Andrade (2001) frente aos demais modelos.

Tabela 18 - Vantagens e desvantagens de alguns modelos existentes na literatura para previsão de vida útil de estruturas de concreto

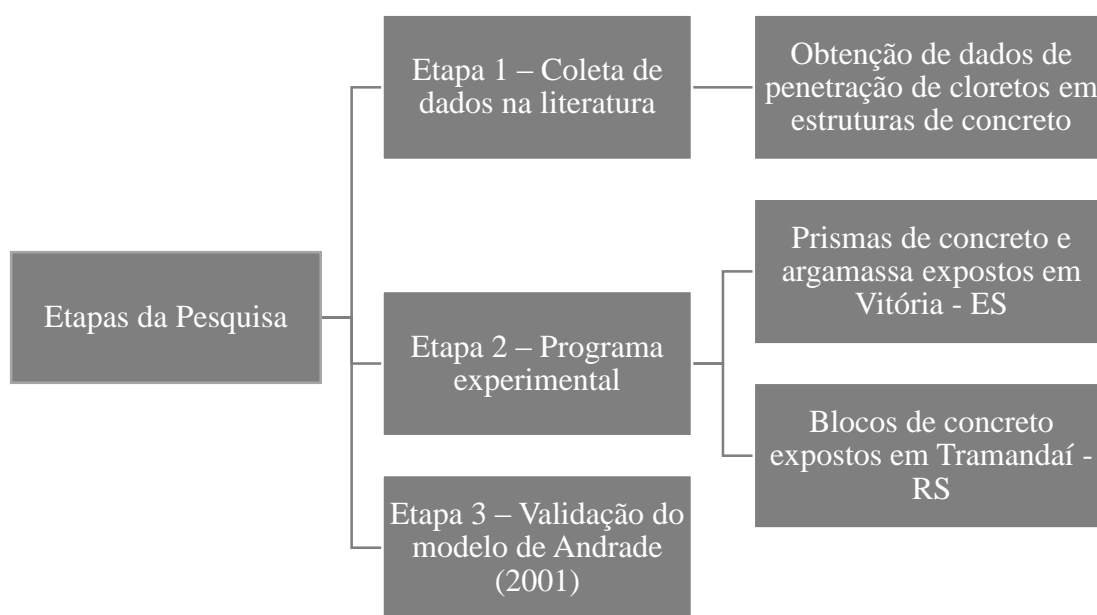
Modelos	Vantagens	Desvantagens
Andrade (2001)	Elevada aplicabilidade prática Variáveis de entrada de fácil obtenção Considera a influência do local de exposição	Erro associado (diferença entre o valor calculado e observado) pode ser maior Requer calibração com base em dados de penetração de cloretos em estruturas de concreto
Solução 2ª Lei de Fick	Fácil aplicação em estruturas existentes Erro associado (diferença entre o valor calculado e observado) tende a ser menor	Difícil aplicação em novas estruturas - usualmente requer inspeções prévias Variáveis de entrada de difícil obtenção Não considera a influência do local de exposição
Uji, Matsuoka e Maruya (1990)	Fácil aplicação em estruturas existentes Erro associado (diferença entre o valor calculado e observado) tende a ser menor	Difícil aplicação em novas estruturas - usualmente requer inspeções prévias Variáveis de entrada de difícil obtenção Não considera a influência do local de exposição
Tang e Nilsson (1996)	Considera a influência do local de exposição Erro associado (diferença entre o valor calculado e observado) tende a ser menor	Baixa aplicabilidade prática Requer ensaios para a determinação das variáveis de entrada - algumas são de difícil obtenção
Bob (1996)	Elevada aplicabilidade prática Variáveis de entrada de fácil obtenção Considera a influência do local de exposição	Erro associado (diferença entre o valor calculado e observado) pode ser maior Requer calibração com base em dados de penetração de cloretos em estruturas de concreto
Andrade <i>et al.</i> (2009)	Principal parâmetro de entrada é a resistividade do concreto - ensaio não destrutivo Considera a influência do local de exposição	Baixa aplicabilidade prática Requer ensaios para a determinação das variáveis de entrada - algumas são de difícil obtenção

Fonte: Elaborada pela autora

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo contém a descrição dos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho que, conforme apresentado na Figura 13, é caracterizado por três etapas principais. A seguir cada uma das etapas será melhor detalhada.

Figura 13 - Etapas que constituem a pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora

5.1. COLETA DE DADOS NA LITERATURA

A fim de validar o modelo de Andrade (2001) para o maior número de combinações possíveis, a pesquisa, em uma primeira etapa, teve como objetivo a coleta de dados na literatura existente, referentes à penetração de cloretos em estruturas de concreto localizadas em zona de atmosfera marinha. Além dos perfis de penetração de cloretos, os dados também devem conter as informações necessárias para a aplicação do modelo de Andrade (2001), as quais são: umidade relativa média do ambiente; temperatura média; concentração superficial de cloretos; tipo de cimento utilizado; resistência à compressão aos 28 dias; tipo e porcentagem de adição (se utilizada) e tempo de exposição.

Nesta etapa surgiram algumas dificuldades associadas ao fato de que a grande parte dos dados de penetração de cloretos existentes na literatura foram obtidos através de ensaios

acelerados, isto porque, trabalhos pautados em condições naturais de exposição demandam períodos de tempo mais prolongados. Tais dados foram descartados, uma vez que a intenção é validar o modelo de Andrade (2001) com base em dados de exposição natural. Este critério pode ser justificado pelo fato de que a degradação em ensaios acelerados difere daquela em reais condições de exposição. Outro aspecto que merece destaque diz respeito ao fato de que a zona de atmosfera marinha, do ponto de vista da agressividade marinha, é menos danosa às estruturas de concreto, o que justifica o pequeno número de trabalhos dedicados a esta zona (MEIRA, 2004).

Em relação aos dados obtidos com exposição natural em atmosfera marinha, muitos deles possuíam um pequeno período de exposição, o que em grande parte das situações não foi suficiente para atingir o teor de cloretos crítico, adotado neste trabalho como 0,4% em relação à massa de cimento. Cita-se ainda o fato de que foram poucos os dados encontrados que avaliaram a concentração de cloretos ao longo do tempo, ou seja, em várias idades. Adicionalmente, alguns dos dados não possuíam todas as informações necessárias para a aplicação do modelo de Andrade (2001), justificando a pequena quantidade de trabalhos encontrados nesta primeira etapa da pesquisa.

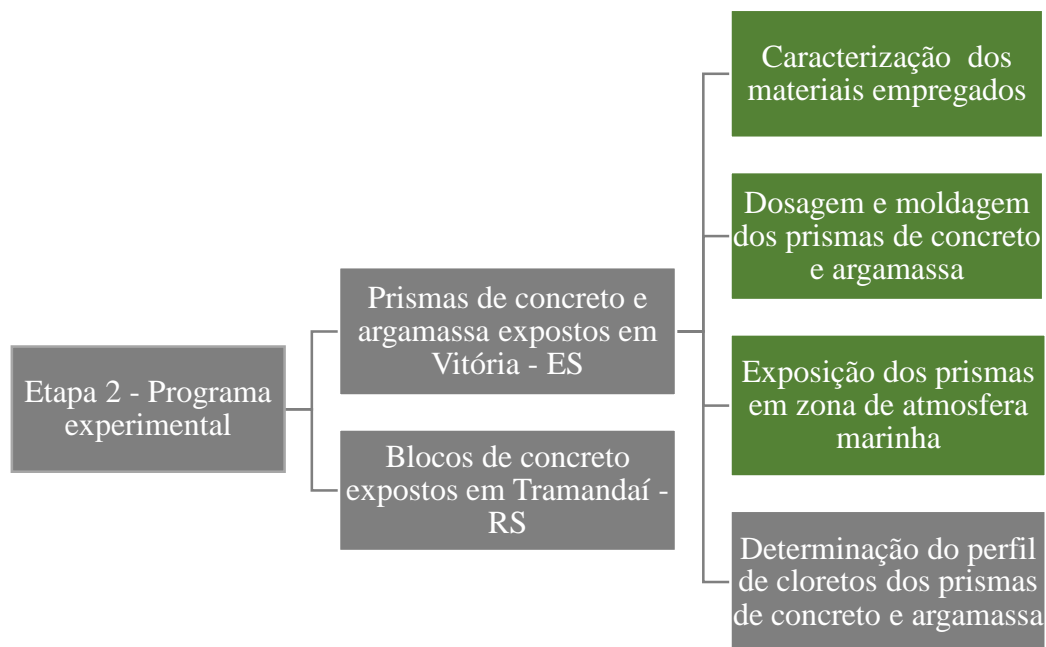
5.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.2.1 Prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória - ES

Esta etapa do trabalho está enquadrada no projeto firmado entre a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e o Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) intitulado “*Contribuições para o aperfeiçoamento da norma técnica de avaliação de desempenho de edifícios habitacionais NBR 15575*” e no projeto de pesquisa do Programa Pesquisador Gaúcho (PqG 2010) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS). Estes projetos iniciaram em 2011 e, desde então, envolveram pesquisadores de diversas instituições, tendo como resultado diversos trabalhos já publicados (DAL MOLIN *et al.*, 2016; ANDRADE, 2013; DAL MOLIN *et al.*, 2012) e outros que ainda estão em desenvolvimento, como é o caso desta pesquisa. Isto porque, por se tratarem de projetos com exposição natural aos fenômenos de degradação que desencadeiam a corrosão de armaduras, são caracterizados por um período de longa duração. Desta forma, conforme destacado em verde na Figura 14, algumas das atividades foram realizadas previamente a esta pesquisa, sendo executadas por outros pesquisadores envolvidos nos projetos. Já as atividades

em cinza são aquelas que efetivamente foram desenvolvidas neste trabalho, as quais consistem em uma continuação dos projetos previamente mencionados.

Figura 14 - Etapas do programa experimental



Fonte: Elaborada pela autora

5.2.1.1. Planejamento do programa experimental

O planejamento do programa experimental foi realizado com a definição dos fatores controláveis, dos fatores não controláveis e das variáveis de resposta da pesquisa. Os fatores controláveis são aqueles que podem exercer influência significativa sobre as variáveis de resposta. Nesta pesquisa, os fatores controláveis, também conhecidos como variáveis independentes, são:

- tipo de cimento: CP II - F, CP III, CP IV e CP V - ARI, os tipos de cimento mais usuais existentes no mercado nacional;
- relação a/c: 0,45, 0,55 e 0,65, visando avaliar o comportamento para diferentes níveis de resistência à compressão uniaxial de concretos e argamassas;
- ambiente de exposição: os prismas de concreto e argamassa permaneceram expostos em local protegido e desprotegido da chuva;
- tempo de exposição: para verificar a evolução da penetração de cloretos ao longo tempo foram avaliadas amostras de concreto e argamassa com tempos de exposição de 1, 2 e 3 anos para as configurações com relação a/c de 0,45; 1, 1,6

e 2 anos para as configurações com relação a/c de 0,55 e de 0,3, 0,7 e 1 ano para as configurações com relação a/c de 0,65;

- e) profundidade de extração das amostras: obtenção do perfil de cloretos através da extração de amostras nos intervalos de profundidade de: 0 – 5 mm, 5 – 10 mm, 10 – 15 mm e 15 – 20 mm.

Como os prismas de concreto e argamassa permaneceram expostos em ambiente natural, existem variáveis não controláveis atuando sobre eles que também influenciam a variável de resposta, tais como: temperatura, umidade relativa, precipitação e direção e intensidade dos ventos, sendo medidas apenas para controle.

Já as variáveis de resposta, também denominadas de variáveis dependentes, estão relacionadas com as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos e argamassas, sendo:

- a) teor de cloretos livres em relação à massa de cimento: optou-se pela determinação do teor de cloretos livres por ser esta a forma que efetivamente causa a corrosão de armaduras e compromete a durabilidade de estruturas de concreto e também por ser uma solução mais econômica frente à determinação da concentração de cloretos totais, conforme justificado no item 5.2.1.7.2. *Análise das Amostras*;
- b) resistência à compressão axial: variável utilizada como parâmetro de controle dos concretos e argamassas avaliados neste estudo, sendo determinada na idade de 28 dias.

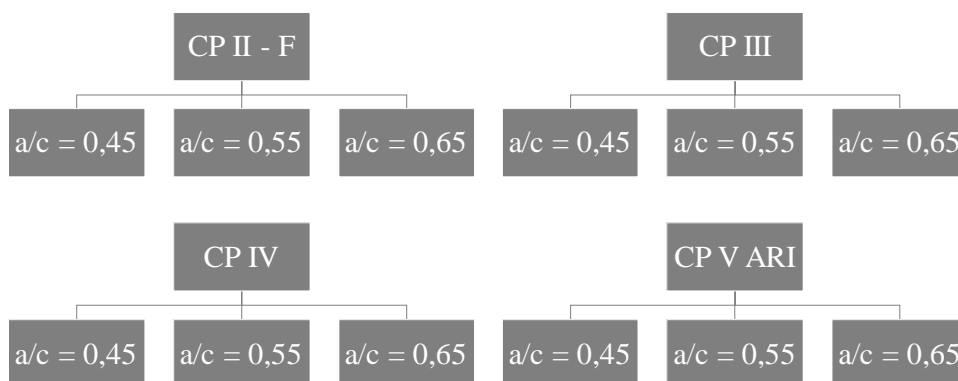
É importante destacar que este trabalho possui duas limitações, a primeira associada à distância em relação ao mar da estação de monitoramento em que os prismas de concreto e argamassa permaneceram expostos em Vitória. Como foi evidenciado na revisão bibliográfica apresentada no *Capítulo 2*, a distância em relação ao mar exerce influência significativa na deposição de cloretos em estruturas de concreto. Desta forma, o ideal seria expor os prismas o mais próximo possível do mar, para que os mesmos apresentassem concentração de cloretos significativas. Contudo, como o tempo de exposição dos prismas era longo, e em função da disponibilidade de locais protegidos durante todo este período, os mesmos permaneceram expostos na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), localizada a 1,8 km do mar. A segunda limitação diz respeito ao fato de que não se tomou o cuidado de expor os prismas voltados para a direção dos ventos predominantes da região.

5.2.1.2. Matriz experimental

A matriz experimental foi elaborada visando a determinação do perfil de cloretos de prismas de concreto e argamassa que permaneceram expostos em zona de atmosfera marinha na cidade de Vitória. Estes prismas foram moldados em Porto Alegre e posteriormente remetidos para a cidade supracitada. Após o período de exposição anteriormente citado, os prismas de concreto e argamassa foram reenviados para Porto Alegre, aonde foi realizada a extração de amostras sob a forma pulverulenta e, por fim, a determinação do perfil de concentração de cloretos.

A fim de avaliar a influência do tipo de cimento e da relação a/c no ingresso de cloretos para o interior destes materiais, foram estabelecidas as doze configurações apresentadas na Figura 15. Foram utilizados quatro tipos de cimento: CP II – F, CP III, CP IV e CP V, e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65, para a produção dos concretos e argamassas avaliados nesta pesquisa.

Figura 15 - Configurações dos prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória



Fonte: Andrade (2013)

O intervalo de exposição das configurações com relação a/c de 0,45, 0,55 e 0,65 estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Intervalo de exposição dos prismas de concreto e argamassa

Relação a/c	Início da Exposição	Fim da Exposição
0,45	15/07/2012	30/06/2015
0,55	15/07/2012	07/07/2014
0,65	15/07/2012	25/07/2013

Fonte: Andrade (2013)

Para cada tipo de cimento e relação a/c foram moldados 2 prismas de concreto com dimensões de 10 x 10 x 36 cm e 2 prismas de argamassa com dimensões de 7 x 7 x 28 cm, dos

quais um permaneceu exposto em local externo protegido da chuva e outro em local externo desprotegido da chuva (Figura 16). É importante destacar que os mesmos não estavam em contato direto com o solo, e que antes da exposição em ambiente natural, o topo e a base de todos os prismas foram selados com parafina/epóxi, a fim de permitir a penetração de íons cloretos somente pelas faces laterais.

Figura 16 – Prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória (a) em local externo protegido da chuva; (b) em local externo desprotegido da chuva



Fonte: Andrade (2013)

Em um estudo prévio a esta pesquisa foi determinada a profundidade de carbonatação destes prismas de concreto e argamassa (ANDRADE, 2013). Para a realização deste ensaio, os mesmos foram quebrados na presa em fatias de espessura superior a 20 mm, para posterior aspersão de solução de fenolftaleína e medição da espessura de carbonatação com um paquímetro, conforme ilustrado na Figura 17. Após a leitura da profundidade de carbonatação e da selagem do topo com parafina/epóxi, a parte remanescente do prisma era devidamente inserida na sua condição de exposição inicial, e a fatia retirada era embalada em saco plástico e devidamente identificada com as informações: tipo de cimento, relação a/c e data, para posterior remessa para Porto Alegre, visando a realização dos ensaios para a determinação do perfil de concentração de cloretos. Desta forma, foram avaliadas quanto à penetração de cloretos as fatias correspondentes a um período de exposição de 1, 2 e 3 anos para as configurações com relação a/c de 0,45; 1, 1,6 e 2 anos para as configurações com relação a/c de 0,55 e de 0,3, 0,7 e 1 ano para as configurações com relação a/c de 0,65.

Figura 17 – Procedimento padrão para determinação da profundidade de carbonatação (a) quebra do prisma na prensa; (b) prisma fatiado; (c) fatias dos prismas; (d) aspersão de fenolftaleína nas fatias dos prismas



Fonte: Andrade (2013)

É importante destacar que quando os prismas de concreto e argamassa foram retirados do local de exposição e levados para o laboratório para determinação da profundidade de carbonatação, ao reinseri-los no mesmo local, não se tomou o cuidado de mantê-los na mesma posição inicial, ou seja, com as faces voltadas para a mesma direção e sentido durante todo o período de exposição. Desta forma, a solução encontrada para contornar esse problema foi determinar, para um dado intervalo de profundidade, a concentração de cloretos em uma amostra constituída pelo material coletado nas 4 faces de cada prisma.

Nos subitens a seguir serão descritos os ensaios de caracterização dos materiais empregados, a dosagem experimental e os procedimentos que foram utilizados para a determinação da penetração de cloretos nos prismas de concreto e argamassa avaliados neste estudo.

5.2.1.3. Caracterização dos materiais empregados

Foram utilizados 4 tipos de cimentos para a moldagem dos prismas de concreto e argamassa, sendo estes: cimento Portland composto CP II – F, cimento Portland de alto forno CP III, cimento Portland pozolânico CP IV e cimento Portland de alta resistência inicial CP V – ARI. A caracterização destes cimentos foi fornecida pelo fabricante. Na Tabela 20 são

apresentados os resultados da caracterização química dos aglomerantes, bem como as exigências estabelecidas pelas normas ABNT NBR 11578:1991, ABNT NBR 5735:1991, ABNT NBR 5736:1991 e ABNT NBR 5733:1991, correspondentes, respectivamente, aos cimentos CP II - F, CP III, CP IV e CP V - ARI.

Tabela 20 - Caracterização química dos cimentos e exigências normativas

Propriedades químicas	Resultados (%)				Exigências de norma			
	CPII - F	CP III	CP IV	CP V	NBR 11578	NBR 5735	NBR 5736	NBR 5733
Al ₂ O ₃	4,21	7,45	5,31	4,79	-	-	-	-
SiO ₂	18,31	17,32	28,02	21,81	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	2,46	1,31	3,78	3,74	-	-	-	-
CaO	60,45	50,20	44,12	57,85	-	-	-	-
MgO	4,94	6,34	2,72	4,82	≤ 6,5	-	≤ 6,5	≤ 6,5
SO ₃	2,87	2,08	2,60	2,68	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 3,5
Perda ao fogo	5,01	4,25	2,90	2,89	≤ 6,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5
CaO livre	1,52	0,62	0,82	1,45	-	-	-	-
Resíduo Insolúvel	1,18	0,38	24,27	0,59	≤ 2,5	≤ 1,5	-	≤ 1,0

Fonte: Andrade (2013), ABNT NBR 11578:1991, ABNT NBR 5735:1991, ABNT NBR 5736:1991 e ABNT NBR 5733:1991

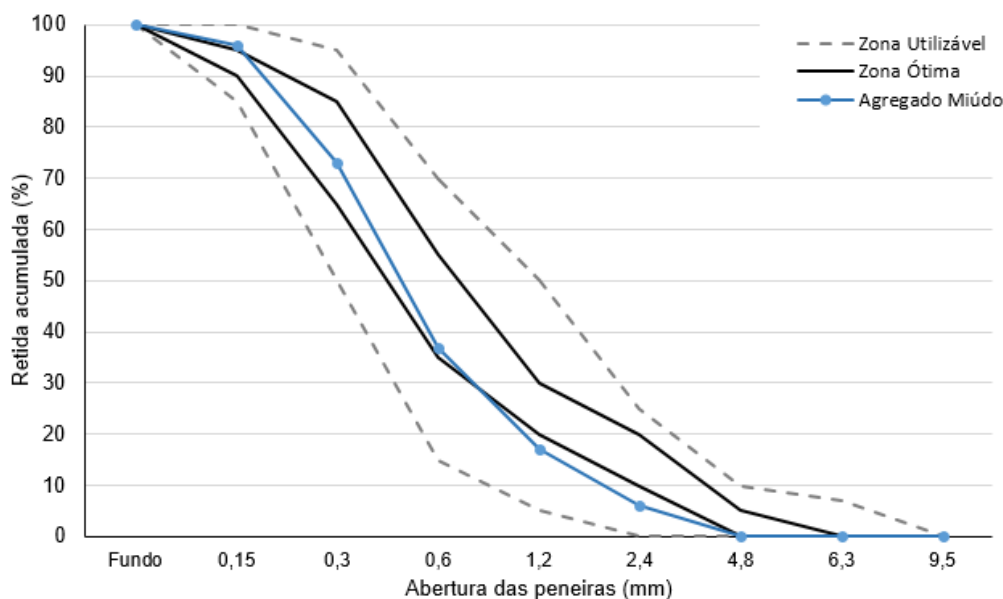
Como agregado miúdo foi utilizada uma areia quartzosa natural oriunda do Rio Jacuí. A Tabela 21 contém os resultados encontrados nos ensaios para caracterização deste agregado e na Figura 18 é apresentada sua curva granulométrica e os limites superiores e inferiores estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2009 para as zonas utilizável e ótima. A partir da análise desta figura constata-se que o agregado possui uma distribuição granulométrica contínua e encontra-se dentro da zona utilizável.

Tabela 21 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo

Ensaio	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida (massa)		Método de ensaio
		Individual	Acumulada	
Composição granulométrica	4,8	0	0	NBR NM 248 (2003)
	2,4	6	6	
	1,2	11	17	
	0,6	20	37	
	0,3	36	73	
	0,15	23	96	
	<0,15	4	100	
Dimensão máxima característica			4,8 mm	NBR NM 248 (2003)
Módulo de finura			2,29	NBR NM 248 (2003)
Massa específica			2,61 kg/dm ³	NBR NM 52 (2009)
Massa unitária			1,55 kg/dm ³	NBR NM 52 (2009)

Fonte: Andrade (2013)

Figura 18 - Curva granulométrica do agregado miúdo e os limites superiores e inferiores das zonas utilizável e ótima estabelecidas pela ABNT NBR 7211:2009



Fonte: Andrade (2013), ABNT NBR 7211:2009

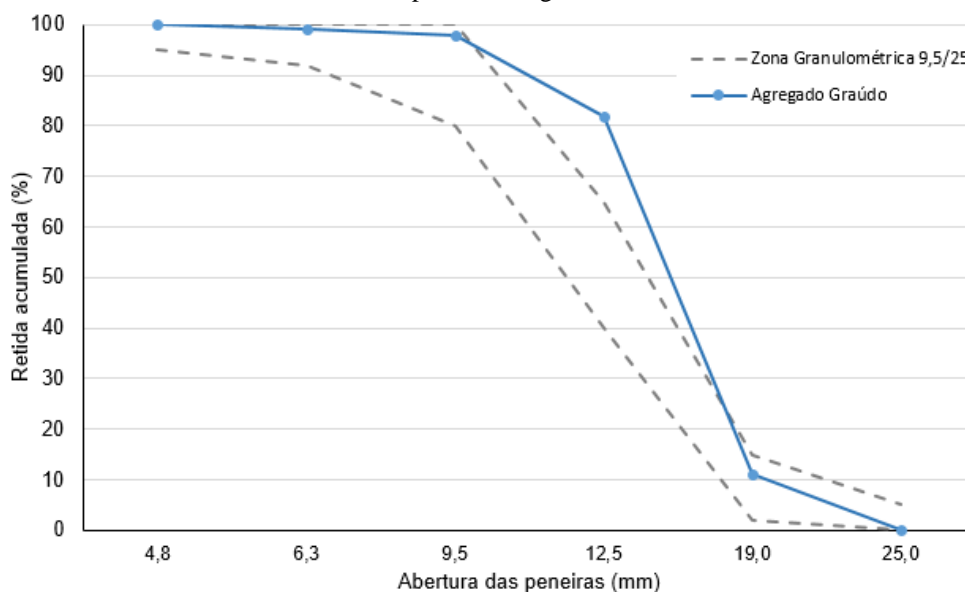
O agregado graúdo utilizado foi uma pedra britada de origem basáltica. Na Tabela 22 são apresentados os resultados da caracterização deste agregado. Destaca-se que o índice de forma do mesmo atende ao limite especificado pela ABNT NBR 7211:2009, sendo inferior a 3. A Figura 19 mostra a curva granulométrica do agregado graúdo e os limites da zona granulométrica 9,5/25, de acordo com a ABNT NBR 7211:2009.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo

Ensaio	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida (massa)		Método de ensaio
		Individual	Acumulada	
Composição granulométrica	25,0	0	0	NBR NM 248 (2003)
	19,0	11	11	
	12,5	71	82	
	9,5	16	98	
	6,3	1	99	
	4,8	1	100	
Dimensão máxima característica			25 mm	NBR NM 248 (2003)
Módulo de finura			7,09	NBR NM 248 (2003)
Índice de Forma			2,66	NBR 7809 (2006)
Massa específica			2,93 kg/dm ³	NBR NM 53 (2009)
Massa unitária			1,60 kg/dm ³	NBR NM 45 (2006)

Fonte: Andrade (2013)

Figura 19 - Curva granulométrica do agregado graúdo e os limites superior e inferior estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2009 para a zona granulométrica 9,5/25



Fonte: Andrade (2013), ABNT NBR 7211:2009

5.2.1.4. Dosagem e moldagem dos prismas de concreto

O proporcionamento dos materiais para a confecção dos concretos foi determinado a partir do método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). Partindo-se de um abatimento do tronco de cone estabelecido em 100 ± 20 mm, determinou-se para o traço 1:5 o teor de argamassa ideal, sendo este de 53%. Esse teor de argamassa foi mantido constante para os traços rico e pobre, de 1:3,5 e 1:6,5, respectivamente. A partir da definição destes parâmetros foram determinadas as dosagens dos concretos, as quais encontram-se apresentadas nas Tabelas 23 a 26. Na Figura 20 é apresentado o diagrama final de dosagem dos concretos, considerando a idade de ruptura de 28 dias.

Tabela 23 – Dosagem e quantidade de materiais para os concretos com cimento CP II - F

Traço	Materiais	Proporção (massa)	Quantidade de material (kg/m³)	Relação a/c	Abatimento (mm)
1:3.5	Cimento	1,00	513,00	0,34	100
	Areia	1,39	713,07		
	Brita	2,12	1087,56		
1:5.0	Cimento	1,00	386,00	0,42	110
	Areia	2,18	841,48		
	Brita	2,82	1088,52		
1:6.5	Cimento	1,00	310,00	0,51	100
	Areia	2,98	923,80		
	Brita	3,53	1094,30		

Fonte: Andrade (2013)

Tabela 24 - Dosagem e quantidade de materiais para os concretos com cimento CP III

Traço	Materiais	Proporção (massa)	Quantidade de material (kg/m³)	Relação a/c	Abatimento (mm)
1:3.5	Cimento	1,00	491,00	0,41	120
	Areia	1,39	682,49		
	Brita	2,12	1040,92		
1:5.0	Cimento	1,00	378,00	0,47	110
	Areia	2,18	824,04		
	Brita	2,82	1065,96		
1:6.5	Cimento	1,00	303,00	0,56	100
	Areia	2,98	902,94		
	Brita	3,53	1069,59		

Fonte: Andrade (2013)

Tabela 25 - Dosagem e quantidade de materiais para os concretos com cimento CP IV

Traço	Materiais	Proporção (massa)	Quantidade de material (kg/m³)	Relação a/c	Abatimento (mm)
1:3.5	Cimento	1,00	490,00	0,40	95
	Areia	1,39	681,10		
	Brita	2,12	1038,80		
1:5.0	Cimento	1,00	370,00	0,50	90
	Areia	2,18	806,60		
	Brita	2,82	1043,40		
1:6.5	Cimento	1,00	295,00	0,63	120
	Areia	2,98	879,10		
	Brita	3,53	1041,35		

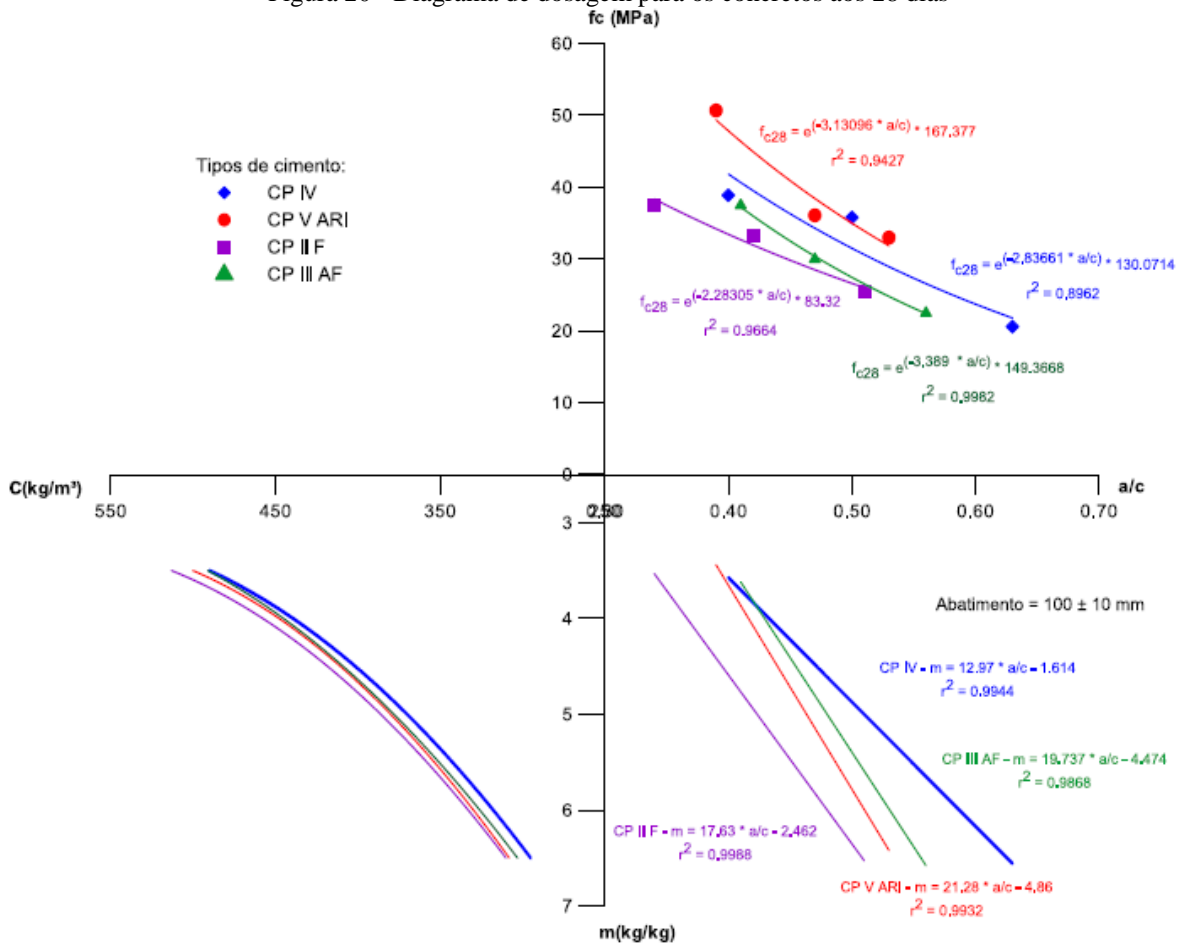
Fonte: Andrade (2013)

Tabela 26 - Dosagem e quantidade de materiais para os concretos com cimento CP V - ARI

Traço	Materiais	Proporção (massa)	Quantidade de material (kg/m³)	Relação a/c	Abatimento (mm)
1:3.5	Cimento	1,00	500,00	0,39	105
	Areia	1,39	695,00		
	Brita	2,12	1060,00		
1:5.0	Cimento	1,00	380,00	0,47	110
	Areia	2,18	828,40		
	Brita	2,82	1071,60		
1:6.5	Cimento	1,00	308,00	0,53	110
	Areia	2,98	917,84		
	Brita	3,53	1087,24		

Fonte: Andrade (2013)

Figura 20 - Diagrama de dosagem para os concretos aos 28 dias



Fonte: Andrade (2013)

Após determinado o proporcionamento dos materiais, passou-se à produção dos concretos e moldagem dos prismas e corpos de prova. A mistura foi realizada em betoneira de eixo inclinado e o processo de adensamento escolhido foi o mecânico, com mesa vibratória, adotando-se como procedimento o preenchimento das formas em duas camadas, sendo cada camada vibrada durante um período de 30 segundos. Para cada traço foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos para a determinação da resistência à compressão, em formas metálicas de 9,5 x 19 cm, e 2 prismas de concreto, em formas metálicas de 10 x 10 x 36 cm. O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com o preconizado pela norma ABNT NBR 5739:2007 e o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone seguindo a norma ABNT NBR NM 67:1996.

Posteriormente à moldagem, os corpos de prova e os prismas de concreto foram mantidos cobertos por 24 horas no ambiente de laboratório e após isto foram desmoldados e mantidos em câmara úmida com umidade relativa superior a 98% e temperatura de 23 ± 2 °C

até os 28 dias para o ensaio de resistência à compressão e 91 dias para serem embalados e remetidos à Vitória.

5.2.1.5. *Dosagem e moldagem dos prismas de argamassa*

A quantidade de água (H) a ser utilizada nos traços de argamassa foi determinada através da Lei de Lyse, apresentada na Equação 26, de forma que não fosse necessário o emprego de aditivos. Fixando-se a quantidade de água, tem-se valores de trabalhabilidades (expressos pelo índice de consistência) semelhantes para os diversos traços.

$$H = \frac{a/c}{1 + m} \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

H – quantidade de água (%);

a/c – relação água/cimento;

$1 + m$ – massa de materiais secos, sendo o “1” correspondente ao cimento e o “m” à massa de areia em argamassas.

Após a realização de alguns estudos preliminares com o cimento CP IV, a quantidade de água (H) foi fixada em 12,2%, sendo este valor mantido constante para todos os traços de argamassa produzidos. O índice de consistência obtido nos testes preliminares foi de 260 ± 20 mm. Adotando-se valores de a/c semelhantes aos dos traços de concreto de 0,45, 0,55 e 0,65, foram definidos, através da Equação 26, três traços de argamassa com o valor de “H” fixo, sendo adotado o mesmo procedimento para os 4 tipos de cimentos. Os resultados da dosagem das argamassas estão apresentados nas Tabelas 27 a 30. Já na Figura 21 é apresentado o diagrama final de dosagem das argamassas, considerando a idade de ruptura de 28 dias.

Tabela 27 - Dosagem e quantidade de materiais para as argamassas com cimento CP II - F

Traço	Materiais	Proporção (massa)	Quantidade de material (kg/m³)	Relação a/c	Consistência (mm)
1:2.70	Cimento	1,00	547,00	0,45	310
	Areia	2,70	1479,90		
1:3.52	Cimento	1,00	445,00	0,55	330
	Areia	3,52	1566,40		
1:4.34	Cimento	1,00	375,00	0,65	280
	Areia	4,34	1627,50		

Fonte: Andrade (2013)

Tabela 28 - Dosagem e quantidade de materiais para as argamassas com cimento CP III

Traço	Materiais	Proporção (massa)	Quantidade de material (kg/m³)	Relação a/c	Consistência (mm)
1:2.70	Cimento	1,00	543,00	0,45	260
	Areia	2,70	1466,10		
1:3.52	Cimento	1,00	443,00	0,55	300
	Areia	3,52	1559,36		
1:4.34	Cimento	1,00	373,00	0,65	245
	Areia	4,34	1618,82		

Fonte: Andrade (2013)

Tabela 29 - Dosagem e quantidade de materiais para as argamassas com cimento CP IV

Traço	Materiais	Proporção (massa)	Quantidade de material (kg/m³)	Relação a/c	Consistência (mm)
1:2.70	Cimento	1,00	537,00	0,45	280
	Areia	2,70	1449,90		
1:3.52	Cimento	1,00	438,00	0,55	260
	Areia	3,52	1541,76		
1:4.34	Cimento	1,00	370,00	0,65	250
	Areia	4,34	1605,80		

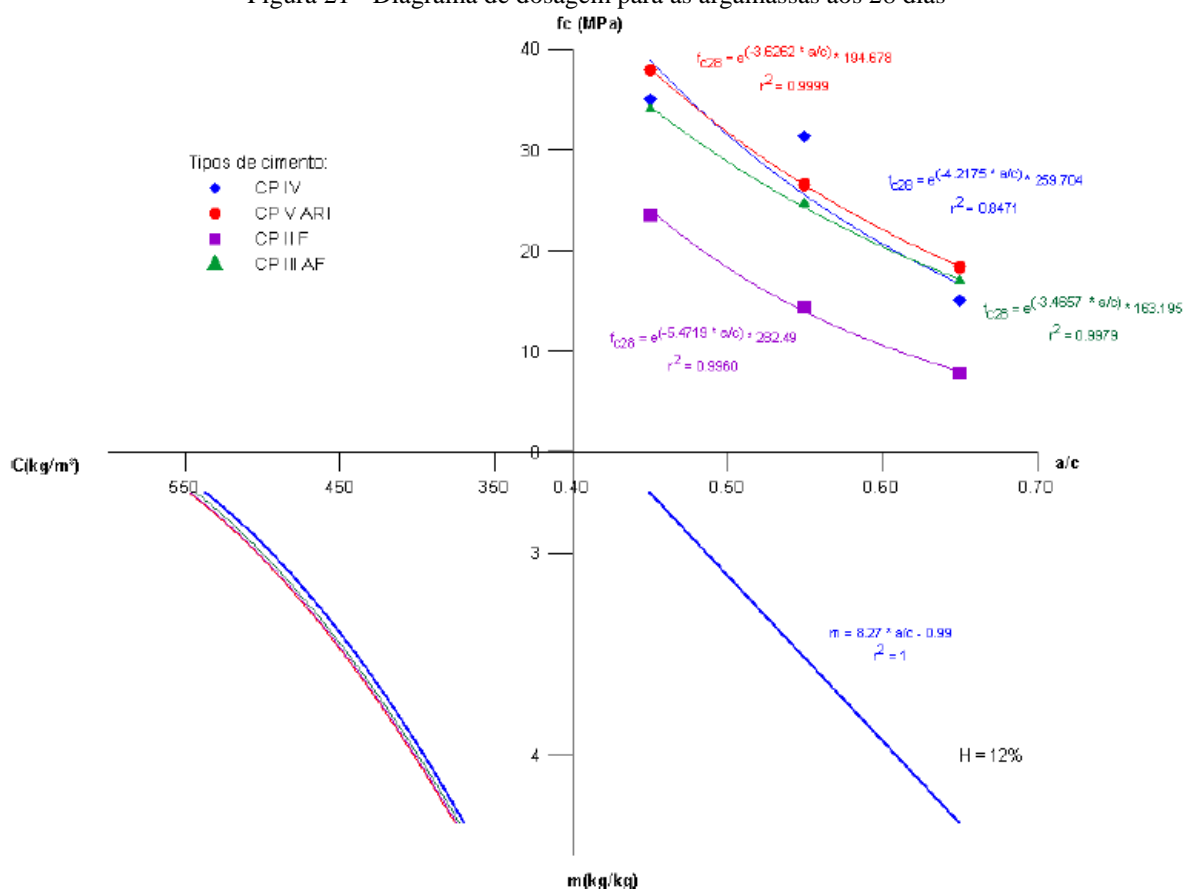
Fonte: Andrade (2013)

Tabela 30 - Dosagem e quantidade de materiais para as argamassas com cimento CP V - ARI

Traço	Materiais	Proporção (massa)	Quantidade de material (kg/m³)	Relação a/c	Consistência (mm)
1:2.70	Cimento	1,00	548,00	0,45	250
	Areia	2,70	1479,60		
1:3.52	Cimento	1,00	446,00	0,55	300
	Areia	3,52	1569,92		
1:4.34	Cimento	1,00	376,00	0,65	280
	Areia	4,34	1631,84		

Fonte: Andrade (2013)

Figura 21 - Diagrama de dosagem para as argamassas aos 28 dias



Fonte: Andrade (2013)

Após determinado o proporcionamento dos materiais, passou-se à produção das argamassas e moldagem dos prismas e corpos de prova. A mistura foi realizada em betoneira de eixo vertical e o processo de adensamento escolhido foi o mecânico, com mesa vibratória. Para cada traço foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos para a determinação da resistência à compressão, em formas metálicas de 5 x 10 cm, e 2 prismas de argamassa, em formas metálicas de 7 x 7 x 28 cm. O ensaio de resistência à compressão e de consistência foram realizados de acordo com o preconizado pela norma ABNT NBR 7215:1996.

Posteriormente à moldagem, os corpos de prova e os prismas de argamassa foram mantidos cobertos por 24 horas no ambiente de laboratório e após isto foram desmoldados e mantidos em câmara úmida com umidade relativa superior a 98% e temperatura de 23 ± 2 °C até os 28 dias para o ensaio de resistência à compressão e 91 dias para serem embalados e remetidos à Vitória.

5.2.1.6. Caracterização ambiental da estação de monitoramento

Os prismas de concreto e argamassa permaneceram expostos em zona de atmosfera marinha em uma estação de monitoramento situada na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Vitória. Na Tabela 31 são apresentadas as coordenadas geográficas do local de exposição, bem como a distância deste ponto em relação ao mar.

Tabela 31 - Localização da estação de monitoramento de Vitória

Estação de monitoramento	Cidade	Latitude	Longitude	Distância em relação a costa (km)
E1	Vitória	20° 16' 22'' S	40° 18' 15'' W	1,8

Fonte: Elaborado pela autora

Para a caracterização ambiental do local de exposição foram coletados os seguintes dados: temperatura máxima, mínima e média; umidade relativa média; precipitação e direção e intensidade dos ventos, referentes ao período de exposição dos prismas, compreendido entre julho/2012 e junho/2015. Na caracterização da estação de monitoramento de Vitória foram utilizados os dados da Estação Meteorológica do Gaturamo Observatório Astronômico (GOAMet), localizada na UFES. Na Tabela 32 constam as coordenadas geográficas desta estação.

Tabela 32 - Estação meteorológica que forneceu os dados para a caracterização ambiental de Vitória

Estação meteorológica	Cidade	Latitude	Longitude
EMet1	Vitória	20° 16' 43'' S	40° 18' 28'' W

Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 22 pode-se verificar a localização das estações de monitoramento e meteorológica em Vitória, a qual evidencia a proximidade entre os dois locais.

Figura 22 - Mapa com a localização das estações de monitoramento e meteorológica em Vitória



Fonte: Google Earth

5.2.1.7. *Determinação do perfil de cloretos dos blocos de concreto e argamassa*

Para a determinação do perfil de cloretos dos prismas de concreto e de argamassa inicialmente extraíram-se amostras sob a forma pulverulenta e, posteriormente realizou-se a análise dessas amostras. Os procedimentos utilizados nesta etapa estão descritos a seguir.

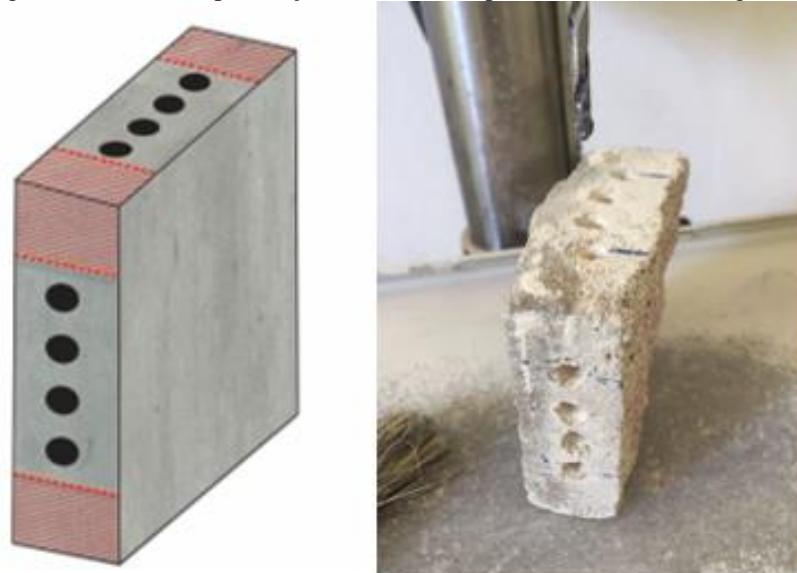
5.2.1.7.1. *Extração de amostras dos prismas de concreto e argamassa*

Foram extraídas amostras das fatias dos prismas de concreto e argamassa sob a forma pulverulenta, utilizando uma furadeira de bancada da marca Motomil, modelo FBM-160i, com broca de 6 mm, de forma semelhante aos procedimentos utilizados em pesquisas prévias (THOMAS; MATTHEWS, 2004; ROMANO, 2009; SILVA, 2010). Em um estudo preliminar, verificou-se que a utilização da furadeira de bancada promoveu uma maior precisão nos furos e que o tamanho da broca de 6 mm era o mais adequado, uma vez que diâmetros maiores ocasionaram a quebra das fatias de concreto e argamassa.

Conforme ilustrado na Figura 23, estabeleceu-se uma área para a extração de amostras, definida por um reticulado com 4 pontos de perfuração em cada uma das faces, garantindo uma quantidade de material suficiente para a determinação do teor de cloretos (3 g de material para uma análise). A utilização deste reticulado também assegurou a obtenção de uma amostra

representativa. Para evitar a sobreposição dos furos de faces adjacentes, evitou-se a perfuração na área hachurada, conforme destacado na Figura 23.

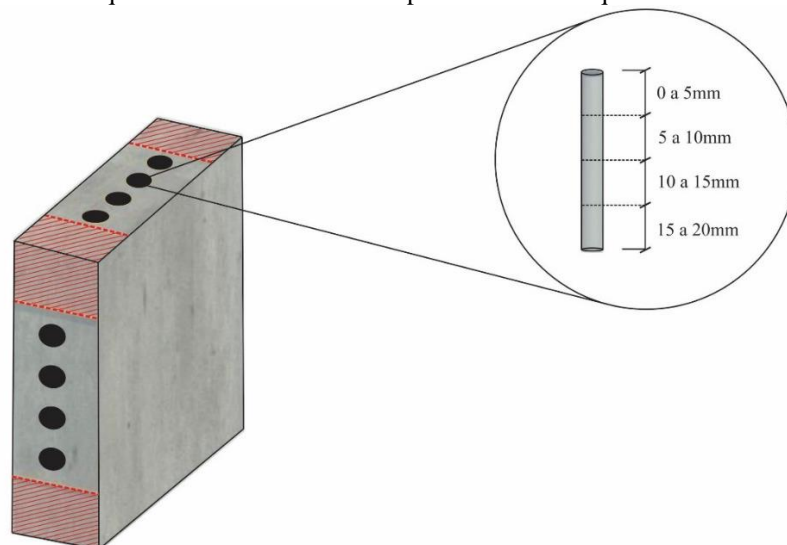
Figura 23 -Pontos de perfuração das fatias dos primas de concreto e argamassa



Fonte: Elaborada pela autora

O material foi coletado em quatro intervalos de profundidade entre: 0 – 5 mm, 5 – 10 mm, 10 – 15 mm e 15 – 20 mm (Figura 24), sendo acondicionado em saco plástico, devidamente lacrado e identificado com etiqueta padrão, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 24 - Desenho esquemático dos intervalos de profundidade em que as amostras foram coletadas



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 25 - Etiqueta padrão para a identificação das amostras retiradas dos prismas de concreto e argamassa

<p>ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO - VITÓRIA</p> <p>TIPO DO PRISMA: Concreto / Argamassa</p> <p>TIPO DE CIMENTO: CP II / CP III / CP IV / CP V</p> <p>RELAÇÃO A/C: 0,45 / 0,55 / 0,65</p> <p>PROFUNDIDADE: 5 mm / 10 mm / 15 mm / 20 mm</p> <p>TEMPO DE EXPOSIÇÃO:</p> <p>Relação a/c = 0,45 - 1 ano / 2 anos / 3 anos</p> <p>Relação a/c = 0,55 - 1 ano / 1,6 anos / 2 anos</p> <p>Relação a/c = 0,65 - 0,3 ano / 0,7 ano / 1 ano</p>

Fonte: Elaborada pela autora

5.2.1.7.2. *Análise das amostras*

Para a determinação do teor de cloretos solúveis das amostras coletadas foi empregada a potenciometria direta, um método de ensaio rápido e de fácil execução, sendo considerado como um dos mais adequados para a determinação de cloretos em solução. Essa técnica requer calibração prévia através de soluções aquosas com concentrações de cloreto conhecidas.

Nesta pesquisa foi utilizado o equipamento CL – 2000 da NDT James Instruments, que abrange uma vasta gama de concentrações. A análise neste equipamento consiste em diluir 3 g da amostra de concreto/argamassa em pó em 20 ml de líquido de extração fornecido pelo fabricante, de forma que os íons cloreto reajam com o líquido de extração em uma reação eletroquímica e, através da inserção de um eletrodo com sensor de temperatura, realizar a medição da reação. De acordo com o fabricante, o líquido de extração pode ser substituído por água deionizada. Desta forma, devido à praticidade e ao menor custo, optou-se pela utilização desta alternativa na determinação do teor de cloretos das amostras desta pesquisa. É importante destacar que quando se utiliza o líquido de extração se determina o teor de cloretos totais da amostra, e quando a água deionizada é utilizada, é determinado apenas o teor de cloretos livres, aqueles solúveis em água.

Como o fabricante do equipamento CL - 2000 não apresentou quais as características que a água deionizada deveria apresentar para a utilização no ensaio de determinação do teor de cloretos, utilizou-se como base a norma ASTM D 1193 (1999), a qual estabelece requisitos para uma água adequada para análises químicas. Essa norma estabelece requisitos para 4 categorias, sendo utilizado neste trabalho, como critério de aceitação, o valor de condutividade

elétrica estabelecido para a água do Tipo 4, sendo este de no máximo 5,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C. Desta forma, após submeter a água ao processo de deionização, foi medida a sua condutividade elétrica para avaliar se este valor estava dentro no limite máximo anteriormente citado, indicando se a mesma poderia ser utilizada no ensaio ou deveria ser descartada. O deionizador utilizado é da marca Union e possui capacidade de 100 L/h e o condutivímetro que foi empregado para a leitura da condutividade elétrica é o modelo AB30 da Fisher Scientific.

Inicialmente foi realizada a calibração do equipamento CL – 2000 da NDT James Instruments mediante a utilização dos frascos com líquidos para calibração fornecidos pelo fabricante, os quais apresentam concentração de cloretos de 0,005%, 0,01%, 0,05%, 0,1% e 0,3%.

Isto posto, efetuou-se a determinação do teor de cloretos solúveis das amostras, através do procedimento descrito a seguir (Figura 26):

- pesagem de 3 g da amostra na forma pulverulenta;
- diluição da amostra de 3 g em 20 ml de água deionizada;
- mistura da solução por 1 minuto em um agitador magnético, modelo 752A da Fisatom, mantendo a mesma velocidade em todas as análises realizadas;
- esperar 1 minuto para a solução estabilizar, conforme recomendação do fabricante;
- inserção do eletrodo na solução, esperando um minuto para a realização da leitura. Nesta etapa evitou-se que o eletrodo entrasse em contato com as partículas sólidas da amostra que se depositavam no fundo do recipiente, uma vez que, de acordo com o fabricante, tal contato poderia riscar o eletrodo e danificá-lo;
- lavagem do eletrodo com água deionizada e secagem com papel toalha para a realização de novas leituras.

Figura 26 – Etapas do procedimento para determinação do teor de cloretos



Fonte: Registrada pela autora

Como o equipamento converte a voltagem gerada na concentração de cloretos em porcentagem por massa de concreto, foi necessária a transformação para porcentagem de cloretos em relação à massa de cimento, por meio da Equação 27 (HELENE, 1993).

$$Cl_{concreto} = \frac{Cl_{cimento} \times C}{\gamma_c} \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

$Cl_{concreto}$ – concentração de cloretos em relação à massa de concreto (%);

$Cl_{cimento}$ – concentração de cloretos em relação à massa de cimento (%);

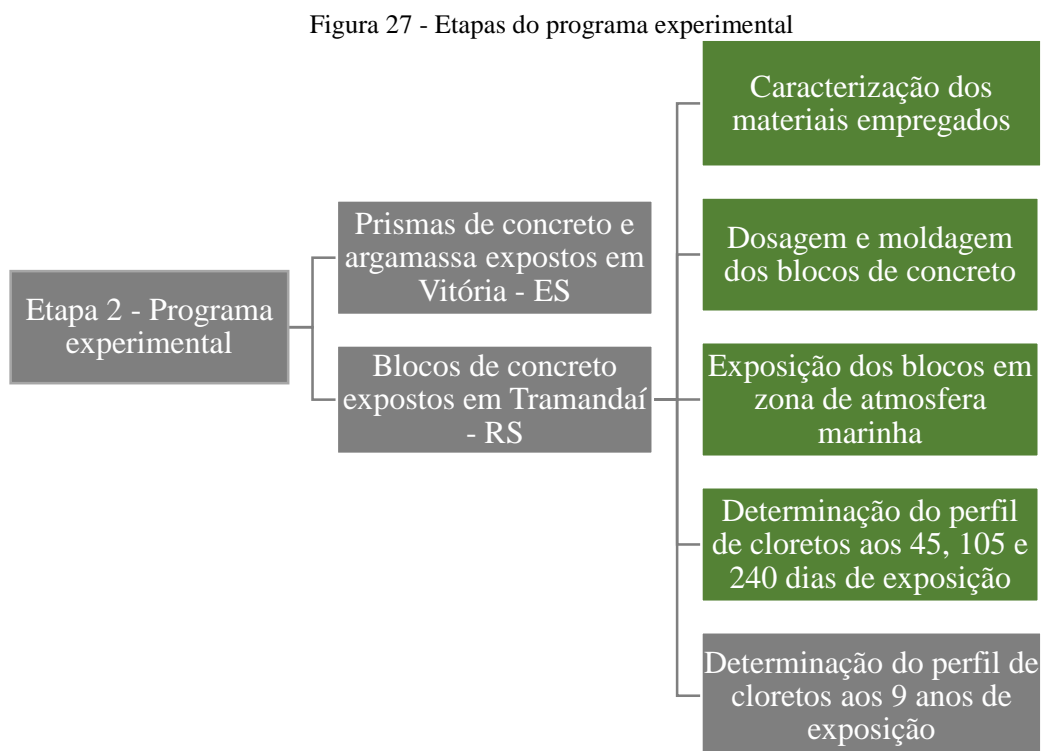
C – consumo de cimento (kg/m^3);

γ_c – massa específica do concreto (kg/m^3).

5.2.2. Blocos de concreto expostos em Tramandaí - RS

Nesta etapa da pesquisa objetivou-se determinar o perfil de concentração de cloretos de blocos de concreto expostos por um período de 9 anos no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, em Tramandaí. Os blocos de concreto foram moldados por Romano (2009) e permaneceram expostos de setembro/2008 até outubro/2017 em uma estação de monitoramento a 100 m da praia. Estes foram moldados com cimento CP IV, CP V – ARI, CP V - ARI + 5% de sílica ativa e CP V - ARI + 10% de sílica ativa e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65.

As atividades desta fase do programa experimental são apresentadas na Figura 27. Aquelas destacadas em verde foram realizadas por Romano (2009), já as atividades que efetivamente foram desenvolvidas nesta pesquisa estão em cinza. Desta forma, as informações complementares referentes ao planejamento experimental, a dosagem e moldagem dos blocos de concreto e aos perfis de cloretos determinados pela autora nas idades de 45, 105 e 240 dias não serão citadas neste trabalho, visto que podem ser consultadas na dissertação de Romano (2009). Portanto, nos subitens a seguir serão abordados os tópicos: caracterização ambiental da estação de monitoramento e os procedimentos de extração e análise das amostras utilizados na determinação do perfil de cloretos de 9 anos.



Fonte: Elaborada pela autora

5.2.2.1. Caracterização ambiental das estações de monitoramento

Os blocos de concreto permaneceram expostos em zona de atmosfera marinha em uma estação de monitoramento situada em Tramandaí. Na Tabela 33 são apresentadas as coordenadas geográficas deste local de exposição, bem como a distância deste ponto em relação ao mar.

Tabela 33 - Localização da estação de monitoramento de Tramandaí

Estação de monitoramento	Latitude	Longitude	Distância da praia (m)
EM - I	30° 00' 33" S	50° 08' 06" W	100

Fonte: Romano (2009)

É importante destacar que os blocos foram posicionados voltados para a direção nordeste por se tratar da direção dos ventos predominantes da região, conforme constatado previamente pela autora. Desta forma, as análises realizadas nesta pesquisa contemplam apenas as faces dos blocos de concreto voltadas a direção predominante dos ventos, ou seja, a nordeste.

Para a caracterização ambiental do local de exposição foram coletados os seguintes dados: temperatura máxima, mínima e média; umidade relativa média; precipitação e direção e intensidade dos ventos, referentes ao período de exposição, compreendido entre setembro/2008 e outubro/2017. Na caracterização da estação de monitoramento foram utilizados os dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática de Tramandaí – A834. Na Tabela 34 constam as coordenadas geográficas desta estação.

Tabela 34 - Estação meteorológica que forneceu os dados para a caracterização ambiental de Tramandaí

Estação meteorológica	Cidade	Latitude	Longitude
EMet1	Tramandaí	30° 00' 37" S	50° 08' 09" W

Fonte: Elaborada pela autora

Na Figura 28 pode-se verificar a localização das estações de monitoramento e meteorológica em Tramandaí.

Figura 28 - Mapa com a localização das estações de monitoramento e meteorológica em Tramandaí



Fonte: Google Earth

5.2.2.2. *Determinação do perfil de cloretos dos blocos de concreto*

Para a determinação do perfil de cloretos dos blocos de concreto extraiu-se amostras sob a forma pulverulenta e, posteriormente realizou-se a análise dessas amostras. Os procedimentos utilizados nesta etapa estão descritos a seguir. É importante destacar que tanto na extração como análise das amostras, procurou-se seguir os mesmos métodos adotados por Romano (2009).

5.2.2.2.1. *Extração de amostras dos blocos de concreto*

Foram extraídas amostras sob a forma pulverulenta da face nordeste de todos os blocos de concreto. Para isto, foi utilizado um martelo da marca BOSH, modelo GBH 2-24 DSE, com broca de 12 mm. Seguindo o mesmo procedimento adotado por Romano (2009), foi desenhado um reticulado com espaçamento de 5 cm, afastado 2,5 cm das laterais e 5 cm da face superior para realização dos furos na mesma região de todos os blocos. Conforme ilustrado na Figura 29, os furos foram realizados nas duas primeiras linhas do reticulado, garantindo que as amostras fossem coletadas na mesma região de todos os blocos.

Figura 29 - Reticulado para extração das amostras



Fonte: Romano (2009), adaptada pela autora

O material foi coletado nos intervalos de profundidade de 0 – 2 mm, 2 – 5 mm, 5 – 15 mm e 15 – 25 mm, sendo acondicionado em saco plástico devidamente identificado. Visando a realização de repetições das leituras da concentração de cloretos, foi coletada uma amostra de 9 g de material em cada uma das profundidades, possibilitando assim a realização de três leituras. A partir de uma análise preliminar dos resultados obtidos, optou-se pela exclusão da leitura com a maior diferença em relação à média. Desta forma, o valor final da concentração de cloretos foi obtido pelo cálculo da média de duas leituras.

5.2.2.2.2. *Análise das amostras*

O procedimento utilizado para a determinação da concentração de cloretos dos blocos de concreto expostos em Tramandaí está descrito no item 5.2.1.7.2. Cabe destacar que consiste no mesmo método utilizado por Romano (2009) para a determinação do perfil de cloretos destes blocos nos tempos de exposição de 45, 105 e 240 dias.

5.3. VALIDAÇÃO DO MODELO DE ANDRADE (2001)

Após a coleta dos dados da literatura, estes foram comparados com a profundidade de penetração da concentração crítica de cloretos calculada pelo modelo de Andrade (2001) e, a partir disso, o modelo foi validado. É importante destacar que como não existiam dados

ambientais prévios da concentração de cloretos nos locais de exposição das estruturas avaliadas nesta pesquisa, utilizou-se a concentração superficial dos dados experimentais como parâmetro de entrada no modelo de Andrade. Para isto, tal parâmetro foi obtido através de um ajuste do perfil de cloretos a partir da equação da 2ª Lei de Fick (Equação 5) por meio de uma regressão não linear em conjunto com o método dos mínimos quadrados, realizados na ferramenta *Solver* do Excel. Após o ajuste e determinação da concentração superficial de cloretos na idade em que o perfil de cloretos foi obtido, para a determinação deste parâmetro na idade de 1 ano, foi utilizada a Equação 1 de Uji, Matsuoka e Maruya (1990), uma vez que o modelo de Andrade (2001) considera como dado de entrada a concentração superficial de cloretos após o primeiro ano de exposição.

6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os dados coletados na literatura referentes à penetração de cloretos em estruturas de concreto e os principais resultados obtidos através da investigação dos prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória e dos blocos de concreto expostos em Tramandaí, bem como uma discussão sobre os fatores intervenientes nesses resultados. Por fim, a validação do modelo para previsão de vida útil de estruturas de concreto proposto por Andrade (2001) será discutida.

6.1. COLETA DE DADOS NA LITERATURA

Os dados encontrados na literatura, referentes à penetração de cloretos em estruturas de concreto localizadas em zona de atmosfera marinha, são os apresentados nos trabalhos descritos a seguir:

- Costa e Appleton (1999a, 1999b) – Os autores avaliaram a concentração de cloretos em painéis de concreto que permaneceram expostos em atmosfera marinha por 3 anos, na Península de Setúbal, em Portugal. Os perfis de cloretos foram determinados para os tempos de exposição de 1,5 e 3 anos;
- Costa e Appleton (2002) – Os autores apresentam a concentração de cloretos na laje de uma ponte localizada em Portugal, para uma idade de 35 anos;
- Pereira (2003) e Brito (2008) – Os autores determinaram o perfil de concentração de cloretos de uma plataforma *offshore* localizada no Brasil, a cerca de 12 km do litoral do Rio Grande do Norte. Pereira (2003) avaliou o perfil correspondente a um tempo de exposição de 24 anos e Brito (2008) o perfil com um tempo de exposição de 29 anos. Pontos da fachada sul, identificados por Pereira (2003) e Brito (2008) como S11-C e S11-1, respectivamente;
- Meira (2004) – O autor expôs pilaretes de concreto armado em João Pessoa, na Paraíba, a uma distância de 10 m em relação ao mar. Estes prismas foram moldados com cimento CP II - F e CP IV e relações a/c de 0,50, 0,57 e 0,65. A concentração de cloretos foi avaliada nos períodos correspondentes a um tempo de exposição de 0,5, 0,8, 1,2 e 1,5 anos;
- Vitali (2013) – Foram expostos prismas de concreto em São Francisco do Sul - SC, a uma distância de 50 m da praia. O concreto utilizado na moldagem dos

prismas era constituído de cimento CP IV e caracterizado por uma relação a/c de 0,57 e resistência à compressão aos 28 dias de 35,2 MPa. Os perfis de concentração de cloretos destes prismas foram determinados nos tempos de exposição de 0,5, 0,75 e 1,5 anos;

- Boubitsas, Luping e Utgenannt (2014) – Foram avaliados os perfis de cloretos de concretos que permaneceram em zona de atmosfera marinha por um período de 20 anos em Traslovslage, Suécia. Os concretos foram moldados com cimento Portland e relações a/c de 0,35 e 0,4 e cimento Portland + 5% sílica ativa e relações a/c de 0,35, 0,4 e 0,5.
- Wu, Li e Yu (2017) – Os autores determinaram o perfil de cloretos dos portos Fangcheng e Qinzhou localizados no Golfo de Beibu na China, nas idades de 80 e 62 meses, respectivamente.
- Fattah *et al.* (2018) – A pesquisa de tais autores avaliou, após 1 ano de exposição, o perfil de cloretos de concretos localizados em zona de atmosfera marinha, na cidade de Al Khobar, Arábia Saudita. Os concretos possuíam relação a/c = 0,4 e foram moldados com cimento Portland comum, com adição de cinza volante e de escória de alto forno.

No Anexo A constam os dados anteriormente citados. É possível verificar os perfis de cloretos para as diversas idades avaliadas pelos autores previamente mencionados.

6.2. PRISMAS DE CONCRETO E ARGAMASSA EXPOSTOS EM VITÓRIA - ES

6.2.1. Caracterização dos concretos e argamassas

Nas Tabelas 35 e 36 são apresentados os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos e argamassas preparados com os cimentos CP II – F, CP III, CP IV e CP V – ARI e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65.

Tabela 35 - Resistência à compressão média dos concretos usados nesta pesquisa

Relação a/c	0,45				0,55				0,65			
Cimento	CPII - F	CPIII	CPIV	CPV	CPII - F	CPIII	CPIV	CPV	CPII - F	CPIII	CPIV	CPV
fc28 (MPa)	37,5	37,5	38,9	50,7	33,3	30,0	35,8	36,1	25,5	22,5	20,6	33,0

Fonte: Andrade (2013)

Tabela 36 - Resistência à compressão média das argamassas usadas nesta pesquisa

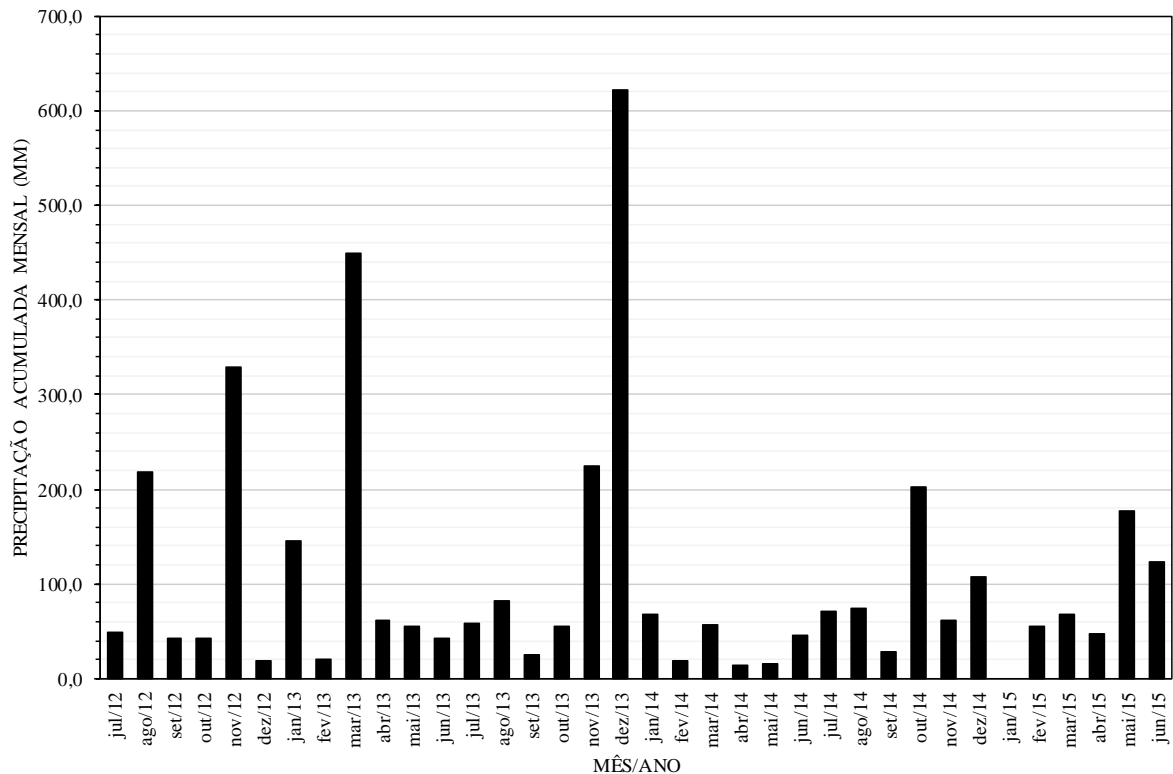
Relação a/c	0,45				0,55				0,65			
Cimento	CPII - F	CP III	CP IV	CP V	CPII - F	CP III	CP IV	CP V	CPII - F	CP III	CP IV	CP V
fc28 (MPa)	23,6	34,0	35,1	38,0	14,5	24,7	31,4	26,6	7,9	17,0	15,1	18,4

Fonte: Andrade (2013)

6.2.2. Caracterização ambiental da estação de monitoramento

Os dados mensais referentes à caracterização ambiental da estação de monitoramento localizada em Vitória estão apresentados no ANEXO B. Estes dados indicam que no período de julho/2012 a junho/2015 a temperatura mensal média foi de 24,1 °C, a temperatura mínima média de 18,4 °C e a temperatura máxima média de 32,4 °C. Já a umidade relativa mensal média foi de 81,7%. Em relação aos ventos, a velocidade mensal média foi de 2,9 m/s e a direção predominante a norte (N). Por fim, em relação à precipitação acumulada mensal, percebe-se que os meses com maior precipitação estão distribuídos entre julho/2012 e junho/2015 (Figura 30).

Figura 30 - Precipitação acumulada mensal da estação de monitoramento localizada em Vitória



Fonte: GOAMet, elaborado pela autora

6.2.3. Penetração de cloretos

Os perfis de concentração de cloretos para todas as configurações avaliadas nesta pesquisa estão apresentados no APÊNDICE A. Cabe salientar que, por se tratar de uma pesquisa realizada em ambiente natural, o ingresso de cloretos para o interior dos prismas de concreto e argamassa se dá de forma mais lenta, o que justifica a baixa concentração encontrada em algumas configurações e o fato de que nenhuma das fatias atingiu a concentração crítica, adotada neste trabalho como 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento. Além disso, as baixas concentrações também podem ser justificadas pela elevada distância dos prismas em relação ao mar (1,8 km) e pelo pequeno tempo de exposição dos mesmos.

Como a concentração de cloretos foi avaliada nas camadas superficiais dos concretos e argamassas (até 20 mm), é importante ressaltar que nessa região o transporte de cloretos usualmente é dominado pela absorção, em função da variação de umidade do ambiente e dos ciclos de molhagem e secagem. Isto justifica o fato de que os perfis encontrados na pesquisa não seguem o comportamento esperado de acordo com a difusão, mecanismo predominante no transporte de íons cloreto nas camadas mais internas dos concretos e argamassas.

Com o intuito de verificar a influência dos fatores controláveis na penetração de cloretos, foi aplicado ao estudo uma análise de variância (ANOVA), sendo os fatores denominados de:

- A – condição de exposição (protegido e desprotegido da chuva);
- B – prisma de concreto x prisma de argamassa;
- C – tipo de cimento;
- D – tempo de exposição;
- E – profundidade em relação à superfície do concreto.

Para a aplicação da análise estatística considerou-se como erro a interação de mais alta ordem entre os fatores, ou seja, a interação ABCDE, uma vez que o experimento não possui repetições. Adicionalmente, definiu-se como critério de decisão um nível de significância de 5%. Acrescenta-se ainda que, como as configurações com relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65 foram avaliadas em diferentes tempos de exposição, optou-se por realizar uma análise estatística individual para cada relação a/c.

Nas Tabelas 37, 38 e 39 pode-se observar os resultados encontrados na análise de variância das configurações com relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Verificou-se que para todas as relações a/c os cinco fatores controláveis principais exercem influência

significativa na variável de resposta analisada, bem como grande parte das interações entre tais fatores. Os resultados encontrados corroboram aqueles identificados por outros pesquisadores, constatando-se que a concentração de cloretos aumenta com o tempo de exposição (ZHANG *et al.*, 2018; ZHU *et al.*, 2016b; MEDEIROS JUNIOR *et al.*, 2015), e que no geral, a concentração tende a diminuir com o aumento da profundidade em relação à superfície do concreto ou argamassa (WANG *et al.*, 2018; VIEIRA *et al.*, 2018). Contudo, é importante destacar que em alguns casos o perfil de cloretos pode apresentar um pico, dado que a camada superficial do material é usualmente exposta a um molhamento e evaporação subsequente ocasionada pela chuva e que, nessa estreita região, o mecanismo de transporte dos cloretos não é dominado pela difusão (LIU *et al.*, 2017).

Tabela 37 - Análise estatística das configurações com relação $a/c = 0,45$

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probab.	Comentário
A - Protegido x Desprotegido	0,000684	1	0,000684	37,197956	0,000921%	S
B - Concreto x Argamassa	0,004178	1	0,004178	227,146575	0,000000%	S
C - Tipo de Cimento	0,037547	3	0,012516	680,388733	0,000000%	S
D - Tempo de exposição	0,003246	2	0,001623	88,237544	0,000000%	S
E - Profundidade	0,000986	3	0,000329	17,858936	0,001247%	S
AB	0,001308	1	0,001308	71,101061	0,000011%	S
AC	0,000910	3	0,000303	16,494646	0,002099%	S
AD	0,000475	2	0,000238	12,920454	0,033154%	S
AE	0,000327	3	0,000109	5,917024	0,541331%	S
BC	0,008582	3	0,002861	155,510545	0,000000%	S
BD	0,000406	2	0,000203	11,032767	0,074561%	S
BE	0,000390	3	0,000130	7,068693	0,244504%	S
CD	0,002312	6	0,000385	20,944270	0,000033%	S
CE	0,000762	9	0,000085	4,603345	0,287152%	S
DE	0,000863	6	0,000144	7,818165	0,030072%	S
ABC	0,000627	3	0,000209	11,359821	0,020581%	S
ABD	0,001305	2	0,000652	35,470936	0,000057%	S
ABE	0,000300	3	0,000100	5,443623	0,766074%	S
ACD	0,000635	6	0,000106	5,757459	0,171296%	S
ACE	0,000791	9	0,000088	4,776619	0,235058%	S
ADE	0,000200	6	0,000033	1,809802	15,369639%	NS
BCD	0,000559	6	0,000093	5,063605	0,333162%	S
BCE	0,000661	9	0,000073	3,991419	0,602252%	S
BDE	0,000175	6	0,000029	1,583829	20,890256%	NS
CDE	0,001044	18	0,000058	3,152969	0,959596%	S
ABCD	0,000973	6	0,000162	8,818849	0,014335%	S
ABCE	0,000217	9	0,000024	1,311853	29,727132%	NS
ABDE	0,000069	6	0,000012	0,626241	70,736051%	NS
ACDE	0,000315	18	0,000017	0,950481	54,230568%	NS
BCDE	0,000211	18	0,000012	0,638351	82,516324%	NS
ABCDE	0,000331	18	0,000018			Erro
TOTAL		191				

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 38 - Análise estatística das configurações com relação a/c = 0,55

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probab.	Comentário
A - Protegido x desprotegido	0,000848	1	0,000848	57,072949	0,000055%	S
B - Concreto x Argamassa	0,000871	1	0,000871	58,602955	0,000046%	S
C - Tipo de Cimento	0,027902	3	0,009301	625,897335	0,000000%	S
D - Tempo de exposição	0,002609	2	0,001305	87,803572	0,000000%	S
E - Profundidade	0,000569	3	0,000190	12,755427	0,010433%	S
AB	0,000281	1	0,000281	18,914338	0,038669%	S
AC	0,000532	3	0,000177	11,933959	0,015467%	S
AD	0,001083	2	0,000541	36,438401	0,000047%	S
AE	0,000508	3	0,000169	11,404448	0,020122%	S
BC	0,000665	3	0,000222	14,914686	0,003994%	S
BD	0,000007	2	0,000003	0,225881	80,004025%	NS
BE	0,000534	3	0,000178	11,971229	0,015188%	S
CD	0,001566	6	0,000261	17,565835	0,000124%	S
CE	0,001902	9	0,000211	14,225258	0,000177%	S
DE	0,001003	6	0,000167	11,254919	0,002928%	S
ABC	0,000279	3	0,000093	6,254301	0,425899%	S
ABD	0,000059	2	0,000030	2,000687	16,421180%	NS
ABE	0,000088	3	0,000029	1,968862	15,481551%	NS
ACD	0,001025	6	0,000171	11,491884	0,002544%	S
ACE	0,000652	9	0,000072	4,872225	0,210838%	S
ADE	0,001239	6	0,000206	13,894579	0,000682%	S
BCD	0,000379	6	0,000063	4,247804	0,775050%	S
BCE	0,000491	9	0,000055	3,673855	0,904250%	S
BDE	0,000601	6	0,000100	6,745040	0,071490%	S
CDE	0,001047	18	0,000058	3,915307	0,292248%	S
ABCD	0,000089	6	0,000015	0,999483	45,550148%	NS
ABCE	0,000089	9	0,000010	0,668344	72,673036%	NS
ABDE	0,000351	6	0,000058	3,932292	1,095826%	S
ACDE	0,001908	18	0,000106	7,132111	0,006144%	S
BCDE	0,000507	18	0,000028	1,894671	9,242490%	NS
ABCDE	0,000267	18	0,000015			Erro
TOTAL		191				

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 39 - Análise estatística das configurações com relação a/c = 0,65

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probab.	Comentário
A - Protegido x desprotegido	0,001220	1	0,001220	62,553682	0,000029%	S
B - Concreto x Argamassa	0,001460	1	0,001460	74,895889	0,000008%	S
C - Tipo de Cimento	0,006602	3	0,002201	112,878528	0,000000%	S
D - Tempo de exposição	0,001250	2	0,000625	32,044936	0,000117%	S
E - Profundidade	0,001677	3	0,000559	28,672331	0,000045%	S
AB	0,000185	1	0,000185	9,501016	0,642213%	S
AC	0,000445	3	0,000148	7,606127	0,172486%	S
AD	0,000318	2	0,000159	8,142310	0,303081%	S
AE	0,000422	3	0,000141	7,222165	0,221019%	S
BC	0,001190	3	0,000397	20,346932	0,000518%	S
BD	0,000855	2	0,000428	21,927239	0,001497%	S
BE	0,000682	3	0,000227	11,653542	0,017763%	S
CD	0,000372	6	0,000062	3,180106	2,626131%	S
CE	0,002880	9	0,000320	16,412083	0,000060%	S
DE	0,000355	6	0,000059	3,032953	3,141610%	S
ABC	0,000891	3	0,000297	15,224508	0,003508%	S
ABD	0,000480	2	0,000240	12,308887	0,042770%	S
ABE	0,000198	3	0,000066	3,386563	4,082681%	S
ACD	0,000548	6	0,000091	4,682138	0,490082%	S
ACE	0,000594	9	0,000066	3,383997	1,328831%	S
ADE	0,000200	6	0,000033	1,709523	17,609289%	NS
BCD	0,001091	6	0,000182	9,324478	0,010072%	S
BCE	0,000307	9	0,000034	1,748938	14,949604%	NS
BDE	0,000651	6	0,000108	5,561510	0,205754%	S
CDE	0,000719	18	0,000040	2,048915	6,873831%	NS
ABCD	0,000439	6	0,000073	3,748761	1,347659%	S
ABCE	0,000347	9	0,000039	1,974643	10,480772%	NS
ABDE	0,000354	6	0,000059	3,024548	3,174195%	S
ACDE	0,000598	18	0,000033	1,702826	13,410129%	NS
BCDE	0,000617	18	0,000034	1,757808	12,049902%	NS
ABCDE	0,000351	18	0,000019			Erro
TOTAL		191				

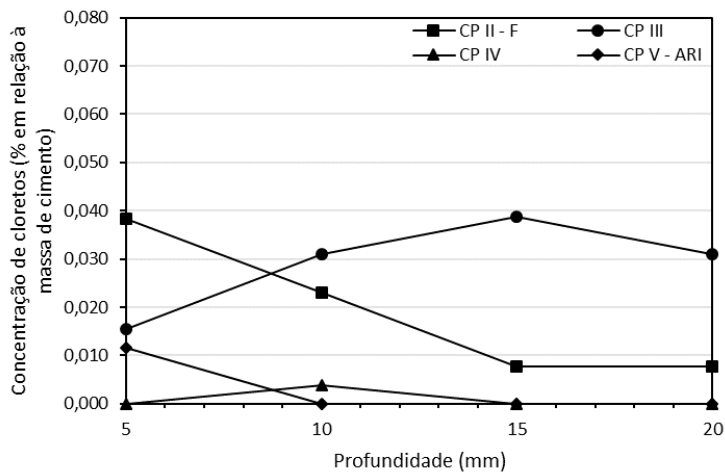
Fonte: Elaborada pela autora

Nos itens a seguir a influência do tipo de cimento, a diferença na penetração de cloretos em concretos e argamassas moldados com os mesmos materiais e relações a/c e a influência do ambiente de exposição (protegido e desprotegido da chuva) serão abordados com mais detalhes. Como mencionado previamente, por se tratar de um estudo realizado em ambiente natural, em alguns tempos de exposição a concentração de cloretos foi baixa e, em certas situações, zero. Desta forma, para a análise dos fatores que influenciaram no ingresso de cloretos para o interior de concretos e argamassas, serão considerados os perfis com maior tempo de exposição, sendo assim, o perfil de 3 anos para as configurações com a/c=0,45, 2 anos para aquelas com relação a/c=0,55 e 1 ano para as configurações com a/c=0,65.

6.2.3.1. *Influência do tipo de cimento*

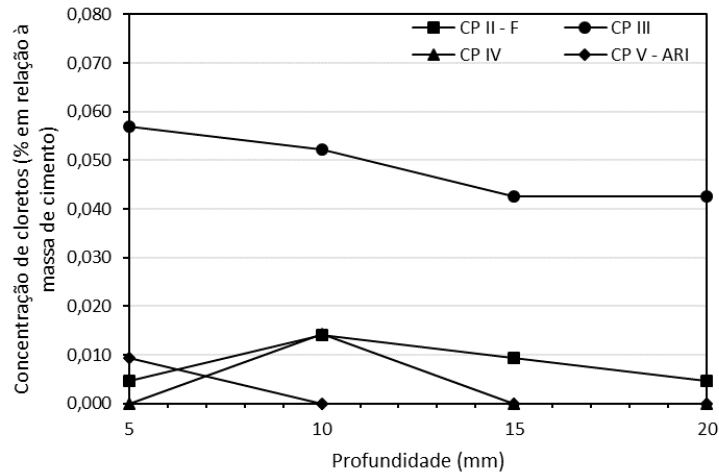
As Figuras 31, 32 e 33 contêm os perfis de cloretos das argamassas moldadas com os cimentos CP II – F, CP III, CP IV e CP V – ARI e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65 que permaneceram expostas em ambiente desprotegido da chuva por um período de 3, 2 e 1 ano, respectivamente.

Figura 31 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos das argamassas moldadas com relação a/c=0,45, expostas em ambiente desprotegido da chuva



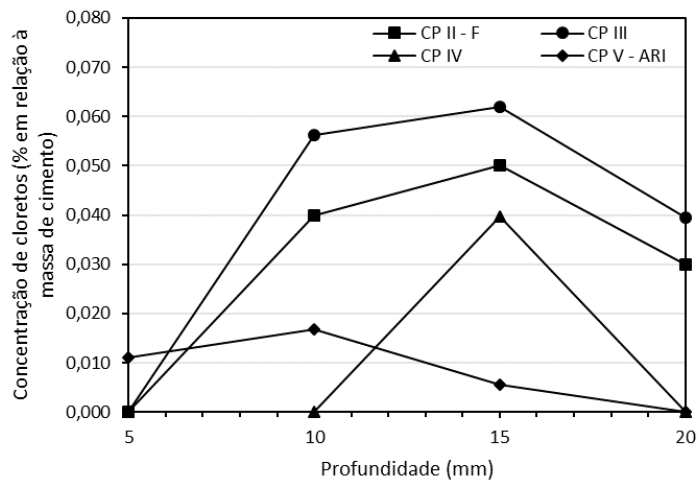
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 32 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos das argamassas moldadas com relação $a/c=0,55$, expostas em ambiente desprotegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

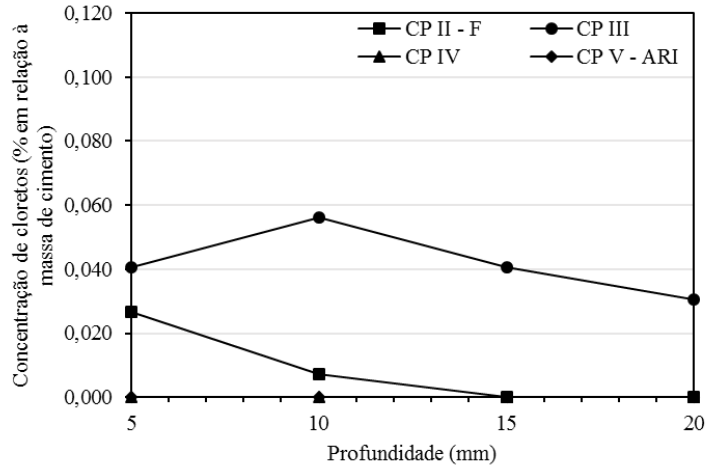
Figura 33 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 1 ano das argamassas moldadas com relação $a/c=0,65$, expostas em ambiente desprotegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

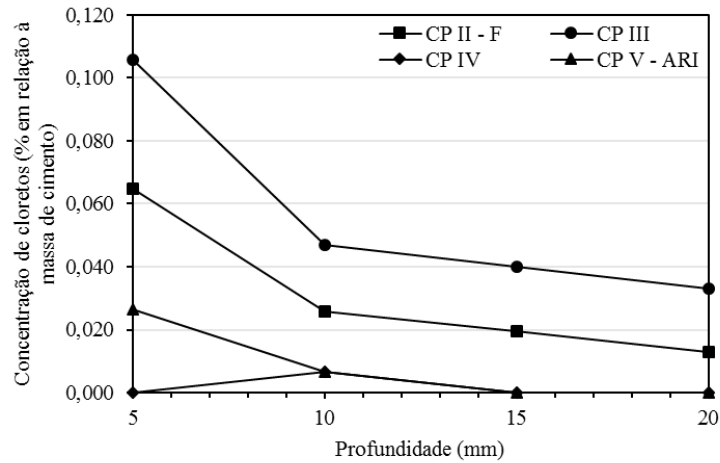
As Figuras 34, 35 e 36 contêm os perfis de cloretos dos concretos moldados com os cimentos CP II – F, CP III, CP IV e CP V – ARI e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65 que permaneceram expostos em ambiente desprotegido da chuva por um período de 3, 2 e 1 ano, respectivamente.

Figura 34 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com relação $a/c=0,45$, expostos em ambiente desprotegido da chuva



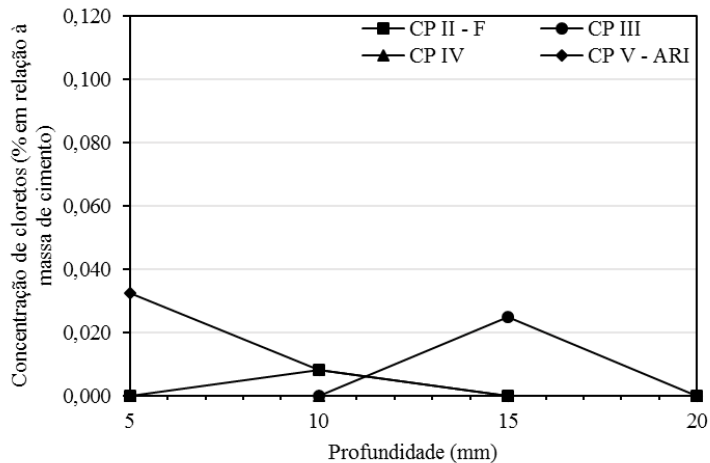
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 35 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos dos concretos moldados com relação $a/c=0,55$, expostos em ambiente desprotegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 36 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 1 ano dos concretos moldados com relação $a/c=0,65$, expostos em ambiente desprotegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

Para os concretos e argamassas de todas as relações a/c que permaneceram expostos em ambiente desprotegido da chuva, o tipo de cimento que apresentou as maiores concentrações de cloretos foi o CP III, seguido pelo cimento CP II – F e dos cimentos CP V - ARI e CP IV. A mesma tendência foi constatada para os concretos e argamassas que permaneceram expostos em ambiente protegido da chuva.

Como anteriormente exposto no capítulo de revisão bibliográfica, adições como a escória de alto forno, no caso do CP III, e da cinza volante, no caso do cimento CP IV, promovem uma redução no ingresso de cloretos para o interior de matrizes cimentícia (MOFFATT; THOMAS; FAHIM, 2017; CHENG *et al.*, 2005). Contudo, é importante salientar que as normas brasileiras que especificam as características físicas e químicas para estes tipos de cimento são bem flexíveis quanto ao teor de tais adições. A norma ABNT NBR 5735:1991 estabelece um teor de escória de alto forno dentro do intervalo de 35-70% em relação à massa total de aglomerante para o cimento CP III. Já a norma ABNT NBR 5736:1991 um teor de material pozzolânico dentro do intervalo de 15-50% para o cimento CP IV. Desta forma, em função desta grande flexibilidade dos teores de substituição, as propriedades dos concretos e argamassas moldados com tais cimentos são bastante variáveis.

Em relação aos resultados encontrados nesta pesquisa, em que os concretos e argamassas moldados com CP III apresentaram as maiores concentrações de cloretos, é bom ressaltar que parte da redução da concentração deste agente agressivo na forma livre diz respeito à reação química entre os cloretos e o aluminato tricálcico presente no cimento, a qual produz um composto denominado Sal de Friedel. Desta forma, é pertinente observar o percentual de óxido de alumínio (Al_2O_3) dos cimentos avaliados, que para o CP II – F, CP III, CP IV e CP V – ARI era de 4,21%, 7,45%, 5,31% e 4,79%, respectivamente. Por consequência, é possível verificar que a concentração deste composto no CP III é ligeiramente superior as dos demais tipos de cimento, o que pode justificar uma pequena diferença na fixação de cloretos associada a este tipo de cimento utilizado na pesquisa. Este baixo percentual também pode indicar que o teor de substituição do cimento Portland por escória possivelmente está próximo do intervalo inferior estabelecido pela respectiva norma brasileira.

Em pesquisas prévias que avaliaram a penetração de cloretos em concretos moldados com cimentos com escória de alto forno e que tiveram resultados satisfatórios com a incorporação deste tipo de adição, o teor de óxido de alumínio dos ligantes utilizados era superior ao do cimento empregado nesta pesquisa. No estudo de Kwon *et al.* (2017) este percentual era de 9,0-11,0% e no estudo de Yildirim, Ilica e Sengul (2011) de 8,63%.

Além disso, pode-se citar o trabalho de Kwon *et al.* (2017), o qual avaliou os perfis de cloretos de cubos de concretos preparados com cimento Portland e cimento Portland com adição de escória que permaneceram expostos na cidade de Tuticorin, na costa sudeste da Índia, em três condições de exposição, sendo estas: zona de atmosfera marinha, zona de variação de maré e zona submersa. Os resultados encontrados pelos autores indicaram que a formação do Sal de Friedel na zona submersa e de variação de maré foi bastante superior à da zona de atmosfera marinha. Em razão disso, por este se tratar de um estudo realizado em zona de atmosfera marinha, a presença da escória de alto forno no cimento do tipo CP III pode ter gerado um efeito menos significativo na fixação de cloretos e, conseqüentemente, uma maior concentração de cloretos livres nos concretos e argamassas avaliados, principalmente em comparação com outros estudos realizados em zonas mais agressivas.

Por fim, no tocante aos resultados verificados para os concretos e argamassas moldados com cimento CP III, é importante levar em consideração o efeito da carbonatação na penetração de íons cloretos (discutido no capítulo de revisão bibliográfica no item 2.1.3. *Tipo de cimento*), uma vez que a carbonatação pode ocasionar a conversão dos cloretos quimicamente ligados em cloretos livres, contribuindo para o processo corrosivo. Isto posto, Andrade (2013) avaliou a profundidade de carbonatação dos prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória, constatando que aqueles produzidos com cimentos com um maior nível de substituição de clínquer por adições (como é o caso do CP III e CP IV) tendem a carbonatar mais. Desta forma, as maiores profundidades de carbonatação verificadas nos prismas moldados com cimento CP III possivelmente podem ter contribuído para concentrações de cloretos livres maiores.

Em relação aos resultados encontrados para o cimento CP II – F, sabe-se que este tipo de ligante possui uma pequena incorporação de adições, limitada pela norma ABNT NBR 11578:1991 em um percentual de substituição de cimento Portland por material carbonático entre 6 – 10%. Tal característica justifica as concentrações de cloretos superiores nos concretos e argamassas moldados com este tipo de cimento quando comparados com aqueles moldados com os cimentos CP IV e CP V – ARI. Além disso, no geral, foi o tipo de cimento que resultou nas menores resistências à compressão dos concretos e, principalmente, das argamassas. Pereira (2001) avaliou o coeficiente de difusão de concretos moldados com cimento CP II – F e CP IV. Os resultados obtidos por tal autora corroboram os comportamentos identificados nessa pesquisa. Na pesquisa de Pereira (2001) os coeficientes de difusão dos concretos com CP II – F foram superiores aos dos concretos com CP IV. Este comportamento, de acordo com a mesma autora, é função do caráter pozolânico da adição presente no cimento Portland pozolânico (CP

IV), responsável pela redução na penetração de cloretos, e da fixação dos mesmos pelos aluminatos.

Nesse contexto, outros autores reportaram concentrações de cloretos inferiores em concretos moldados com cimento Portland e adição de cinza volante quando comparados a concretos sem CV (KWON *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2017). Na pesquisa de Moffatt, Thomas e Fahim (2017), realizada em zona de variação de maré na Baía de Passamaquoddy, a qual está localizada entre o estado americano de Maine e a província canadense de Nova Brunswick, observou-se que a profundidade de penetração de cloretos de espécimes de concreto expostos por 24 anos excedeu os 100 mm, enquanto que a presença de CV diminuiu significativamente a profundidade de penetração para aproximadamente 30 – 40 mm para as espécimes com um teor de substituição de cimento Portland por cinza volante de 56%.

O comportamento verificado para o CP IV neste trabalho, assim como em outros trabalhos da literatura, pode ser justificado pelo refinamento dos poros e densificação da matriz cimentícia ocasionada pela presença de adição pozolânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, a incorporação de cinza volante no concreto melhora a capacidade de fixação dos íons cloreto, o que pode ser explicado pelo aumento do teor de C_3A , que aumenta a taxa de formação do Sal de Friedel e, conseqüentemente, diminui a concentração de cloretos livres, a forma efetivamente responsável pelo processo corrosivo. Liu *et al.* (2017) reportaram um aumento na capacidade de fixação de 30,7% em um concreto com teor de substituição de CV de 15% e um aumento de 61,5% quando 30% de CV foi incorporada.

Contudo, é importante citar que Thomas (1996) constatou que a incorporação de cinza volante tende a reduzir o limite crítico de cloretos necessário para a iniciação da corrosão. Tal autor encontrou que teores de substituição de CV de 0, 15, 30 e 50% resultam em limites críticos de cloretos de 0,7, 0,65, 0,5 e 0,2% em relação à massa de cimento do material, respectivamente. Essa constatação é atribuída à redução no conteúdo de OH, levando a um aumento da relação Cl/OH na solução do poro. Isto posto, apesar desta redução no limite crítico de cloretos, acredita-se que a cinza volante proporciona uma melhor proteção das armaduras nessas condições, devido a sua maior resistência à penetração de íons cloreto.

Por fim, serão abordados os resultados dos concretos e argamassas moldados com cimento CP V – ARI, os quais apresentaram baixas concentrações de cloretos. Isto deve-se principalmente a maior finura deste tipo de cimento, que afeta a sua reatividade com água e intensifica o desenvolvimento da resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014), usualmente levando a resistências finais mais elevadas em comparação à dos concretos moldados com cimentos Portland “puros” e com finura convencional, como, no caso desta

pesquisa, o cimento CP II – F, uma vez que se trata de um tipo de cimento com uma pequena quantidade de adições. A influência da finura do cimento CP V - ARI fica evidente nos resultados de resistência à compressão apresentados no item 6.1.1. *Caracterização dos concretos e argamassas*. Como exemplo citam-se os valores de resistência aos 28 dias dos concretos com relação $a/c = 0,45$ moldados com os cimentos CP II – F, CP III, CP IV e CP V – ARI, as quais são de 37,5 MPa, 37,5 MPa, 38,9 MPa e 50,7 MPa, respectivamente. Desta forma, espera-se que quanto maior a resistência à compressão de um concreto ou argamassa, mais densa a estrutura do material e, conseqüentemente, menor o ingresso de agentes agressivos para o interior da estrutura, o que justifica a baixa concentração de cloretos nos concretos e argamassas moldados com o cimento CP V – ARI.

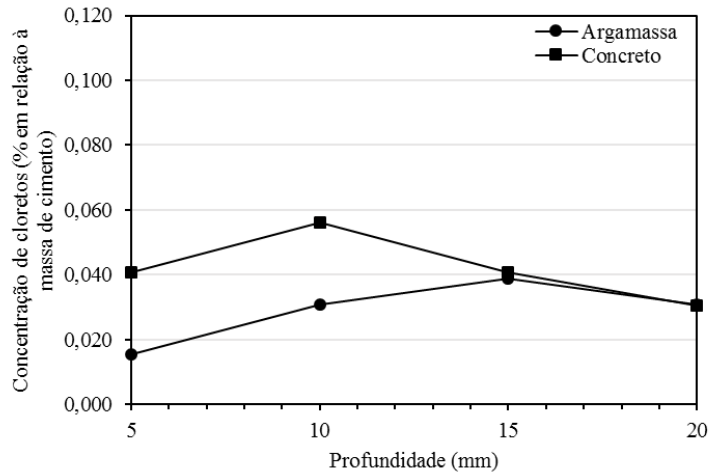
6.2.3.2. *Diferença na penetração de cloretos entre concreto e argamassa*

Em relação às diferenças na penetração de cloretos em concretos e argamassas moldados com os mesmos materiais e relações a/c , os comportamentos gerais observados para os exemplares expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva para os quatro tipos de cimentos avaliados são os descritos a seguir:

- Os prismas de concreto apresentaram concentração de cloretos superior aos de argamassa para as configurações com relação $a/c=0,45$ e $a/c=0,55$;
- Os prismas de argamassa apresentaram concentração superior aos de concreto para as configurações com relação $a/c=0,65$.

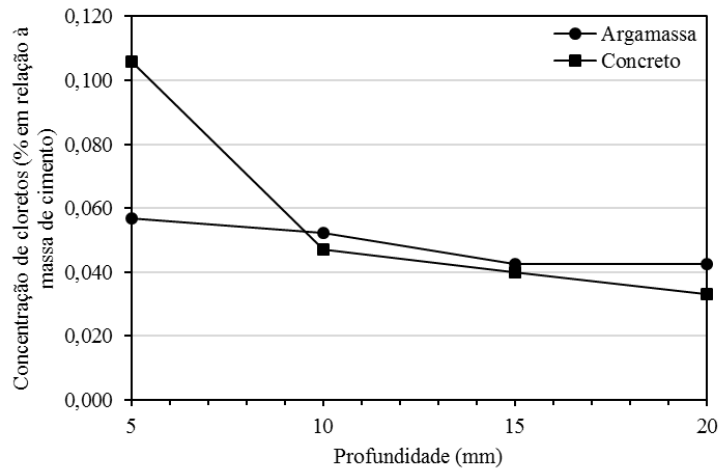
Para exemplificar as constatações acima mencionadas são apresentadas as Figuras 37, 38 e 39, as quais se referem aos perfis de cloretos dos concretos e argamassas moldados com cimento CP III e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65 que permaneceram expostos em ambiente desprotegido da chuva por um período de 3, 2 e 1 ano, respectivamente.

Figura 37 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos do concreto e argamassa moldados com cimento CP III e relação a/c=0,45, expostos em ambiente desprotegido da chuva



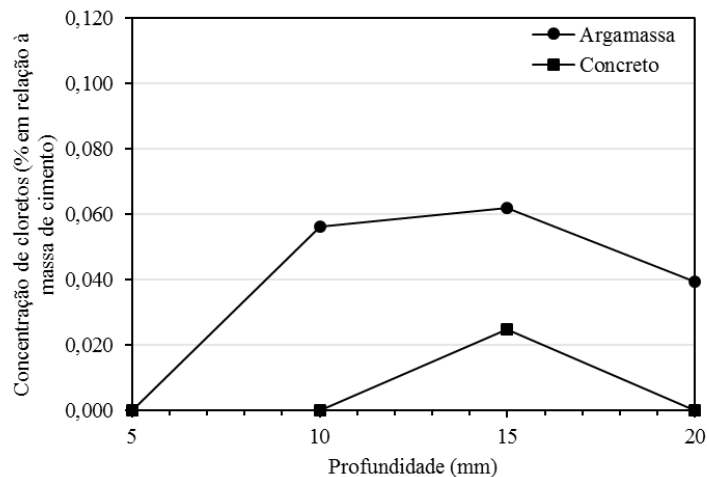
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 38 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos do concreto e argamassa moldados com cimento CP III e relação a/c=0,55, expostos em ambiente desprotegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 39 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 1 ano do concreto e argamassa moldados com cimento CP III e relação a/c=0,65, expostos em ambiente desprotegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

Inicialmente é importante expor a constatação feita por Vidal, Castel e François (2007) em um estudo realizado em vigas de concreto que permaneceram expostas a íons cloretos por 28 anos em ambiente laboratorial. Os autores sugerem que a extração de amostras de concreto sob a forma pulverulenta através de furos de pequenos diâmetros, inferiores à dimensão máxima característica do agregado graúdo (DMC), pode gerar uma amostra não representativa quando a broca acidentalmente atinge um agregado, o que pode levar a uma subestimativa do teor de cloretos. Isto porque o concreto é um meio heterogêneo e que os agregados graúdos, diferentemente da matriz cimentícia, não possibilitam a passagem de cloretos (POULSEN; MEJLBRO, 2006). Vidal, Castel e François (2007) inicialmente utilizaram uma broca com diâmetro de 10 mm para extração das amostras, tamanho próximo da DMC dos agregados graúdos utilizados na pesquisa. Após esta constatação, tais autores passaram a utilizar o *Profile Grinder* da *Germann Instruments*, extraindo um fino pó de concreto através da utilização de um disco com diâmetro de 30 mm, tamanho cerca de três vezes superior a maior dimensão do agregado graúdo utilizado.

Neste estudo, realizado com os prismas de concreto e argamassa que permaneceram expostos em Vitória, foi utilizada uma broca com diâmetro de 6 mm em função da pequena dimensão das fatias de tais prismas. O agregado graúdo utilizado nos concretos possuía DMC de 25 mm, conforme previamente apresentado no item 5.2.1.3. *Caraterização dos materiais empregados*. Desta forma, em função do exposto anteriormente por Vidal, Castel e François (2007), o procedimento de retirada de amostras empregado nesta pesquisa pode não ter sido o mais adequado, em função da relação entre a dimensão da broca utilizada e do tamanho do agregado graúdo.

No que se refere aos resultados obtidos nessa pesquisa, para as configurações com relação $a/c = 0,45$ e $0,55$, os exemplares de concreto apresentaram concentração superior aos de argamassa. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de que a inserção de agregados graúdos na pasta de cimento torna o concreto um material heterogêneo e que, conforme destacado por Mehta e Monteiro (2014), isto aumenta consideravelmente a sua permeabilidade, de forma que, quanto maior a dimensão do agregado, maior a zona de transição entre a pasta e o agregado e, conseqüentemente, maior a permeabilidade do concreto.

Nesse contexto, segundo Wang *et al.* (2018), o concreto pode ser considerado um material compósito heterogêneo, composto de três fases, denominadas de pasta de cimento, agregado e zona de transição. Sendo considerada como zona de transição a região no entorno de todos os agregados, tanto do graúdo como do miúdo. Desta forma, a argamassa também é um material composto por pasta de cimento, agregado miúdo e a zona de transição. Contudo,

no geral, é considerada como um meio de transporte homogêneo para os íons cloreto, devido ao pequeno tamanho dos poros e da dimensão do agregado miúdo em relação ao gráudo. Por isso, o efeito do agregado na difusão dos cloretos para o interior de estruturas de concreto pode ser atribuído ao agregado gráudo. Os autores ainda acrescentam que a zona de transição é caracterizada por uma alta concentração de cristais de hidróxido de cálcio e uma maior porosidade próxima à superfície das partículas do agregado, o que resulta numa maior difusividade dessa região em comparação com a fase de argamassa. Liao *et al.* (2004) verificaram, através da microscopia eletrônica de varredura, que a extensão da zona de transição do concreto, dependente fundamentalmente da dimensão máxima do agregado, corresponde a uma faixa de aproximadamente 100 μm entre a pasta e o agregado gráudo, sendo que a zona mais fraca fica dentro do intervalo de 0 – 15 μm em relação à borda do agregado, dado que os poros se concentram nessa região. De acordo com Yang e Cho (2005), com base em resultados experimentais do ensaio de migração de cloretos, o coeficiente de migração da zona de transição é aproximadamente 37-40 vezes maior que o coeficiente da matriz de argamassa, para relações a/c entre 0,35-0,55, respectivamente. Liu (2015)² *apud* Wang *et al.* (2018) observou que o coeficiente de difusão de cloretos da zona de transição é 35 vezes superior ao da argamassa, para uma relação a/c = 0,4 e fração de agregados gráudos de 0,4. As informações anteriormente expostas justificam os resultados encontrados nesta pesquisa para os concretos e argamassas com relação a/c = 0,45 e 0,55 moldados com os mesmos materiais.

Por fim, apresentando uma tendência oposta ao verificado nas as relações a/c de 0,45 e 0,55, para as configurações com relação a/c de 0,65 observou-se que os exemplares de argamassa apresentaram concentrações de cloretos superiores. Possivelmente este comportamento pode ser consequência da elevada porosidade dos concretos com relação a/c de 0,65, fazendo com que a influência da zona de transição não seja tão importante nestes casos.

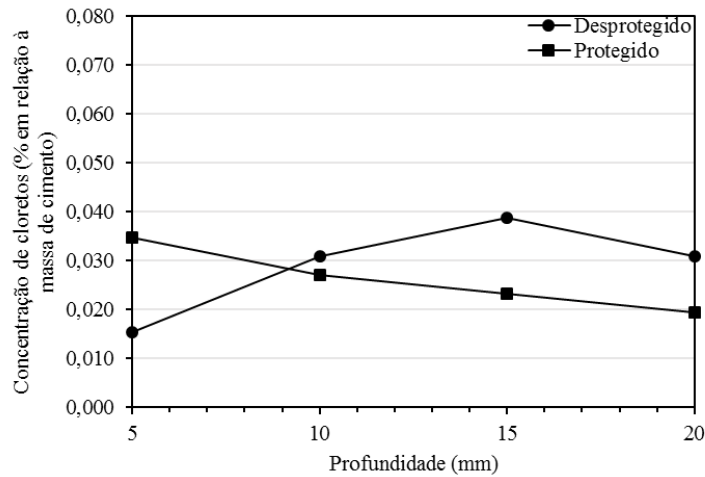
6.2.3.3. *Influência do ambiente de exposição (protegido e desprotegido da chuva)*

Com o objetivo de verificar a influência do ambiente de exposição na concentração e no formato dos perfis de cloretos dos concretos e argamassas moldados com os cimentos CP II – F, CP III, CP IV e CP V – ARI e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65, foram expostos prismas destes materiais em ambiente protegido e desprotegido da chuva. Observou-se que, no geral, para todas as relações a/c e tipos de cimento avaliados, os prismas de argamassa em ambiente

² LIU, H. Research on experiment of chloride diffusion in concrete considering the effects of coarse aggregate, Tianjin University, Tianjin, China, 2015 (in Chinese).

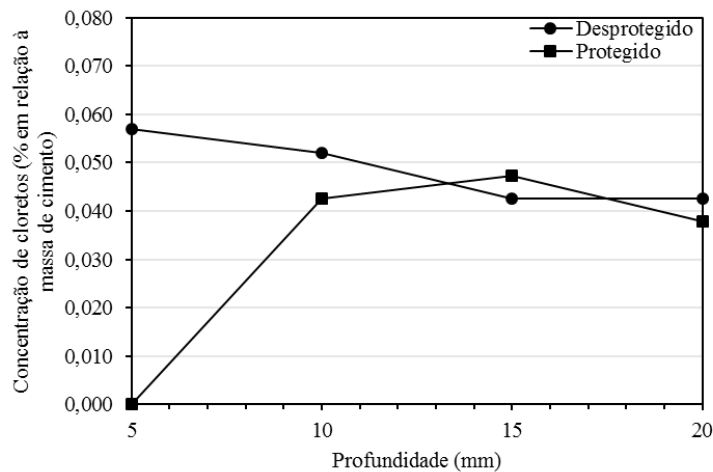
desprotegido apresentaram concentração de cloretos superior. O mesmo comportamento foi verificado nos concretos com relação $a/c = 0,55$ e $0,65$. Tal constatação pode ser verificada nas Figuras 40, 41 e 42, as quais contém os perfis de cloretos das argamassas moldadas com cimento CP III e relações a/c de $0,45$, $0,55$ e $0,65$, que permaneceram expostas em ambiente desprotegido e protegido da chuva por um período de 3,2 e 1 ano, respectivamente.

Figura 40 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos das argamassas moldadas com cimento CP III e relação $a/c = 0,45$, expostas em ambiente desprotegido e protegido da chuva



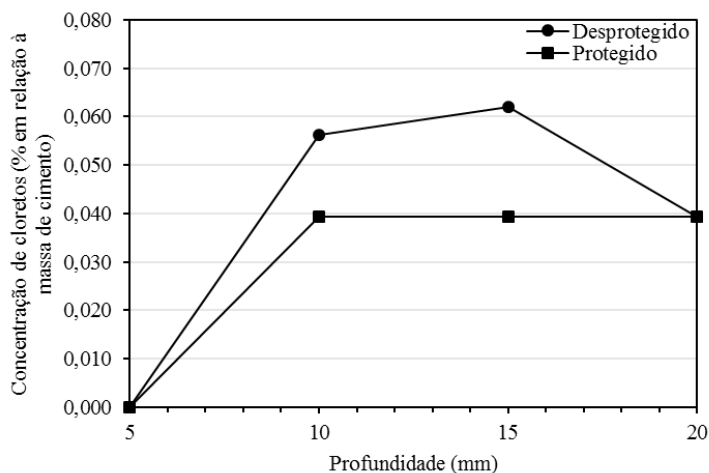
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 41 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos das argamassas moldadas com cimento CP III e relação $a/c = 0,55$, expostas em ambiente desprotegido e protegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 42 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 1 ano das argamassas moldadas com cimento CP III e relação a/c = 0,65, expostas em ambiente desprotegido e protegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

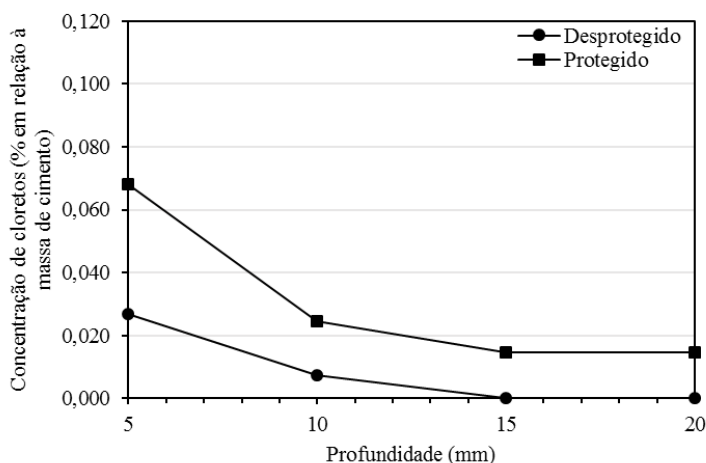
A condição de exposição desprotegido da chuva, no geral, gera concentrações de cloretos superiores à condição protegido da chuva. Isto porque, de acordo com Talavera (2005), em concretos e argamassas desprotegidos a chuva atua diretamente sobre a estrutura e fornece teores de umidade superiores aos fornecidos pelo simples aumento da umidade relativa do ambiente, como é o caso dos exemplares protegidos da chuva. Desta forma, conforme citado por Balestra *et al.* (2017), altos níveis de umidade acabam proporcionando um gradiente entre a umidade presente nas camadas mais próximas à superfície e as camadas mais internas, o que favorece a penetração de cloretos para o interior do material, por mecanismo de absorção capilar, que ocorre principalmente nas camadas mais próximas à superfície, e mecanismo de difusão nas camadas mais internas. Oh e Jang (2007) também observaram um crescimento na penetração de cloretos em concretos com o aumento da umidade no interior de tais materiais.

Lindvall (2003) cita que as condições de umidade do concreto afetam o transporte de diversas substâncias para o interior deste material. No que diz respeito à influência na taxa de transporte, a umidade atua como um obstáculo no transporte de gases, como o dióxido de carbono, entretanto é um condicionante para o ingresso de íons, como o caso dos cloretos. Desta forma, o autor salienta que no período de iniciação da corrosão, a umidade serve como uma barreira para a carbonatação, contudo é um requisito para o transporte de íons cloreto. Isto posto, em relação à influência da condição de exposição (protegido e desprotegido da chuva), o comportamento no caso do ingresso de cloretos é o oposto do observado nos casos de carbonatação, aonde exemplares expostos em condição protegida da ação de intempéries tendem a apresentar uma maior profundidade de carbonatação que aqueles inseridos em condição desprotegida. Isto ocorre devido à minimização da permeabilidade da matriz

cimentícia pelo preenchimento da porosidade, com conseqüente saturação superficial, devido à ação da chuva (ANDRADE, 2013).

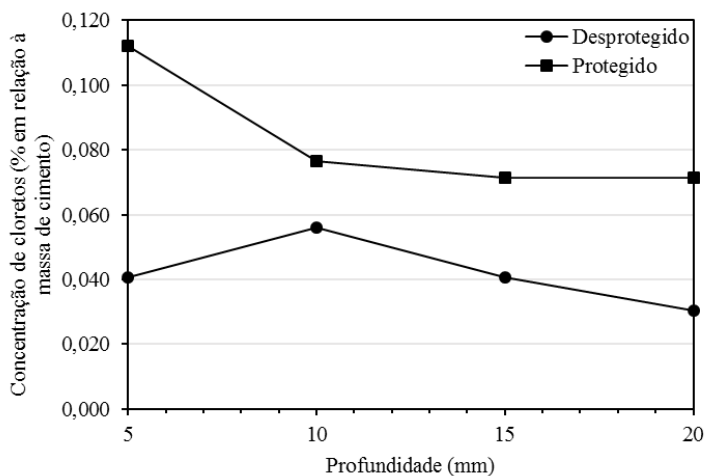
Contudo, este comportamento geral não foi observado nos prismas de concreto com relação $a/c = 0,45$. Verificou-se que em tais configurações as concentrações de cloretos dos concretos expostos em ambiente protegido da chuva foram superiores, diferentemente do observado nas relações a/c 0,55 e 0,65. As Figuras 43 a 46 apresentam o perfil de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos prismas de concreto moldados com relação $a/c=0,45$ e cimento CP II - F, CP III, CP IV e CP V – ARI, respectivamente.

Figura 43 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com cimento CP II – F e relação $a/c = 0,45$, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva



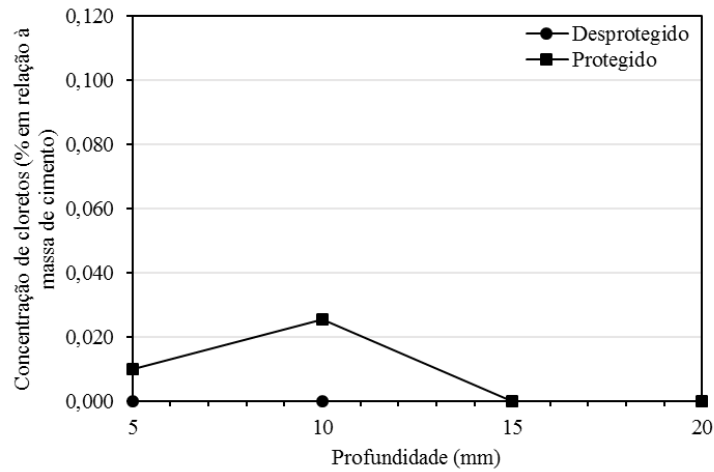
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 44- Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com cimento CP III e relação $a/c = 0,45$, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva



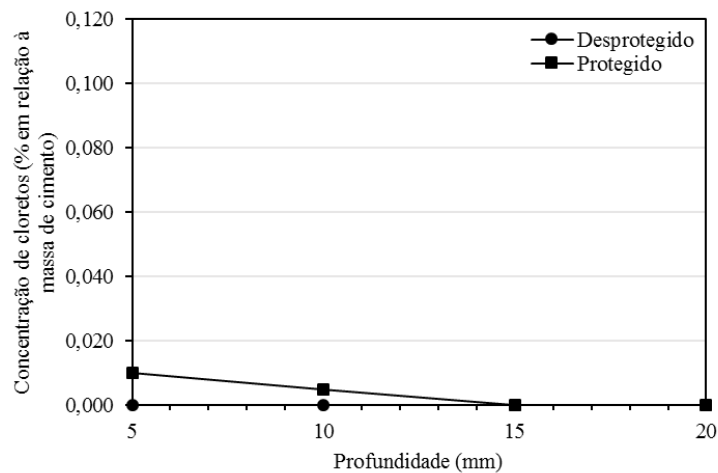
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 45 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com cimento CP IV e relação a/c = 0,45, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

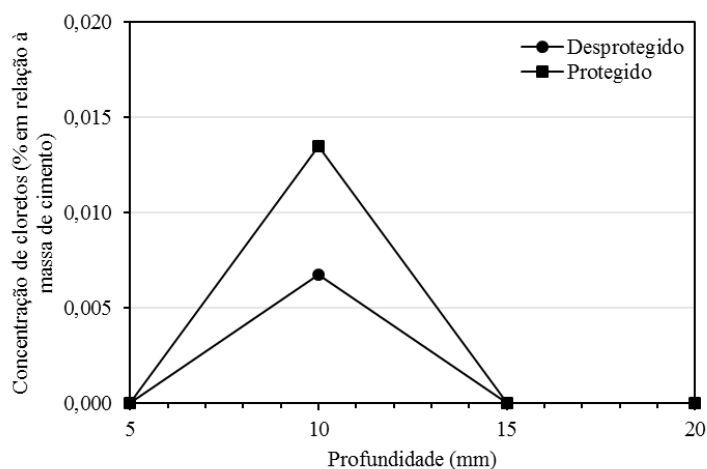
Figura 46 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 3 anos dos concretos moldados com cimento CP V - ARI e relação a/c = 0,45, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

Outro aspecto que merece destaque diz respeito ao fato de que alguns perfis de cloretos de concretos e argamassas que permaneceram em ambiente protegido da chuva apresentaram um pico, como mostra a Figura 47.

Figura 47 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 2 anos dos concretos moldados com cimento CP IV e relação a/c = 0,55, expostos em ambiente desprotegido e protegido da chuva

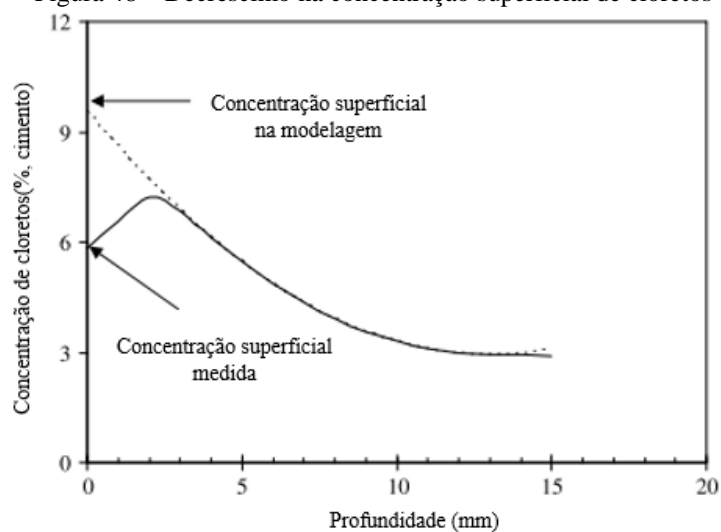


Fonte: Elaborada pela autora

Este comportamento usualmente é atribuído ao efeito da chuva e dos ciclos de molhagem e secagem (YANG; CAI; YU, 2017), ambos característicos do ambiente desprotegido. Neste contexto, Liu *et al.* (2017) explicam que na zona de atmosfera marinha, o cloreto é depositado na superfície de concreto e depois absorvido para o interior do material através do mecanismo de sucção capilar. Os íons livres começam a se difundir no concreto devido a existência de um gradiente de concentração. Quando ocorrem os ciclos de secagem, as moléculas de água presentes nos poros evaporam e os cloretos permanecem acumulados na camada superficial da matriz cimentícia. Desta forma, após uma série de ciclos de molhagem/secagem, a concentração destes íons pode atingir um pico a poucos milímetros em relação à superfície exposta.

Contudo, como a formação deste pico também foi observada em diversas configurações que permaneceram protegidas da chuva, é possível inferir que tal comportamento é decorrente de outras causas. Neste âmbito, Ann, Ahn e Ryou (2009) associam essa queda no teor de cloretos nos milímetros superficiais do concreto (Figura 48) a uma diferença na composição do material desta região quando comparada com o concreto do interior da estrutura. Essa diferença na composição pode ser atribuída a fenômenos como o contato as formas, entre outros (ANDRADE; DÍEZ; ALONSO, 1997).

Figura 48 – Decréscimo na concentração superficial de cloretos

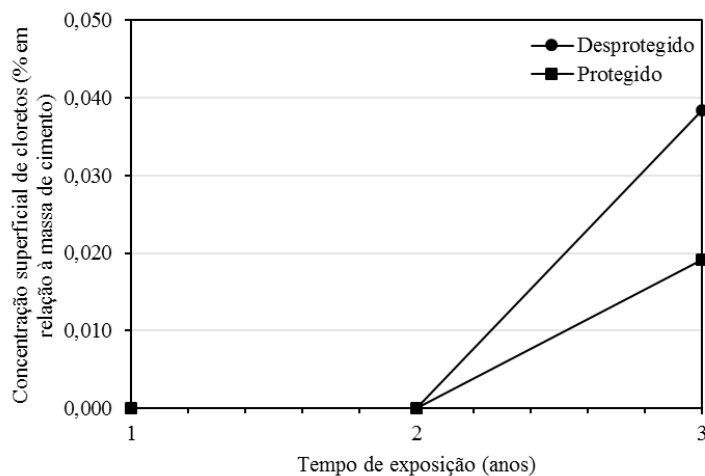


Fonte: Ann, Ahn e Ryou (2009), adaptada pela autora

Cita-se ainda que não foram encontrados trabalhos na literatura que analisaram comparativamente os perfis de cloretos de concretos ou argamassas expostos em ambiente protegido e desprotegido da chuva. Comumente, a maioria das pesquisas é realizada apenas em ambiente desprotegido da chuva.

Em relação a influência da condição de exposição na concentração superficial de cloretos (considerada neste trabalho como a concentração na profundidade de 5 mm) verificou-se que, no geral, houve a tendência de aumento deste parâmetro com o tempo de exposição, tanto para os concretos e argamassas em ambiente desprotegido como para aqueles que permaneceram em ambiente protegido da chuva. Tal comportamento pode ser verificado na Figura 49, a qual mostra a variação ao longo do tempo da concentração superficial das argamassas moldadas com cimento CP II – F e relação $a/c=0,45$, corroborando o relatado por vários autores (TANG, 2003; ANN; AHN; RYOU, 2009), os quais verificaram um aumento deste parâmetro nos primeiros anos de exposição e, após períodos significativamente longos, uma estabilização deste valor. Esse aumento pode ser justificado pelo acúmulo destes íons na superfície do material.

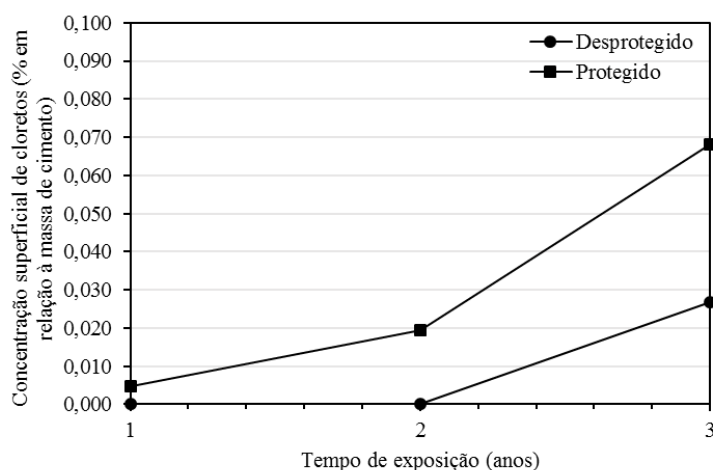
Figura 49 – Variação ao longo do tempo da concentração superficial de cloretos das argamassas moldadas com cimento CP II – F e relação a/c = 0,45, que permaneceram em ambiente desprotegido e protegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

De modo geral, a concentração superficial de cloretos apresentou-se superior para a condição de exposição desprotegido da chuva. Contudo, para os concretos com relação a/c = 0,45, independentemente do tipo de cimento, as concentrações superficiais das configurações que permaneceram em ambiente protegido da chuva foram superiores às daquelas que permaneceram em ambiente desprotegido. Como exemplo, apresenta-se a Figura 50, que contém a variação ao longo do tempo da concentração superficial de cloretos dos concretos moldados com cimento CP II – F e relação a/c = 0,45.

Figura 50 – Variação ao longo do tempo da concentração superficial de cloretos dos concretos moldados com cimento CP II – F e relação a/c = 0,45, que permaneceram em ambiente desprotegido e protegido da chuva



Fonte: Elaborada pela autora

6.3. BLOCOS DE CONCRETO EXPOSTOS EM TRAMANDAÍ - RS

6.3.1. Caracterização dos concretos

Na Tabela 40 são apresentados os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos preparados com os aglomerantes CP IV, CP V – ARI, CP V – ARI + 5% SA, CP V – ARI + 10% SA e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65.

Tabela 40 - Resultados da resistência à compressão axial

Aglomerante	Idade da ruptura (dias)	Resistência à compressão axial média (fc)		
		a/c = 0,45	a/c = 0,55	a/c = 0,65
CP IV	3	13,90	10,12	6,95
	7	22,33	15,91	10,55
	28	29,52	20,85	17,39
CP V - ARI	3	28,15	20,39	14,85
	7	38,90	28,53	21,06
	28	45,85	34,35	30,76
CP V - ARI + 5 % SA	3	28,57	26,63	16,22
	7	37,03	35,80	22,96
	28	52,17	39,82	32,48
CP V - ARI + 10 % SA	3	33,33	23,38	20,74
	7	38,59	31,25	28,15
	28	53,26	46,06	39,64

Fonte: Romano (2009)

6.3.2. Caracterização ambiental da estação de monitoramento

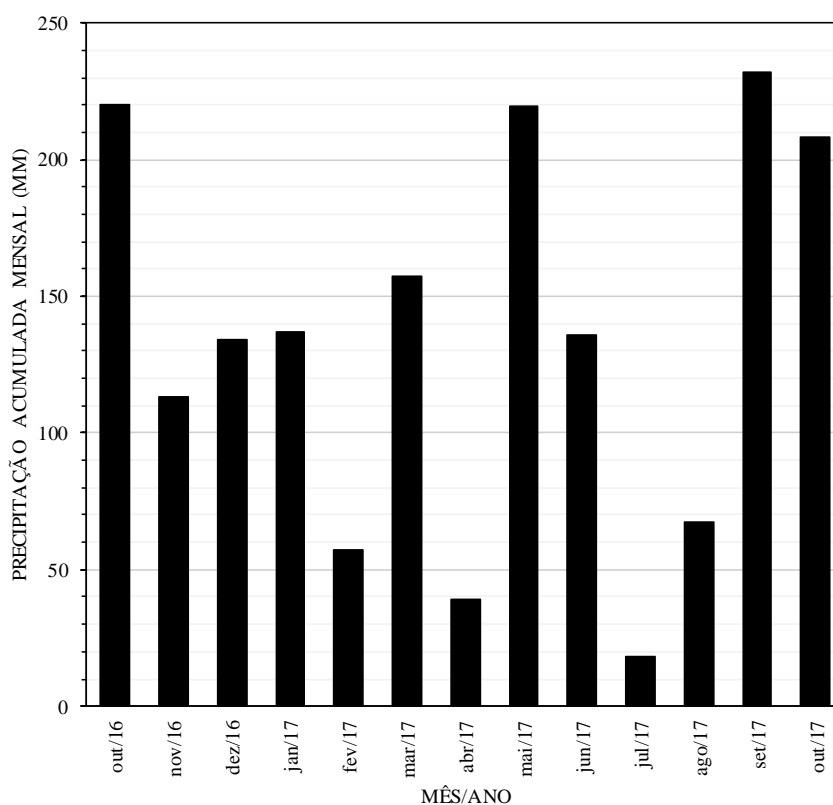
Os dados anuais referentes à caracterização ambiental das estações de monitoramento localizadas em Tramandaí são apresentados na Tabela 41. Em função do elevado volume de dados para a caracterização ambiental ao longo dos 9 anos de exposição, os mesmos serão tratados em termos anuais. Estes dados indicam que no período de setembro/2008 a outubro/2017 a temperatura anual média foi de 19,6 °C, a temperatura mínima média de 4,4 °C e a temperatura máxima média de 34,4 °C. Já a umidade relativa média foi de 80,4 %. Em relação aos ventos, a velocidade anual média foi de 4,5 m/s e a direção predominante a nordeste (NE). Na Figura 51 são apresentados os dados de precipitação do último ano de exposição dos blocos de concreto, dado que o perfil de cloretos com tempo de exposição de 9 anos foi determinado neste período.

Tabela 41 - Caracterização ambiental das estações de monitoramento localizadas em Tramandaí

Ano	Temperatura média anual (°C)	Temperatura mínima anual (°C)	Temperatura máxima anual (°C)	Umidade relativa média (%)	Velocidade média do vento (m/s)	Direção predominante do vento	Precipitação acumulada (mm)
2008	19,0	8,8	30,8	83,0	4,8	NE	1400,8
2009	19,3	1,5	32,9	81,7	4,6	NE	1410,0
2010	19,7	5,0	38,6	80,3	4,7	NE	1681,6
2011	19,1	3,4	32,5	76,2	4,6	NE	1199,2
2012	19,9	2,4	33,8	79,1	4,5	NE	1169,6
2013	19,0	3,8	35,9	78,9	4,2	NE	1593,2
2014	20,3	4,4	37,3	80,4	4,3	NE	1702,0
2015	20,2	6,3	33,3	81,0	4,2	NNE	1925,8
2016	19,6	4,7	35,1	80,9	4,3	NE	1396,2
2017	20,3	3,4	33,7	80,7	4,4	NE	1271,8
Média	19,6	4,4	34,4	80,2	4,5	-	-

Fonte: INMET

Figura 51- Precipitação acumulada mensal da estação meteorológica localizada em Tramandaí



Fonte: INMET

6.3.3. Penetração de cloretos

Os perfis de concentração de cloretos aos 9 anos dos blocos expostos em Tramandaí estão apresentados no APÊNDICE B. Com o intuito de verificar a influência dos fatores

controláveis na penetração de cloretos foi aplicado ao estudo uma análise de variância (ANOVA), sendo os fatores denominados de:

- A – tipo de aglomerante;
- B – relação a/c;
- C – profundidade em relação à superfície do concreto.

Inicialmente foram realizadas três leituras da concentração de cloretos para cada profundidade. Contudo, a partir de uma análise preliminar, optou-se pela exclusão da leitura com a maior diferença em relação à média. Desta forma, a análise estatística foi realizada considerando apenas duas leituras. Por fim, cita-se que foi estabelecido um nível de significância de 5% como critério de decisão.

Na Tabela 42 pode-se observar os resultados encontrados na análise de variância aplicada aos perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos blocos de concreto expostos em Tramandaí. Verificou-se que os três fatores controláveis principais exercem influência significativa na variável de resposta analisada, bem como todas as interações entre tais fatores.

Tabela 42 - Análise estatística dos dados de concentração de cloretos dos blocos de concreto expostos em Tramandaí por um período de 9 anos

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probab.	Comentário
A - Tipo de aglomerante	0,093119	3	0,031040	380,159454	0,00000000%	S
B - Relação a/c	0,005737	2	0,002868	35,129929	0,00000004%	S
C - Profundidade	0,081673	3	0,027224	333,428479	0,00000000%	S
AB	0,085003	6	0,014167	173,513275	0,00000000%	S
AC	0,036062	9	0,004007	49,074116	0,00000000%	S
BC	0,126875	6	0,021146	258,983800	0,00000000%	S
ABC	0,137464	18	0,007637	93,533086	0,00000000%	S
Erro	0,003919	48	0,000082			
TOTAL		95				

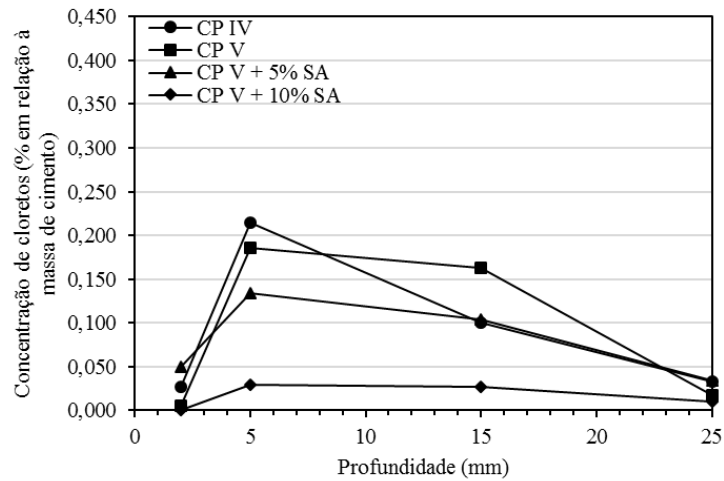
Fonte: Elaborada pela autora

Nos subitens a seguir a influência do tipo de aglomerante e da relação a/c na penetração de cloretos serão abordadas com mais detalhes.

6.3.3.1. *Influência do tipo de cimento e uso de adição de sílica ativa*

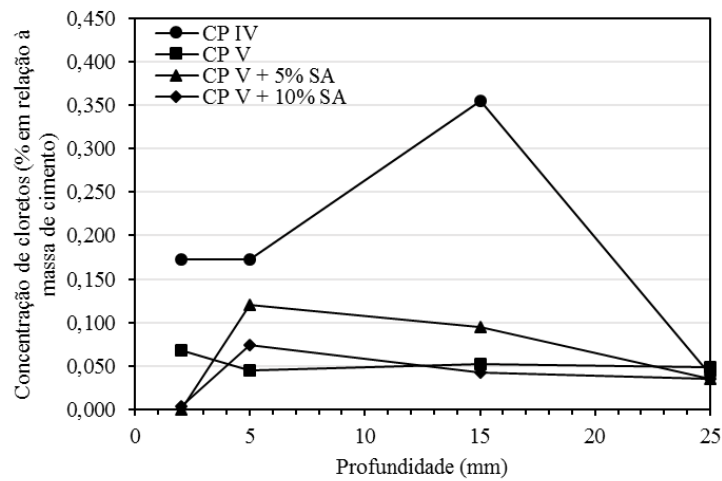
As Figuras 52, 53 e 54 contêm os perfis de cloretos dos concretos moldados com diferentes tipos de aglomerantes e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente, que permaneceram expostos em Tramandaí em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos.

Figura 52- Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com relação a/c=0,45



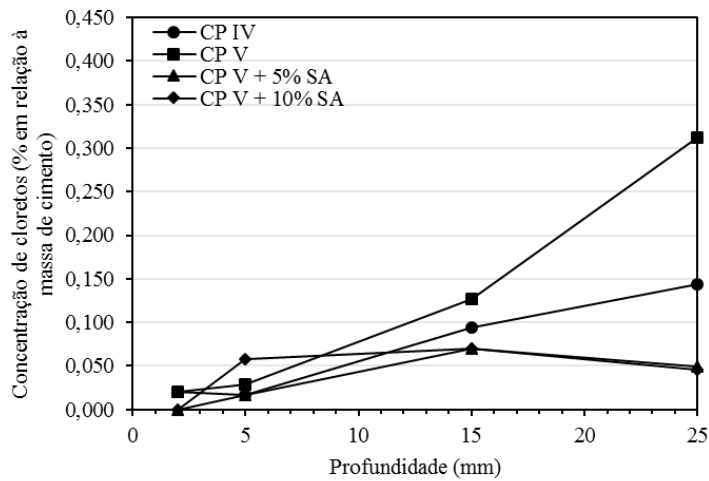
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 53 - Perfis de cloretos na com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com relação a/c=0,55



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 54 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com relação a/c=0,65



Fonte: Elaborada pela autora

Inicialmente destaca-se que em função do elevado período de exposição e da distância destes blocos em relação ao mar (100 m), foram observadas concentrações de cloretos expressivas, as quais estão próximas do limite crítico de cloretos para a despassivação das armaduras, considerado como 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento.

No que se refere às configurações moldadas com cimento CP IV, percebe-se que, para a relação a/c de 0,45, há uma tendência de concentrações de cloretos maiores nas camadas superficiais (entre 0 – 5 mm) em relação aos concretos moldados com cimento CP V e com adição de sílica ativa. Contudo, enfatiza-se que a medida que a profundidade aumenta, a concentração de íons nos concretos com CP IV diminui notadamente e fica próxima das demais configurações.

Neste âmbito, Weerdt *et al.* (2016) avaliaram a concentração de cloretos em vigas de concreto moldadas com cimento Portland com teores de substituição de 8% de sílica ativa e 19% de cinza volante e relações a/c de 0,44 e 0,42, respectivamente, que permaneceram expostas por um período de 16 anos em zona de variação de maré, em Sotra, na Noruega. Os autores verificaram que a concentração superficial do concreto com sílica ativa foi de 0,64% em relação à massa de concreto, enquanto que para o concreto com cinza volante foi de 0,79%. Cita-se ainda o trabalho de Fattah *et al.* (2018). Os autores determinaram os perfis de cloretos de concretos com relação a/c = 0,40, moldados com cimento Portland e teores de sílica ativa de 6% e de cinza volante de 25%, expostos por um período de 1 ano em zona de atmosfera marinha e zona de variação de maré, na cidade de Al Khobar, Arábia Saudita. Após este período de exposição, o concreto com sílica ativa localizado em zona de atmosfera marinha apresentou concentração superficial de cloretos de 0,165% em relação à massa de concreto, valor semelhante ao encontrado no concreto com cinza volante, o qual apresentou uma concentração de 0,152%. Para a zona de variação de maré as diferenças encontradas foram significativas. O concreto com sílica ativa apresentou concentração de 0,345%, enquanto que o concreto com cinza volante um valor de 0,528%. Essa tendência de comportamento também foi verificada neste trabalho, uma vez que para a relação a/c=0,45, semelhante às relações utilizadas pelos autores anteriormente citados, verificou-se uma concentração superficial maior para o concreto moldado com cimento constituído por um percentual de cinza volante, ou seja, o cimento CP IV. Destaca-se, entretanto, que no caso deste tipo de cimento os percentuais de substituição de cinza volante são superiores (35-50%) ao utilizado na pesquisa de Weerdt *et al.* (2016) e de Fattah *et al.* (2018).

No tocante à utilização de sílica ativa, observa-se que, no geral, teores de adição em torno de 5 a 10% promovem uma redução na penetração de cloretos. Esta constatação pode ser

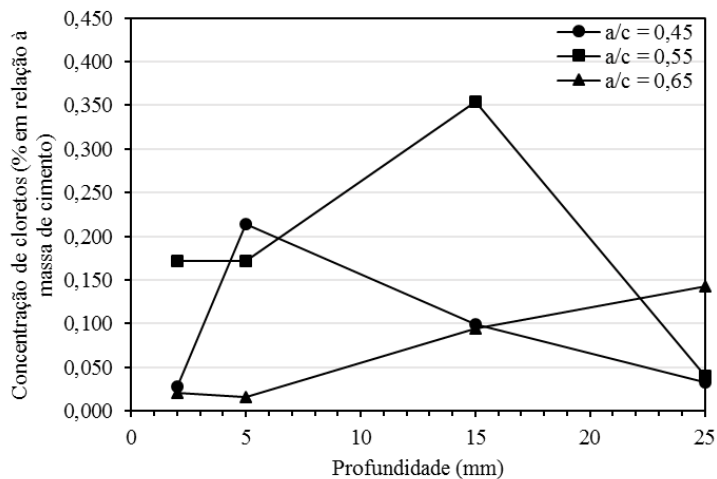
observada através da análise da concentração total de cloretos de cada concreto, resultado da soma dos valores nas quatro profundidades avaliadas. Para os concretos com relação $a/c = 0,45$, a utilização de um percentual de sílica ativa de 5% reduziu a concentração total de cloretos em aproximadamente 13% e a incorporação de um teor de sílica ativa de 10% ocasionou uma redução de 82% na concentração total de cloretos. Para os concretos com relação $a/c = 0,55$, verificou-se um aumento de 16% para o concreto com CP V + 5% SA e um redução de 27% para o concreto moldado com CP V + 10% SA. Por fim, para os concretos com relação $a/c = 0,65$, foram observadas reduções de 72% e 64% na concentração total de cloretos dos concretos com 5% e 10% de sílica ativa em relação ao concreto moldado com o cimento CP V – ARI.

Neste contexto, diversos autores reportaram uma redução na penetração de cloretos com a incorporação de sílica ativa (AGUIRRE-GUERRERO; MEJÍA-DE-GUTIÉRREZ; MONTÊS-CORREIA, 2016; FARAHANI; TAGHADDOS; SHEKARCHI, 2015). Tadayon, Shekarchi e Tadayon (2016) verificaram uma redução no coeficiente de difusão de aproximadamente 67% entre o concreto de referência, moldado apenas com cimento Portland, e o concreto com teor de substituição do cimento por sílica ativa de 5%. Ambos os concretos possuíam relação $a/c = 0,40$ e permaneceram expostos por um período de 27 meses em zona de variação de maré na Ilha Qeshm, situada no Golfo Pérsico. Este comportamento pode ser justificado pela elevada reatividade da sílica ativa, que acelera o processo de hidratação do cimento e, em função da pequena dimensão de suas partículas, é responsável pelo refinamento dos poros da matriz cimentícia e redução da porosidade do material (SIDDIQUE; KHAN, 2011). Destaca-se ainda a ação pozolânica deste tipo de adição, que também contribuiu para os resultados encontrados.

6.3.3.2. *Influência da relação a/c*

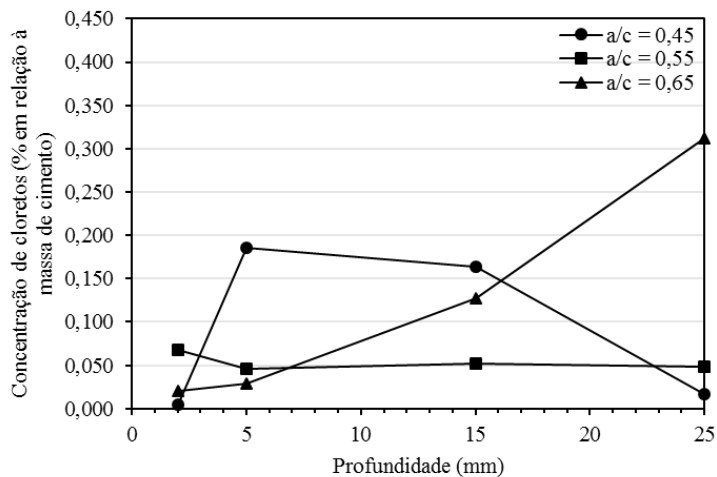
As Figuras de 55 a 58 contêm, respectivamente, os perfis de cloretos dos concretos com os aglomerantes CP IV, CP V – ARI, CP V + 5% de sílica ativa e CP V + 10% de sílica ativa moldados com as relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65, que permaneceram expostos em Tramandaí em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos.

Figura 55 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com cimento CP IV



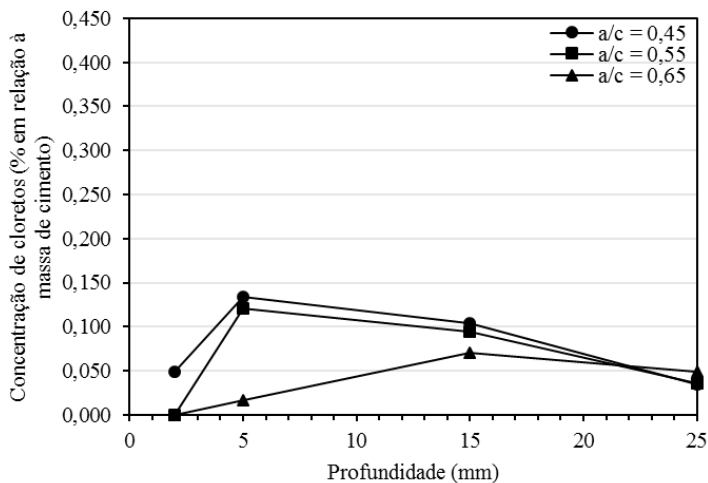
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 56 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com cimento CP V - ARI



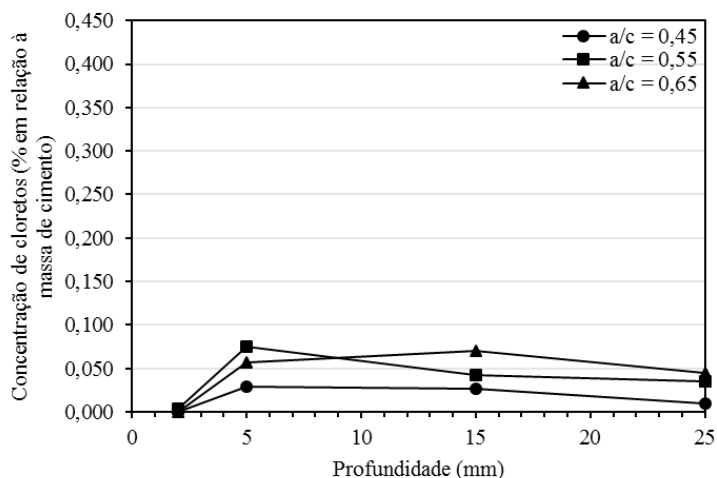
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 57 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com cimento CP V - ARI e adição de 5% de sílica ativa



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 58 - Perfis de cloretos com tempo de exposição de 9 anos dos concretos moldados com cimento CP V – ARI e adição de 10% de sílica ativa



Fonte: Elaborada pela autora

Pode-se observar que, para os quatro tipos de aglomerante avaliados na pesquisa, os concretos com relação $a/c=0,45$ apresentaram um pico na concentração superficial de cloretos e, em profundidades maiores, concentrações inferiores. Romano (2009) também observou este comportamento nos perfis destes blocos com tempos de exposição de 45, 105, 240 dias, justificando que concretos com baixa relação a/c possuem um maior volume de pasta, o que leva a uma maior absorção superficial. De acordo com Tadayon, Shekarchi e Tadayon (2016) este comportamento é característico de concretos menos permeáveis, onde o teor de cloretos é maior na região superficial e tende a ser relativamente inferior em maiores profundidades.

Já em relação à concentração de cloretos em profundidades maiores (25 mm), fica claro uma maior penetração destes íons em concretos com relações a/c mais elevadas. Avaliando a concentração de cloretos na profundidade de 25 mm, os concretos moldados com cimento CP IV e relações $a/c = 0,45, 0,55$ e $0,65$ apresentaram concentração de 0,032%, 0,040% e 0,143% de cloretos em relação à massa de cimento, respectivamente. Para os concretos com cimento CP V - ARI os valores encontrados foram de 0,017%, 0,049% e 0,312%. Para os concretos moldados com cimento CP V e adição de 5% de sílica ativa foram de 0,035%, 0,036% e 0,049%. E para aqueles moldados com cimento CP V e 10% de sílica ativa, foram de 0,010%, 0,036% e 0,045%.

Por fim, de acordo com Tadayon, Shekarchi e Tadayon (2016), em função de um estudo realizado em concretos moldados apenas com cimento Portland e com a incorporação de 5% sílica ativa que permaneceram expostos em zona de variação de maré por um período de 27 meses na Ilha Qeshm, situada no Golfo Pérsico, os autores acreditam que a utilização de pozolanas no concreto pode ser mais eficiente na durabilidade do que a redução da relação a/c ,

visto que ambas as soluções podem gerar os mesmos incrementos nas propriedades mecânicas de tais materiais.

6.4. VALIDAÇÃO DO MODELO DE ANDRADE (2001)

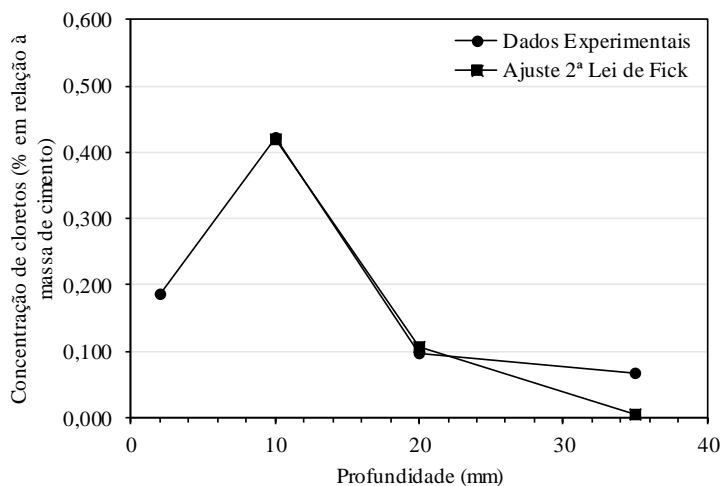
Após a obtenção dos dados experimentais e da coleta de dados na literatura, a última etapa da pesquisa consistiu na validação do modelo de Andrade (2001). Como as concentrações de cloretos dos dados experimentais não atingiram o valor crítico de 0,4% em relação à massa de cimento, profundidade descrita pelo modelo em questão, estes não poderão ser utilizados. Desta forma, tal validação foi realizada apenas com base nos dados da literatura citados anteriormente no item 6.1. *Coleta de Dados na Literatura*.

Ao todo foram encontrados 10 trabalhos caracterizados por: exposição em zona de atmosfera marinha, concentrações de cloretos superiores ao limite crítico (0,4 % em relação à massa de cimento) e pela apresentação de todas as informações necessárias para a definição dos parâmetros de entrada do modelo em questão. Após uma análise preliminar dos dados obtidos nestes 9 trabalhos, julgou-se necessário a definição de alguns critérios de escolha para a utilização dos mesmos. Estes critérios foram estabelecidos a fim de utilizar na validação do modelo dados concisos e que estão de acordo com os fenômenos físicos da penetração de cloretos em estruturas de concreto.

Determinou-se como primeiro critério que os perfis de cloretos deveriam ser compostos ao menos por 5 pontos. Perfis com poucos pontos não descrevem adequadamente a concentração de cloretos ao longo da profundidade do concreto. Além disso, como mencionado anteriormente, o parâmetro de entrada do modelo “concentração superficial de cloretos” é obtido através de um ajuste do perfil dos dados experimentais com base na 2ª Lei de Fick. Perfis compostos por poucos pontos comprometem a qualidade deste ajuste e, conseqüentemente, o valor da concentração superficial obtido. Levando isto em conta, e que este parâmetro de entrada é o mais significativo no modelo de Andrade (2001) conforme indicado na análise de sensibilidade realizada pelo autor, foram excluídos os trabalhos que contêm perfis de cloretos compostos por menos de 5 pontos. Tais constatações podem ser exemplificadas na Figura 59, que contém os dados de Vitali (2013). A autora determinou o perfil a partir da concentração de cloretos em 4 profundidades, sendo estas de 2, 10, 20 e 35 mm. Estes intervalos de profundidades são grandes, reduzindo a precisão do perfil obtido. Usualmente a concentração de cloretos é determinada em faixas de 5 em 5 mm. Além disso, como o perfil dos dados experimentais apresentou um pico, o valor da camada superficial foi desprezado para o ajuste

com base na 2ª Lei de Fick. Desta forma, um perfil de cloretos com apenas 3 pontos não fornece um ajuste adequado.

Figura 59 - Perfil de cloretos dos dados de Vitali (2013) e ajuste com base na 2ª Lei de Fick



Fonte: Vitali (2013), elaborada pela autora

Posteriormente, estabeleceu-se como segundo critério a utilização de perfis que apresentassem concentração superficial de cloretos crescente no tempo e coeficiente de difusão decrescente, seguindo o comportamento geral esperado para tais parâmetros. Isto posto, após a análise dos dois critérios acima mencionados, foram excluídos da validação do modelo de Andrade (2001) os dados obtidos por Vitali (2013), Pereira (2003) e Brito (2008). Os dados utilizados para validação são aqueles que constam nos trabalhos de: Costa e Appleton (1999a, 1999b); Costa e Appleton (2002); Meira (2004); Boubitsas, Luping e Utgenannt (2014); Wu, Li e Yu (2017) e Fattah *et al.* (2018).

Na Tabela 43 são apresentados os dados utilizados para a validação do modelo. Nela constam as profundidades medidas da concentração crítica de cloretos, as profundidades calculadas através do modelo de Andrade (2001), as diferenças entre os valores medidos e calculados e os erros associados ao modelo avaliado. No APÊNDICE C a planilha completa com os parâmetros de entrada do modelo para todos os dados utilizados na validação é apresentada.

Tabela 43 - Profundidade da concentração crítica de cloretos medida e calculada pelo modelo de Andrade (2001)

Autor	Características do concreto	Tempo de exposição (anos)	Profundidade medida CCr (mm)	Profundidade calculada Ccr (mm)	Diferença (mm)	Erro (%)
Meira (2004)	CP IV - a/c = 0,5	0,8	4,0	4,0	0,0	-0,9%
		1,2	6,0	4,9	1,1	17,6%
		1,5	7,0	5,5	1,5	21,1%
Meira (2004)	CP IV - a/c = 0,57	0,8	7,5	5,7	1,8	23,7%
		1,2	8,5	7,0	1,5	17,5%
		1,5	9,5	7,8	1,7	17,5%
Meira (2004)	CP IV - a/c = 0,65	0,8	10,0	8,9	1,1	10,6%
		1,2	11,5	11,0	0,5	4,8%
		1,5	13,0	12,2	0,8	5,8%
Meira (2004)	CP II - F - a/c = 0,5	1,5	4,0	4,8	-0,8	-19,7%
Meira (2004)	CP II - F - a/c = 0,57	1,5	9,0	8,4	0,6	6,7%
Meira (2004)	CP II - F - a/c = 0,65	0,8	9,0	9,2	-0,2	-1,9%
		1,2	10,8	11,2	-0,4	-4,0%
		1,5	12,6	12,6	0,0	0,3%
Costa e Appleton (1999a, 1999b)	OPC - fck = 34 MPa	1,5	20,8	12,3	8,5	40,9%
		3	30,0	17,4	12,6	42,0%
Costa e Appleton (2002)	OPC - a/c = 0,32	35	21,0	10,3	10,7	50,8%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC - a/c = 0,4	20	33,8	15,9	17,9	52,8%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC - a/c = 0,35	20	25,9	9,6	16,3	62,8%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC + 5% SA - a/c = 0,35	20	29,1	8,3	20,8	71,3%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC + 5% SA - a/c = 0,4	20	18,8	8,4	10,4	55,4%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC + 5% SA - a/c = 0,5	20	43,5	11,0	32,5	74,7%
Fattah et al. (2018)	OPC - a/c = 0,4	1	6,4	6,6	-0,2	-2,8%
Fattah et al. (2018)	OPC + 25% CV - a/c = 0,4	1	5,6	5,2	0,4	7,7%
Fattah et al. (2018)	OPC + 70% EAF - a/c = 0,4	1	13,3	8,7	4,6	34,5%
Wu, Li e Yu (2017)	OPC - a/c = 0,4	6,7	13,7	6,1	7,6	55,3%
Wu, Li e Yu (2017)	OPC - a/c = 0,4	5,2	3,6	4,2	-0,6	-15,6%

Fonte: Meira (2004); Costa e Appleton (1999a, 1999b); Costa e Appleton (2002); Boubitsas, Luping e Utgennat (2014); Fattah *et al.* (2018); Wu, Li e Yu (2017); elaborada pela autora

Na Tabela 43 verifica-se que, de uma forma geral, o modelo de Andrade (2001) fornece uma boa estimativa da profundidade da concentração crítica de cloretos (associada a concentração de 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento), principalmente em função da pequena quantidade de dados de entrada e da facilidade de obtenção dos mesmos. Em relação aos dados de Meira (2004) e Fattah *et al.* (2017), as diferenças entre os valores medidos e calculados estão dentro de uma faixa aceitável de variação, apresentando como maior erro um percentual de 34,5%, correspondente a uma diferença de apenas 4,6 mm. Neste contexto, Andrade (2001) aplicou o modelo em quatro pontos de um complexo portuário com 22 anos de exposição localizado na cidade de Rio Grande na região sul do estado do Rio Grande do Sul. A ordem de grandeza das variações entre dados reais e valores calculados encontrados pelo autor estão na faixa de -6,3% a 36,8%, semelhante às variações encontradas para os dados anteriormente citados. Entretanto, conforme pode ser constatado na Tabela 43, as diferenças encontradas para alguns dados são maiores e serão discutidas a seguir.

Inicialmente é importante destacar que variações entre o valor calculado e o valor medido são esperadas e podem ser atribuídas a determinados fatores, principalmente devido à variabilidade inerente associada às características do concreto, às condições ambientais, ao processo de extração de amostras e análise dos resultados e à influência das práticas construtivas. Em relação a estas variabilidades, cita-se que: considera-se que a penetração de cloretos ocorre de maneira uniforme em toda a superfície do concreto, contudo por se tratar de um material heterogêneo, ocorrem variações na penetração destes íons em função da região analisada; as características ambientais no modelo de Andrade (2001) são consideradas em termos médios, não englobando a variação de tais parâmetros; o processo de extração de amostras não possui uma precisão muito elevada, principalmente em função da dimensão destes intervalos de profundidade, usualmente entre 2 -5 mm.

Nesse sentido, a norma ABNT NBR 6118: 2014 estabelece cobrimentos mínimos para os elementos estruturais em função da classe de agressividade do ambiente. Levando em consideração a variabilidade da espessura de cobrimento, tal norma define que o cobrimento mínimo é composto por um valor nominal acrescido de um limite de tolerância de 10 mm, visando englobar essas variações e os diferentes níveis de controle de qualidade de execução. De acordo com a mesma norma anteriormente citada, em obras em que existe um controle adequado de qualidade e limites rígidos de tolerância da variabilidade, ou quando são utilizados concretos com classes de resistência superiores ao mínimo exigido neste mesmo documento, o limite de tolerância pode ser reduzido para 5 mm. Entretanto, Maran (2015) pondera que a norma não indica parâmetros para identificar o que é um projeto com controle de qualidade adequado e que, desta forma, o limite de tolerância de 5 mm é usualmente aplicado nos projetos. Desta forma, considerando a situação mais rigorosa que é um limite de tolerância de apenas 5 mm para o cobrimento das armaduras e que é o valor usualmente praticado pelas empresas em função desta falta de especificações da norma ABNT NBR 6118:2014, também é plausível adotar uma tolerância semelhante a esta para as estimativas fornecidas pelos modelos de previsão de vida útil. A situação ideal é que não ocorram essas variações, contudo, em função do baixo controle de qualidade e falta de precisão do setor da construção civil, elas devem ser consideradas. Portanto, a partir de uma análise da Tabela 43, percebe-se que a maioria das diferenças entre os valores medidos e calculados estão dentro desta tolerância de 5 mm.

Separando os dados apresentados na Tabela 43 em dois grandes grupos, aqueles caracterizados por erros inferiores a 35% e aqueles com erros superiores a 35%, percebe-se que no geral, o primeiro grupo é composto por concretos com pequenos tempos de exposição, enquanto que o segundo grupo é composto por concretos com tempos de exposição mais

elevados. Isto pode indicar que o modelo de Andrade (2001) possui uma faixa de aplicação para idades inferiores e que, para tempos de exposição maiores, precisa passar por um ajuste. Possivelmente os erros associados à aplicação do modelo em dados com tempos de exposição mais elevados são superiores pelo fato de que o parâmetro de entrada do modelo é a concentração superficial após o primeiro ano de exposição. Indicando, provavelmente, que o modelo precisa passar por um ajuste no sentido de melhor descrever o crescimento da concentração superficial ao longo do tempo, dado que este parâmetro é o mais significativo na estimativa fornecida pelo modelo de Andrade (2001), conforme indicado na análise de sensibilidade realizada pelo autor.

Também cabe citar que os dados de Costa e Appleton (2002) e Wu, Li e Yu (2017), diferentemente dos demais apresentados na Tabela 43, tratam-se de dados de estruturas reais, as quais muitas vezes não são construídas com o mesmo rigor tecnológico de corpos de prova destinados à pesquisa. Esta informação pode justificar uma maior variabilidade nas propriedades dos concretos destas estruturas, resultando em maiores diferenças entre os valores observados e estimados pelo modelo de Andrade (2001).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. CONCLUSÕES

As conclusões encontradas nesta pesquisa serão apresentadas em três itens principais, sendo estes: prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória, blocos de concreto expostos em Tramandaí e, por fim, a validação do modelo de Andrade (2001) para previsão da vida útil de estruturas de concreto.

Desta forma, em relação aos resultados encontrados no estudo referente aos prismas de concreto e argamassa expostos em Vitória, cita-se:

- para os concretos e argamassas com relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65 que permaneceram expostos em ambiente protegido e desprotegido da chuva, o tipo de cimento que apresentou as maiores concentrações de cloretos foi o CP III, seguido pelo cimento CP II – F e dos cimentos CP V - ARI e CP IV;
- sobre a diferença na penetração de cloretos em prismas de concreto e argamassa moldados com os mesmos materiais e relações a/c, observou-se que os prismas de concreto apresentaram concentração de cloretos superiores aos de argamassa para as relações a/c=0,45 e a/c=0,55. Para as configurações com relação a/c = 0,65, os prismas de argamassa apresentaram concentrações superiores aos de concreto;
- observou-se que, no geral, para todas as relações a/c e tipos de cimento avaliados, os prismas de argamassa em ambiente desprotegido apresentaram concentração de cloretos superior. O mesmo comportamento foi verificado nos concretos com relação a/c = 0,55 e 0,65. Apenas os concretos com relação a/c = 0,45 apresentaram comportamento oposto.
- alguns perfis de cloretos de concretos e argamassas que permaneceram em ambiente protegido da chuva apresentaram um pico, comportamento usualmente atribuído à ação da chuva;
- no geral, verificou-se uma tendência de aumento da concentração superficial de cloretos em função do tempo de exposição, tanto para os concretos e argamassas em ambiente desprotegido como para aqueles que permaneceram em ambiente protegido da chuva.

Já os resultados dos blocos de concreto expostos em Tramandaí indicaram que:

- no tocante à utilização de sílica ativa, observa-se que, no geral, teores de adição em torno de 5 a 10% promovem uma redução na penetração de cloretos;
- no que diz respeito à influência da relação a/c na penetração de cloretos, observou-se que concretos menos permeáveis ($a/c=0,45$) tendem a apresentar teores de cloretos maiores na região superficial e valores relativamente inferiores em maiores profundidades. Verificou-se também que quanto maior a relação a/c maior a concentração de cloretos em profundidades maiores.

Por fim, em relação à validação do modelo de Andrade (2001) para previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, conclui-se que:

- ao comparar os resultados fornecidos pelo modelo com os dados reais, verificou-se que o mesmo apresenta níveis de resposta similares à penetração de cloretos medida *in situ*, isto para os dados com pequenos tempos de exposição;
- o erro associado ao modelo para os dados com tempos de exposição superiores foi expressivo, o que indica que o mesmo precisa passar por um ajuste no sentido de melhor descrever o crescimento da concentração superficial ao longo do tempo;
- no geral, o modelo apresentou-se confiável para uma faixa de variação de 35%, com diferenças de apenas 4,6 mm entre a profundidade da concentração crítica de cloretos medida e a calculada para os dados avaliados nesta pesquisa.

7.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Visando a continuidade de pesquisas nesta área, são sugeridos os seguintes temas para trabalhos futuros:

- investigar a variabilidade dos cimentos existentes no mercado nacional quanto à penetração de cloretos;
- investigar a influência da condição de exposição protegido e desprotegido da chuva em concretos com baixas relações a/c ;
- aplicar o modelo de Andrade (2001) sistematicamente, a fim de validar o mesmo para o maior número de combinações possíveis;
- realizar um experimento controlado a longo prazo que avalie a concentração de cloretos ao longo do tempo, visando o ajuste do modelo de Andrade (2001);

- caracterizar a variabilidade dos parâmetros de entrada do modelo de Andrade (2001) que influenciam na penetração de cloretos em estruturas de concreto;
- avaliar o comportamento da concentração superficial de cloretos ao longo do tempo em diferentes matrizes cimentícias e condições de exposição.

8. REFERÊNCIAS

- AGUIRRE-GUERRERO, A. M.; MEJÍA-DE-GUTIÉRREZ, R.; MONTÊS-CORREIA, M. J. R. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 704-716, 2016.
- ALVES, A. M. C. **Contribuição à análise da perspectiva de vida útil de estruturas de concreto face ao teor de cloreto registrado em Maceió - AL**. 2007. 121 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Alagoas, Maceió, 2007.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 365**: Service-life prediction: state-of-the-art report, 2000.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete, 2014.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **201.2R-16**: Guide to Durable Concrete, 2016.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD FEDERAL TEST METHOD. **ASTM D 1193**: Standard Specification for Reagent Water, West Conshohocken, 1999.
- ANACTA, E. **Modelling the depth of chloride ingress and time-to-initiate corrosion of RC exposed to marine environment**. 2009. PhD Dissertation – Institute of Civil Engineering, University of the Philippines, Diliman, Quezon City, 2009.
- ANDRADE, C.; D' ANDREA, R. Electrical resistivity as microstructural parameter for the modelling of service life of reinforced concrete structures. **2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure**, p. 379 – 388, 2010.
- ANDRADE, C.; CASTILLO, A. Evolution of reinforcement corrosion due to climatic variations. **Materials and Corrosion**, v. 54, p. 379 – 386, 2003.
- ANDRADE, C.; DÍEZ, J. M.; ALONSO, C. Mathematical modeling of a concrete surface “skin effect” on diffusion in chloride contaminated media. **Advn Cem Bas Mat**, v. 6, p. 39-44, 1997.
- ANDRADE, C; *et al.* The use of electrical resistivity as NDT method for the specification of the durability of reinforced concrete. **Non-destructive Testing in Civil Engineering**, p. 1–6, 2009.
- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão de vida útil de estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. 277 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- ANDRADE, J. J. O. **Análise de desempenho e previsão de vida útil de concretos carbonatados**. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2013. 106 p. Relatório de pesquisa do Programa Pesquisador Gaúcho (PqG 2010), 2013.
- ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Considerations about service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, p. 1-8, 2017.
- ANN, K. Y.; AHN, J. H.; RYOU, J. S. The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 239 – 245, 2009.

APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADAKIS, V. G. Consequences of steel corrosion on the ductility of reinforcement bar. **Construction and Building Materials**, v. 22, n.12, p. 2316-2324, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazio. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de Alto Forno. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Parte 1: Desempenho de Edifícios Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

AUDENAERT, K.; YUAN, Q.; SCHUTTER, G. On the dependency of the chloride migration coefficient in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 396-402, 2010.

AUSTRALIA STANDARDS. **AS 4997** - Guidelines for the Design of Maritime Structures, Australia, 2005.

- BADOGIANNIS, E.; TSIVILLIS, S. Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 128 – 133, 2009.
- BALESTRA, C. E. T.; *et al.* Parâmetros ambientais e materiais que afetam a penetração de cloretos em estruturas de concreto – Estudo de caso da Ilha dos Arvoredos. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, p. 270-282, 2017.
- BARBOSA, P.; *et al.* Influência dos ciclos de molhamento e secagem, da altura e do posicionamento dos pilares no teor de íons cloreto presentes no concreto com 30 anos de idade. **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – SEMENGO**. Rio Grande, Furg, 2004.
- BEAUDOIN, J. J.; RAMACHANDRAN, V. S.; FELDMAN, R. F. Interaction of chloride and C-S-H. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 875 – 883, 1990.
- BOB, C. Probabilistic Assessment of Reinforcement Corrosion in Existing Structures. In: International Conference: **Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. Proceedings**. Dundee, p. 17-28, 1996.
- BORBA JUNIOR, J. C. **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: Estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste**. 2011. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.
- BOUBITSAS, D.; LUPING, T.; UTGENANNT, P. **Chloride ingress in concrete exposed to marine environment – Field data up to 20 years’ exposure**. Report, 2014.
- BRANDÃO, R. M. L. **Levantamento das manifestações patológicas nas edificações, com até cinco anos de idade, executadas no estado de Goiás**. 2007. 224 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2007.
- BRETANHA, S. S. F. **Variação do grau de saturação do concreto em ambiente marítimo**. 2004. 155 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2004.
- BRITO, P. C. **Avaliação da durabilidade de uma plataforma offshore em concreto – Estudo de microclima em ambiente marinho**. 2008. 148 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2008.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.
- CAMPOS, A. M. R. **Estudo da agressividade do ar atmosférico de Fortaleza/CE**. 2016. 136 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2016.
- CASTRO-BORGES, P.; *et al.* Effect of environmental changes on chemical and electrochemical parameters in reinforced concrete. The case of a tropical marine atmosphere. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 8, p. 6204-6211, 2013.
- CASTRO, P.; RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. Interpretation of chloride profiles concrete exposed to tropical marine environments. **Cement and Concrete Research**, p. 529 – 537, 2001.
- CHALEE, W.; AUSAPANIT, P.; JATURAPITAKKUL, C. Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design analysis. **Materials and Design**, p. 1242 – 1249, 2010.

- CHALEE, W.; *et al.* Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment. **Construction and Building Materials**, p. 965 – 971, 2007.
- CHALEE, W.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. **Marine Structures**, v. 22, p. 341 – 353, 2009.
- CHEEWAKET, T.; JATURAPITAKKUL, C.; CHALEE, W. Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. **Construction and Building Materials**, p. 693 – 698, 2012.
- CHENG, A.; *et al.* Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete. **Materials Chemistry and Physics**, v. 93, p. 404 – 411, 2005.
- CHEN, Y. S., *et al.* The correlation between air-borne salt and chlorides cumulated on concrete surface in the marina atmosphere zone in north Taiwan. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 21, p. 24-34, 2013.
- CHOI, Y. K.; *et al.* Effect of corrosion method of reinforcing bar on bond characteristics in reinforced concrete specimens. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 180 -189, 2014.
- CLEAR, K. C.; HAY, R. E. Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs. Federal Highway Administration, **Report FHWA/RD-73/32**. Washington, p. 361-373, 1973.
- COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment – Part I: Main parameters affecting chloride penetration. **Materials and Structures**, v. 32, p. 252-259, 1999a.
- 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, 1999b.
- COSTA, A.; APPLETON, J. Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 169-179, 2002.
- COSTA, E. A. L. **Determinação do potencial de agressão dos sais marinhos sobre as argamassas de revestimento na Região Metropolitana de Salvador**. 2001. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**, p. 347-380. São Paulo: Arte interativa. 2011.
- DAL MOLIN, D. C. C.; *et al.* Contribuição à previsão da vida útil de estruturas de concreto. In: KAZMIERCZAK, C. S.; FABRÍCIO, M. M. **Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: Materiais e Sustentabilidade**, p. 223 - 270. Porto Alegre: ANTAC, 2016.
- DAL MOLIN, D. C. C.; *et al.* **Contribuições para o aperfeiçoamento da norma técnica de avaliação de desempenho de edifícios habitacionais NBR 15575**. Relatório Técnico Parcial, Projeto da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), 2012.
- DASAR, A.; *et al.* Deterioration progress and performance reduction of 40-years-old reinforced concrete beams in natural corrosion environments. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 690 – 704, 2017.

- DOUSTI, A.; SHEKARCHI, M.; TADAYON, M. Effect of silica fume on chloride binding in concrete. **4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications**, p. 715–720, 2009.
- DU, X.; JIN, L.; MA, G. A meso-scale numerical method for the simulation of chloride diffusivity in concrete. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 85, p. 87 – 100, 2014.
- ENEVOLDSEN, J. N.; HANSSON, C. M. Binding of chloride in mortar containing admixed or penetrated chlorides. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 8, p. 1525 – 1533, 1994.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – **EN 206-1**: Concrete Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity, Brussels, 2007.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1990:2002/A1:2005**: Eurocode – Basis of structural design, 2005.
- FARAHANI, A.; TAGHADDOS, H.; SHEKARCHI, M. Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 10 – 17, 2015.
- FATTAH, A. A. E; *et al.* Field evaluation of corrosion mitigation on reinforced concrete in marine environment exposure conditions. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 663-674, 2018.
- GERHARDUS, H. K.; *et al.* **Corrosion costs and preventive strategies in the United States**. Federal Highway Administration, FHWA-RD-01-156, 2002.
- GARCIA, E. J. P.; *et al.* Influencia de la dirección del viento en los perfiles de cloruro obtenidos em estruturas cercanas al Mar Caribe. Caso del viaducto Turiguanó-Cayo Coco em Cuba. **Materiales de Construcción**, v. 55, n. 277, p. 75 – 82, 2005.
- GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. 2000. 289 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, 2000.
- GUIMARÃES, A. T. C.; CASTRO, P.; NUNES, J. Teor de cloretos próximos a superfície do concreto em ambientes marítimos. In: **Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto**, p. 1 – 11, 2007.
- GUSTAFSSON, M. E. R.; FRAZÉN, L. G. Dry deposition and concentration of marine aerosol in a coastal area, SW Sweden. **Atmospheric Environment**, v. 30, p. 977 – 989, 1996.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 248 p. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.
- INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **FIB Bulletin 34**: Model Code for Service Life Design, 2006.
- ISTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sobre o Brasil – Posição e Extensão**. Disponível em: <<http://teen.ibge.gov.br/mao-na-roda/posicao-e-extensao.html>>. Acesso em 19 de julho de 2017.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE N° 15** – Standard Specifications for Concrete - Design, Tokyo, Japan, 2007.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE N° 16** – Standard Specifications for Concrete – Materials and Construction, Tokyo, Japan, 2007.

KWON, S.; *et al.* Long-term corrosion performance of blended cement concrete in the marine environment – A real-time study. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 349-360, 2017.

LENG, F.; FENG, N.; LU, X. An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 989-992, 2000.

LIAO, K.; *et al.* A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 977-989, 2004.

LIU, J.; *et al.* Effects of chlorides ions on carbonation rate of hardened cement paste by X-ray CT techniques. **Construction and Building Materials**, v.122, p. 619-627, 2016.

LIU, J.; *et al.* Chloride transport and microstructure of concrete with/without fly ash under atmospheric chloride condition. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 493-501, 2017.

LINDVALL, A. **Environmental actions on concrete exposed in marine environments and its response: Consequence for the initiation of chloride induced reinforcement corrosion**. 2003. 245 f. Thesis – Departament of Building Technology and Building Materials, Sweden, 2003.

LUO, R.; *et al.* Study os chloride binding and diffusion in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1 – 7, 2003.

MARAN, A. P. **Análise da influência da distribuição de espaçadores na garantia da espessura de cobrimento especificada em lajes de concreto armada**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MARIC, M. K.; *et al.* Service life prediction of concrete structures in marine environment – case study: Maslenica Motorway Bridge. **1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future**. Zadar, p. 1–10, 2017.

MARSAVINA, L.; *et al.* Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 264 – 274, 2009.

MAZER, W. **Metodologia para a previsão da penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado utilizando lógica difusa**. 2009. 201 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

MEDEIROS JUNIOR, R. A. **Estudo da influência das mudanças climáticas na penetração de cloretos em estruturas de concreto localizadas em ambiente marinho**. 2011. 192 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; *et al.* Chloride penetration into concrete in an offshore platform-analysis of exposure conditions. **Ocean Engineering**, v. 103, p. 78-87, 2015.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 2008. 156 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEDEIROS, W. T. A. P.; MEIRA, G. R. Estudo do transporte de sais em zona de atmosfera marinha nos planos horizontal e vertical. **XIV ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 244 – 249, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: Microstructures, Properties, and Materials**. McGraw-Hill, 2014.

MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. 2004. 369 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MEIRA, G. R., *et al.* Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement & Concrete Composites**, p. 667 – 676, 2007.

MEIRA, G. R.; *et al.* Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement and Concrete Composites**, p. 427 – 435, 2010.

MILANI, C. J.; KRIPKA, M. Diagnosis of pathologies in bridges of the road system in Brazil. **Constructii: Journal of Civil Engineering Research**, v. 1, p. 26 – 34, 2012.

MEJLBRO, L. The Complete Solution of Fick's Second Law of Diffusion with Time-Dependent Diffusion Coefficient and Surface Concentration. In: **Durability of Concrete in Saline Environment**. Proceedings. P. Sandberg (Ed.) Lund, p. 127-158, 1996.

MOFFATT, E. G.; THOMAS, M. D. A.; FAHIM, A. Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 127-135, 2017.

MOHAMMED, T. U.; HAMADA, H. Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1487-1490, 2003.

MORCILLO, M.; *et al.* Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site. **Corrosion Science**, p. 91 – 104, 2000.

MUTHULINGAM, S.; RAO, B. N. Consistent models for estimating chloride ingress parameters in fly ash concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 3, p. 24-38, 2015.

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

NOKKEN, M.; *et al.* Time dependent diffusion in concrete – three laboratory studies. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 200-2007, 2006.

O'DOWD, C. D.; *et al.* Marine aerosol, sea-salt, and the marine sulphur cycle: a short review. **Atmospheric Environment**, v. 31, p. 73 – 80, 1997.

OH, B. H.; JANG, S. Y. Experimental investigation on the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures. **18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology**, Beijing, p. 2389 – 2396, 2005.

OH, B. H.; JANG, S. Y. Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 47-53, 2007.

- OTIENO, M.; BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. Effect of chemical composition of slag on chloride penetration resistance of concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 46, p. 56 – 64, 2014.
- PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 291-299, 2000.
- PECH-CANUL, M. A.; CASTRO, P. Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere. **Cement and Concrete Research**, p. 491 – 498, 2002.
- 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**. 2001. 154 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- PEREIRA, A. C. **Estudio de métodos probabilísticos para la predicción de la vida útil de estructuras de hormigón: influencia del factor variabilidad espacial em el caso de plataformas offshore en Brasil**. 2003. 493 p. Tesis Doctoral – Departamento de Ingeniería Civil: Contrucción, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2003.
- PINTAN, N. M. *et al.* Pathological manifestations and the study of corrosion present on bridges of the city of Recife. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 20, p. 11893 – 11907, 2015.
- PONTES, R. B. **Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife – PE**. 2006. 123 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2006.
- POULSEN, E.; MEJLBRO, L. **Diffusion of chloride in concrete: Theory and Application**, 1. ed., Abingdon, Taylor & Francis, 2006.
- PRUCKNER, F.; GJORV, O. E. Effect of $CaCl_2$ and $NaCl$ additions on concrete corrosivity. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1209 – 1217, 2004.
- QUE, N. S. History and development of prediction models of time-to-initiate-corrosion in reinforced concrete structures in marine environment. **Philippine Engineering Journal**, v. 28, p. 29 – 44, 2007.
- RAMEZANIANPOUR, A. A.; REZAEI, H. R.; SAVOJ, H. R. Influence of silica fume on chloride diffusion and corrosion resistance of concrete – A review. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 301-321, 2015.
- RASHEEDUZZAFAR; HUSSAIN, S. E.; AL-SAADOUN, S. S. Effect of cement composition of chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 777 – 794, 1991.
- REDDY, B.; *et al.* On the corrosion risk presented by chloride bound in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 1-5, 2002.
- RIBEIRO, D. V. *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Elsevier Brasil, 1 ed, Rio de Janeiro, 2014.
- ROMANO, F.S. **Estudo do ingresso de cloretos em estruturas de concreto no Litoral Norte do Rio Grande do Sul**. 2009. 153 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

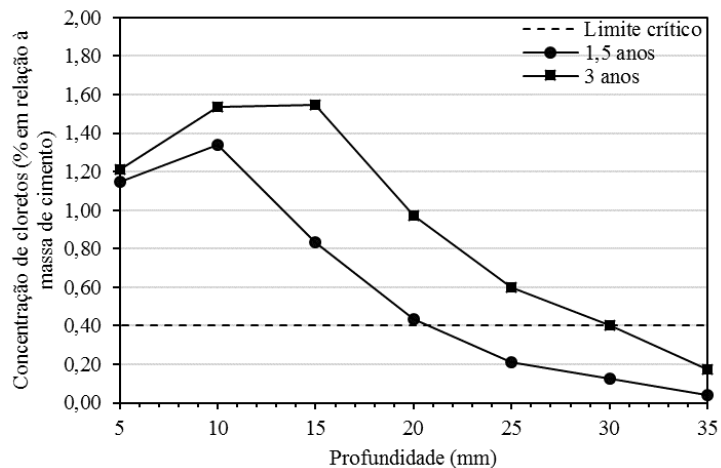
- SACILOTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura**. 2005. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. 178 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- SELVARAJ, R.; MURALIDHARAN, S.; SRINIVASAN, S. The influence of silica fume on the factors affecting the corrosion of reinforcement in concrete – a review. **Structural Concrete**, n.1, v.4, p. 19-24, 2003.
- SHEKARCHI, M.; *et al.* Transport properties in metakaolin blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2217 – 2223, 2010.
- SHI, X., *et al.* Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 125 – 138, 2012.
- SHODJA, H. M.; KIANI, K.; HASHEMIAN, A. A model for the evolution of concrete deterioration due to reinforcement corrosion. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 52, p. 1403–1422, 2010.
- SIDDIQUE, R.; BENNACER, R. Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 69, p. 29-34, 2012.
- SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary cement materials**. Springer, 2011.
- SILVA, C. A. **Comportamento dos perfis de cloreto em tetrápodes localizados nos molhes da barra (Rio Grande - RS – Brasil)**. 2010. 287 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.
- SILVA, L. K.; CABRAL, A. E. B. Levantamento de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado no estado do Ceará. **XV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 1626 – 1634, 2014.
- SONG, H.; *et al.* An estimation of the diffusivity of silica fume concrete. **Building and Environment**, v. 42, p. 1358-1367, 2007.
- SONG, H.; LEE, C.; ANN, K. Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 113-121, 2008.
- SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. The apparent and effective chloride migration coefficients obtained in migration tests. **Cement and Concrete Research**, v. 48, p. 116-127, 2013.
- SUGIYAMA, T.; RITTHICHAUY, W.; TSUJI, Y. Experimental investigation and numerical modeling of chloride penetration and calcium dissolution in saturated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 49 – 67, 2008.
- SUN, Y.; LIANG, M.; CHANG, T. Time/depth dependent diffusion and chemical reaction model of chloride transportation in concrete. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, p. 1114-1122, 2012.
- TADAYON, M. H.; SHEKARCHI, M.; TADAYON, M. Long-term field study of chloride ingress in concretes containing pozzolans exposed to severe marine tidal zone. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 611-616, 2016.

- 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.**2005. 145 p. Tese (Doctorado) – Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2005.
- TANG, L. Chloride ingress in concrete exposed to marine environment – Field data up to 10 years exposure. SP Swedish National Testing and Research Institute. **SP REPORT 2003:16**, 2003.
- TANG, L.; NILSSON, L. O. A Numerical Method for Prediction of Chloride Penetration into Concrete Structures. In: **The Modelling of Microstructure and it's Potential for Studying Transport Properties and Durability**. p. 539 – 552, 1996.
- THOMAS, M. Chloride thresholds in marine concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 4, p. 513-519, 1996.
- THOMAS, M. D. A.; *et al.* The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1-7, 2012.
- THOMAS, M. D. A.; MATTHEWS, J. D. Performance of pfa concrete in marine environment – 10 year results. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 5-20, 2004.
- TORRES-ACOSTA, A. A.; NAVARRO-GUTIERREZ, S.; TERÁN-GUILLÉN, J. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, v. 29, p. 1145 – 1152, 2007.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, 1982.
- UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Performance-based Standard Specifications for maintenance and repair of concrete structures in Japan. **Structural Engineering International**, v. 4, p. 359-366, 2007.
- UJI, K; MATSUOKA, Y.; MARUYA, T. Formulation of an equation for surface chloride content of concrete due to permeation of chloride. **3rd Int. Symp. on Corrosion of Reinforced Concrete, Society of Chemical Industry**, p. 258-267, 1990.
- VALIPOUR, M.; *et al.* In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 63 – 70, 2013.
- VIDAL, T.; CASTEL, A.; FRANÇOIS, R. Corrosion process and structural performance of a 17-year-old reinforced concrete beam stored in chloride environment. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1551-1561, 2007.
- VIEIRA, D. R.; *et al.* Service life modeling of a bridge in a tropical marine environment for durable design. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 315-325, 2018.
- VITALI, M. R. V. **Efeito Do Distanciamento Ao Mar Da Contaminação Do Concreto Por Cloretos**. 2013. 208 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- WANG, Y.; *et al.* Prediction model of long-term chloride diffusion into plain concrete considering the effect of the heterogeneity of materials exposed to marine tidal zone. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 297-315, 2018.

- WEERDT, K.; *et al.* Towards the understanding of chloride profiles in marine exposed concrete, impact of leaching and moisture content. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 418 – 431, 2016.
- WU, L.; LI, W.; YU, X. Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 406-413, 2017.
- XU, J.; *et al.* Influence of $CaCl_2$ and $NaCl$ from different sources on chloride threshold value for the corrosion of steel reinforcement in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 663 – 669, 2011.
- XU, J.; *et al.* Influence of elevated temperature on release of bound chlorides from chloride-admixed plain and blended cement pastes. **Cement and Building Materials**, v. 104, p. 9-15, 2016.
- YANG, C. C.; CHO, S. W. Approximate migration coefficient of percolated interfacial transition zone by using the accelerated chloride migration test. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 344 – 350, 2005.
- YANG, L. F.; CAI, R.; YU, B. Investigation of computational model for surface chloride concentration of concrete in marine atmosphere zone. **Ocean Engineering**, v. 138, p. 105-111, 2017.
- YEAU, K. Y.; KIM, E. K. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1391-1399, 2005.
- YILDIRIM, H.; ILICA, T.; SENGUL, O. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1282 – 1288, 2011.
- YUAN, Q.; *et al.* Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review. **Construction and Building Materials**, p. 1 – 13, 2009a.
- YUAN, Q. *et al.* Effect of temperature on transport of chloride ions in concrete. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**, p. 345 – 351, 2009b.
- ZHANG, J.; *et al.* Instantaneous chloride diffusion and its time dependency of concrete exposed to a marine tidal environment. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 225-234, 2018.
- ZHU, X.; *et al.* Probabilistic analysis of reinforcement corrosion due to the combined action of carbonation and chloride ingress in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 667-680, 2016a.
- ZHU, W.; *et al.* Influence of long-term chloride diffusion in concrete and the resulting corrosion of reinforcement on the serviceability of RC beams. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 144-152, 2016b.

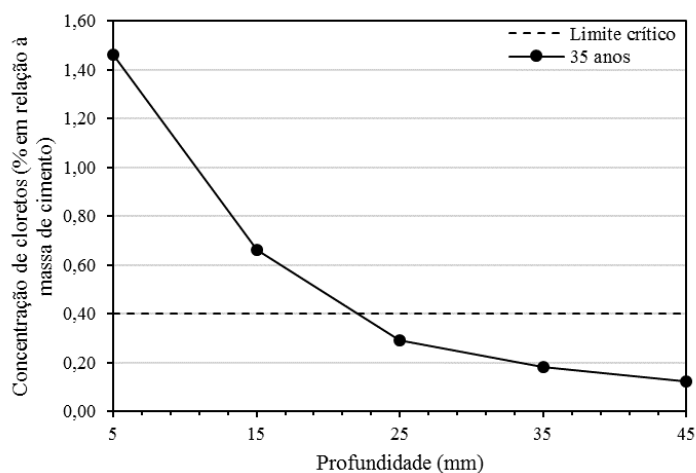
ANEXO A – DADOS DA LITERATURA – PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

1) Costa e Appleton (1999a, 1999b)



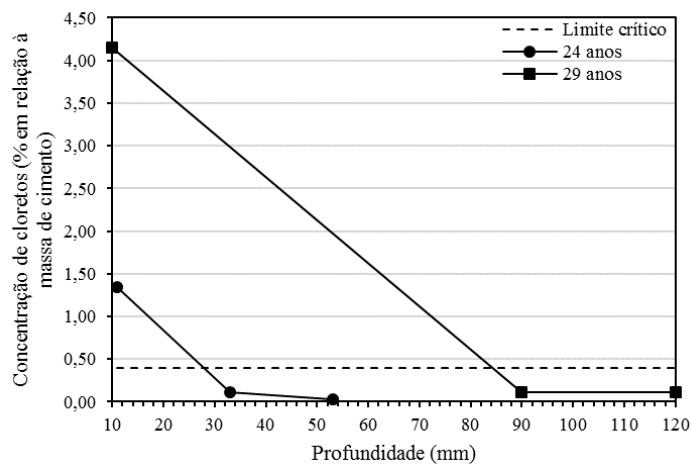
Fonte: Costa e Appleton (1999a, 1999b), elaborada pela autora

2) Costa e Appleton (2002)



Fonte: Costa e Appleton (2002), elaborada pela autora

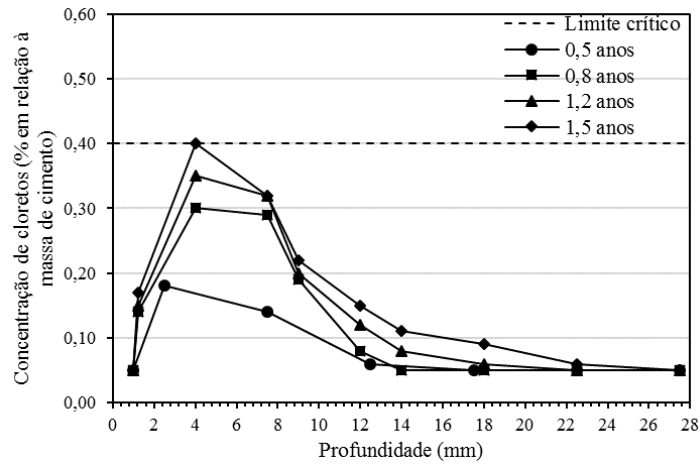
3) Pereira (2003) e Brito (2008)



Fonte: Pereira (2003) e Brito (2008), elaborada pela autora

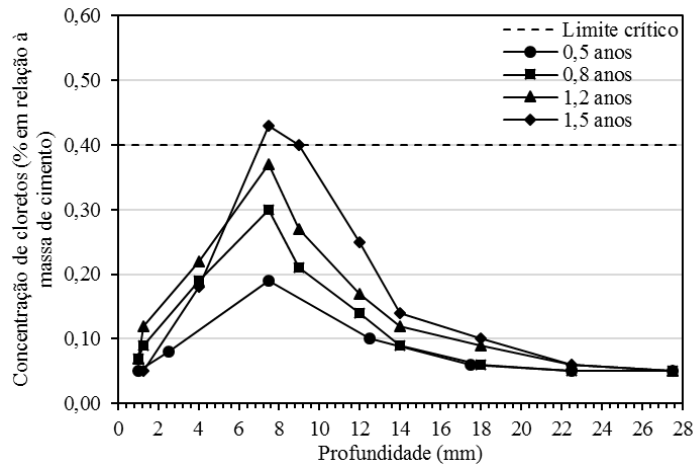
4) Meira (2004)

a) CP II – F e relação $a/c = 0,50$



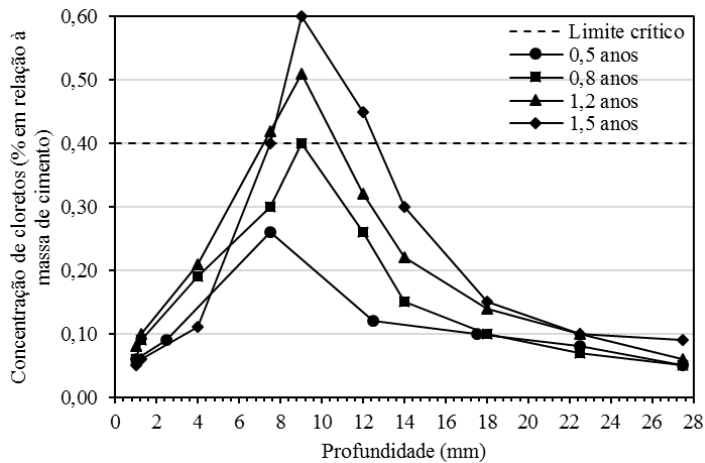
Fonte: Meira (2004), elaborada pela autora

b) CP II – F e relação $a/c = 0,57$



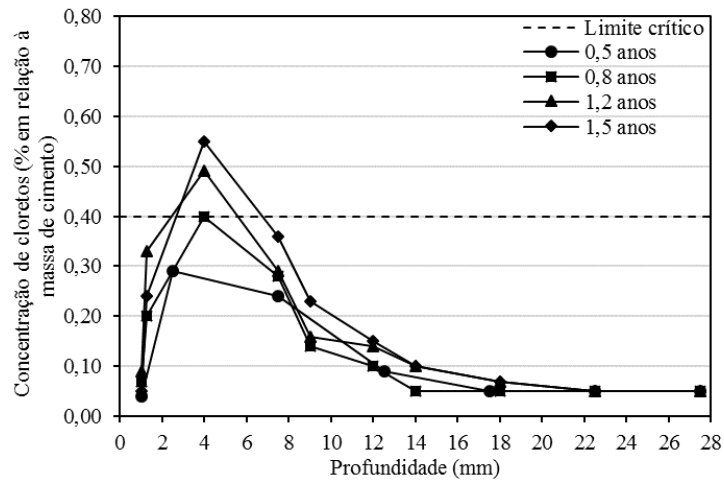
Fonte: Meira (2004), elaborada pela autora

c) CP II – F e relação $a/c = 0,65$



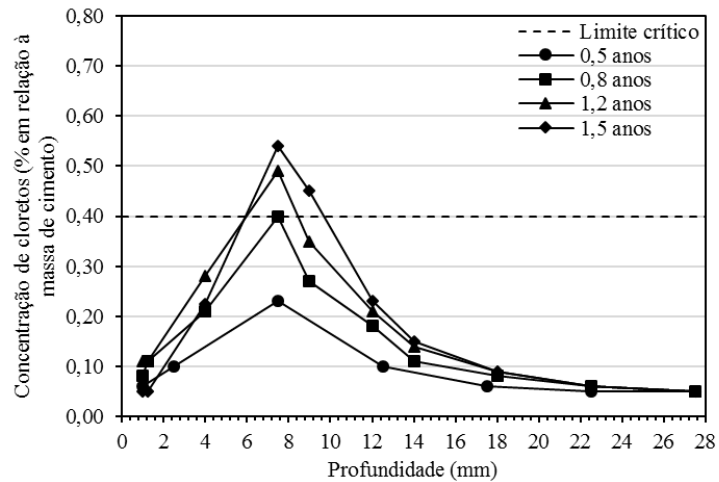
Fonte: Meira (2004), elaborada pela autora

d) CP IV e relação $a/c = 0,50$



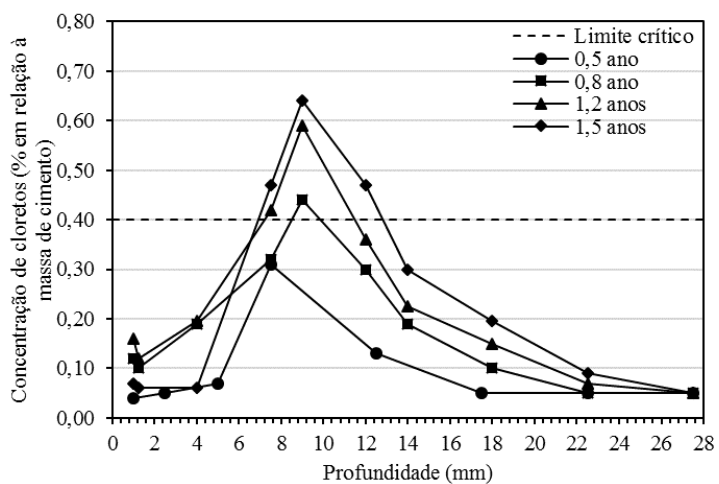
Fonte: Meira (2004), elaborada pela autora

e) CP IV e relação $a/c = 0,57$



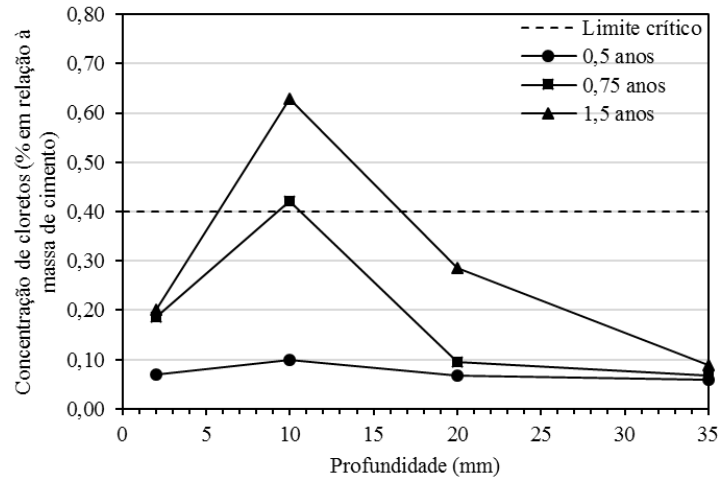
Fonte: Meira (2004), elaborada pela autora

f) CP IV e relação $a/c = 0,65$



Fonte: Meira (2004), elaborada pela autora

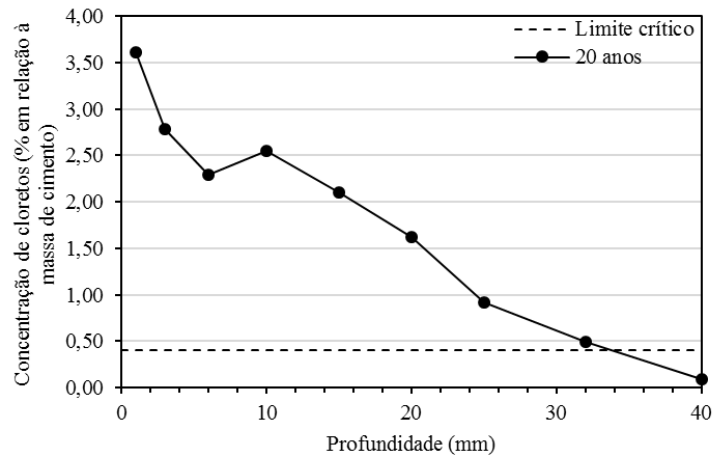
5) Vitali (2013)



Fonte: Vitali (2013), elaborada pela autora

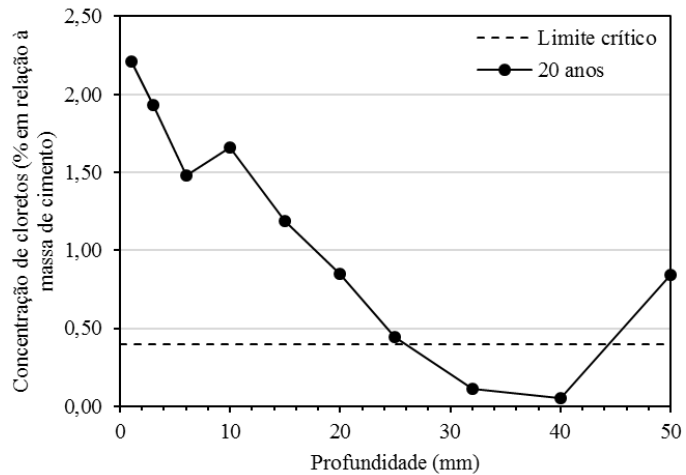
6) Boubitsas, Luping e Utgenannt (2014)

a) OPC e relação a/c = 0,4



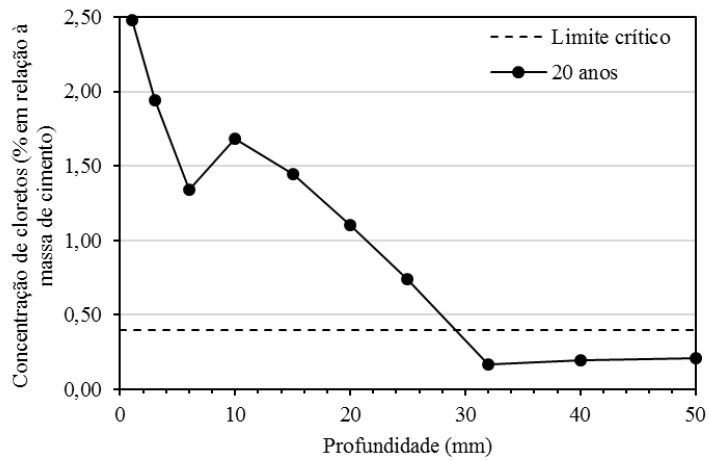
Fonte: Boubitsas, Luping e Utgenannt (2014), elaborada pela autora

b) OPC e relação a/c = 0,35



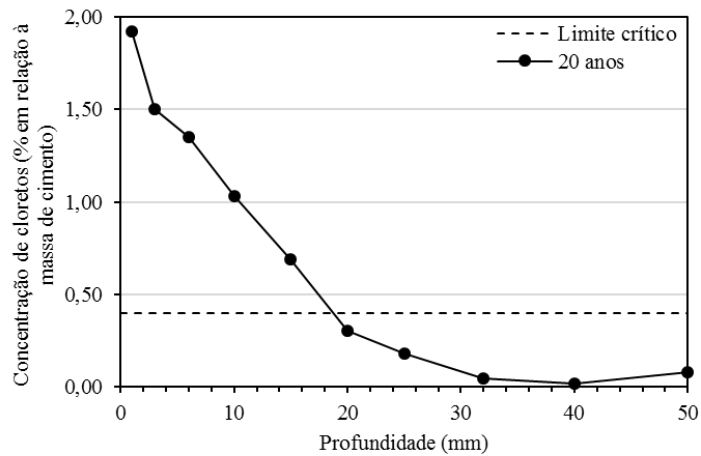
Fonte: Boubitsas, Luping e Utgenannt (2014), elaborada pela autora

c) OPC + 5% SA e relação a/c = 0,35



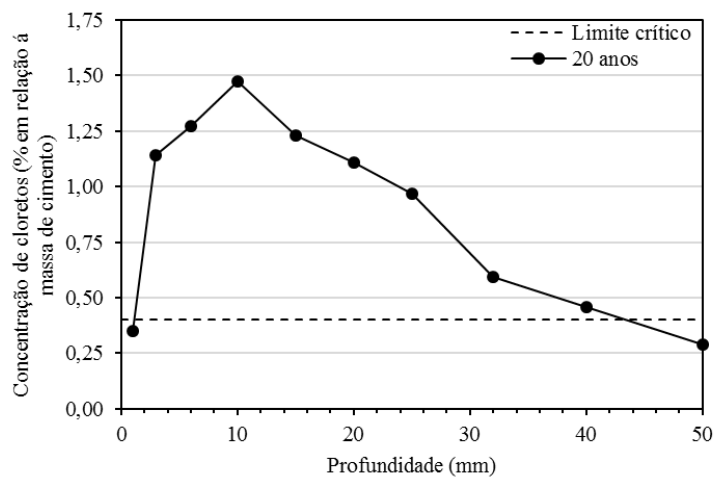
Fonte: Boubitsas, Luping e Utgenannt (2014), elaborada pela autora

d) OPC + 5% SA e relação a/c = 0,4



Fonte: Boubitsas, Luping e Utgenannt (2014), elaborada pela autora

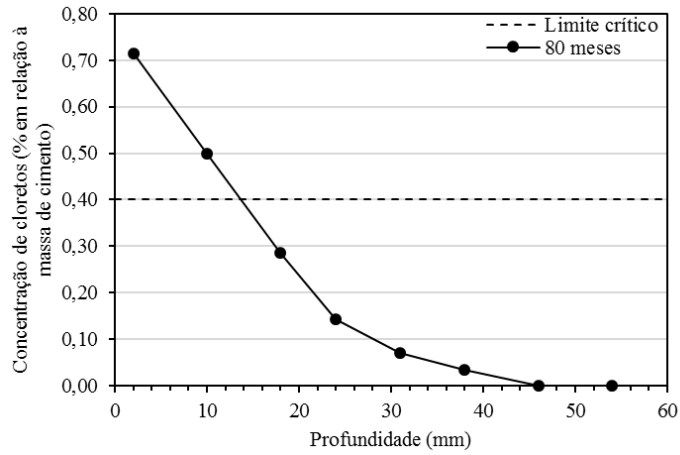
e) OPC + 5% SA e relação a/c = 0,5



Fonte: Boubitsas, Luping e Utgenannt (2014), elaborada pela autora

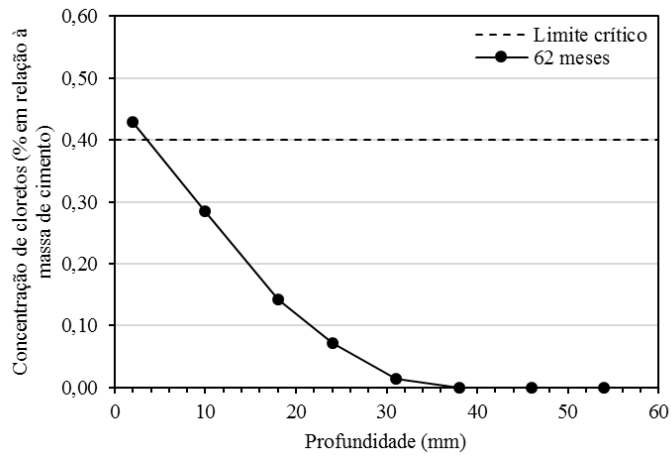
7) Wu, Li e Yu (2017)

a) Fangcheng



Fonte: Wu, Li e Yu (2017), elaborada pela autora

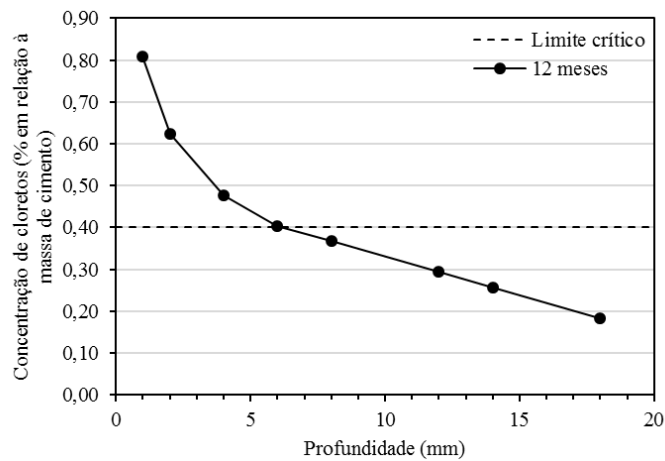
b) Qinzhou



Fonte: Wu, Li e Yu (2017), elaborada pela autora

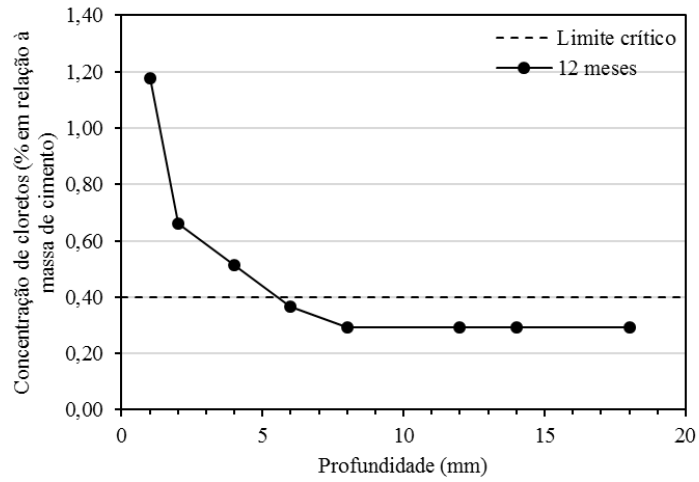
8) Fattah *et al.* (2018)

a) OPC e relação a/c = 0,4



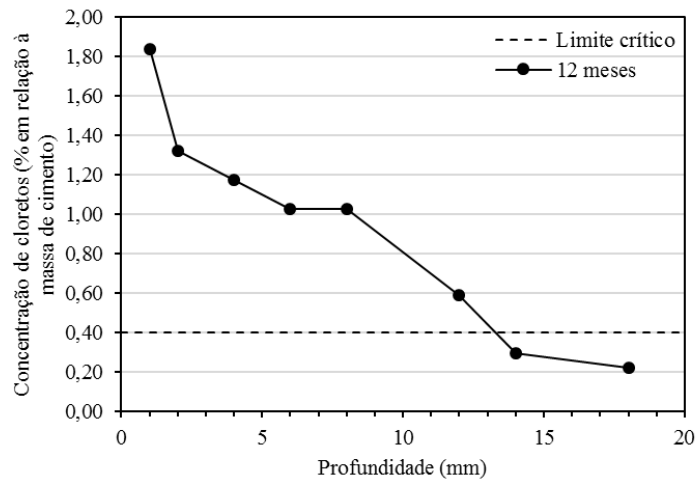
Fonte: Fattah *et al.* (2018), elaborada pela autora

b) OPC + 25% cinza volante e relação a/c = 0,4



Fonte: Fattah *et al.* (2018), elaborada pela autora

c) OPC + 70% escória de alto forno e relação a/c = 0,4



Fonte: Fattah *et al.* (2018), elaborada pela autora

ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE VITÓRIA – ES

Período	Temperatura Média (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Umidade Relativa Média (%)	Velocidade média do vento (m/s)	Direção predominante do vento	Precip. acum. (mm)
jul/12	22,0	15,5	30,9	81,0	2,6	N	49,3
ago/12	21,5	15,8	29,4	84,8	1,7	S	218,4
set/12	22,5	15,5	32,9	79,3	3,9	N	42,9
out/12	23,8	16,1	34,3	80,3	3,7	N	42,1
nov/12	23,9	19,4	35,7	86,3	2,7	N	329,1
dez/12	26,8	21,8	33,5	79,4	3,5	N	18,0
jan/13	26,0	21,6	34,9	81,1	3,4	N	145,0
fev/13	26,6	21,6	32,9	79,6	3,0	N	19,8
mar/13	25,9	19,6	34,7	83,5	2,9	N	449,9
abr/13	24,1	18,6	31,4	82,6	2,4	S	62,0
mai/13	23,0	16,9	32,7	81,8	2,3	N	55,6
jun/13	22,8	18,1	30,9	84,6	1,8	N	42,4
jul/13	21,9	15,5	29,4	82,6	2,8	S	58,9
ago/13	21,8	15,3	31,4	80,6	2,9	N	81,2
set/13	22,6	17,0	31,8	81,1	3,2	N	25,6
out/13	23,1	15,8	33,1	81,2	3,3	N	55,9
nov/13	23,9	18,2	33,5	85,2	2,9	N	225,1
dez/13	25,0	20,1	33,2	88,0	3,1	N	621,7
jan/14	26,2	21,6	32,5	80,7	2,8	N	67,0
fev/14	26,3	21,1	32,4	80,1	2,3	N	18,9
mar/14	26,1	21,5	32,6	80,8	2,9	N	57,3
abr/14	25,1	18,2	31,7	80,6	2,7	S	14,0
mai/14	23,3	17,7	31,2	81,0	2,4	S	16,2
jun/14	22,6	17,3	30,2	84,1	2,2	N	46,0
jul/14	21,3	16,5	29,1	86,8	2,3	N	71,1
ago/14	21,7	15,2	29,6	81,2	3,0	N	74,6
set/14	23,2	17,4	31,1	77,8	3,7	N	28,5
out/14	22,9	16,5	32,2	80,7	3,7	N	202,4
nov/14	24,6	17,7	31,7	80,4	4,0	N	60,7
dez/14	25,7	20,2	33,6	80,1	3,7	N	107,4
jan/15	27,0	21,9	34,9	75,6	4,0	N	0,0
fev/15	26,9	22,2	33,4	79,5	3,3	N	54,8
mar/15	26,6	20,7	33,8	80,5	2,9	N	68,0
abr/15	25,1	19,5	34,0	79,8	2,6	S	48,0
mai/15	22,7	17,4	30,0	85,9	2,5	S	177,0
jun/15	22,7	17,1	34,2	84,0	2,7	N	122,9
Média	24,1	18,4	32,4	81,7	2,9	-	-

**APÊNDICE A – PERFIS DE CLORETOS DOS PRISMAS DE VITÓRIA
ARGAMASSA - DESPROTEGIDO DA CHUVA**

Relação a/c	Idade	Profundidade (mm)	Concentração de cloretos (% em relação à massa de cimento)			
			CP II - F	CP III	CP IV	CP V - ARI
0,45	3 anos	5	0,038	0,015	0,000	0,011
		10	0,023	0,031	0,004	0,000
		15	0,008	0,039	0,000	0,000
		20	0,008	0,031	0,000	0,000
	2 anos	5	0,000	0,000	0,004	0,000
		10	0,000	0,015	0,000	0,000
		15	0,000	0,015	0,000	0,000
		20	0,000	0,015	0,000	0,000
	1 ano	5	0,000	0,012	0,012	0,000
		10	0,000	0,015	0,000	0,000
		15	0,000	0,015	0,000	0,000
		20	0,000	0,008	0,000	0,000
0,55	2 anos	5	0,005	0,057	0,000	0,009
		10	0,014	0,052	0,014	0,000
		15	0,009	0,043	0,000	0,000
		20	0,005	0,043	0,000	0,000
	1,6 anos	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,000	0,028	0,000	0,000
		15	0,000	0,024	0,000	0,000
		20	0,000	0,019	0,000	0,000
	1 ano	5	0,000	0,005	0,000	0,000
		10	0,000	0,028	0,000	0,000
		15	0,000	0,019	0,000	0,000
		20	0,000	0,019	0,000	0,000
0,65	1 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,011
		10	0,040	0,056	0,000	0,017
		15	0,050	0,062	0,040	0,006
		20	0,030	0,039	0,000	0,000
	0,7 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,034	0,017	0,000	0,000
		15	0,039	0,028	0,000	0,000
		20	0,025	0,017	0,000	0,000
	0,3 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,006	0,023	0,000	0,000
		15	0,000	0,017	0,000	0,000
		20	0,000	0,017	0,000	0,000

**APÊNDICE A – PERFIS DE CLORETOS DOS PRISMAS DE VITÓRIA
CONCRETO - DESPROTEGIDO DA CHUVA**

Relação a/c	Idade	Profundidade (mm)	Concentração de cloretos (% em relação à massa de cimento)			
			CP II - F	CP III	CP IV	CP V - ARI
0,45	3 anos	5	0,027	0,041	0,000	0,000
		10	0,007	0,056	0,000	0,000
		15	0,000	0,041	0,000	0,000
		20	0,000	0,031	0,000	0,000
	2 anos	5	0,000	0,036	0,000	0,000
		10	0,000	0,046	0,000	0,000
		15	0,000	0,041	0,000	0,000
		20	0,000	0,036	0,000	0,000
	1 ano	5	0,000	0,041	0,000	0,000
		10	0,000	0,046	0,000	0,000
		15	0,000	0,041	0,000	0,000
		20	0,000	0,031	0,000	0,000
0,55	2 anos	5	0,065	0,106	0,000	0,026
		10	0,026	0,047	0,007	0,007
		15	0,019	0,040	0,000	0,000
		20	0,013	0,033	0,000	0,000
	1,6 anos	5	0,013	0,013	0,000	0,000
		10	0,019	0,036	0,007	0,000
		15	0,006	0,040	0,000	0,000
		20	0,006	0,026	0,000	0,000
	1 ano	5	0,013	0,013	0,000	0,000
		10	0,019	0,040	0,000	0,000
		15	0,006	0,033	0,000	0,000
		20	0,000	0,033	0,000	0,000
0,65	1 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,032
		10	0,008	0,000	0,000	0,008
		15	0,000	0,025	0,000	0,000
		20	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,7 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,000	0,033	0,000	0,000
		15	0,000	0,025	0,000	0,000
		20	0,000	0,017	0,000	0,000
	0,3 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,000	0,025	0,000	0,000
		15	0,000	0,025	0,000	0,000
		20	0,000	0,017	0,000	0,000

**APÊNDICE A – PERFIS DE CLORETOS DOS PRISMAS DE VITÓRIA
ARGAMASSA - PROTEGIDO DA CHUVA**

Relação a/c	Idade	Profundidade (mm)	Concentração de cloretos (% em relação à massa de cimento)			
			CP II - F	CP III	CP IV	CP V - ARI
0,45	3 anos	5	0,019	0,035	0,000	0,000
		10	0,004	0,027	0,000	0,000
		15	0,000	0,023	0,000	0,000
		20	0,000	0,019	0,000	0,000
	2 anos	5	0,000	0,008	0,000	0,000
		10	0,000	0,015	0,000	0,000
		15	0,000	0,015	0,000	0,000
		20	0,000	0,019	0,000	0,000
	1 ano	5	0,000	0,015	0,000	0,000
		10	0,000	0,019	0,000	0,000
		15	0,000	0,015	0,000	0,000
		20	0,000	0,015	0,000	0,000
0,55	2 anos	5	0,005	0,000	0,000	0,005
		10	0,000	0,043	0,005	0,000
		15	0,000	0,047	0,000	0,000
		20	0,000	0,038	0,000	0,000
	1,6 anos	5	0,000	0,005	0,000	0,000
		10	0,000	0,038	0,000	0,000
		15	0,000	0,028	0,000	0,000
		20	0,000	0,028	0,000	0,000
	1 ano	5	0,000	0,005	0,000	0,000
		10	0,000	0,024	0,000	0,000
		15	0,000	0,019	0,000	0,000
		20	0,000	0,019	0,000	0,000
0,65	1 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,000	0,039	0,000	0,000
		15	0,000	0,039	0,000	0,000
		20	0,000	0,039	0,000	0,000
	0,7 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,000	0,017	0,000	0,000
		15	0,000	0,028	0,000	0,000
		20	0,000	0,023	0,000	0,000
	0,3 ano	5	0,000	0,006	0,000	0,000
		10	0,000	0,023	0,000	0,000
		15	0,000	0,011	0,000	0,000
		20	0,000	0,011	0,000	0,000

**APÊNDICE A – PERFIS DE CLORETOS DOS PRISMAS DE VITÓRIA
CONCRETO - PROTEGIDO DA CHUVA**

Relação a/c	Idade	Profundidade (mm)	Concentração de cloretos (% em relação à massa de cimento)			
			CP II - F	CP III	CP IV	CP V - ARI
0,45	3 anos	5	0,068	0,112	0,010	0,010
		10	0,024	0,076	0,026	0,005
		15	0,015	0,071	0,000	0,000
		20	0,015	0,071	0,000	0,000
	2 anos	5	0,019	0,092	0,000	0,000
		10	0,005	0,066	0,000	0,000
		15	0,005	0,066	0,000	0,000
		20	0,005	0,051	0,000	0,000
	1 ano	5	0,005	0,041	0,000	0,000
		10	0,005	0,025	0,000	0,000
		15	0,000	0,031	0,000	0,000
		20	0,000	0,031	0,000	0,000
0,55	2 anos	5	0,019	0,013	0,000	0,000
		10	0,006	0,026	0,014	0,000
		15	0,000	0,046	0,000	0,000
		20	0,000	0,026	0,000	0,000
	1,6 anos	5	0,006	0,020	0,000	0,000
		10	0,000	0,046	0,000	0,000
		15	0,000	0,040	0,000	0,000
		20	0,000	0,033	0,000	0,000
	1 ano	5	0,000	0,020	0,000	0,000
		10	0,000	0,040	0,000	0,000
		15	0,000	0,020	0,000	0,000
		20	0,000	0,020	0,000	0,000
0,65	1 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,000	0,017	0,000	0,000
		15	0,000	0,008	0,000	0,000
		20	0,000	0,008	0,000	0,000
	0,7 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,000	0,017	0,000	0,000
		15	0,000	0,008	0,000	0,000
		20	0,000	0,008	0,000	0,000
	0,3 ano	5	0,000	0,000	0,000	0,000
		10	0,000	0,000	0,000	0,000
		15	0,000	0,000	0,000	0,000
		20	0,000	0,000	0,000	0,000

**APÊNDICE B – PERFIS DE CLORETOS DOS CONCRETO EXPOSTOS EM
TRAMANDAÍ**

Tipo de aglomerante	Relação a/c	Profundidade (mm)	Concentração de cloretos (% em relação a massa de cimento)		
			L1	L2	Média
CP IV	0,45	2	0,025	0,030	0,027
		5	0,214	0,214	0,214
		15	0,100	0,100	0,100
		25	0,035	0,030	0,032
	0,55	2	0,159	0,185	0,172
		5	0,179	0,166	0,172
		15	0,344	0,364	0,354
		25	0,040	0,040	0,040
	0,65	2	0,025	0,016	0,020
		5	0,016	0,016	0,016
		15	0,106	0,082	0,094
		25	0,131	0,156	0,143
CP V	0,45	2	0,005	0,005	0,005
		5	0,178	0,193	0,186
		15	0,173	0,153	0,163
		25	0,015	0,020	0,017
	0,55	2	0,065	0,072	0,068
		5	0,046	0,046	0,046
		15	0,052	0,052	0,052
		25	0,052	0,046	0,049
	0,65	2	0,016	0,025	0,021
		5	0,025	0,033	0,029
		15	0,115	0,140	0,127
		25	0,296	0,329	0,312
CP V + 5% SA	0,45	2	0,054	0,045	0,049
		5	0,134	0,134	0,134
		15	0,099	0,109	0,104
		25	0,035	0,035	0,035
	0,55	2	0,000	0,000	0,000
		5	0,124	0,117	0,120
		15	0,091	0,098	0,094
		25	0,033	0,039	0,036
	0,65	2	0,000	0,000	0,000
		5	0,016	0,016	0,016
		15	0,058	0,082	0,070
		25	0,041	0,058	0,049
CP V + 10% SA	0,45	2	0,000	0,000	0,000
		5	0,020	0,040	0,030
		15	0,025	0,030	0,027
		25	0,005	0,015	0,010
	0,55	2	0,000	0,007	0,003
		5	0,085	0,065	0,075
		15	0,033	0,052	0,042
		25	0,039	0,033	0,036
	0,65	2	0,000	0,000	0,000
		5	0,058	0,058	0,058
		15	0,074	0,066	0,070
		25	0,049	0,041	0,045

APÊNDICE C – VALIDAÇÃO DO MODELO DE ANDRADE (2001)

Autor	Características do concreto	Tempo de exposição (anos)	Profundidade medida CCr (mm)	Parâmetros de entrada - Modelo de Andrade (2001)							Profundidade calculada Ccr (mm)	Diferença (mm)	Erro (%)
				UR	T	CI	K1	fck	K2	Ad			
Meira (2004)	CP IV - a/c = 0,5	0,8	4,0	78,3	26,5	0,704	1,17	32,0	1,0	0,0	4,0	0,0	-0,9%
		1,2	6,0	78,3	26,5	0,704	1,17	32,0	1,0	0,0	4,9	1,1	17,6%
		1,5	7,0	78,3	26,5	0,704	1,17	32,0	1,0	0,0	5,5	1,5	21,1%
Meira (2004)	CP IV - a/c = 0,57	0,8	7,5	78,3	26,5	0,905	1,17	26,9	1,0	0,0	5,7	1,8	23,7%
		1,2	8,5	78,3	26,5	0,905	1,17	26,9	1,0	0,0	7,0	1,5	17,5%
		1,5	9,5	78,3	26,5	0,905	1,17	26,9	1,0	0,0	7,8	1,7	17,5%
Meira (2004)	CP IV - a/c = 0,65	0,8	10,0	78,3	26,5	1,203	1,17	21,0	1,0	0,0	8,9	1,1	10,6%
		1,2	11,5	78,3	26,5	1,203	1,17	21,0	1,0	0,0	11,0	0,5	4,8%
		1,5	13,0	78,3	26,5	1,203	1,17	21,0	1,0	0,0	12,2	0,8	5,8%
Meira (2004)	CP II - F - a/c = 0,5	1,5	4,0	78,3	26,5	0,438	1,00	31,0	1,0	0,0	4,8	-0,8	-19,7%
Meira (2004)	CP II - F - a/c = 0,57	1,5	9,0	78,3	26,5	0,803	1,00	27,0	1,0	0,0	8,4	0,6	6,7%
Meira (2004)	CP II - F - a/c = 0,65	0,8	9,0	78,3	26,5	0,949	1,00	20,3	1,0	0,0	9,2	-0,2	-1,9%
		1,2	10,8	78,3	26,5	0,949	1,00	20,3	1,0	0,0	11,2	-0,4	-4,0%
		1,5	12,6	78,3	26,5	0,949	1,00	20,3	1,0	0,0	12,6	0,0	0,3%
Costa e Appleton (1999a, 1999b)	OPC - fck = 34 MPa	1,5	20,8	71,0	16,8	2,265	1,00	34,0	1,0	0,0	12,3	8,5	40,9%
		3	30,0	71,0	16,8	2,265	1,00	34,0	1,0	0,0	17,4	12,6	42,0%
Costa e Appleton (2002)	OPC - a/c = 0,32	35	21,0	73,3	17,8	0,310	1,00	50,0	1,0	0,0	10,3	10,7	50,8%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC - a/c = 0,4	20	33,8	80,0	11,0	0,942	1,00	54,0	1,0	0,0	15,9	17,9	52,8%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC - a/c = 0,35	20	25,9	80,0	11,0	0,664	1,00	70,0	1,0	0,0	9,6	16,3	62,8%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC + 5% SA - a/c = 0,35	20	29,1	80,0	11,0	0,563	1,00	72,0	1,0	0,05	8,3	20,8	71,3%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC + 5% SA - a/c = 0,4	20	18,8	80,0	11,0	0,448	1,00	61,0	1,0	0,05	8,4	10,4	55,4%
Boubitsas, Luping e Utgennat (2014)	OPC + 5% SA - a/c = 0,5	20	43,5	80,0	11,0	0,429	1,00	45,0	1,0	0,05	11,0	32,5	74,7%
Fattah et al. (2018)	OPC - a/c = 0,4	1	6,4	80,0	25,9	0,787	1,00	28,1	1,0	0,0	6,6	-0,2	-2,8%
Fattah et al. (2018)	OPC + 25% CV - a/c = 0,4	1	5,6	80,0	25,9	1,118	1,17	39,1	1,0	0,0	5,2	0,4	7,7%
Fattah et al. (2018)	OPC + 70% EAF - a/c = 0,4	1	13,3	80,0	25,9	1,537	1,21	28,0	1,0	0,0	8,7	4,6	34,5%
Wu, Li e Yu (2017)	OPC - a/c = 0,4 (Fangcheng)	6,7	13,7	80,0	22,4	0,308	1,00	40,0	1,0	0,0	6,1	7,6	55,3%
Wu, Li e Yu (2017)	OPC - a/c = 0,4 (Qinzhou)	5,2	3,6	80,0	22,4	0,213	1,00	40,0	1,0	0,0	4,2	-0,6	-15,6%