

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE ENSAIO DE DIFUSÃO ACELERADO EM CONDIÇÃO  
SATURADA

por

João Antonio Modernel Bender

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, dezembro, 2016

DESENVOLVIMENTO DE ENSAIO DE DIFUSÃO ACELERADO EM CONDIÇÃO  
SATURADA

Por

João Antonio Modernel Bender  
Engenheiro Civil

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães	PPGEO/FURG
Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real	PPGEO/FURG
Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães	IFRS

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 22 de dezembro de 2016



## AGRADECIMENTOS

À minha família, que em diversos momentos deste trabalho me apoiaram, em especial à minha mãe Telma, minha avó Eva e minha tia Eva pelo apoio e amor ambos incondicionais.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães, pelos conhecimentos passados com total dedicação e paciência, tanto como educador quanto como orientador propriamente dito.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da FURG, através de seu atual Coordenador Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos e aos demais professores pela atenção e cordialidade.

A Tássia e Leandro, colegas de laboratório que tiveram importância significativa nesse trabalho, além de todos os colegas de convivência do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica pela amizade e troca de conhecimentos.

À CAPES - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pela concessão do apoio financeiro no decorrer de meus estudos.

Aos professores e laboratoristas que atuam no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Escola de Engenharia que sempre me incentivaram e me auxiliaram ao longo do presente trabalho.

Aos meus amigos, Carlos, Filipe, Nayguel e Sérgio, segunda família, por sempre me apoiarem, mesmo com alguns distantes, e mesmo sem poder ver todos tanto quanto eu gostaria.

Ao Prof. Dr. João Prolo, e ao seu orientando Marco Rodriguez, pela convivência, as lições e o conhecimento que certamente estarão sempre comigo.

A Ângela e Luiza, duas pessoas que, mesmo sem notar, também me apoiaram e me fizeram seguir em frente com seus discursos e conversas.

Enfim a todos que, direta e indiretamente, colaboraram para a realização desse trabalho.

## RESUMO

A degradação de estruturas de concreto armado e protendido têm como uma de suas principais causas os efeitos resultantes da penetração de íons cloreto em sua rede porosa. Muitas vezes, essas estruturas estão localizadas em ambiente marítimo ou ambientes apresentando ciclos de gelo e degelo, onde ocorrem grandes concentrações de cloretos. Diversos autores pelo mundo apresentam estudos para verificar as condições e a forma de penetração dos íons cloreto no interior da massa cimentícia. Entretanto, os ensaios normatizados e tradicionais existentes possuem um tempo de execução elevado, o que dificulta o processo de pesquisa. O presente estudo visa propor uma metodologia de ensaio modificada a partir de um ensaio normatizado, assim como verificar a eficácia de dito ensaio quando comparado aos resultados apresentados por ensaios já normatizados e consagrados, além de identificar qual o tempo mínimo para a obtenção de resultados significativos quanto ao perfil de penetração de íons cloreto. Conclui-se com os resultados obtidos que existe a tendência de o coeficiente de difusão não diferir com o tempo para os concretos estudados utilizando o ensaio proposto, e o foi constatado tempo de ensaio para perfis significativos de 7 dias.

Palavras-chaves: concreto, desenvolvimento experimental, difusão, durabilidade, ensaios acelerados.

## **ABSTRACT**

The degradation of structures of reinforced and prestressed concrete has as one of its main causes the effects resulting from the penetration of chloride ions in its porous network. Often, these structures are located in maritime environments or snow areas, where large concentrations of chlorides occur. Several authors around the world present studies to verify the conditions and the form of penetration of the chloride ions inside the cementitious mass. However, existing standard and traditional tests present a long execution time, which makes the data gathering process excessively time-consuming. The present study aims to propose a modified test methodology from a standardized test, as well as to verify the effectiveness of this test when compared to the results presented by already standardized and established tests, in addition to identifying the minimum time to obtain significant results With respect to the penetration profile of chloride ions. It is concluded from the obtained results that there is a tendency for the diffusion coefficient not to differ with time for the concretes studied using the proposed test, and the test time was verified for significant profiles of 7 days.

Keywords: concrete, experimental development, diffusion, durability, accelerated tests.

# ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Importância e justificativa do tema .....	15
1.2. Estudos anteriores na área .....	17
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivo geral.....	18
1.3.2. Objetivos específicos.....	18
1.4. Estrutura da dissertação .....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. Agentes de deterioração das estruturas de concreto armado .....	20
2.1.1. Carbonatação.....	20
2.1.2. Sulfatos .....	22
2.1.3. Cloretos.....	23
2.2. Mecanismos de transporte que influenciam na durabilidade do concreto armado .....	24
2.2.1. Penetração por permeabilidade .....	24
2.2.2. Absorção capilar.....	24
2.2.3. Migração .....	25
2.2.4. Convecção.....	26
2.2.5. Difusão.....	26
2.3. Principais fatores externos que influem na penetração de cloretos .....	29
2.3.1. Temperatura.....	29
2.3.2. Umidade.....	29
2.3.3. Efeito do oxigênio .....	30
2.3.4. Concentração superficial de cloretos.....	32
2.3.5. Tipo de ambiente .....	34
Ambiente urbano .....	34
Ambiente industrial .....	34
Ambiente marítimo.....	35
2.4. Principais fatores do concreto que influenciam na penetração de cloretos .....	37
2.4.1. Tipo de cimento.....	37
2.4.2. Relação água/cimento.....	37
2.4.3. Grau de carbonatação .....	38
2.4.4. Grau de saturação .....	38

3. ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DO CONCRETO	40
3.1. Introdução	40
3.2. Ensaio de difusão passante	40
3.3. Ensaio de difusão interna	42
3.3.1. Ensaio acelerado de difusão interna conforme NT BUILD 443 (1995)	43
3.3.2. Ensaio de difusão com concentração 0,5 M	44
3.4. Ensaio de migração	44
3.5. Ensaio de resistividade elétrica	46
3.6. Comparação do ensaio normatizado segundo NT BUILD 443 (1995) com ensaio consagrado de concentração 0,5 M.	48
4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	49
4.1. Metodologia de ensaio	49
4.1.1. Introdução	49
4.1.2. Proposta de ensaio	49
4.1.3. Dosagem dos traços e confecção dos corpos de prova	49
4.1.4. Saturação das amostras	52
4.1.5. Revestimento das amostras com resina epóxi	53
4.1.6. Contaminação com NaCl e armazenamento	54
4.1.7. Extração	56
4.2. Materiais utilizados e dosagem do concreto	59
5. RESULTADOS E ANÁLISE	62
5.1. Teor de cloretos	62
5.1.1. Resultados	62
5.1.2. Análise dos resultados	70
5.2. Validação do processo de limpeza da superfície de ataque	75
5.2.1. Análise	75
5.3. Coeficiente de difusão	87
5.3.1. Resultados	87
5.3.2. Análise dos resultados	88
5.4. Proposta final de metodologia de ensaio	94
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	96
6.1. Conclusões	96
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	97
7. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	98

APÊNDICE A.....	104
Apêndice A – Tabelas com teores de cloretos para os ensaios desenvolvidos .....	104

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Processo de formação de pilha de corrosão (Fonte: Helene, 1994).....	30
Figura 2.2- Teor de cloretos nas camadas mais externas de estruturas de concreto em relação à distância da água do mar em Rio Grande - RS (Fonte: Nunes, 2006).....	33
Figura 2.3- Modelo da influência da altura vertical em relação ao nível do mar sobre a concentração superficial de cloretos (Cs). (Fonte: Guimarães et. al., 2007).....	33
Figura 3.1- a) Montagem do ensaio de difusão passante; b) quantidade acumulada n compartimento descendente. (Fonte: Adaptado de Patel et al., 2016).....	41
Figura 3.2- Montagem do ensaio de difusão interna. (Fonte: Adaptado de Patel et al., 2016).....	42
Figura 3.3- Montagem do ensaio de migração (Fonte: Adaptado de Patel et al., 2016).....	46
Figura 3.4- Montagem de um ensaio de resistividade elétrica. (Fonte: Adaptado de Patel et al., 2016).....	47
Figura 4.1- Serra circular resfriada por água utilizada na confecção das amostras. (Fonte: Autor)..	51
Figura 4.2- a) representação esquemática da separação de um corpo de prova em amostras; b) nomenclatura utilizada para referência. Dimensões em cm. (Fonte: Autor).....	51
Figura 4.3- Procedimentos para saturação das amostras: a) imersão em água destilada; b) pesagem para determinação da constância de massa; c) Fervura durante 5h. (Fonte: Autor).....	53
Figura 4.4- Amostra a) antes do revestimento; b) com revestimento. (Fonte: Autor).....	54
Figura 4.5- Procedimentos para contaminação de amostra revestida: a) pesagem da quantidade de NaCl para atingir concentração desejada; b) preparação dos apoios auxiliares para suporte da amostra; c) adição da amostra ao recipiente com solução; d) armazenamento. (Fonte: Autor).....	55
Figura 4.6- Equipamento para fixação de amostra durante processo de extração. (Fonte: Autor)....	56
Figura 4.7- a) materiais e ferramentas utilizados; b) equipamento de fixação das amostras para extração. (Fonte: Bandeira, 2014).....	57
Figura 4.8- Processo de extração das amostras: a) desgaste de camada; b) remoção do material pulverulento; c) controle de profundidade; d) armazenamento do material. (Fonte: Bandeira, 2014).....	58
Figura 4.9- Procedimento do ensaio de potenciometria: a) determinação da massa seca do material em balança de precisão; b) ataque com ácido nítrico; c) fervura do material; d) potenciômetro utilizado para medição. (Fonte: Autor).....	59
Figura 5.1- Perfis de penetração do concreto POZ-T3 para a idade de 7d. (Fonte: Autor).....	63
Figura 5.2- Perfis de penetração do concreto POZ-T3 para a idade de 14d. (Fonte: Autor).....	64
Figura 5.3- Perfis de penetração do concreto POZ-T3 para a idade de 21 d. (Fonte: Autor).....	65
Figura 5.4- Perfil de penetração do concreto POZ-T3 para a idade de 35d; (Fonte: Autor).....	65
Figura 5.5- Perfil de penetração do concreto POZ-T3 para ensaio normatizado NT BUILD 443(1995). (Fonte: Autor).....	66
Figura 5.6- Perfil de penetração do concreto POZ-T3 utilizando ensaio de difusão interna com concentração de 0,5M e tempo de contaminação de 90 d. (Fonte: Autor).....	66
Figura 5.7- Perfis de penetração do concreto ARI10-T3 para a idade de 7 d. (Fonte: Autor).....	67
Figura 5.8- Perfis de penetração do traço ARI10-T3 para a idade de 14 d. (Fonte: Autor).....	68
Figura 5.9- Perfil de penetração para o concreto ARI10-T3 segundo procedimento descrito na NT BUILD 443 (1995). (Fonte: Autor).....	69
Figura 5.10- Perfil de penetração para o concreto ARI10-T3 em ensaio 0,5M. (Fonte: Autor).....	69
Figura 5.11- Concentração de cloretos com a profundidade. (Fonte: Autor).....	70
Figura 5.12- Perfis de penetração de cloretos POZ-T7. (Fonte: Autor).....	70
Figura 5.13- Perfis de penetração médios para o concreto POZ-T7. (Fonte: Autor).....	71
Figura 5.14- Concentração de cloretos com a profundidade para o concreto ARI10-T3. (Fonte: Autor).....	72
Figura 5.15- Perfis de penetração para o concreto ARI10-T3. (Fonte: Autor).....	72

Figura 5.16- Perfis de penetração médios para o concreto ARI10-T3. (Fonte:Autor) .....	73
Figura 5.17- Perfis de penetração teóricos do concreto POZ-T7. (Fonte: Autor) .....	73
Figura 5.18- Perfis de penetração teóricos médios para o concreto POZ-T7. (Fonte: Autor) .....	74
Figura 5.19- Perfis de penetração teóricos para o concreto ARI10-T3. (Fonte:Autor) .....	74
Figura 5.20- Perfis de penetração médios para o concreto ARI10-T3. (Fonte: Autor) .....	75
Figura 5.21- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-8D considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	77
Figura 5.22- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-8D desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	78
Figura 5.23- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-11B considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	78
Figura 5.24- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-11B desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	79
Figura 5.25- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-11D considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	79
Figura 5.26- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-11D desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	80
Figura 5.27- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-1D considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	80
Figura 5.28- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-1D desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	81
Figura 5.29- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-5B considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	81
Figura 5.30- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-5B desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	82
Figura 5.31- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-11D considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	82
Figura 5.32- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-11D desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	83
Figura 5.33- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-1C considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	83
Figura 5.34- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-1C desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	84
Figura 5.35- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-3A considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	84
Figura 5.36- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-3A desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	85
Figura 5.37- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-1B considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	85
Figura 5.38- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-1B desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor) .....	86
Figura 5.39- Valores mínimos, máximos e médios para o coeficiente de difusão do concreto POZ-T7. (Fonte:Autor) .....	91
Figura 5.40- Valores mínimos, máximos e médios para o coeficiente de difusão do concreto ARI10-T3. (Fonte: Autor) .....	92
Figura 5.41- Valores máximos, mínimos e médios de Cs para o concreto POZ-T7. (Fonte:Autor) ..	93
Figura 5.42- Valores máximos, mínimos e médios de Cs para o concreto ARI10-T3. (Fonte:Autor) ..	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Dosagem dos traços desenvolvidos .....	50
Tabela 4.2- Características dos cimentos estudados .....	60
Tabela 4.3- Granulometria do agregado miúdo .....	60
Tabela 4.4- Granulometria do agregado graúdo .....	61
Tabela 5.1- Comparação de Cs e D para perfis de diferentes idades considerando e desconsiderando o primeiro ponto do ensaio .....	76
Tabela 5.2- Coeficiente de difusão e concentração superficial para as amostras estudadas. ....	87
Tabela 5.3 -Valores de GS, $D_{med}$ e $C_{Smed}$ para concretos desenvolvidos por Bandeira (2014) e Guimarães (2005).....	88
Tabela 5.4- Resultado do coeficiente de variação para a média de cada idade de ensaio e concreto utilizado .....	89
Tabela 5.5- Resultado do coeficiente de variação para o ensaio proposto em cada tipo de concreto estudado.....	90
Tabela 5.6- Resultados de CV para o coeficiente de difusão de cada tipo de concreto.....	90
Tabela A.1- Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-8D.....	104
Tabela A.2-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-9B.....	105
Tabela A.3-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-11B.....	105
Tabela A.4-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-10B.....	106
Tabela A.5-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-11A.....	106
Tabela A.6-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-11D.....	107
Tabela A.7-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-11C.....	107
Tabela A.8-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-1D.....	108
Tabela A.9-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-5B.....	108
Tabela A.10-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-11B.....	109
Tabela A.11-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-1D.....	109
Tabela A.12-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-1C.....	110
Tabela A.13-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-2B.....	110
Tabela A.14-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-7C.....	111
Tabela A.15-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-3 <sup>a</sup> .....	111
Tabela A.16-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-1B.....	112

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Algarismos Romanos

$^{\circ}C$	Graus Celcius
$C_s$	Concentração superficial de cloretos
$C(x,t)$	Concentração de íons cloreto em relação à massa de cimento em uma determinada profundidade $x$ a partir da superfície do concreto em um tempo $t$
$cm$	Centímetro (s)
$cm^2$	Centímetro (s) quadrados (s)
$cm^3$	Centímetro (s) cúbico (s)
$mm$	Milímetro (s)
$nm$	Nanômetro
$D$	Coeficiente de difusão do concreto
$D_{const.Cl(corrigido)}$	Coeficiente de difusão do concreto corrigido
$D_{const.Cl(lab)}$	Coeficiente de difusão do concreto obtido em laboratório
$D_{medio}$	Coeficiente de difusão médio do concreto
$D_T$	Coeficiente de difusão à temperatura $T$
$D_{T0}$	Coeficiente de difusão à temperatura $T_0$
$erf(z)$	Função erro de Gauss
$erfc$	Função complementar erro de Gauss
$GS$	Grau de saturação
$kg$	Quilograma (s)
$m^2$	Metro (s) quadrado (s)
$m^3$	Metro (s) cúbico (s)
$MPa$	Mega Pascal
$s$	Segundo (s)
$t$	Tempo; Tonelada
$x$	Profundidade de penetração dos íons cloreto, extensão percorrida pelo agente agressivo, profundidade de extração

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP	Corpo de prova
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
NT BUILD	Nordtest build
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
UR	Umidade relativa

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Importância e justificativa do tema

O concreto de cimento Portland é atualmente um dos mais utilizados materiais manufaturados no mundo. Inúmeras construções de diversos portes e tipos (comerciais, residenciais, industriais, inseridas no continente, costeiras ou imersas em ambientes marítimos) são executadas em concreto no planeta Terra. A versatilidade e as vantagens do concreto fazem do material o segundo mais consumido no planeta, sendo ultrapassado somente pela água. Estima-se que em 2010 o consumo aproximado de concreto foi próximo de 3,0 t/hab.ano (Isaia,2011)

O concreto possui elevada resistência à compressão, porém resistência à tração muito baixa. O concreto armado vem a cobrir essa falta de resistência. A principal qualidade do concreto armado é a boa resistência mecânica do conjunto aço-concreto. O trabalho conjunto possibilita boa resistência aos esforços de flexão, possibilitando maiores vãos livres com vigas retas ou curvas (Isaia, 2011). Mas quais as outras características que destacam o concreto armado como material estrutural?

Primeiramente, o concreto é composto por materiais de custo relativamente baixo, visto que os materiais constituintes estão disponíveis na maior parte do planeta. Por ser também um material plástico no estado fresco, pode ser moldado com liberdade de formas e dimensões conforme a vontade dos projetistas. A geometria pode ser adaptada de acordo com os esforços solicitante e de acordo com a estética proposta no projeto (Isaia,2011).

As peças de concreto armado são unidas entre si, com a rigidez desejada pelo monolitismo dos nós. Essa característica dificilmente é encontrada nos demais materiais de construção disponíveis hoje em dia. As ligações rígidas possibilitam engastamentos que por sua vez resultam em estruturas hiperestáticas, com reserva de resistência. Isso proporciona seções mais esbeltas (e economia de material), reserva de resistência a esforços anormais (segurança quanto a esforços inesperados) e desempenho de funções simultâneas como, por exemplo, as vigas T que funcionam como elemento da laje e como viga (Helene, 1993).

Além disso, as estruturas de concreto podem ser executadas com mão-de-obra sem muita especialização, com equipamentos simples para obras mais cotidianas ou com equipamentos mais sofisticados para obras de maior porte (Isaia,2011). Todas essas vantagens intrínsecas do concreto aliadas ao seu baixo custo justificam o uso extensivo do material.

Entretanto, o concreto também possui algumas desvantagens. Métodos analíticos da ciência

dos materiais e da mecânica dos sólidos que funcionam bem com materiais manufaturados relativamente homogêneos e muito menos complexos (como o aço, por exemplo) não se mostram muito efetivos com o concreto (ACI, 1977).

A relação tensão-deformação do concreto também varia com o tempo, é o que se denomina por fluência (aumento gradual da deformação com o tempo, mesmo sob tensão constante), assim como sua estrutura interna não é estática ao longo de sua vida útil, pois a pasta de cimento e a zona de interface entre agregado e pasta continuam a se modificar com o passar do tempo (ACI, 1977).

Sendo assim, mesmo com a aparente simplicidade, o concreto mostra-se um material complexo, sendo justificada a intensificação de estudos a respeito das propriedades e da estrutura de cada parte constituinte e a relação entre cada uma delas.

No início do século passado, quando as primeiras construções em concreto armado foram edificadas, a principal preocupação existente era a resistência mecânica. Os processos de degradação, tanto da armadura do concreto quanto do próprio concreto devido a agentes agressivos do meio onde a estrutura se insere motivaram tanto a inclusão de parâmetros de durabilidade na normatização quanto a intensificação de pesquisas na área (Helene, 1993).

Nos tempos atuais, é impensável a concepção de uma estrutura sustentável e com propriedades mecânicas aceitáveis que não possua a capacidade de resistir às ações de intempéries, ataques químicos ou qualquer outro processo de deterioração. Os critérios de durabilidade devem estar presentes em todas as etapas da vida útil da estrutura.

Os íons cloreto, presentes na água do ambiente marítimo e nas regiões de degelo, contribuem de forma significativa para a corrosão da armadura presente no concreto armado, desde que sua penetração no interior da massa de concreto seja facilitada. Os cloretos são a maior causa do ataque à armadura do concreto, visto que a maioria das construções no mundo está situada em regiões de proximidade ao mar.

Tendo em vista essa situação, fica justificada a importância da pesquisa na área de durabilidade do concreto. Para a determinação das propriedades do concreto frente agentes agressivos, e em especial os íons cloreto, existem ensaios tradicionais e acelerados desenvolvidos. Porém, o tempo de execução mesmo de ensaios acelerados é longo, ocasionando demora no desenvolvimento de pesquisa na área. O fato de ensaios para a determinação de propriedades do concreto possuírem tempo elevado para a execução justifica a busca por ensaios e metodologias que diminuam esse tempo, proporcionando uma maior agilidade na aquisição de dados experimentais e no desenvolvimento de novas pesquisas.

## 1.2. Estudos anteriores na área

Guimarães (1997) observou grande diferença entre a profundidade que seria prevista para frente de ataque por modelos considerando a difusão de cloretos, e a profundidade existente na estrutura analisada, em zona de maré, zona de respingo ou zona de névoa.

Guimarães e Helene (2002) desenvolveram método de ensaio para obtenção do coeficiente de difusão em concreto não saturado, chegando à conclusão nestes ensaios que há uma tendência de cessar a difusão quando o GS diminui até aproximadamente 40%. Sendo que este método teve o inconveniente de permitir a avaliação da penetração de cloretos tão somente pela 1ª Lei de Fick. No entanto, Guimarães (2005) modificou o método de ensaio para difusão de cloretos em concretos não saturados, permitindo sua avaliação pela 2ª Lei de Fick.

Climent et al (2002) propuseram um teste para medir o coeficiente de difusão de íons cloreto em amostras de concreto não saturado, submetendo a superfície de concreto ao produto de combustão de PVC e concluíram que o coeficiente de difusão decresce cerca de duas ordens de grandeza quando a porcentagem de saturação do concreto diminui entre 80% a 30%, em ensaios com teores de água controlados.

Nielsen e Geiker (2003) em seu trabalho propuseram a criação de um modelo para avaliar a penetração de íons cloreto levando em conta que o coeficiente de difusão deverá ser dependente da quantidade de umidade disponível para a substância difusora.

Saciloto (2005) analisando o comportamento frente à ação de cloretos em concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura, concluiu que a difusão de cloretos é inversamente proporcional à relação água/aglomerante e ao período de cura do concreto.

Nunes (2006) verificou em estruturas de concreto armado aparente com mais de 15 anos, a influência do teor de cloretos na superfície do concreto, sendo que este diminui com maior distância em relação à água do mar.

Silva (2010) em suas pesquisas, elaborou perfis de penetração de cloretos obtendo o coeficiente de difusão (D) em tetrápodes com 9,5 anos, localizados nos molhes da barra do Rio Grande, extremo sul do Brasil, comparando com o mesmo estudo efetuado aos 5 anos de idade destes elementos, verificando a eficiência do modelo de Crank (1975) o qual considera a variação do teor de cloretos na superfície de concreto ao longo do tempo.

Guimarães et al. (2011) estudaram o comportamento da concentração superficial de cloretos em testes submersos e concluem que a concentração superficial parece variar pouco com o passar do tempo.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é a proposição e o desenvolvimento de um ensaio acelerado para obtenção do coeficiente de difusão D de uma amostra de concreto saturada.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são a verificação da eficácia do ensaio acelerado proposto, utilizando como comparação um ensaio normatizado e um ensaio já consagrado. Para tal serão utilizadas amostras de concreto executadas com cimento Portland pozolânico e cimento Portland de alta resistência inicial com adição de micro sílica, sendo verificado o tempo mínimo necessário para a obtenção de coeficientes de difusão representativos do concreto.

### **1.4. Estrutura da dissertação**

O capítulo 1 apresenta a importância e justificativa do tema, citação de alguns estudos de vários pesquisadores nacionais e internacionais na área de durabilidade, o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho.

O capítulo 2 apresenta revisão bibliográfica da área de durabilidade, incluindo os principais agentes na deterioração do concreto, os principais mecanismos de transporte de agentes agressivos no interior do concreto, os principais fatores externos e intrínsecos do concreto que influenciam a difusão de íons cloreto.

O capítulo 3 apresenta revisão sobre os tipos de ensaio para determinação do coeficiente de difusão no concreto, assim como uma descrição dos métodos abordados nesse trabalho e o método proposto.

O capítulo 4 demonstra todas as etapas do desenvolvimento experimental deste trabalho, com a metodologia aplicada, ensaios, materiais utilizados.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos pelo desenvolvimento experimental e sua análise.

O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas neste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

O APÊNDICE A apresenta as planilhas de dados para a determinação dos perfis de penetração obtidos no desenvolvimento da pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Agentes de deterioração das estruturas de concreto armado

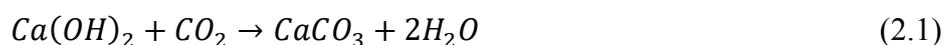
#### 2.1.1. Carbonatação

A carbonatação é um dos processos químicos de degradação do concreto e ocorre pela ação do dióxido de carbono ( $CO_2$ ) presente na atmosfera, resultante da queima de combustíveis fósseis, compostos derivados do petróleo e carvão mineral.

O aço envolvido pela pasta de cimento hidratada forma uma fina camada de passivação de óxido que adere fortemente ao aço, criando uma proteção contra a reação do oxigênio com a água do concreto, que é a causadora da corrosão da armadura segundo Neville (1997).

O processo de despassivação do aço do concreto armado por carbonatação ocorre através da reação do hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) existente na pasta de cimento com o dióxido de carbono presente na atmosfera. Segundo Guimarães (2000), a camada passivante que envolve o aço é estável se o pH da solução no interior do concreto endurecido for  $pH \geq 12$  e na ausência de cloretos. Se a camada de cobertura que protege o aço por passivação carbonatar ou for neutralizada por solução ácida causando redução para  $pH \leq 11,5$ , a proteção do concreto será desfeita e o aço ficará sujeito ao processo de corrosão.

Conforme Helene (1993) o processo de transformação dos compostos do cimento hidratado por ação do dióxido de carbono ocorre lentamente segundo a reação principal na Eq. 2.1:



Quando se esgota o hidróxido de cálcio através da reação secundária com a sílica das pozolanas, também é possível a carbonatação dos álcalis da pasta de cimento (C-H e C-S-H). Quando isso acontece, forma-se simultaneamente o gel de sílica, com poros grandes, maiores que 100 nm, que facilita a carbonatação subsequente, segundo Neville (1997).

Segundo Helene (1993), a penetração do gás carbônico no concreto ocorre preponderantemente pelo mecanismo de difusão. A umidade relativa do ambiente exerce influência nesse fato, visto que a quantidade de água contida nos poros do concreto condiciona a velocidade da difusão do dióxido de carbono. A falta de água não impede a difusão do  $CO_2$  nas regiões mais internas, mas impossibilita a reação de carbonatação. Quando os poros estão cheios d'água (na zona

submersa por exemplo) a reação de carbonatação é retardada, pois a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub> na água é muito baixa. Sendo assim, os concretos com maior predisposição ao processo de carbonatação são aqueles que permanecem com os poros parcialmente preenchidos com água. Segundo Neville (1997), a velocidade máxima de carbonatação ocorre em umidades relativas variando de 50% a 70%.

Além do teor de umidade relativa, a concentração de dióxido de carbono no meio também influencia o processo de carbonatação. Neville (1997) aponta valores médios de concentração de dióxido de carbono no ambiente, sendo o ambiente rural 0,03% em volume, 0,10% em volume para laboratórios e em grandes cidades 0,30% a 1,00% em volume dependendo da concentração de tráfego.

Segundo Neville (1997), a carbonatação em si não causa deterioração no concreto, mas decorre em efeitos importantes, como a retração. A retração por carbonatação ocorre a partir da dissolução dos cristais de hidróxido de cálcio sob tensão dada a retração hidráulica e a deposição de carbonato de cálcio em espaços onde não ocorrem tensões na peça estrutural. Assim, a compressibilidade da pasta de cimento hidratada aumenta temporariamente. Com a carbonatação após o estágio de desidratação do (C-S-H) o resultado é a retração por carbonatação.

Conforme Helene (1993), a Eq. (2.2) representa o modelo matemático clássico que pode ser utilizado para representar e prever a evolução da difusão do dióxido de carbono e a profundidade da carbonatação com o tempo:

$$e_{co2} = k_{co2} \cdot t^{0,5} \quad (2.2)$$

Onde  $e_{co2}$  é a espessura ou profundidade carbonatada (em mm);  $t$  é o tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> (em anos);  $k_{co2}$  é uma constante que depende da difusividade do CO<sub>2</sub>, do gradiente de concentração de CO<sub>2</sub> e da quantidade retida de CO<sub>2</sub> (em mm/ano<sup>0,5</sup>).

Segundo Helene (1993), o valor de  $k_{co2}$  da equação 2.1 tende a aumentar com a redução da umidade relativa do ambiente, até valores entre 65% e 85%. Essa constante, e portanto o processo de carbonatação em si também tende a se intensificar com o aumento da relação água/cimento do concreto, com a redução do teor de hidróxido de cálcio nos poros do concreto e com um processo de cura inapropriado, que provoca fissuras, facilitando a penetração do CO<sub>2</sub>.

Guimarães (2000) ainda atribui outros fatores para o aumento da velocidade de carbonatação, como a qualidade da execução da peça estrutural; o volume de agregados utilizados,

sendo que acima de 50% em volume, um aumento no teor de agregados provoca um acréscimo significativo no coeficiente de difusão, e abaixo de 50% um aumento no teor acarreta na diminuição do processo de difusão; e o uso de aditivos, sendo que dependendo da quantidade e do tipo utilizados, podem influenciar na permeabilidade do concreto e aumentar a velocidade de penetração da frente de carbonatação.

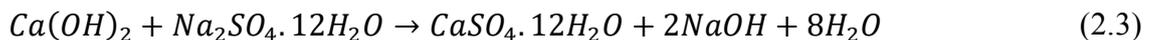
### 2.1.2. Sulfatos

Os sais na forma sólida não atacam o concreto, porém, quando dissolvidos, podem reagir com a pasta de cimento hidratado, conforme Neville (1997).

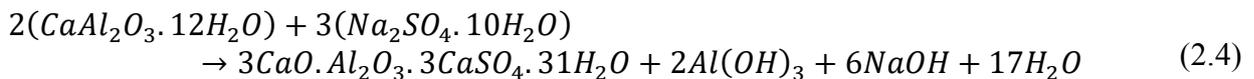
Os sulfatos mais perigosos para o cimento Portland são os de amoníaco, de cálcio, de magnésio e de sódio. Já os sulfatos de potássio, de cobre e de alumínio são menos perigosos. Os sulfatos de bário e os de chumbo são insolúveis, e, portanto, inofensivos ao ambiente.

Segundo Neville (1997), os sulfatos em águas freáticas, na maioria dos casos, têm origem natural. Às vezes, porém, podem ser provenientes de fertilizantes ou de efluentes industriais. As principais reações com a pasta endurecida são as seguintes:

O ataque do sulfato de sódio ao hidróxido de cálcio é apresentado na Eq. (2.3):

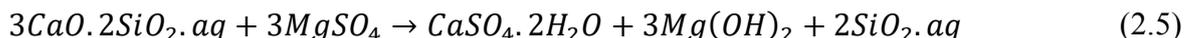


A Eq. (2.4) apresenta a reação do sulfato de sódio com o aluminato do cálcio:



Onde  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$  é denominado etringita.

A Eq. (2.5) apresenta o ataque do sulfato de magnésio aos silicatos de cálcio hidratados:



Onde  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  é denominado gipsita.

A Eq. (2.6) apresenta a reação do sulfato de magnésio com o hidróxido de cálcio:



Onde  $Mg(OH)_2$  é denominado brucita.

Tanto a etringita quanto a gipsita são minerais expansivos, promovendo tensão de tração no

concreto e a conseqüente formação de fissuras que facilitam a penetração e outros agentes agressivos, como os íons cloreto e o gás carbônico (Neville,1997).

### 2.1.3. Cloretos

A camada protetora de passivação na superfície do aço envolto pelo concreto, que se forma logo após o início da hidratação do cimento, e que consiste de óxido ferroso ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) firmemente aderente ao aço, é destruída pelos íons cloreto, havendo corrosão na presença de água e oxigênio de acordo com Neville (1997).

Dos íons despassivantes, são os cloretos os mais fortes causadores da dissolução localizada da capa passiva, dando lugar a ataques pontuais que podem reduzir drasticamente a seção de trabalho do aço, em um tempo relativamente curto.

Segundo Guimarães (2000), o valor da concentração crítica ( $C_c$ ) de íons cloreto depende de fatores como o pH e o conteúdo de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) no cimento e na umidade existente no concreto. Geralmente o valor de concentração crítica de cloretos adotado na prática é o de  $C_c=0,4\%$ , em relação ao conteúdo de cimento.

Conforme Neville, os cloretos podem ser encontrados em agregados contaminados, principalmente em regiões litorâneas, em águas salobras ou excessivamente cloradas. Segundo Helene (1993), outra forma de contaminação por cloretos provém dos aditivos aceleradores de pega e aceleradores de endurecimento que contêm cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) na sua composição.

Além disso, segundo Neville (1997) os cloretos também podem provir do contato do concreto com o meio externo, onde se fizer presente água do mar, atmosfera marinha, lavagem de fachadas e/ou pisos com ácido clorídrico, atmosferas industriais, produtos armazenados em tanques industriais e, ocasionalmente, gases liberados na queima de produtos plásticos à base de PVC. As soluções de sais degelantes, de uso comum em países de clima temperado, também representam perigo quando se trata de ataque de cloretos ao concreto armado.

## 2.2. Mecanismos de transporte que influenciam na durabilidade do concreto armado

### 2.2.1. Penetração por permeabilidade

A penetração por permeabilidade é um mecanismo de transporte de líquidos ou gases que ocorre em função de uma diferença de pressão. O escoamento em poros capilares pode ser expresso através da lei de Darcy para fluxo laminar através de meio poroso, conforme Neville (1997).

Considerando-se que o fluido presente nos capilares seja água em temperatura ambiente, pode-se escrever e aplicar a lei de Darcy conforme a Eq. (2.7), conforme Helene (1993):

$$V = k \cdot \frac{H}{x} = \frac{Q}{S} \quad (2.7)$$

Onde V é a velocidade de percolação da água (em m/s), k é o coeficiente de permeabilidade da água no concreto (em m/s), H é a pressão da água (em m.c.a.), x é a espessura do concreto percolado pela água (em m), Q é a vazão da água percolada (em m<sup>3</sup>/s) e S é a área da superfície confinada por onde ocorre a percolação da água (em m<sup>2</sup>).

Ainda é possível escrever a Eq. (2.7) em função do tempo, considerando um processo em regime estacionário e com ausência de evaporação (Helene, 1993), resultando na equação (2.8):

$$H = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Vrt}{n}} \quad (2.8)$$

Onde, além das constantes citadas anteriormente, n é a viscosidade da água (em kg.s/m<sup>2</sup>), t é o período de tempo para atingir a penetração h (em s) e r é o raio do capilar (em m).

### 2.2.2. Absorção capilar

Segundo Nepomuceno (2005), estando os materiais de construção raramente saturados, a

absorção capilar passa a ser um dos principais mecanismos de penetração de líquidos nas estruturas de concreto armado. A absorção ocorre através da intercomunicabilidade dos poros do concreto. Assim sendo, na grande maioria dos casos, concretos com valores menores de relação água/cimento tendem a apresentar poros menos interligados e acabam por dificultarem este mecanismo de absorção capilar.

Em concretos saturados não ocorre absorção. Para que o mecanismo ocorra, deve haver poros secos ou parcialmente secos. Desta forma, no caso de estruturas semi-submersas, onde o risco de absorção é eminente, é recomendada a utilização de aditivos incorporadores de ar e de aditivos de ação hidrofugante de massa. As bolhas de ar incorporadas ao concreto tendem a diminuir a comunicação entre capilares, diminuindo por consequência a absorção. Segundo Neville (1997), deve-se tomar cuidado com a utilização de aditivos impermeabilizantes ao concreto visando diminuir a absorção capilar, visto que estes podem diminuir a resistência à compressão do material. A ascensão capilar pode ser calculada pela lei de Jurin, de acordo com a Eq. (2.9):

$$h = \frac{2v}{r\gamma} \quad (2.9)$$

Onde  $h$  é a altura ou penetração da água no capilar (em m),  $v$  é a tensão superficial da água (em kg/m) e  $r$  é o raio do capilar (em m) e  $\gamma$  é a massa específica da água (em kg/m<sup>3</sup>).

Mesmo existindo uma equação para quantificar este fenômeno, a aplicação direta é difícil, visto que os diâmetros dos capilares variam muito no tempo, além da equação 2.9 depender de diversos fatores físicos e químicos, como por exemplo a composição química e grau de saturação do cimento, uso de adições e aditivos, relação água/cimento, entre diversos outros.

### 2.2.3. Migração

A migração é um fenômeno que ocorre devido à ação de um campo elétrico oriundo de uma diferença de potencial que ocasiona fluxo de íons. É utilizada com frequência para ensaios acelerados de permeabilidade de íons. A migração é dada pela Eq. (2.10):

$$q_m = -D_c \frac{zF}{RT} \frac{dV}{dx} \quad (2.10)$$

Onde  $D_c$  é o coeficiente de migração,  $z$  é a valência do íon (adimensional),  $V$  é a voltagem (em V),  $R$  é a constante do gás ideal (83145 J/mol.K),  $F$  é a constante de Faraday (9648533289 C/mol),  $T$  é a temperatura absoluta (em K) e  $q_m$  é o fluxo de íons.

#### 2.2.4. Convecção

Convecção se trata do fluxo de uma substância que ocorre devido ao movimento do fluido que a contém. O fluxo da substância é dado pela Eq. (2.11):

$$q_m = C \cdot q_{fluido} \quad (2.11)$$

Onde  $q_m$  é o fluxo de substância,  $C$  é a concentração da substância no fluido e  $q_{fluido}$  é o volume de fluxo no fluido.

Segundo Nepomuceno (2005), a convecção pode ocorrer quando substâncias, como os íons cloreto e sulfato presentes na água, são introduzidas no interior do concreto não saturado por algum mecanismo de penetração de água.

#### 2.2.5. Difusão

Ocorre difusão quando o deslocamento de um gás ou vapor através do concreto ocorre por meio de um gradiente de concentração, e não com um diferencial de pressão. Em se tratando da difusão de gases, o dióxido de carbono e o oxigênio desempenham um papel importante. O dióxido de carbono é responsável pela carbonatação da pasta de cimento hidratado e o oxigênio é necessário à corrosão da armadura do concreto, conforme Neville (1997).

A Eq. (2.12) apresenta a primeira lei de Fick, que pode expressar a função da difusão que se aplica ao vapor de água e ao ar.

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dL} \quad (2.12)$$

Onde  $dc/dL$  é o gradiente de concentração (em  $\text{Kg/m}^4$  ou  $\text{mol/m}^4$ ),  $D$  é o coeficiente de difusão (em  $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $J$  é a velocidade de transporte de massa (em  $\text{Kg/m}^2\text{s}$  ou  $\text{mol/m}^2\text{s}$ ) e  $L$  é a espessura do elemento (em m).

Uma das expressões matemáticas mais empregadas para efetuar a previsão da velocidade de penetração de cloretos, é a solução da segunda lei de Fick considerando a concentração superficial de cloretos e o coeficiente de difusão constantes (Crank, 1975).

Normalmente realiza-se a previsão da vida útil residual das estruturas de concreto existente através da medição dos teores de íons cloreto a profundidades especificadas no elemento estrutural, em determinado tempo.

De posse do perfil de penetração de cloretos resultante, são determinados os valores da concentração superficial ( $C_s$ ) e do coeficiente de difusão de cloretos ( $D$ ). Os dados são ajustados empregando-se o método dos mínimos quadrados na Eq. (2.13), utilizada para o cálculo da vida útil residual.

$$C_{(x,t)} = C_s - (C_s - C_0) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{const}t}} \quad (2.13)$$

Onde  $C_{(x,t)}$  é a concentração de íons cloreto em relação à massa de cimento na profundidade  $x$  a partir da superfície do concreto em um dado tempo,  $C_0$  é a concentração inicial de íons cloreto no interior do concreto do componente estrutural,  $C_s$  é a concentração superficial de cloretos admitida como constante,  $x$  é a profundidade de penetração de íons cloreto (em cm),  $D_{const}$  é o coeficiente de difusão de cloretos ( $\text{cm}/\text{ano}^2$ ),  $t$  é o tempo (em anos) e  $\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{const}t}}$  é a função erro de Gauss.

Se utilizarmos a Eq. (2.13) considerando uma concentração de cloretos qualquer, tal que  $C_{(x,t)} = C_{cl}(x)$ , podemos escrever essa equação conforme Crank (1975):

$$C_{cl}(x) = C_s - (C_s - C_0) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{const}t}} \quad (2.14)$$

$$C_{cl}(x) - C_0 = C_s - C_0 - (C_s - C_0) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{const}t}} \quad (2.15)$$

$$\frac{C_{cl}(x) - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{const}t}} \quad (2.16)$$

$$\frac{C_{cl}(x) - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{const}t}} \quad (2.17)$$

Considerando que o primeiro termo da Eq. (1.17) é constante assim como o coeficiente de difusão, temos a Eq. (1.18):

$$x = k\sqrt{t} \quad (2.18)$$

Onde, além dos termos já demonstrados,  $k$  é uma constante que depende principalmente da concentração de íons no meio externo, da qualidade do concreto e da quantidade de fissuras.

A Eq. (2.18) é amplamente utilizada na previsão do avanço da frente de ataque de um agente agressivo no interior do concreto existente.

A Eq. (2.13) pode ser utilizada para estabelecer a qualidade e a espessura do concreto de cobrimento do aço para uma vida útil pré-estabelecida. Como o valor de  $D_{const}$  é normalmente obtido em laboratório na condição de temperatura constante, concreto saturado e tomando uma amostra do centro do concreto (sem efeito parede da forma da concretagem), Guimarães (2000) corrige o valor do coeficiente de difusão ( $D$ ) a partir da equação (2.19) e, após a solução das equações, é possível o cálculo mais apurado da vida útil de projeto.

$$D = D_{const.Cl(corrigido)} = D_{const.Cl(lab)} \cdot R_c \cdot R_t \cdot R_{cs} \cdot R_{GS} \quad (2.19)$$

Onde  $D_{const.Cl(corrigido)}$  é o coeficiente de difusão de íons cloreto corrigido,  $D_{const.Cl(lab)}$  é o coeficiente de difusão de íons cloreto obtido em laboratório,  $R_c$  é o coeficiente de redução devido ao tipo de cimento,  $R_t$  é o coeficiente de redução devido à temperatura,  $R_{cs}$  é o coeficiente de

difusão devido à diferença da superfície exposta no ensaio com relação à superfície de concretagem e  $R_{GS}$  é o coeficiente de redução devido à variação do grau de saturação.

## 2.3. Principais fatores externos que influem na penetração de cloretos

### 2.3.1. Temperatura

A temperatura é um fator importante que deve ser levado em conta na vida útil de uma estrutura de concreto, pois influencia sobremaneira a movimentação iônica e a umidade interior. Estruturas inseridas em regiões mais quentes deterioram mais rapidamente do que em regiões frias, quando sujeitas à penetração dos íons cloreto (Neville, 1997).

Conforme Cascudo (1997) a temperatura pode ter influência em dois aspectos na penetração de cloretos: para um acréscimo de temperatura haverá um aumento na velocidade de corrosão e da mobilidade iônica, no entanto a diminuição da temperatura irá provocar condensações nas paredes da rede porosa, as quais podem produzir incrementos locais no teor da umidade.

A Eq. (2.20), denominada equação de Arrhenius, modela a influência da temperatura na velocidade e intensidade de penetração dos íons cloreto nas estruturas de concreto armado:

$$D_T = D_{T_0} \cdot e^{-k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2.20)$$

Onde  $D_T$  é o coeficiente de difusão na temperatura  $T$ ,  $D_{T_0}$  é o coeficiente de difusão na temperatura  $T_0$ ,  $k$  é a constante de reação,  $T$  é a temperatura final (em K) e  $T_0$  é a temperatura inicial (em K).

### 2.3.2. Umidade

O teor de umidade presente nos poros do concreto faz com que o teor crítico de cloretos decresça com o seu aumento, uma vez que há um aumento do eletrólito e as condições para a instalação da célula corrosiva são mais favoráveis. Por outro lado, segundo Meira (2004), com o

aumento da umidade interior há diminuição da entrada de oxigênio o que dificulta as reações para a formação da corrosão.

Desde que o concreto não esteja saturado, pode-se dizer que a umidade relativa está diretamente relacionada com a quantidade de água no interior desse elemento, ou seja, com o GS, e portanto, influenciará na difusão de cloretos.

A umidade no interior do concreto é um importante fator no transporte de agentes agressivos na massa cimentícia, não somente por difusão de substâncias como também pelo próprio fluxo através da pasta não saturada ao arrastar substâncias dissolvidas (Camacho, 2014).

### 2.3.3. Efeito do oxigênio

A presença de oxigênio no interior do concreto armado, aliada à presença de um eletrólito e uma diferença de potencial, pode gerar uma pilha ou célula de corrosão. Quando ocorre penetração de agentes agressivos no interior do concreto e os mesmos encontram a armadura em estado despассивado, ocorre o fluxo de elétrons da zona anódica para a zona catódica e a consequente diminuição (ou corrosão) da armadura. A figura 2.1 demonstra esse processo.

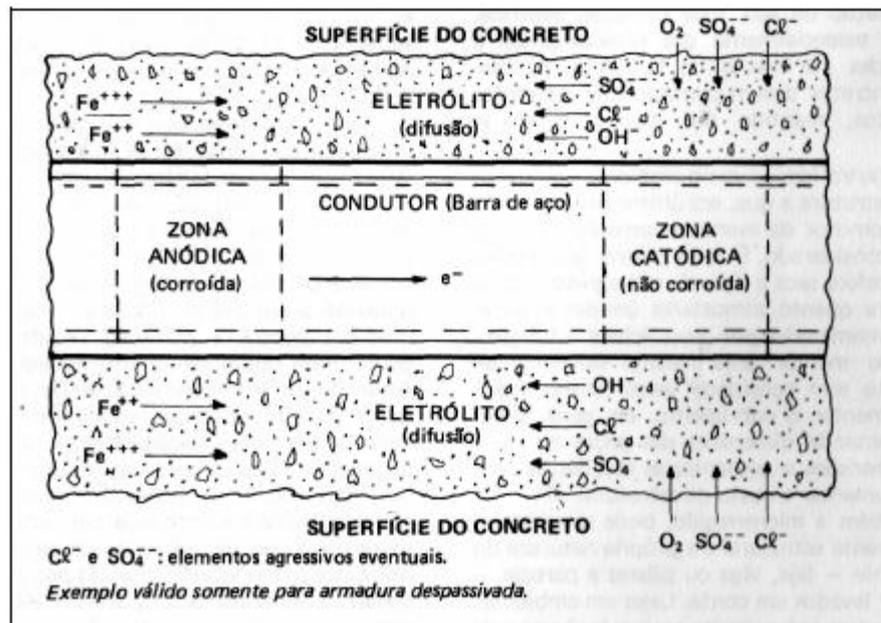
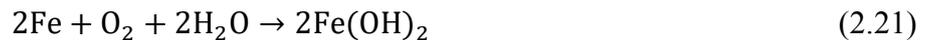


Figura 2.1- Processo de formação de pilha de corrosão (Fonte: Helene, 1994)

Segundo Cascudo (1997), a diferença de potencial que estabelece a existência de um ânodo

e um cátodo pode ter origem de diversas causas, entre as quais destacam-se as solicitações mecânicas distintas do aço e do concreto em regiões próxima da mesma peça estrutural, diferenças na composição química e na superfície do aço, incluindo heterogeneidades na fase metálica, aeração diferencial devido à compactidade do concreto, concentração salina diferencial, entre outros.

De acordo com Helene (1993), é necessário que haja oxigênio para a formação da ferrugem, segundo reação apresentada na Eq. (2.21):



Helene (1993) afirma que na realidade as reações são mais complexas e o produto da corrosão, denominado ferrugem, nem sempre é hidróxido de ferro, mas sim uma gama de óxidos ou hidróxidos de ferro resultantes de prováveis reações que variam de acordo com a zona onde ocorrem.

Helene (1993) explica como ocorre a corrosão com as seguintes reações:

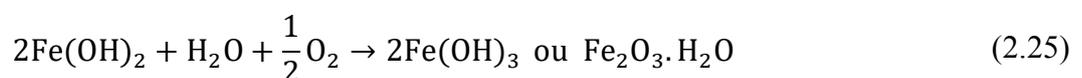
Dissolução (oxidação) do ferro nas zonas anódicas (zonas que sofrem corrosão), conforme Eq. (2.22):



Redução de oxigênio nas zonas catódicas (zonas que não sofrem corrosão), conforme Eq. (2.23):



Ocorrem, então, as seguintes reações de corrosão com formação de ferrugem nas zonas anódicas, conforme Eq. (2.24), Eq. (2.25) e Eq. (2.26):



Vale ressaltar que a corrosão da armadura do concreto armado ocorre mais facilmente em concretos úmidos em comparação com concretos submersos, visto que quando o concreto se encontra com seus poros cheios de água, é necessário primeiramente que ocorra a dissolução do oxigênio para só então ocorrer o processo de corrosão. Isso explica o fato de concretos localizados em zonas de respingo e maré sofrerem maiores danos em suas armaduras do que aqueles em zona submersa.

#### **2.3.4. Concentração superficial de cloretos**

Segundo Bandeira (2014), a concentração de cloretos na superfície das estruturas é considerada um dos fatores que determinam a velocidade de penetração dos íons cloreto para o interior da pasta de cimento.

Segundo Helene (1993), fatores como a relação a/c, presença de adições, tipo e quantidade de cimento, direção dos ventos predominantes, ciclos de molhagem e secagem e concentração de cloretos no meio ambiente influenciam a concentração superficial de íons cloreto no concreto.

Em estudo realizado por Guimarães et al. (2007), estruturas existentes em ambientes similares apresentaram concentração superficial aproximadamente igual. Segundo Silva (2010), a concentração superficial de cloretos pode variar dependendo da posição do elementos estruturais em relação à incidência de ventos.

A distância entre a estrutura e a água do mar também influi na concentração superficial de cloretos. Nunes (2006) estudou estruturas localizadas próximas ao mar na região Sul do Brasil, chegando à conclusão de que quanto maior a distância da estrutura em relação à água do mar, menor é a concentração de cloretos. A Figura 2.2 apresenta gráfico sobre o teor de cloretos nas camadas externas de estruturas de concreto localizadas em diferentes distâncias em relação à água do mar.

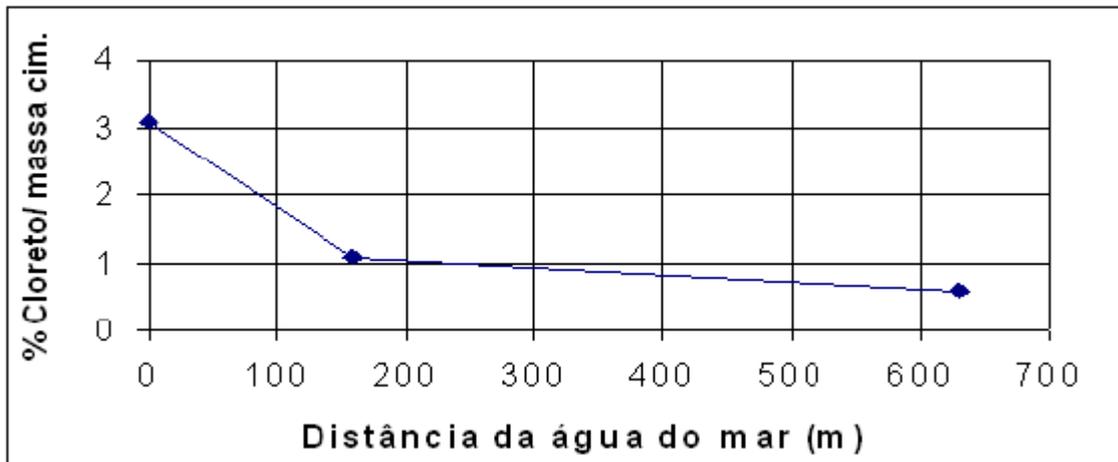


Figura 2.2-Teor de cloretos nas camadas mais externas de estruturas de concreto em relação à distância da água do mar em Rio Grande - RS (Fonte: Nunes,2006)

Existem estudos que também demonstram a variação da concentração superficial com a distância vertical em relação ao ambiente agressivo. Em estudos realizados a respeito dessa influência, foi observada a que o  $C_s$  varia verticalmente em relação ao nível do mar, segundo Barbosa et al. (2004).

A Figura 2.3 demonstra o resultado do estudo realizado por Guimarães et al. (2007), utilizando dados de Castro et. al. (2001), onde se evidencia que quanto maior a distância vertical em relação ao nível do mar, menores os valores encontrados para a concentração superficial de cloretos.

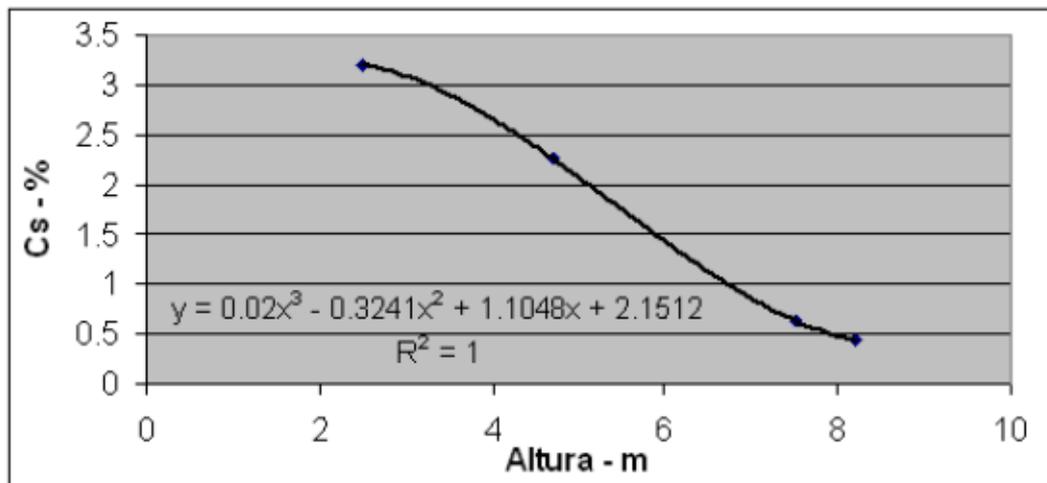


Figura 2.3- Modelo da influência da altura vertical em relação ao nível do mar sobre a concentração superficial de cloretos ( $C_s$ ). (Fonte: Guimarães et. al.,2007)

### **2.3.5. Tipo de ambiente**

Neste item são revistos conceitos sobre os agentes que compõem os diversos ambientes em que pode estar situada uma estrutura de concreto armado. As características do tipo de ambiente caracterizam os agentes agressores e conseqüentemente o tipo de ataque que a estrutura de concreto sofrerá. São estudados os ambientes urbano, industrial e marítimo, visto que os três ambientes costumam atuar em conjunto, pois é comum a instalação de um complexo urbano e industrial junto a um porto marítimo devido à facilidade de transporte oferecida.

#### ***Ambiente urbano***

O meio ambiente urbano, por suas características de concentração populacional, provoca alterações no meio ambiente original. Segundo Lima (1993), essas alterações, no que tange o estudo da degradação de estruturas de concreto, contemplam a ocorrência de chuvas ácidas, deposição de partículas sólidas e lançamento de dióxido de carbono na atmosfera, responsável pela carbonatação do concreto e conseqüente corrosão da armadura.

Ainda é interessante salientar que o ambiente urbano provoca alterações no regime de ventos, devido à criação de corredores de vento, que modificam as características de chuva dirigida, especialmente nos centros mais densos (Lima, 2011).

Outro fator notável são as alterações na distribuição de temperatura no ambiente urbano, com a formação de ilhas de calor (Lima, 2011).

#### ***Ambiente industrial***

O ambiente industrial possui particularidades específicas, visto que indústrias possuem microclimas bastante peculiares. Conforme Lima (2011) um exemplo da peculiaridade destes microclimas pode ser observado em fábricas de papel e celulose, por exemplo, onde os tanques de branqueamento contaminam todo o entorno com cloretos. Nesses casos, o ataque é superior ao provocado pela pior condição de exposição ao ambiente marinho.

As indústrias também contribuem para a contaminação do meio ambiente em geral, lançando substâncias como derivados de sulfatos, monóxido e dióxido de carbono. Também

contribuem para a formação de chuvas ácidas e para a deposição de partículas sólidas em suspensão na atmosfera, formando depósitos que na ocorrência de chuvas provocam acidificação na superfície do concreto (Lima, 2011).

### *Ambiente marítimo*

Devido à variedade de características diferenciadas de ataque, o ambiente marinho é dividido por autores e códigos de normalização em diferentes zonas. Essa divisão por zonas se caracteriza pelo distinto acesso de oxigênio, de água e umidade (Guimarães, 2000). Sendo assim, serão abordados a seguir as principais características de degradação, conforme especificadas a seguir.

A primeira das zonas a se analisar é a zona de atmosfera marinha. Segundo Lima (2011), nessa região, apesar de não estar em contato direto com a água do mar, a estrutura recebe uma quantidade razoável de sais, capazes de produzir depósitos salinos na superfície, onde se produzem ciclos de molhagem e secagem. Os ventos podem carregar os sais sob a forma de partículas sólidas ou ainda como gotas de solução salina contendo vários outros constituintes. A quantidade de sais presente vai diminuindo em função da distância do mar, sofrendo influência da direção e velocidade dos ventos predominantes. O mecanismo principal de degradação dessa zona é a corrosão de armadura pela ação de íons cloreto (Helene, 1993).

A segunda zona é denominada zona de respingos. É a região onde ocorre a ação direta do mar, devido às ondas e os respingos. Os danos mais significativos encontrados são produzidos pela corrosão da armadura pelos íons cloreto. Ainda segundo Helene (1993), a degradação nessa zona é bastante significativa devido aos ciclos de molhagem e secagem, potencializando a ação dos agentes agressivos presentes.

A terceira zona recebe a denominação de zona de variação de marés. Essa região é delimitada pelos níveis máximo e mínimo que alcançam as marés. Devido a isso, o concreto pode se encontrar sempre saturado, dependendo das condições climatológicas, e com uma crescente concentração de sais. A degradação acontece devido à ação dos sais agressivos (ataque químico), corrosão de armaduras (devido à presença de cloretos), ação das ondas e outras substâncias em suspensão (abrasão) e micro-organismos (Helene, 1993).

A quarta e última zona é denominada de zona submersa, e se caracteriza como a região onde a estrutura de concreto encontra-se permanentemente submersa. A degradação ocorre pela ação de

sais agressivos (sulfato e magnésio) e pela ação de micro-organismos, que em casos extremos podem gerar a corrosão biológica da armadura e do concreto (Lima, 2011).

O ambiente marinho é sem dúvida bastante agressivo, expondo a estrutura a ações decorrentes de diferenças de temperatura, ações das ondas e variações de maré, juntamente com as diferenças de temperatura entre o ar e a água. Essas ações podem expor a estrutura a ciclos de molhagem e secagem, assim como ciclos de calor e frio, capazes de destruir o mais forte dos materiais (Lima, 2011). Além disso, deve-se atentar ao fato de que o ambiente marinho pode estar associado com os ambientes urbano e industrial, causando uma degradação ainda mais acentuada da estrutura.

## **2.4. Principais fatores do concreto que influenciam na penetração de cloretos**

### **2.4.1. Tipo de cimento**

O estudo da influência do tipo de cimento no transporte de íons cloreto no concreto pode ser visto sob dois aspectos: na capacidade do cimento fixar os cloretos na matriz cimentícia, tendo em vista que somente os cloretos livres participam do processo de corrosão da armadura, e na dificuldade que o cimento irá proporcionar à movimentação dos cloretos.

Para Helene (1993), as quantidades de  $C_3A$  e  $C_4AF$  no cimento é que determinam a capacidade de combinação com os íons cloreto. Cimentos com baixas quantidades de  $C_3A$  e  $C_4AF$  possuem pouca capacidade de imobilizar os íons cloreto através da formação de um sal complexo insolúvel (cloro-aluminato de cálcio hidratado), que reduz a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto.

Segundo Neville (1997), ao se utilizar cimentos com elevado teor de  $C_3A$ , haverá grande quantidade inicial de calor de hidratação desprendido e conseqüente elevação da temperatura, que pode ser prejudicial em obras com grandes massas de concreto, como é o caso de muitas estruturas expostas ao mar.

As adições minerais que possuem teor de aluminatos em sua composição, quando substituem parte do cimento, tendem a provocar alterações na estrutura dos poros, na composição aquosa e aumentam a capacidade e fixação dos íons cloreto (Helene,1993).

Conforme Guimarães (2000), concretos executados com cimento Portland comum tem melhor desempenho na proteção do aço do que os concretos com cimento de alta resistência inicial resistente a sulfatos (baixo teor de aluminato tricálcico); cimentos com adição de escória ou cinza volante são mais resistentes ao ataque de cloretos do que o cimento Portland comum, assim como concretos com sílica ativa e cinza de casca de arroz.

### **2.4.2. Relação água/cimento**

A relação água/cimento é um fator importante na distribuição dos poros da pasta cimentícia. Quanto maior a relação água/cimento, maiores e mais interligados serão os poros da pasta de cimento.

Logo, a relação água/cimento influencia no ataque de íons cloreto sobre o concreto, pois existe uma relação desse fator com a permeabilidade, ou seja, quanto maior a permeabilidade, maior será a facilidade no transporte de cloretos (Mehta, 1994).

Segundo Meira (2004), a relação água/cimento tem uma forte influência sobre a porosidade do concreto, podendo gerar um concreto mais ou menos denso dependendo do teor escolhido, assim facilitando ou dificultando o transporte de cloretos por entre a rede de poros do concreto.

### **2.4.3. Grau de carbonatação**

Conforme Tuutti (1982), o processo de carbonatação presente no interior da massa cimentícia pode liberar íons cloreto fixados na pasta endurecida, provocando uma elevação do teor desses íons livres, facilitando o aumento de sua concentração no interior da peça estrutural podendo chegar a ocasionar despassivação da armadura.

A combinação destes dois mecanismos de agressão, carbonatação e cloretos, pode aumentar a intensidade da ação corrosiva do aço, sendo que esta é a causa de muitos problemas severos de corrosão da armadura do concreto.

### **2.4.4. Grau de saturação**

O grau de saturação (GS) do concreto é considerado um fator importante para o processo de penetração dos íons cloreto. O nível de saturação da estrutura porosa determina caminhos para a penetração de íons cloreto durante o processo de difusão. Além disso, as variações do grau de saturação geram convecção da água contida na peça, fazendo com que o fluxo seja tanto para dentro como para fora do concreto (Guimarães, 2000).

Quando um concreto em ambiente marítimo se encontra submerso, toda a rede de poros igualmente se encontra saturada de água, o transporte dos íons cloreto são devidos aos gradientes de concentração das camadas mais externas com mais concentração de íons cloreto para as camadas mais internas com menos concentração de íons cloreto (Nunes, 2006).

Por outro lado, quando se tem um concreto não totalmente saturado há uma combinação do mecanismo de transporte, isto é, absorção capilar e difusão. Isto se dá quando se tem uma das superfícies do concreto em contato com uma solução iônica e a outra em contato com o ar com umidade relativa baixa (Nunes, 2006).

Guimarães (2005) desenvolveu método de ensaio para obtenção do coeficiente de difusão

em concreto não saturado, chegando à conclusão durante a pesquisa que existe uma tendência de cessar a difusão quando o grau de saturação diminui até aproximadamente 40%. Ainda concluíram que o grau de saturação é um fator mais relevante na penetração de íons cloreto do que o teor de umidade assim como a interligação dos poros é mais importante que o teor de vazios.

Climent et al. (2002) concluiu que o coeficiente de difusão decresce cerca de duas ordens de grandeza quando o grau de saturação do concreto diminui entre 80% a 30%, em ensaios com teores de água controlados.

### **3. ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DO CONCRETO**

#### **3.1. Introdução**

Nesse item são apresentados os ensaios consagrados e normatizados utilizados na determinação do coeficiente de difusão de amostras de concreto, utilizados como valores base neste trabalho, bem como a proposta do procedimento de ensaio a ser desenvolvido e avaliado.

Segundo Patel et al. (2016), os tipos de ensaio para determinar o coeficiente de difusão de um íon podem ser divididos em quatro categorias. São elas os ensaios de difusão passante, baseados na medição de fluxos através da amostra, os ensaios de difusão interna, baseados em medições de perfis de concentração na amostra, os ensaios de migração, onde a difusão de íons é acelerada por um campo elétrico, e os ensaios onde uma variável correlata é usada para determinar o coeficiente de difusão, como os ensaios de resistividade elétrica.

#### **3.2. Ensaio de difusão passante**

Segundo Patel et al. (2016), tradicionalmente, os coeficientes de uma variedade de agentes (como água pesada, íons e gases dissolvidos) são determinados por ensaios de difusão passante devido a sua simplicidade, conveniência e estado natural de difusão durante o procedimento. A montagem do ensaio consiste em uma amostra fina localizada entre dois compartimentos, servindo como uma divisão entre ambos, sendo a interface entre a amostra e as paredes os compartimentos seladas com a finalidade de evitar efeitos de parede. O agente difusivo é injetado ou depositado, dependendo de sua natureza, no compartimento da parte ascendente. Com o gradiente de concentração formado, o agente sofre difusão na direção descendente, para o compartimento com concentração menor. A concentração no compartimento da parte descendente é então medido em intervalos fixos até que o regime estacionário seja alcançado.

A Figura 3.1 mostra a montagem do ensaio, assim como uma quantidade cumulativa típica de um agente difusor com o tempo.

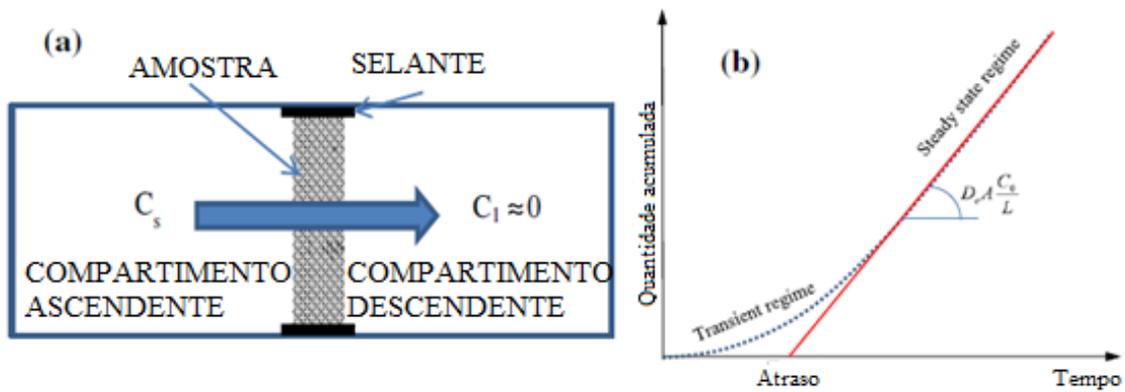


Figura 3.1- a) Montagem do ensaio de difusão passante; b) quantidade acumulada n compartimento descendente. (Fonte: Adaptado de Patel et al., 2016)

Quando o regime estacionário é atingido, a declividade da curva se torna constante, o que significa que o fluxo passando através da amostra também é constante. A 1ª lei de Fick pode então ser aplicada para calcular a quantidade cumulativa de agente difusor passando pela amostra com área de seção transversal  $A$ , conforme Eq. (3.1).

$$Q(t) = \int_0^t -D_e A \frac{\partial C}{\partial x} dt = -D_e A \frac{\partial C}{\partial x} t \approx -D_e A \frac{C_s}{L} t \quad (3.1)$$

Onde  $Q(t)$  é a quantidade acumulada (em mols),  $L$  é o comprimento da amostra (em m) e  $C_s$  é a concentração de agente difusivo (em mols/m<sup>3</sup>). É importante ressaltar que a concentração de agente difusivo no compartimento descendente é considerado nulo, visto que a concentração é muito baixa em comparação à parte ascendente. O coeficiente de difusão efetivo neste caso pode ser obtida facilmente pela declividade da curva de quantidade acumulada de agente difusivo. Em caso de sorção, a porosidade acessível da amostra pode ser determinada com o atraso  $t_{lag}$  (em s) que é o intercepto da reta que representa o regime transiente com o eixo do tempo, e expresso pela Eq. (3.2).

$$\theta = \frac{6D_e t_{lag}}{L^2} \quad (3.2)$$

Quando utilizada para determinar a difusão de íons, como sulfatos e cloretos, o tempo decorrido para o ensaio atingir o estado estacionário é longo, chegando inclusive a levar meses (Patel et al., 2016).

Esse tipo de ensaio é consagrado, embora não exista norma específica para sua execução. Page et al. (1981) utilizaram o ensaio de difusão passante ao analisar o fenômeno da difusão de cloretos em pasta de cimento endurecido, enquanto Bretton et al. (1992) utilizou tal ensaio para a avaliação da influência da zona de transição do concreto na difusão de íons cloreto.

### 3.3. Ensaio de difusão interna

Os ensaios de difusão interna são métodos de ensaio que trabalham no regime transiente, portanto não necessitam do tempo transcorrido para atingir regime estacionário, consumindo um tempo bem menor. O ensaio é destrutivo e só é aplicável a agentes difusivos facilmente identificáveis, como cloretos e agentes radioativos. Os ensaios deste grupo são baseados na medição de perfis de concentração do agente difusivo dentro da amostra. Para isso, depois de decorrido o tempo de contaminação a amostra é cortada em pequenas fatias ou a superfície de ataque é desgastada em camadas sucessivas e o material pulverulento decorrente do processo é então analisado. Segundo Patel et al. (2016), esse tipo de ensaio é desenvolvido de tal maneira que a fonte de contaminação é mantida constante e a amostra é longa o suficiente para se considerar um domínio semi-infinito. A Figura 3.2 representa de maneira esquemática a montagem típica do ensaio.

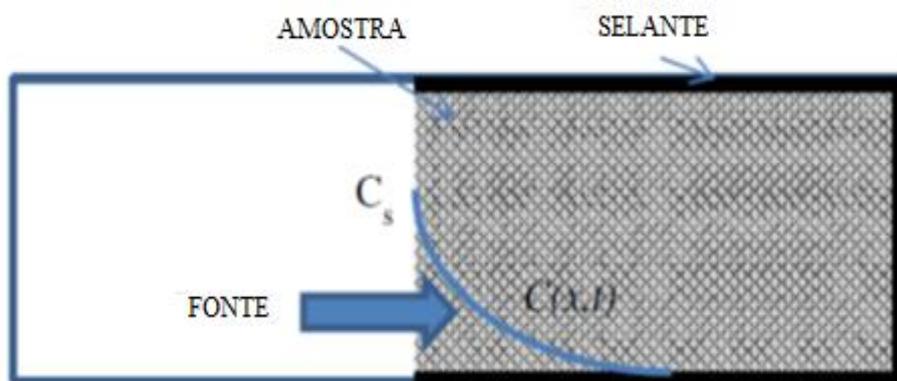


Figura 3.2- Montagem do ensaio de difusão interna. (Fonte: Adaptado de Patel et al., 2016)

O coeficiente de difusão aparente é então obtido ajustando o perfil experimental à solução da 2ª lei de Fick considerando o coeficiente de difusão e a concentração superficial constantes (conforme demonstrado no capítulo anterior) com uma regressão pelo método dos mínimos quadrados. Vale ainda ressaltar que o coeficiente de difusão aparente para materiais cimentícios decresce com a duração da medição devido à hidratação contínua e atração não linear. Portanto, o coeficiente de difusão encontrado não é o instantâneo, mas sim uma espécie de coeficiente médio em determinado tempo (Patel et al., 2016).

O coeficiente de difusão é normalmente determinado utilizando testes de imersão em agente difusivo baseados na difusão interna, os quais são normatizados na ASTM C1556 (2004) e na NT BUILD 443 (1995). Como a difusão é o mecanismo de transporte predominante nesses ensaios, o tempo de exposição pode ser longo para a obtenção de dados experimentais, mesmo com concentrações elevadas.

### **3.3.1. Ensaio acelerado de difusão interna conforme NT BUILD 443 (1995)**

O ensaio consiste em expor fatias de corpos de prova do concreto a ser analisado em uma solução aquosa de cloreto de sódio. Segundo NT BUILD 443 (1995), primeiramente o corpo de prova é cortado em cilindros menores, e então exposto a uma solução de hidróxido de cálcio. No dia seguinte procede-se à pesagem do corpo de prova e a massa de superfície seca (massa com o corpo de prova saturado porém com as superfícies externas secas) é determinada. Esse processo se repete a cada dia até que a variação da massa de superfície seca não varie mais do que 0,1% entre duas pesagens sucessivas.

O corpo de prova é então coberto por uma camada de aproximadamente 1 mm de epóxi ou poliuretano. Deve-se ter o cuidado de evitar que a superfície de exposição não entre em contato com o material selante, e as prescrições do fabricante para aplicação e cura da resina também devem ser respeitadas. Com capa selante estabilizada, o corpo de prova é novamente mergulhado na solução de hidróxido de cálcio e o processo de pesagem descrito anteriormente é repetido até a estabilização da massa de superfície seca. Com isso, procede-se à etapa de contaminação da amostra.

A contaminação ocorre imergindo a amostra de concreto com a capa selante em uma solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 165 g/dm<sup>3</sup> a uma temperatura entre 21°C e 25°C. O tempo de contaminação é de 35 d. Deve-se manter a amostra imersa porém sem contato direto com as paredes do reservatório, sendo esta erguida por apoios auxiliares.

Após o período de exposição, a amostra é desgastada em camadas paralelas à superfície de exposição do concreto. O diâmetro de desgaste deve ser no mínimo 10 mm menor que o diâmetro da amostra, com a finalidade de evitar contaminação e efeitos de borda no ensaio.

A primeira camada de desgaste deve ter sempre espessura mínima de 1 mm. Deve-se garantir que no mínimo 5 g de material pulverulento seja obtido em cada camada. Para cada camada de profundidade extraída, uma média de pontos é calculada usando paquímetro.

O coeficiente de difusão e a concentração superficial de cloretos são determinados ajustando o perfil obtido à solução da segunda lei de Fick por uma regressão não linear de acordo com o método dos mínimos quadrados, omitindo o primeiro ponto da regressão.

### **3.3.2. Ensaio de difusão com concentração 0,5 M**

O ensaio é tradicional e consagrado, sendo este a base do exposto na NT BUILD 443 (1995), com a diferença de que a concentração da solução de ataque é de 0,5 M (29,2 g/dm<sup>3</sup>), concentração essa equivalente à da água do mar, e idade de extração do material de 90 d. O processo de estabilização, preparação para contaminação e extração são os mesmos.

### **3.4. Ensaio de migração**

Ensaio de migração foram desenvolvidos para acelerar o transporte iônico através da aplicação de um campo elétrico. A montagem do método consiste em uma amostra fina posicionada entre dois eletrodos e imersa em soluções eletrolíticas. O agente difusivo é posicionado no compartimento de ascensão e uma diferença de potencial elétrico é aplicada através da amostra. Quando o ensaio é estacionário, a concentração de determinado íon na parte descendente é medida até o início do regime estacionário. Para ensaios em regime não-estacionário, o perfil de concentração de íons na amostra é determinado após dado período. A interpretação dos dados experimentais é obtido através da solução da equação de Nernst-Planck, considerando um coeficiente de difusão aparente constante, campo elétrico constante, contribuição do termo eletrocinético desprezível frente ao campo elétrico, representada pela Eq. (3.3).

$$C = \frac{C_s}{2} \left[ e^{\alpha x} \operatorname{erfc} \left( \frac{x + \alpha \sqrt{D_a t}}{2\sqrt{D_a t}} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{x - \alpha \sqrt{D_a t}}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (3.3)$$

Onde  $\alpha = zF\Delta\Psi/RTL$ ;  $z$  é o número de valência do íon (adimensional);  $F$  é a constante de Faraday (9648533289 C/mol);  $R$  é a constante do gás ideal (83145 J/mol.K);  $T$  é a temperatura do líquido (em K);  $C_s$  é a concentração do agente difusor (em mol/m<sup>3</sup>);  $L$  é o comprimento da amostra (em m) e  $\Delta\Psi$  é a diferença de potencial (em V). O coeficiente de difusão aparente pode ser obtido por uma regressão pelo método dos mínimos quadrados (como no caso do ensaio de difusão interna). Segundo Patel et al. (2016) apud. Samson et al. (2003), o coeficiente de difusão obtido considerando o campo elétrico constante pode ser maior que o coeficiente obtido via ensaio de difusão passante, pois o perfil de concentração iônica é superestimado.

Para regime estacionário, assumindo que a migração é o processo de transporte dominante, o campo elétrico constante e concentração de ascensão muito maior que a concentração do compartimento descendente, o coeficiente de difusão pode ser calculado pela Eq. (3.4).

$$D_e = \frac{J_{ss}RTL}{zFC_s\Delta\Psi} \quad (3.4)$$

Onde o fluxo em estado estacionário  $J_{ss}$  (em mol/m<sup>2</sup>.K) pode ser calculado da evolução de concentração no compartimento descendente.

As normas que definem os procedimentos para este tipo de ensaio são a NT BUILD 355 (1995), a NT BUILD 492 (1999) e a ASTM C1202 (1997). A Figura 3.3 apresenta a montagem esquemática do ensaio de migração.

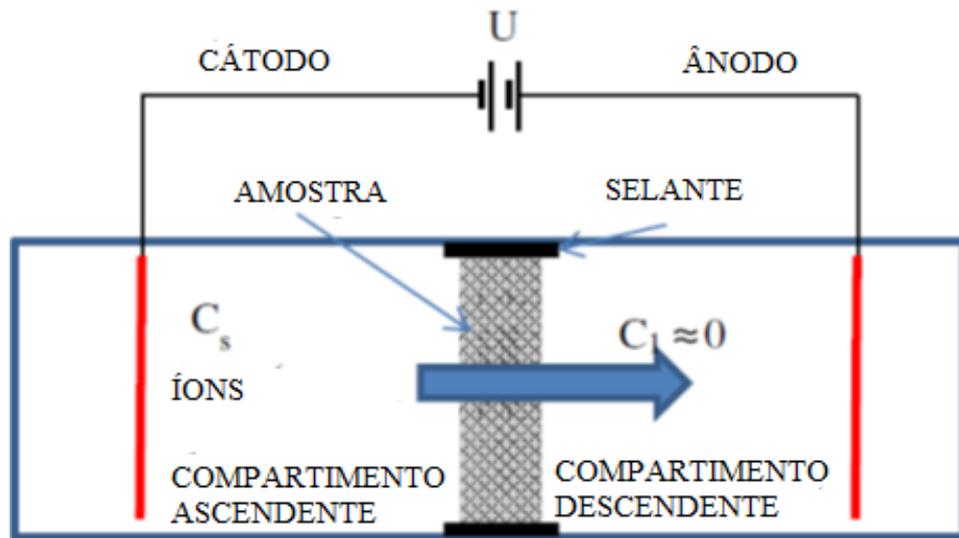


Figura 3.3- Montagem do ensaio de migração (Fonte: Adaptado de Patel et al., 2016)

### 3.5. Ensaio de resistividade elétrica

Segundo Patel et al. (2016), a difusividade efetiva pode ser obtida também pela analogia entre condutividade elétrica e difusividade em um material poroso. A Eq. (3.5) apresenta a relação entre coeficiente de difusão, condutividade elétrica e resistividade.

$$\frac{D_e}{D_0} = \frac{\sigma_e}{\sigma_0} = \frac{\rho_0}{\rho_e} \quad (3.5)$$

Onde  $D_e$  é o coeficiente de difusão da amostra (em  $\text{mm}^2/\text{s}$ ),  $D_0$  é o coeficiente de difusão da solução dos poros (em  $\text{mm}^2/\text{s}$ ),  $\sigma_e$  é a condutividade elétrica da amostra ( $\text{K}^3/\text{mol} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{A}^2$ );  $\sigma_0$  é a condutividade elétrica da solução dos poros ( $\text{K}/\text{mol} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{A}^2$ );  $\rho_e$  é a resistividade elétrica da amostra ( $\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{A}^2/\text{K}^3$ );  $\rho_0$  é a resistividade elétrica da solução dos poros ( $\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{A}^2/\text{K}^3$ ). A resistividade elétrica da amostra é medida aplicando uma corrente ou voltagem alterada conhecida. A resistividade da amostra pode então ser determinada pela Eq. (3.6).

$$\rho_e = \frac{\Delta\Psi A}{IL} \quad (3.6)$$

Onde, além dos parâmetros mencionados anteriormente,  $I$  é a corrente passada através da amostra (em A),  $A$  é a área da seção transversal (em  $m^2$ ) e  $L$  é o comprimento da amostra (em m).

Para estimar a difusividade, a resistividade da solução nos poros também é requerida, porém para sua determinação a solução deve ser extraída em pressões muito elevadas. Alternativamente, a resistividade elétrica pode ser estimada se a composição da água nos poros na pasta cimentícia é conhecida. Outra forma de contornar o problema é substituir a solução dos poros por uma solução com resistividade conhecida, o que pode aumentar a duração do ensaio e também alterar a resistividade da matriz cimentícia devido à interação com a solução. Patel et al. (2016) apud. Spragg et al. (2013) atenta ao fato de que parâmetros importantes como montagem, temperatura, armazenamento da amostra, frequência da corrente com as quais as medidas são tomadas e a solução nos poros podem resultar em grandes variações da difusividade relativa obtida por ensaio de resistividade elétrica.

A Figura 3.4 apresenta a montagem de um ensaio de resistividade elétrica.

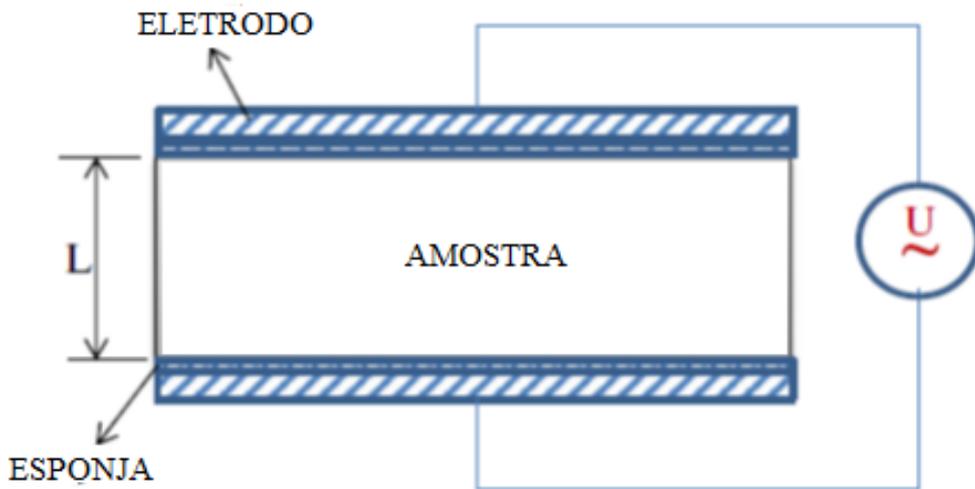


Figura 3.4- Montagem de um ensaio de resistividade elétrica.  
(Fonte: Adaptado de Patel et al., 2016)

### **3.6. Comparação do ensaio normatizado segundo NT BUILD 443 (1995) com ensaio consagrado de concentração 0,5 M.**

Guimarães et al. (2011) desenvolveram estudo com o objetivo de analisar o comportamento da concentração superficial do concreto durante ensaios de difusão interna. Para isso, foram executados ensaios segundo NT BUILD 443 (1995) e segundo ensaio consagrado 0,5M, para idades de 7 d, 14 d e 35d. A conclusão do trabalho mostrou a tendência da concentração superficial em não variar em função do tempo, assim como o coeficiente de difusão das amostras confeccionadas a partir do mesmo concreto não demonstraram variação significativa. Ainda é sugerido que novos testes com concentrações maiores de NaCl podem ser executados para verificar a possibilidade de utilização destes ensaios com tempo de contaminação menor e concentração de solução maior, visto que a concentração utilizada em ensaios acelerados atualmente é ainda distante do valor de saturação da solução.

Na sequência deste trabalho propõem-se dar andamento ao desenvolvimento de ensaio acelerado em tempo menor que o proposto na NT BUILD 443 (1995), que fixa um tempo mínimo de 35 d.

## **4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

### **4.1. Metodologia de ensaio**

#### **4.1.1. Introdução**

Todos os ensaios descritos no presente trabalho tiveram execução realizada no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). A seguir são descritos a proposta do método de ensaio modificado a partir da NT BUILD 443 (1995), bem como todas as etapas para a obtenção dos resultados.

#### **4.1.2. Proposta de ensaio**

O ensaio proposto baseia-se nas observações feitas por Guimarães et al. (2011), onde foi observado nos resultados que o coeficiente de difusão do concreto testado não variou significativamente com a concentração utilizada para contaminação, demonstrando resultados muito próximos nas idades de 7 d e 35 d.

Sendo assim, o ensaio proposto baseia-se numa modificação da NT BUILD 443 (1995), utilizando para tanto uma concentração de 400 g/dm<sup>3</sup>, que por estar acima da concentração de saturação da água pura (370 g/dm<sup>3</sup> a 20°C), garantirá um ensaio saturado durante todo o processo. Além disso, outra modificação presente é a espessura da camada de material extraída. As duas camadas iniciais tem espessura de 1 mm, valor menor que o mínimo indicado na norma. Optou-se por essa modificação para uma melhor qualidade de perfis em intervalos de tempo curtos. Com a finalidade de investigar qual o menor tempo de ensaio para a obtenção de resultados significativos, foram definidas as idades de ensaio de 7d, 14d, 21d e 35 d.

#### **4.1.3. Dosagem dos traços e confecção dos corpos de prova**

Inicialmente, foram definidos quais traços seriam utilizados na pesquisa, bem como sua dosagem. Utilizando os dois traços dosados, procedeu-se à confecção de corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. A produção do concreto, dimensões dos corpos de prova e processo de cura submersa seguiram as orientações expostas na NBR 5738 (2003). Foram fixados para ambos os traços o teor de argamassa em 68%, o abatimento de tronco de cone ou *slump test* em

15 cm e a relação água/cimento em 0,4. Vale salientar que esse valor de relação água/cimento é próximo aos valores utilizados na maioria das obras em ambiente marítimo. A Tabela 4.1 relaciona a dosagem de cada traço.

Tabela 4.1- Dosagem dos traços desenvolvidos

Material	Unidade	ARI10	POZ
		CP V-ARI	CP IV
Cimento	Kg/m <sup>3</sup>	444	493
Sílica ativa	Kg/m <sup>3</sup>	49	0
Água	Kg/m <sup>3</sup>	197	197
Areia	Kg/m <sup>3</sup>	785	785
Brita 1	Kg/m <sup>3</sup>	925	925
SP(%) *superplastificante	%	2,5	2,5
Relação água/cimento	-	0,4	0,4

(\*): % referente ao peso de material cimentício

Os corpos de prova foram então cortados, utilizando serra circular diamantada resfriada por água, em amostras menores de 10 cm de diâmetro e 4 cm de altura, recebendo para tanto uma nomenclatura com a finalidade de estabelecer facilmente o número do corpo de prova e a qual parte do corpo de prova original a amostra pertencia. Vale ainda destacar que na confecção das amostras o topo e o fundo dos corpos de prova foram removidos. A Figura 3.1 mostra o equipamento utilizado para a separação dos corpos de prova.



Figura 4.1- Serra circular resfriada por água utilizada na confecção das amostras. (Fonte: Autor)

Na identificação das amostras, além do número do traço indicando o tipo de concreto, sendo POZ para o concreto confeccionado com cimento do tipo CP-IV e ARI para o concreto confeccionado com o cimento do tipo CP-V ARI, foram destacados o número do corpo de prova original e a identificação da posição da amostra no corpo de prova original, indo sendo A a D, sendo A o topo e D o fundo. A Figura 3.2 apresenta a representação gráfica da nomenclatura utilizada.

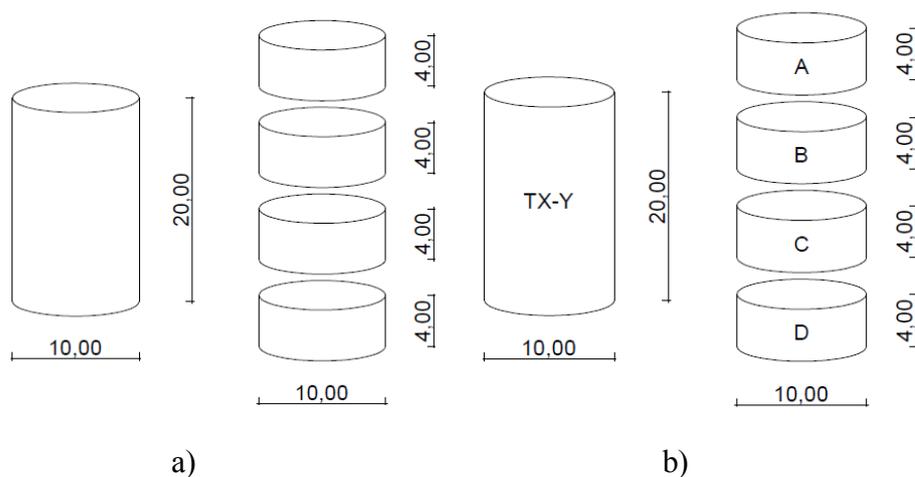


Figura 4.2- a) representação esquemática da separação de um corpo de prova em amostras; b) nomenclatura utilizada para referência. Dimensões em cm. (Fonte: Autor)

#### **4.1.4. Saturação das amostras**

O processo de saturação consiste em submergir as amostras em água destilada saturada com hidróxido de sódio, em ambiente com temperatura controlada, entre 21°C e 23°C. As amostras devem ter um terço de seu volume coberto por água destilada nas primeiras 4 h, dois terços de seu volume nas próximas 4 h, e finalmente devem permanecer submersas durante as 64 h restantes, totalizando 72 h. As amostras devem então ter a constância de massa verificada. A massa de superfície seca de cada amostra é verificada a cada 24 h. A amostra é considerada em constância de massa se, para duas pesagens sucessivas, a massa não varie mais que 0,5%.

Com a constância de massa alcançada, as amostras são depositadas em recipiente com água destilada para fervura. A temperatura de fervura da água deve ser atingida em 30 min, e depois as amostras são fervidas durante 5 h. As amostras são então depositadas em recipiente para armazenamento com água destilada e novamente o processo de pesagem para determinação da constância de massa é executado. Com a constância de massa alcançada, as amostras são então revestidas com camada de no mínimo 1 mm de resina epóxi, seguindo as prescrições de cura do fabricante. Após o processo de cura da resina, uma última determinação da constância de massa é realizado e as amostras então são mantidas em repouso em recipiente contendo água destilada até o início do processo de contaminação.

A Figura 4.3 demonstra os procedimentos para saturação das amostras.

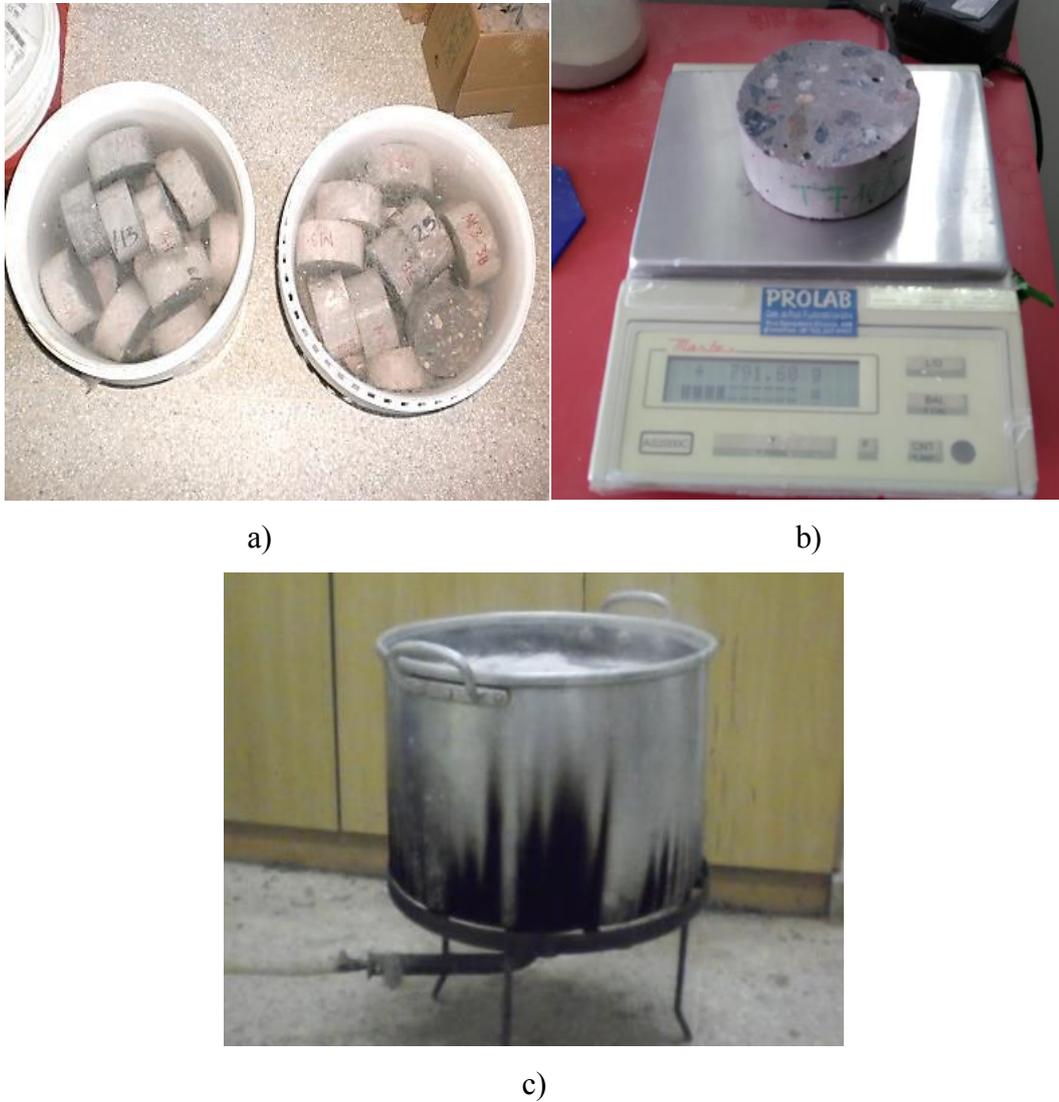


Figura 4.3- Procedimentos para saturação das amostras: a) imersão em água destilada; b) pesagem para determinação da constância de massa; c) Fervura durante 5h. (Fonte: Bandeira,2014)

#### 4.1.5. Revestimento das amostras com resina epóxi

Com a estabilização das amostras, a próxima etapa a ser realizada é o revestimento. Como o método de ensaio é baseado na 2ª lei de Fick, é necessário que o fluxo seja unidirecional. Sendo assim, a amostra deve ser revestida a fim de evitar fluxo multidirecional enquanto submersa na solução de contaminação. Cada amostra é revestida com resina epóxi, fazendo-se a mistura dos

componentes da resina e aplicação com pincel, mantendo somente uma das faces livre, com o subsequente processo de cura executado conforme instruções do fabricante.

Cada amostra foi revestida e mantida em cura pelo período mínimo de 24 h, garantindo assim a impermeabilidade adequada. A Figura 3.4 indica os procedimentos utilizados para o revestimento das amostras.



Figura 4.4- Amostra a) antes do revestimento; b) com revestimento. (Fonte: Autor)

#### 4.1.6. Contaminação com NaCl e armazenamento

Após o período de constância de massa das amostras resinadas, é realizada a contaminação. O procedimento consiste em armazenar as amostras em um recipiente contendo a solução aquosa de NaCl. Devido à limitação normativa do número de amostras por superfície de ataque, optou-se por utilizar um recipiente separado por amostra. Ainda conforme NT BUILD 443 (1995), as amostras foram mantidas suspensas por apoios auxiliares, impedindo contato com o fundo do recipiente com a finalidade de evitar alguma contaminação residual por pressão com o fundo. Os apoios auxiliares desempenham papel especialmente importante no método modificado, visto que uma concentração de solução acima da saturação da água implica em acúmulo de material contaminante no fundo do recipiente.

Para a contaminação, foram preparadas soluções de concentração 0,5 M (29,2 g/dm<sup>3</sup>),

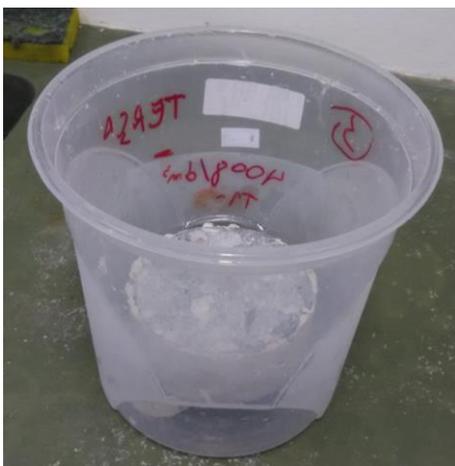
165 g/dm<sup>3</sup> conforme NT BUILD 443 e 400 g/dm<sup>3</sup>. As amostras com concentração 0,5 M e 165 g/dm<sup>3</sup>, utilizadas como referência para comparação, tiveram tempo de contaminação de 90d e 35 d respectivamente, enquanto nas amostras com concentração 400 g/dm<sup>3</sup> os tempos de contaminação foram de 7 d, 14 d, 21 d e 35 d. As amostras foram então identificadas em cada recipiente e mantidas em repouso pelo tempo de contaminação. A Figura 4.5 indica os procedimentos para contaminação das amostras.



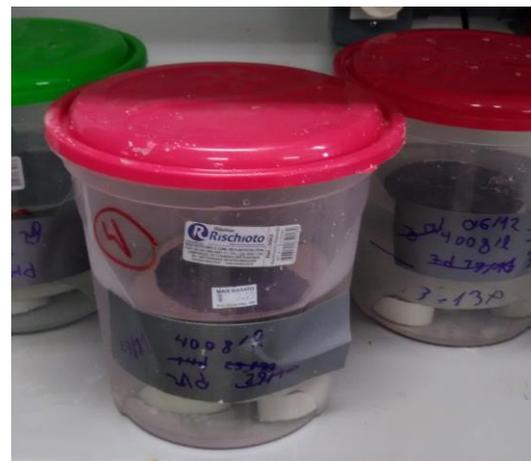
a)



b)



c)



d)

Figura 4.5- Procedimentos para contaminação de amostra revestida: a) pesagem da quantidade de NaCl para atingir concentração desejada; b) preparação dos apoios auxiliares para suporte da amostra; c) adição da amostra ao recipiente com solução; d) armazenamento. (Fonte: Autor)

#### 4.1.7. Extração

Após efetivado o tempo de contaminação das amostras, realiza-se o processo de extração do material para determinação dos perfis de penetração de cloretos. As amostras são retiradas do recipiente de contaminação e procede-se à preparação das mesmas.

A superfície de ataque é limpa removendo qualquer material que possa ter sido depositado durante a contaminação. O processo de limpeza da amostra consiste em uma limpeza superficial inicial com jato de ar comprimido, seguido de uma limpeza na superfície de extração com escova de aço e remoção de qualquer material que tenha sido depositado nos poros da superfície de contaminação. O objetivo da limpeza é evitar que algum contaminante excedente acabe por causar um teor de cloretos falso na primeira camada causado por resíduo superficial de NaCl. A limpeza da superfície é importante para a inclusão da primeira camada na determinação do perfil, por se tratar de um método que analisa perfis de penetração em idades pequenas, com perfis ainda superficiais, sendo que os primeiros pontos exercem uma influência maior ainda sobre o perfil nessa situação.

Em seguida a amostra é colocada em equipamento para extração do material pulverulento. O equipamento consiste de dois anéis de ferro, uma placa de madeira e uma placa de ferro com uma abertura circular no centro. As placas são presas por parafusos, exercendo pressão nos anéis que garantem a fixação da amostra para a execução do processo. A Figura 4.6 apresenta uma representação esquemática do aparelho de fixação da amostra.

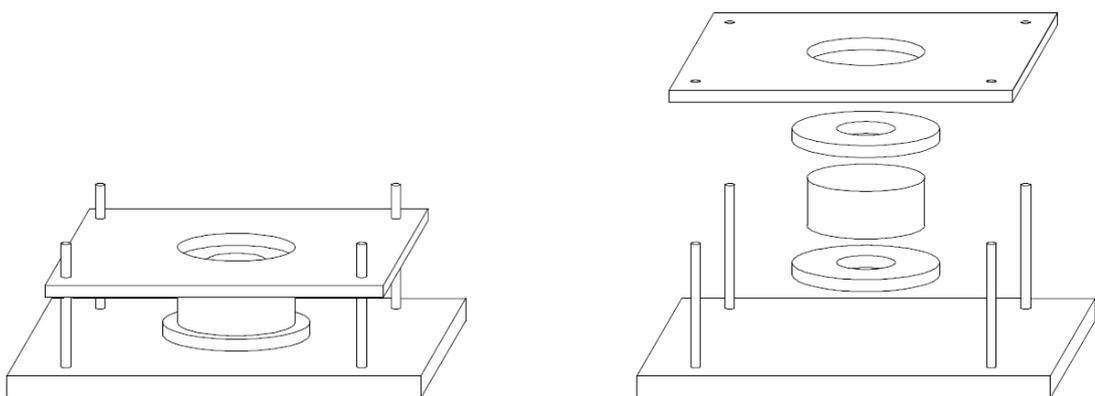


Figura 4.6- Equipamento para fixação de amostra durante processo de extração. (Fonte: Autor)

A extração consiste no desgaste de camadas da amostra, com o desgaste ocorrendo no sentido paralelo à superfície de ataque. Inicialmente, utilizou-se durante a extração 10 camadas de 2 mm cada, porém para perfis mais superficiais (em idades menores), ocorreu a necessidade da

modificação do número de camada para a melhor conformidade dos perfis. Com a modificação, ao todo são extraídas 11 camadas, sendo as duas primeiras camadas de aproximadamente 1 mm de profundidade e as subsequentes com aproximadamente 2 mm de profundidade. O controle da profundidade das camadas se deu com a utilização de um paquímetro, realizando medições em três pontos ao longo do diâmetro da amostra, obtendo a profundidade média de desgaste em cada camada.

Entre cada camada da amostra a superfície de extração é limpa com jato de ar, com a finalidade de garantir a retirada do material pulverulento da camada anterior, evitando resquícios de material depositado.

O material extraído é então armazenado em sacos plásticos para posterior análise e obtenção da configuração do perfil de penetração através de ensaio químico.

A Figura 4.7 mostra os equipamentos utilizados durante o processo de extração.



Figura 4.7- a) materiais e ferramentas utilizados; b) equipamento de fixação das amostras para extração. (Fonte: Bandeira, 2014)

A partir do material extraído executa-se o ensaio de potenciometria com eletrodo de prata/cloreto de prata para a obtenção da quantidade de cloretos por massa de cada camada para a elaboração do perfil de penetração de cloretos. Todos os ensaios de potenciometria foram realizados no Laboratório de Química dos Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

A Figura 4.8 apresenta o procedimento de extração das amostras.

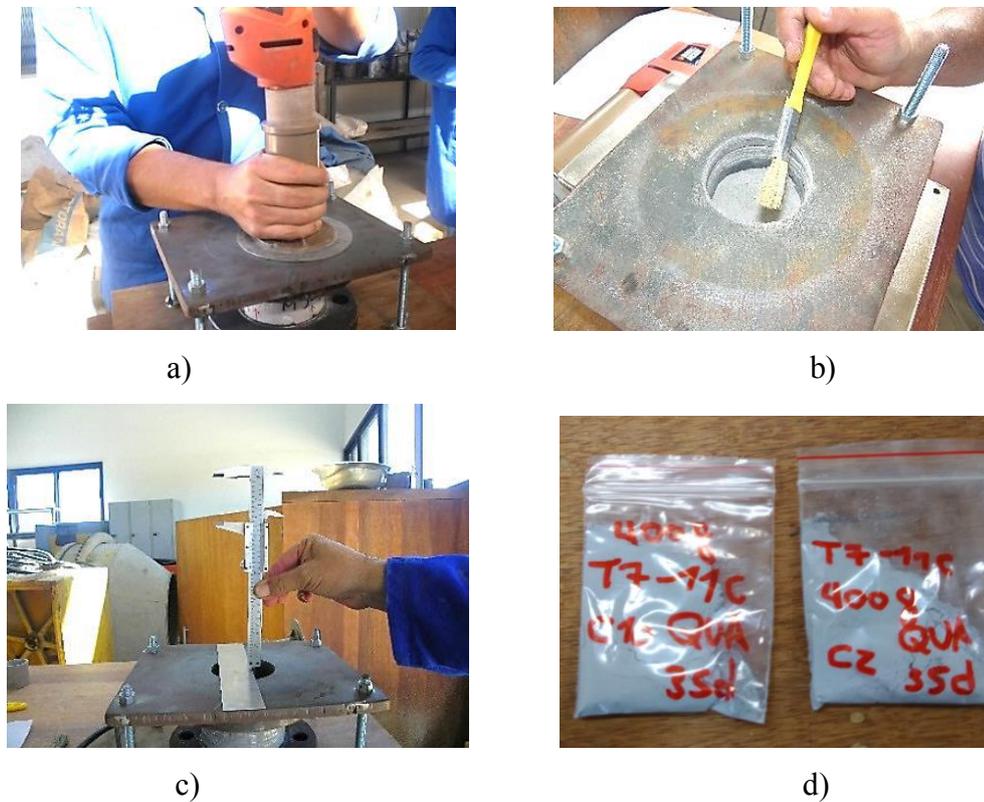


Figura 4.8- Processo de extração das amostras: a )desgaste de camada; b) remoção do material pulverulento; c) controle de profundidade; d)armazenamento do material. (Fonte: Bandeira, 2014)

Inicialmente, o material de cada camada é homogeneizado manualmente, uma massa de 0,5 g a 1,0 g de material é separada para ensaio. O restante é acondicionado e mantido como reserva para repetição em caso de algum erro durante o ensaio. O material é então depositado em recipiente de vidro, pesado e seco em estufa a  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  por no mínimo 24 h.

Após a secagem o material é colocado em balança de precisão para a determinação da massa seca, em seguida cada camada recebe solução de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) que irá desfazer a combinação entre aglomerante e os cloretos através de reação química, promovendo a liberação dos íons. Essa solução de ácido e material pulverulento é posteriormente fervida e resfriada em repouso em água fria. Após, o material de cada camada tem seu pH regulado para o valor  $2 < \text{pH} < 3$  através da adição de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ). Também são adicionados 1,0 ml de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) para que o ensaio tenha eficácia, visto que parte do material extraído tem uma concentração de cloretos muito baixa.

Para a medição potenciométrica, utiliza-se um potenciômetro, que determina a composição

de uma solução mediante potencial medido entre dois eletrodos e adição de nitrato de prata. A partir daí o ensaio segue com leituras no potenciômetro até o registro de picos de medição, onde o ensaio é encerrado para esta amostra com mais três medições para confirmação. O processo é repetido para todas as camadas. Com os resultados, por fórmula matemática, são obtidos os perfis de cloretos.

A Figura 4.9 exemplifica os procedimentos do ensaio de potenciometria.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.9- Procedimento do ensaio de potenciometria: a) determinação da massa seca do material em balança de precisão; b) ataque com ácido nítrico; c) fervura do material; d) potenciômetro utilizado para medição. (Fonte:Autor)

## 4.2. Materiais utilizados e dosagem do concreto

Os ensaios de caracterização que geraram os resultados presentes neste item ocorreram no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Para a

confecção dos traços, foram utilizados os cimentos dos tipos CP-IV e CP-V ARI-RS.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização dos cimentos utilizados durante a pesquisa. A determinação da água de consistência normal segue recomendações da NBR NM 43 (2003), o início e fim de pega segue recomendação da NBR NM 65 (2003), a determinação do módulo de finura segue a NBR 11579 (2012), enquanto a determinação da resistência mecânica a compressão nos períodos de 7 d, 14 d e 28 d segue recomendações da NBR 7215 (1997).

Tabela 4.2- Características dos cimentos estudados

Característica	CP IV	CPV-ARI
Água de consistência normal (%)	33,80	32,80
Início de pega (min)	378	250
Fim de pega (min)	525	450
Módulo de finura (%)	0,38	1,98
Resistência mecânica 7d (MPa)	21,60	33,00
Resistência mecânica 14d (Mpa)	26,00	39,20
Resistência mecânica 28d (Mpa)	32,50	39,70

A Tabela 3.3 apresenta a granulometria do agregado graúdo utilizado e a Tabela 3.4 apresenta a granulometria do agregado miúdo utilizado, conforme NBR NM 248 (2003).

Tabela 4.3- Granulometria do agregado miúdo

Granulometria		
Peneira		Peso (g)
número	abertura	
3/8	9,5	
4	4,8	1,57
8	2,4	26,68
16	1,2	124,89
30	0,6	160,1
50	0,3	132,17
100	0,15	45,9
200	0,075	5,92
Resíduo		2,29
soma		499,52

Tabela 4.4- Granulometria do agregado graúdo

Granulometria		
Peneira		Peso (g)
número	abertura	
2	50	
1 1/2	38	
1	25	
3/4	19	
1/2	12,7	1861,4
3/8	9,5	952,7
4	4,8	1335,91
8	2,4	2,57
16	1,2	0,52
30	0,6	0,49
50	0,3	0,44
100	0,15	0,75
Resíduo		5,09
soma		4159,87

## 5. RESULTADOS E ANÁLISE

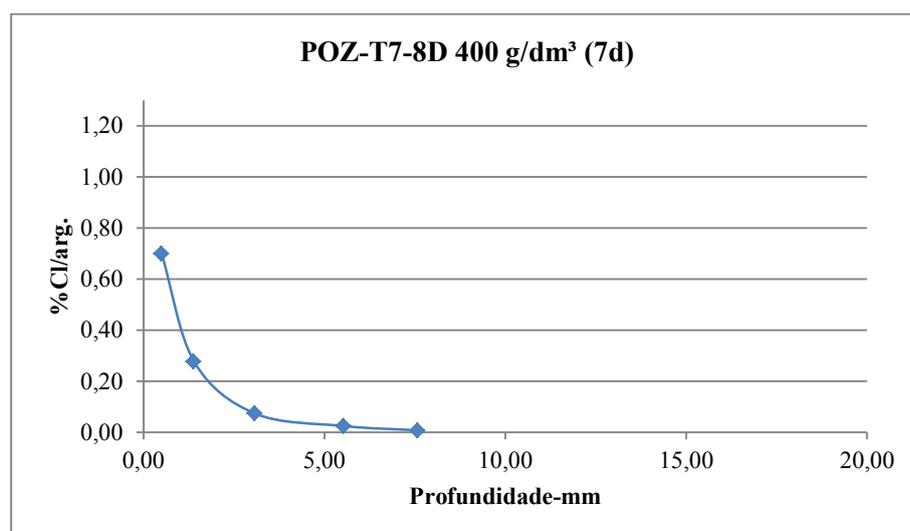
### 5.1. Teor de cloretos

#### 5.1.1. Resultados

A partir dos resultados obtidos no desenvolvimento experimental deste trabalho, determinou-se os gráficos dos perfis de concentração de cloretos para cada traço e cada intervalo de tempo.

Para o concreto POZ-T7, foram elaborados perfis de penetração de duas amostras em cada idade não normatizada e em cada traço, sendo os resultados em idades normatizadas servindo como base comparativa. Com a finalidade de aumentar a base de dados para uma análise mais eficaz, executou-se os ensaios normatizado e consagrado, assim como o ensaio proposto em um segundo traço de concreto, dessa vez executado com cimento do tipo CPV ARI-RS, com adição de 10% de microssílica, o que confere um desempenho melhor frente ao ataque de cloretos mas ainda assim inferior quando comparado ao concreto executado com o cimento Portland pozolânico. A seguir, são apresentados os perfis de penetração encontrados para o traço POZ-T7, bem como os perfis de penetração provenientes dos ensaios realizados no concreto ARI10-T3.

A Figura 7.1 apresenta os perfis de penetração para a idade de 7 d.



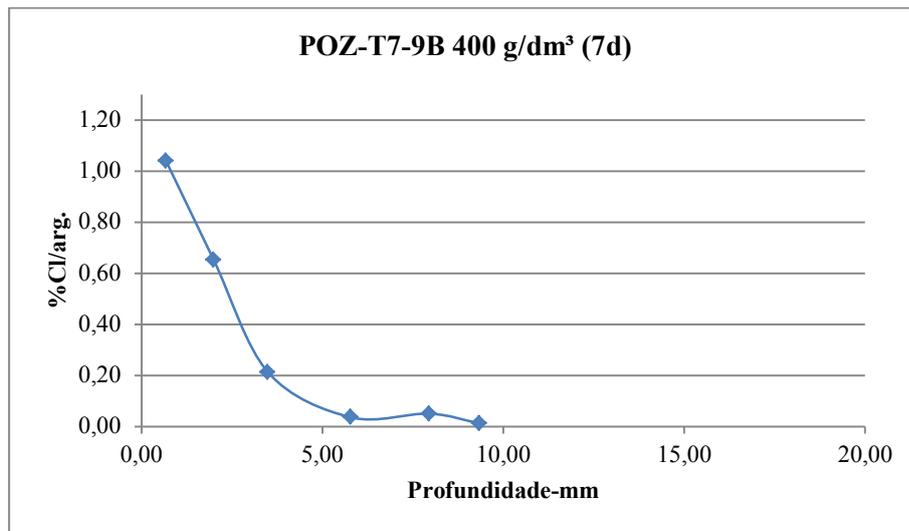
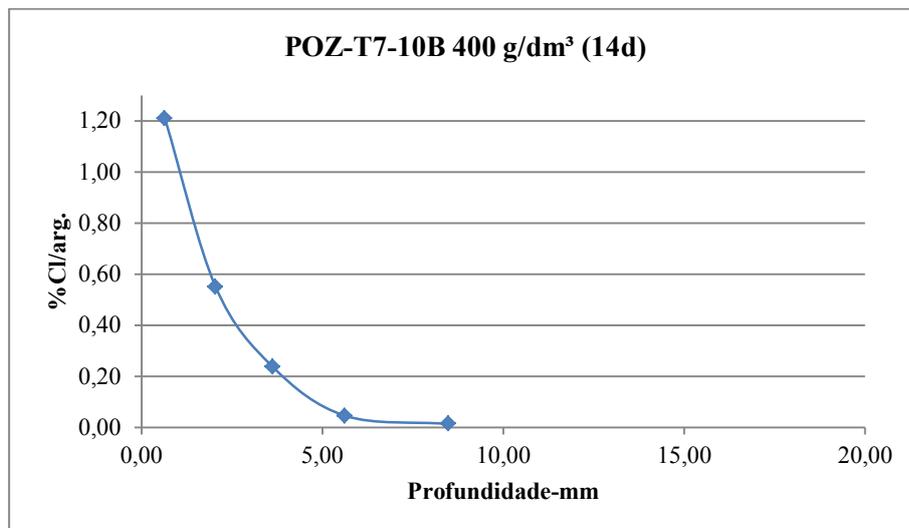


Figura 5.1-Perfis de penetração do concreto POZ-T3 para a idade de 7d.(Fonte:Autor)

A Figura 5.2 apresenta os perfis de penetração para a idade de 14 d.



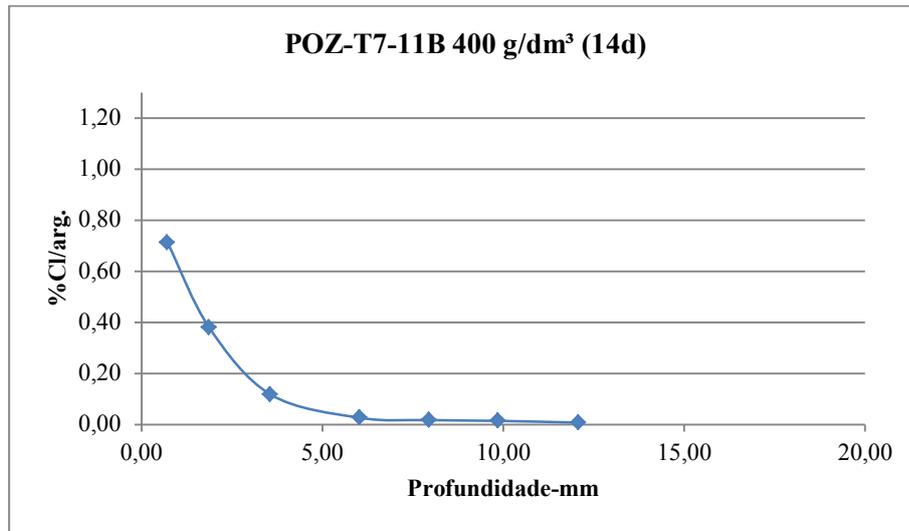
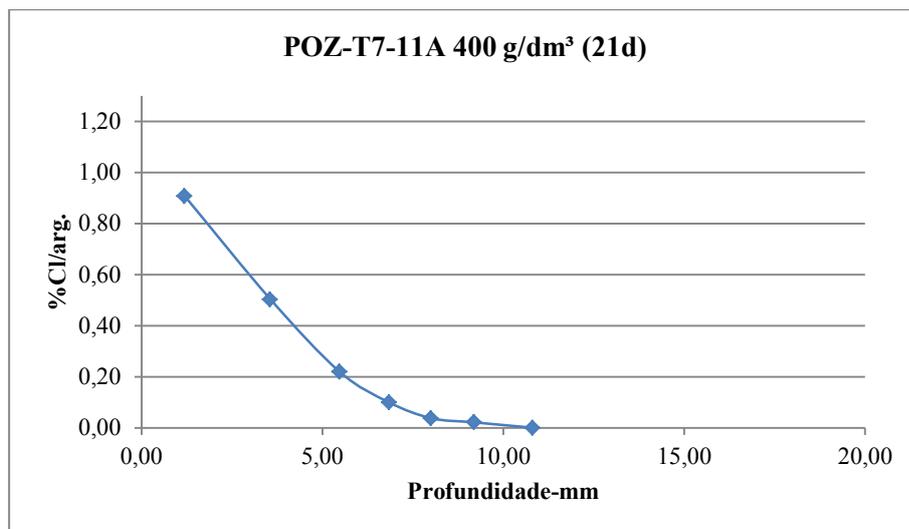


Figura 5.2- Perfis de penetração do concreto POZ-T3 para a idade de 14d. (Fonte: Autor)

A Figura 5.3 apresenta os perfis de penetração obtidos para a idade de 21 d.



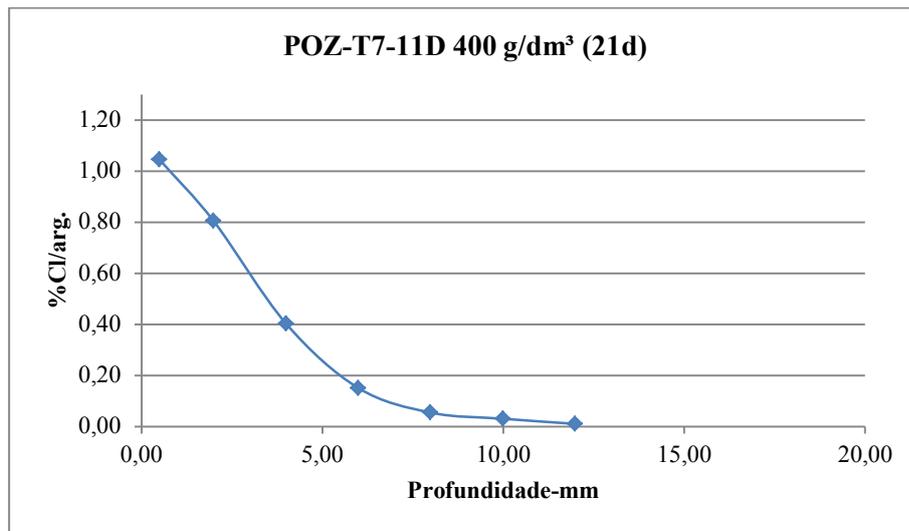


Figura 5.3- Perfis de penetração do concreto POZ-T3 para a idade de 21 d. (Fonte:Autor)

A Figura 5.4 apresenta o perfil de penetração para a idade de 35 d.

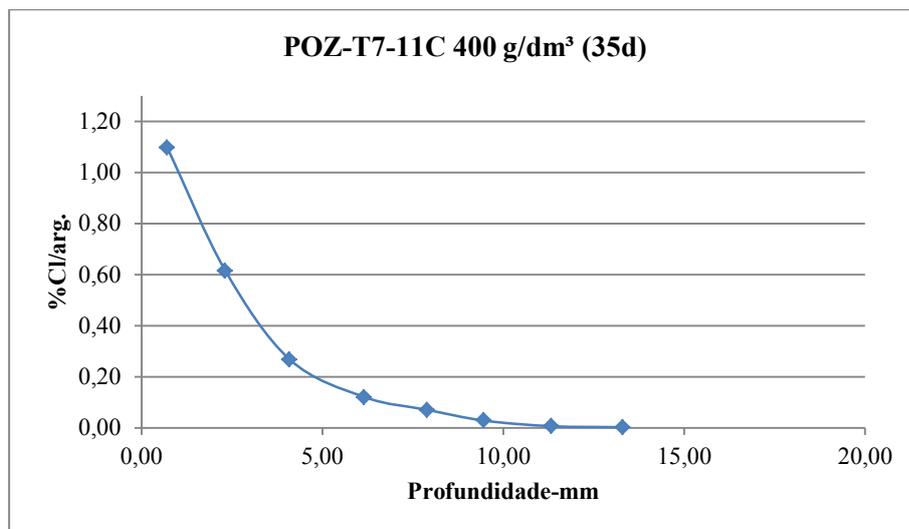


Figura 5.4- Perfil de penetração do concreto POZ-T3 para a idade de 35d; (Fonte: Autor)

A Figura 5.5 apresenta o perfil de penetração para o ensaio de acordo com a NT BUILD 443 (1995) para a idade de 35d.

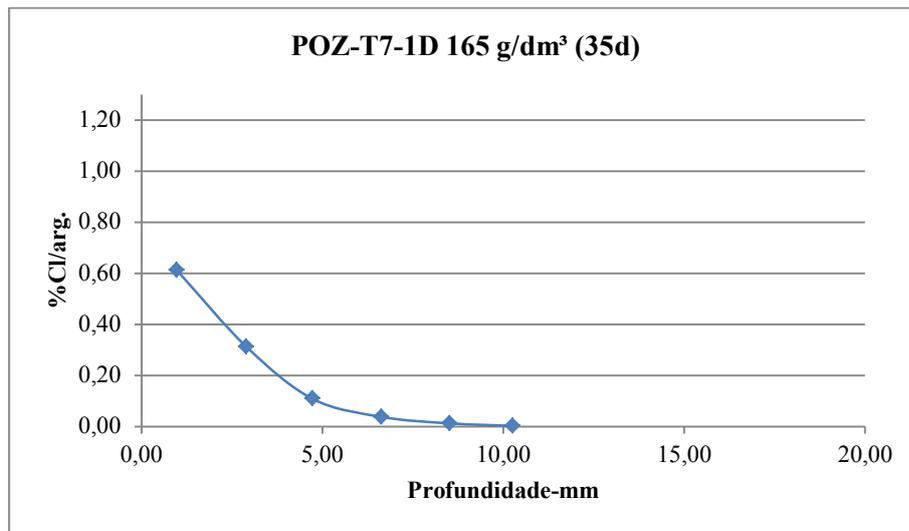


Figura 5.5-Perfil de penetração do concreto POZ-T3 para ensaio normalizado NT BUILD 443(1995). (Fonte: Autor)

A Figura 5.5 apresenta o perfil de penetração obtido a partir do ensaio consagrado com concentração de 0,5 M.

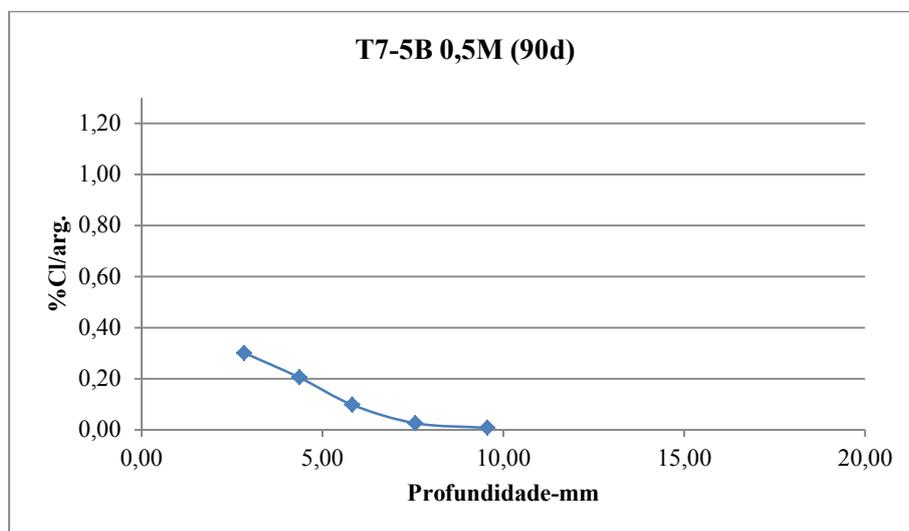


Figura 5.6-Perfil de penetração do concreto POZ-T3 utilizando ensaio de difusão interna com concentração de 0,5M e tempo de contaminação de 90 d. (Fonte: Autor)

A seguir, são apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados no traço ARI10-T3. A Figura 5.7 apresenta os perfis de penetração para a idade de 7d.

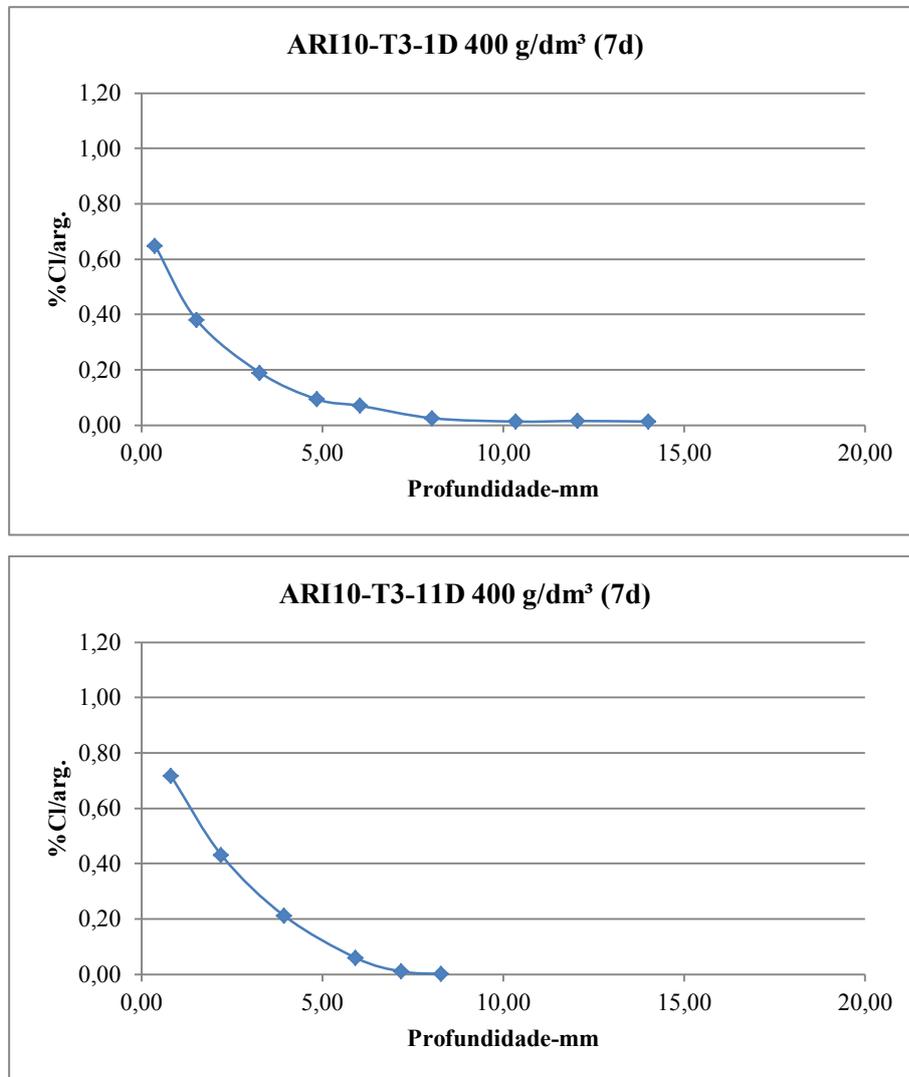


Figura 5.7- Perfis de penetração do concreto ARI10-T3 para a idade de 7 d. (Fonte:Autor)

A Figura 5.8 apresenta os perfis de penetração para a idade de 14 d.

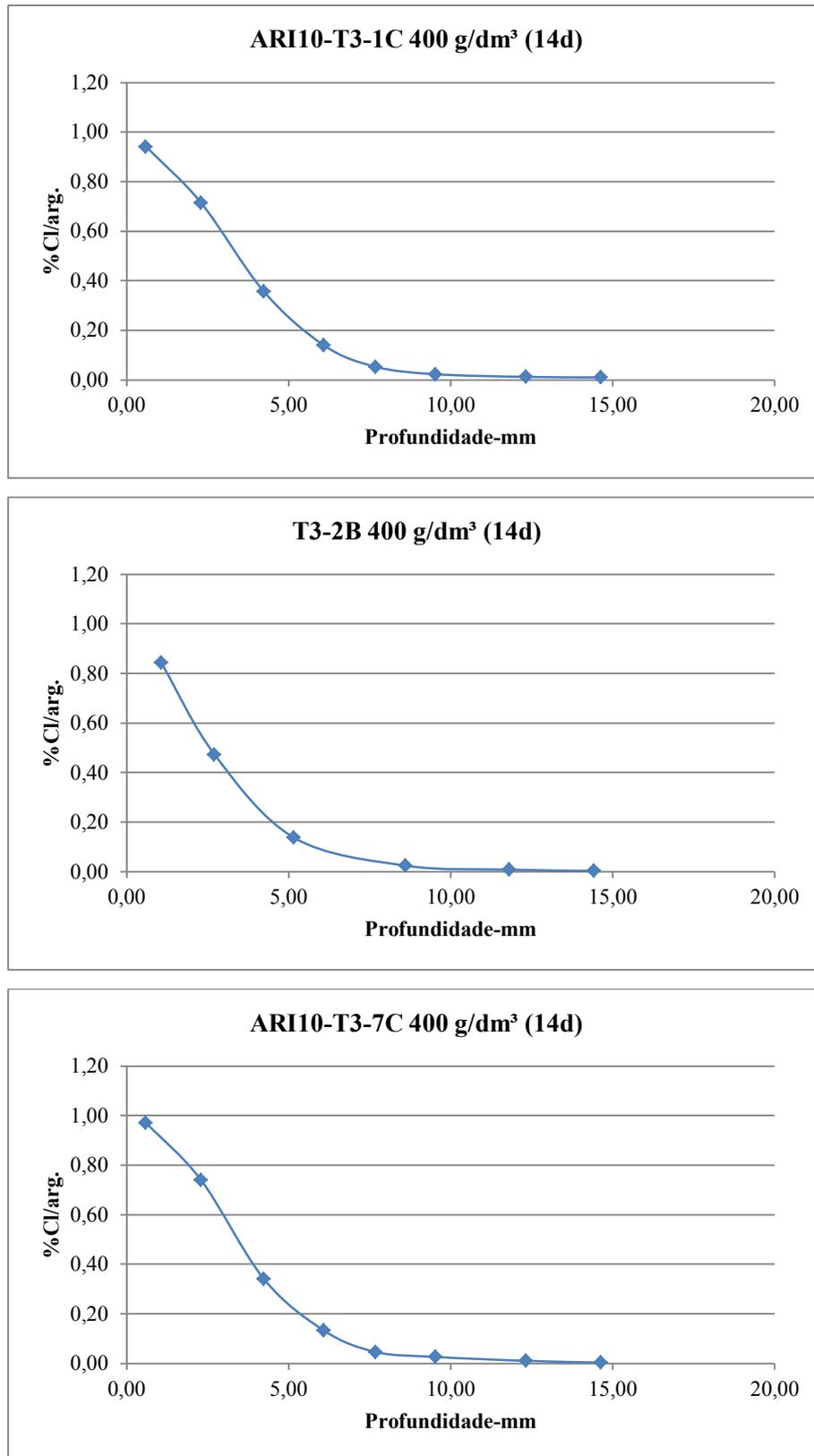


Figura 5.8- Perfis de penetração do traço ARI10-T3 para a idade de 14 d. (Fonte:Autor)

A Figura 5.9 apresenta o perfil de penetração para o ensaio normatizado da NT BUILD 443 (1995) para o concreto ARI10-T3.

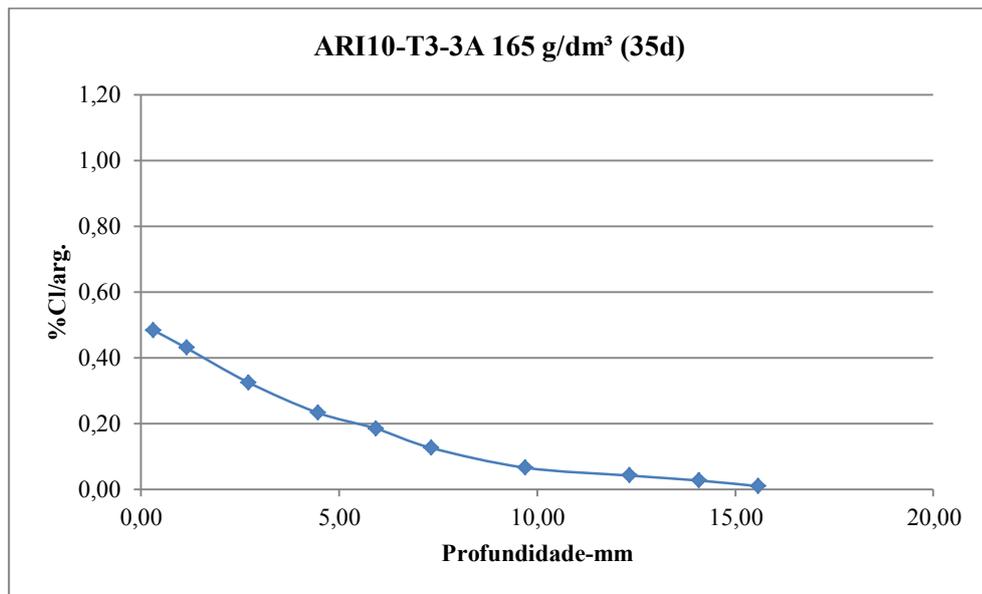


Figura 5.9- Perfil de penetração para o concreto ARI10-T3 segundo procedimento descrito na NT BUILD 443 (1995).(Fonte:Autor)

A Figura 5.10 apresenta o perfil de penetração de cloretos segundo ensaio consagrado com concentração de 0,5 M.

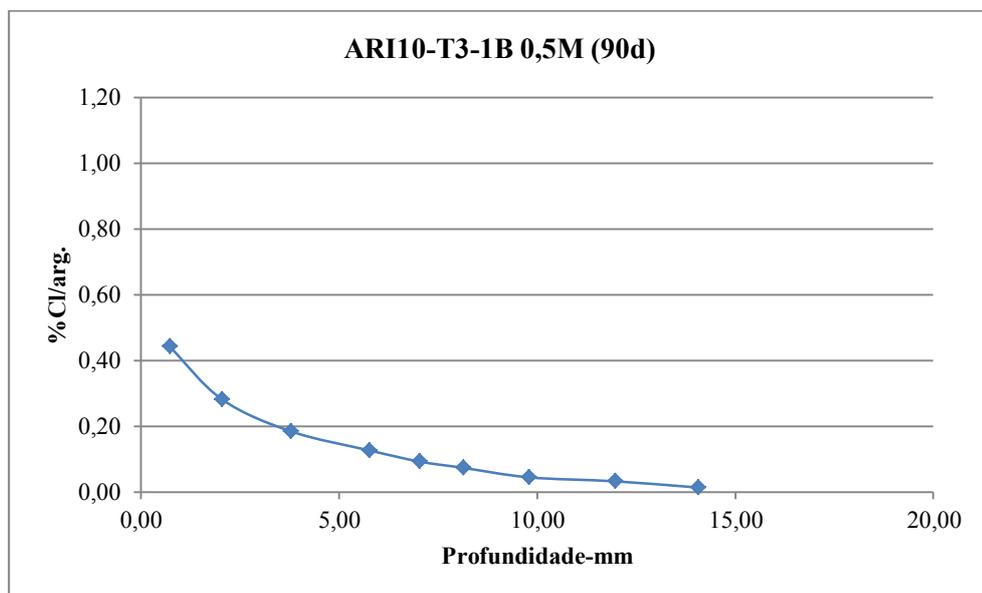


Figura 5.10-Perfil de penetração para o concreto ARI10-T3 em ensaio 0,5M. (Fonte:Autor)

### 5.1.2. Análise dos resultados

Para o melhor entendimento do desenvolvimento dos perfis com o passar do tempo e a comparação preliminar dos métodos, a Figura 5.11 apresenta os pontos coletados de todos os ensaios do traço POZ-T7, e a Figura 5.12 apresenta a configuração dos perfis extraídos durante os ensaios.

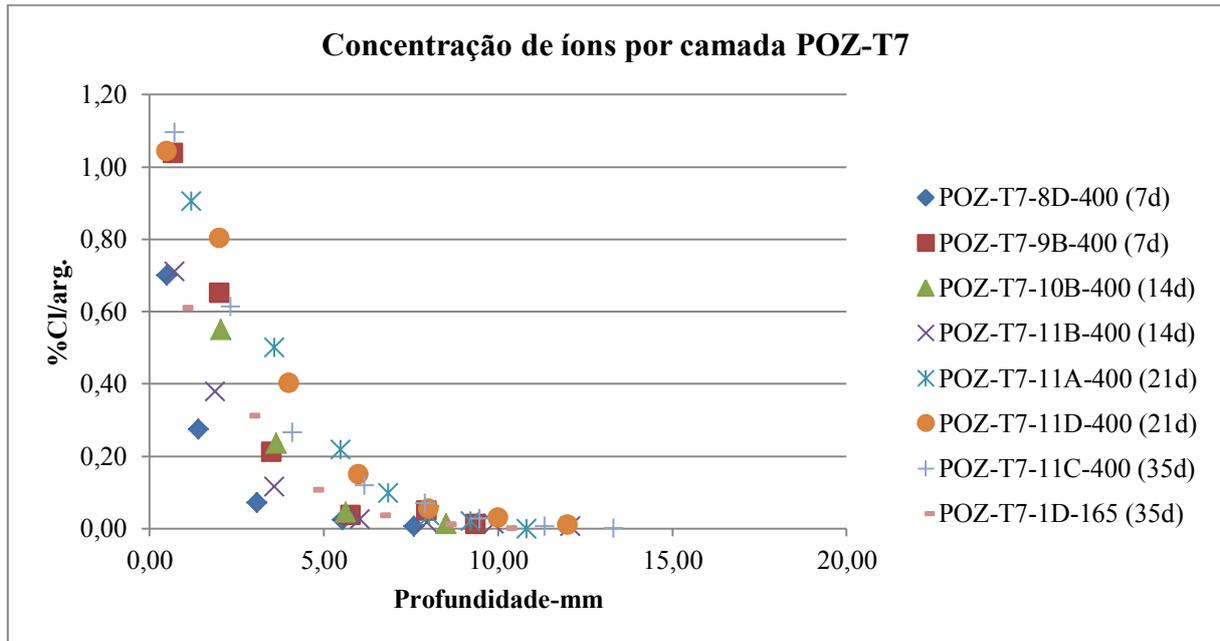


Figura 5.11- Concentração de cloretos com a profundidade.(Fonte:Autor)

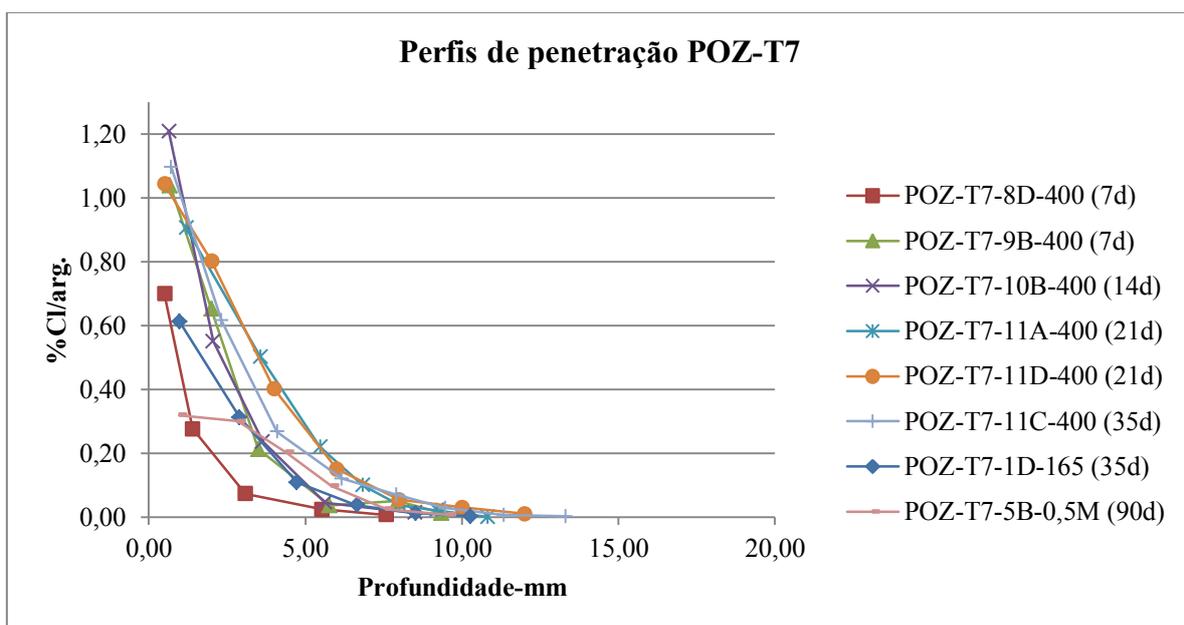


Figura 5.12- Perfis de penetração de cloretos POZ-T7. (Fonte:Autor)

Com a finalidade de analisar melhor o comportamento do concreto frente o ensaio estudado, fora, elaborados perfis médios de cada ensaio em idades inferiores. O resultado é demonstrado na Fig. 5.13.

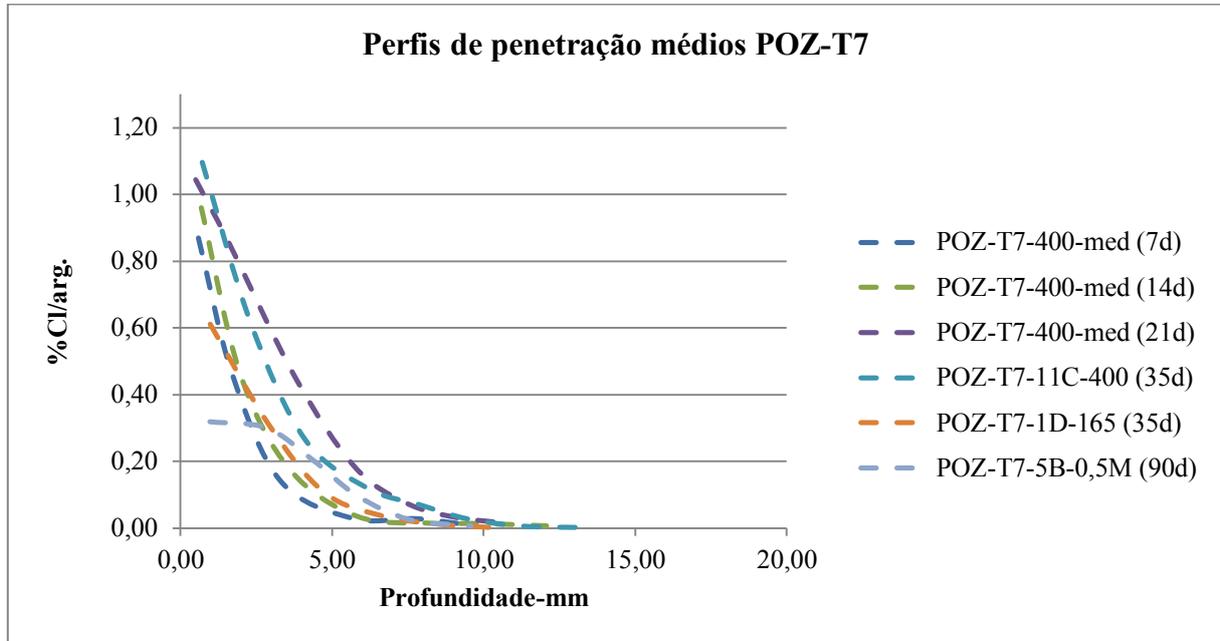


Figura 5.13-Perfis de penetração médios para o concreto POZ-T7. (Fonte:Autor)

A Figura 5.14 apresenta a concentração de cloretos com a profundidade para as amostras do concreto ARI10-T3, assim como a Figura 5.15 demonstra os perfis encontrados para as amostras do do mesmo concreto. A Figura 5.16 apresenta os perfis de penetração médio para o concreto ARI10-T3.

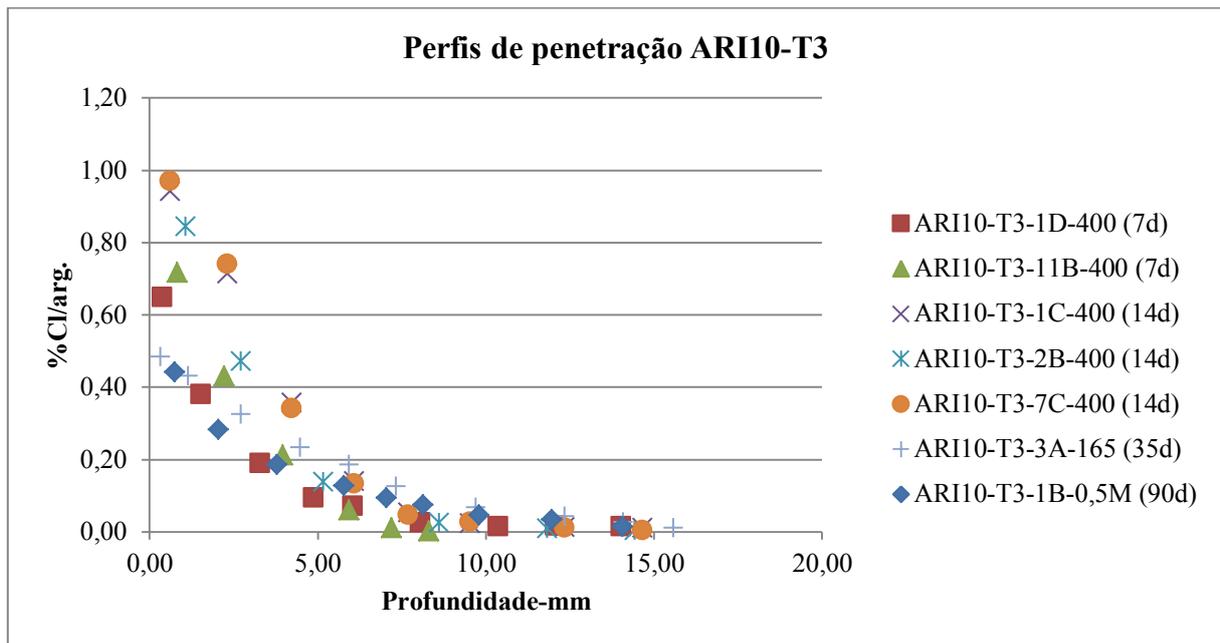


Figura 5.14- Concentração de cloretos com a profundidade para o concreto ARI10-T3. (Fonte:Autor)

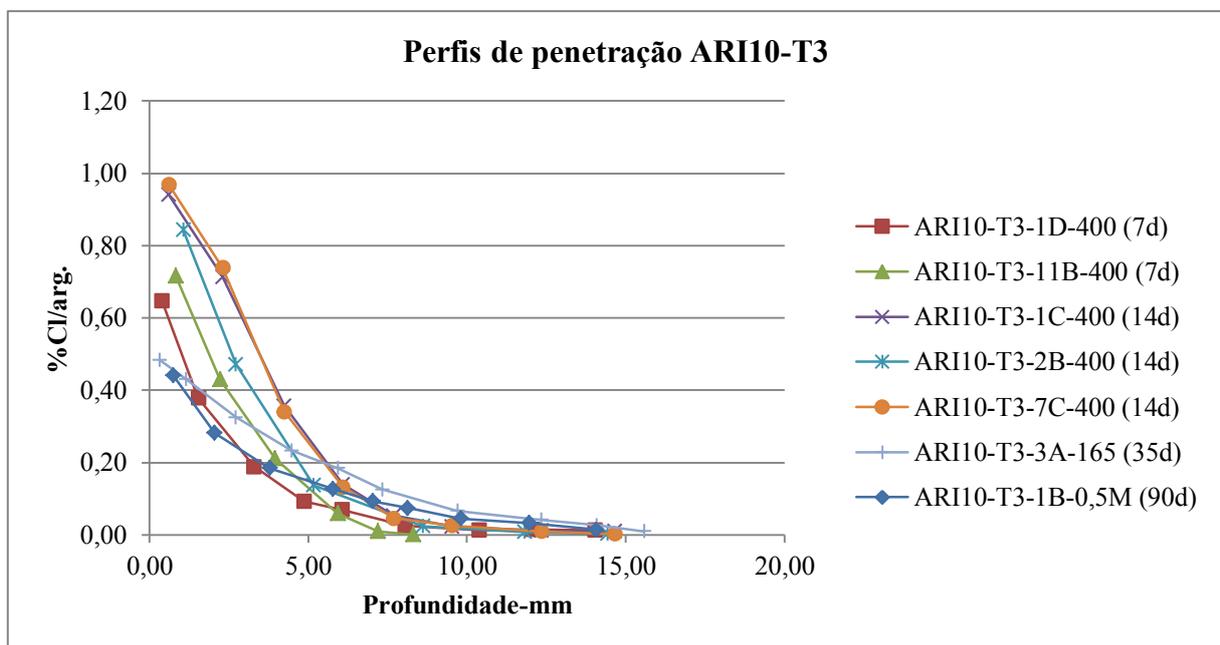


Figura 5.15- Perfis de penetração para o concreto ARI10-T3. (Fonte:Autor)

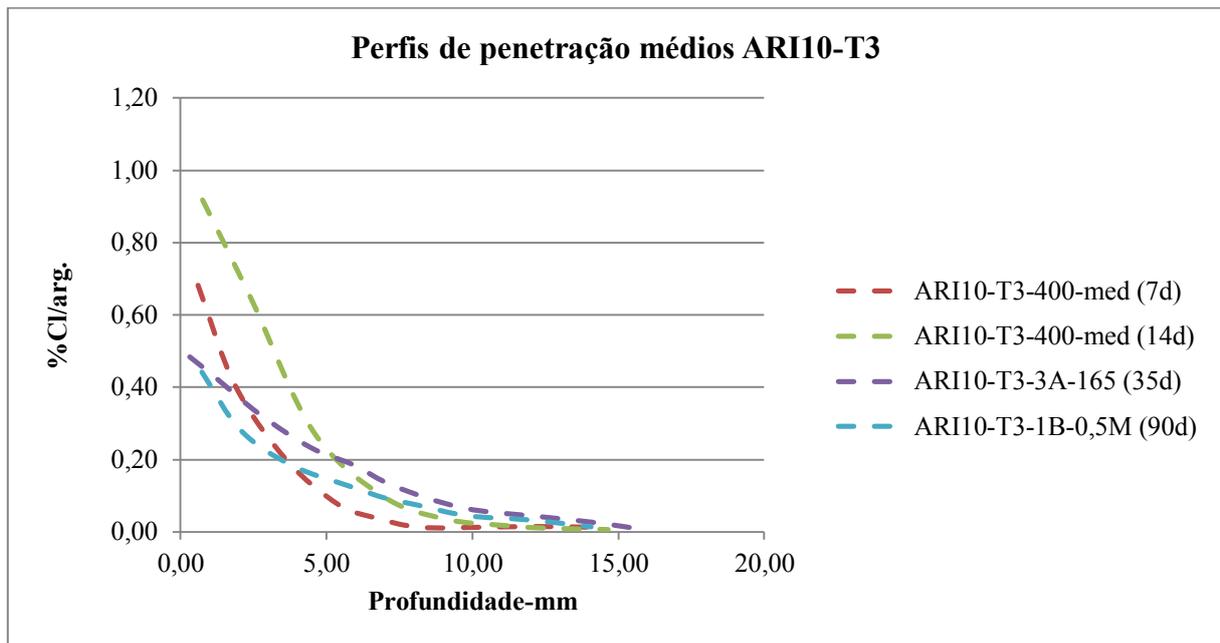


Figura 5.16- Perfis de penetração médios para o concreto ARI10-T3. (Fonte: Autor)

A Figura 5.17 apresenta os perfis teóricos obtidos para as amostras do concreto POZ-T7 e a Figura 5.18 apresenta os perfis teóricos médios do mesmo concreto para as diferentes idades e diferentes ensaios estudados.

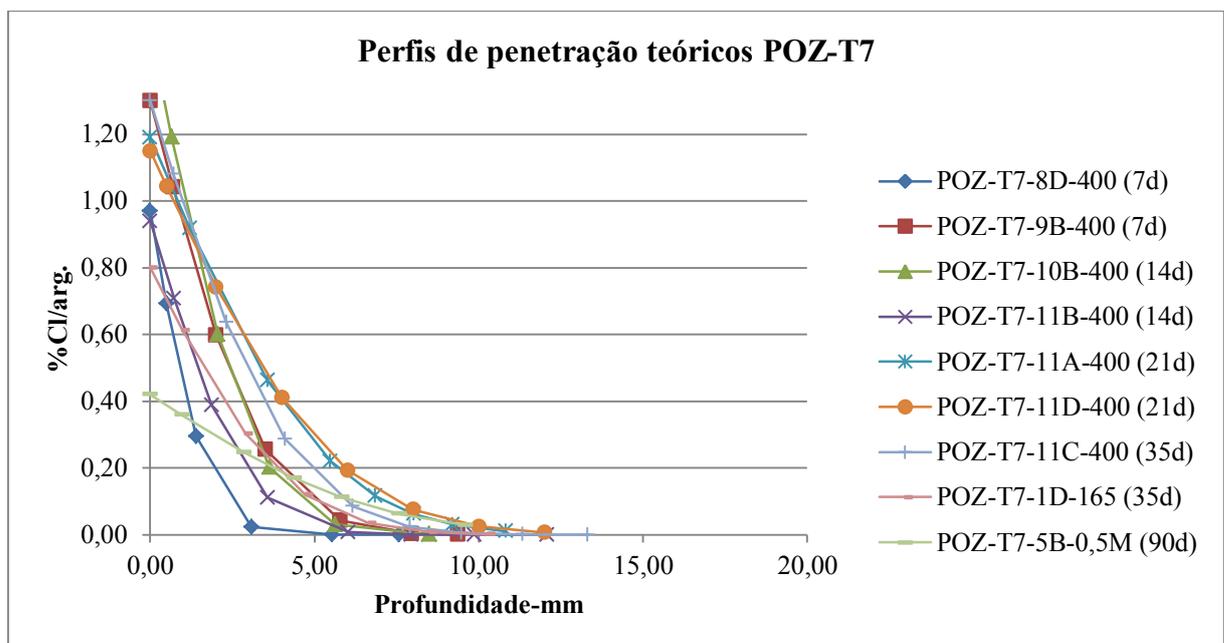


Figura 5.17- Perfis de penetração teóricos do concreto POZ-T7. (Fonte: Autor)

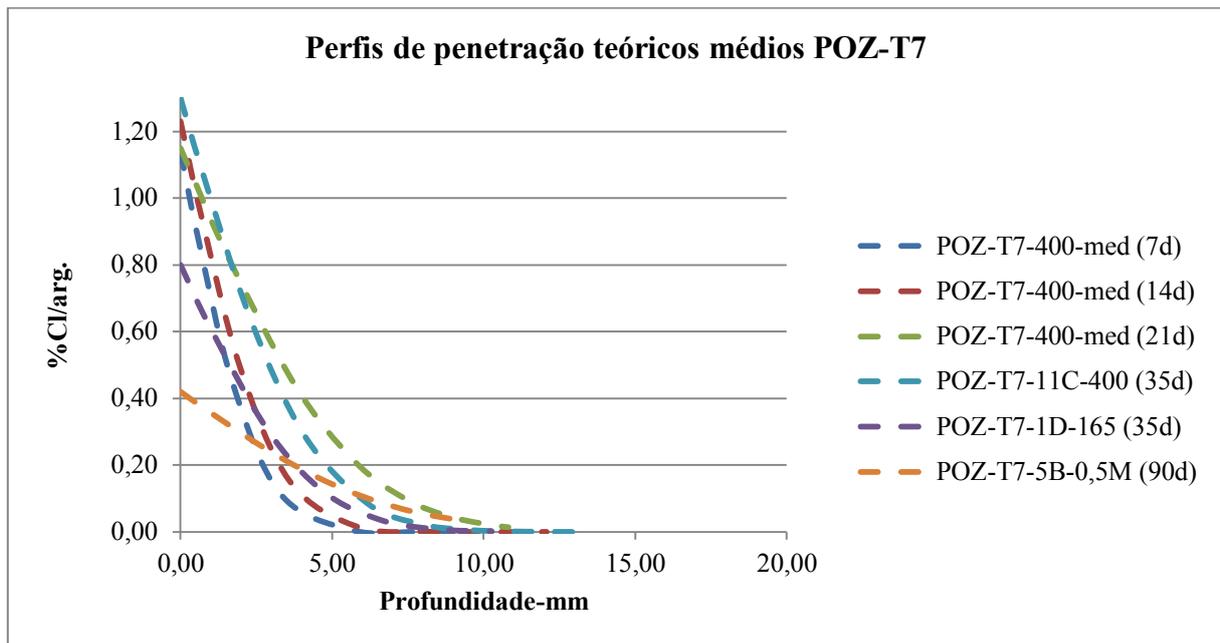


Figura 5.18- Perfis de penetração teóricos médios para o concreto POZ-T7. (Fonte: Autor)

A Figura 5.19 apresenta os perfis teóricos obtidos para as amostras do concreto ARI10-T3 e a Figura 5.20 apresenta os perfis teóricos médios do mesmo concreto para as diferentes idades e diferentes ensaios estudados.

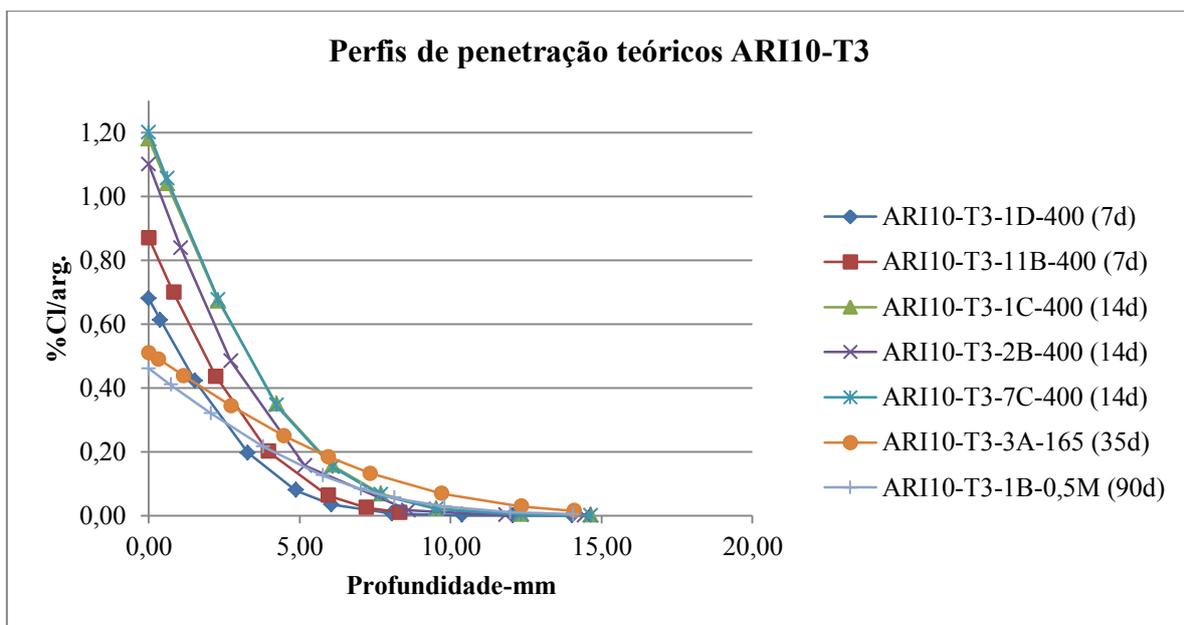


Figura 5.19- Perfis de penetração teóricos para o concreto ARI10-T3. (Fonte: Autor)

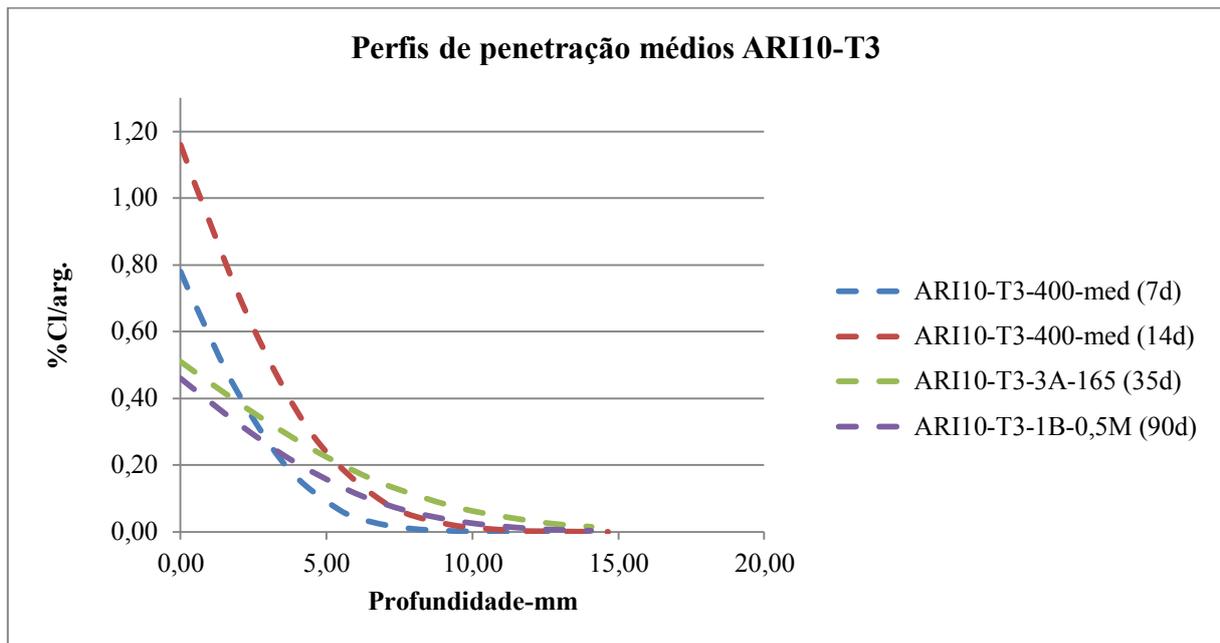


Figura 5.20- Perfis de penetração médios para o concreto ARI10-T3. (Fonte: Autor)

Ao analisar os perfis teóricos médios, é possível observar uma tendência à estabilização da concentração superficial para o concreto POZ-T7 com relação ao ensaio proposto. Tendo em vista que o cimento Portland pozolânico gera uma rede de poros menos interligada na pasta de cimento endurecido, a tendência à estabilização da concentração superficial indica uma adequação ao modelo tradicional da solução da 2ª lei de Fick com concentração superficial e coeficiente de difusão constantes. Por outro lado, os ensaios executados no concreto ARI10-T3 apresentaram variação considerável na concentração superficial.

## 5.2. Validação do processo de limpeza da superfície de ataque

### 5.2.1. Análise

Neste item, avalia-se a eficiência do processo de limpeza da superfície de ataque da amostra antes do processo de extração em camadas para determinação do perfil de penetração. O aproveitamento da primeira camada de material implica em uma melhor conformidade para perfis mais superficiais. Para isso, nos perfis onde a extração consistiu de duas camadas mais superficiais de aproximadamente 1 mm de espessura, executou-se o ajuste por mínimos quadrados considerando

a camada superficial e desconsiderando a camada superficial, para avaliar se a consideração da camada com limpeza implica em uma diferença significativa no coeficiente de difusão da amostra.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados da análise da limpeza, demonstrando os resultados e a diferença percentual entre os mesmos perfis para a concentração superficial e o coeficiente de difusão.

Tabela 5.1- Comparação de Cs e D para perfis de diferentes idades considerando e desconsiderando o primeiro ponto do ensaio

Ensaio	Amostra	Idade (dias)	Primeiro ponto	Cs (%/m. conc.)	Dif. (%)	D ( $10^{-6}$ mm <sup>2</sup> /s)	Dif. (%)
400 g/dm <sup>3</sup>	POZ-T7-8D	7	Considerado	1,53	64,75	0,97	49,48
			Desconsiderado	4,34		0,49	
400 g/dm <sup>3</sup>	POZ-T7-11B	14	Considerado	0,94	2,13	2,16	1,85
			Desconsiderado	0,92		2,20	
400 g/dm <sup>3</sup>	POZ-T7-11D	21	Considerado	1,17	2,56	4,96	3,02
			Desconsiderado	1,20		4,81	
165 g/dm <sup>3</sup>	POZ-T7-1D	35	Considerado	0,80	1,25	1,79	1,12
			Desconsiderado	0,81		1,77	
0,5M	POZ-T7-5B*	90	Considerado	0,42	7,14	1,75	5,14
			Desconsiderado	0,45		1,66	
400 g/dm <sup>3</sup>	ARI10-T3-11D	7	Considerado	0,87	1,15	8,99	0,11
			Desconsiderado	0,86		9,00	
400 g/dm <sup>3</sup>	ARI10-T3-1C	14	Considerado	1,18	4,24	6,77	1,62
			Desconsiderado	1,23		6,66	
165 g/dm <sup>3</sup>	ARI10-T3-3A	35	Considerado	0,51	3,92	6,95	3,60
			Desconsiderado	0,49		7,20	
0,5M	ARI10-T3-1B	90	Considerado	0,46	8,70	1,76	14,20
			Desconsiderado	0,42		2,01	

(\*): o perfil resultante apresentou valores que demonstram um erro na execução do ensaio

Analisando as regressões para as idades superiores a 7 d, as diferenças nos valores da concentração superficial e no coeficiente de difusão obtidos para cada amostra não são significativas, chegando a no máximo 14,20 %, demonstrando que a consideração do primeiro ponto com o processo de limpeza da superfície de ataque da amostra não demonstra diferença significativa.

Aliado a esse fato, Camacho (2014) obteve ao executar ensaios de difusão pelo método desenvolvido por Guimarães e Helene (2001), sem o processo de limpeza, valores altos na camada superficial da amostra, sendo levado a descartar a camada superficial das amostras. Isso corrobora

com a validação do processo para o aproveitamento da primeira camada em perfis de penetração mais superficiais.

Para o melhor entendimento dos resultados obtidos, são apresentados a seguir os perfis experimental e teórico dos ensaios considerados utilizando o primeiro ponto da extração, e o mesmo perfil teórico e uma nova regressão numérica sem a utilização do primeiro ponto para idades superiores a 7 d e para ambos os concretos desenvolvidos.

A Figura 5.21 apresenta o perfil da amostra POZ-T7-11B considerando o primeiro ponto, enquanto a Figura 5.22 apresenta a mesma amostra desconsiderando o primeiro ponto.

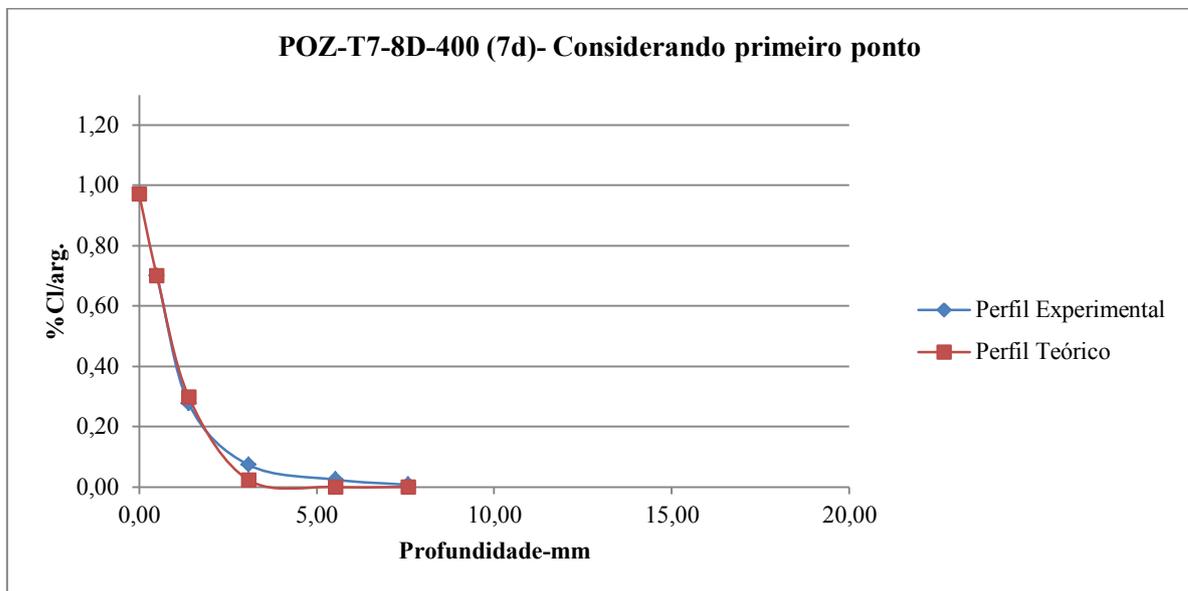


Figura 5.21- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-8D considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

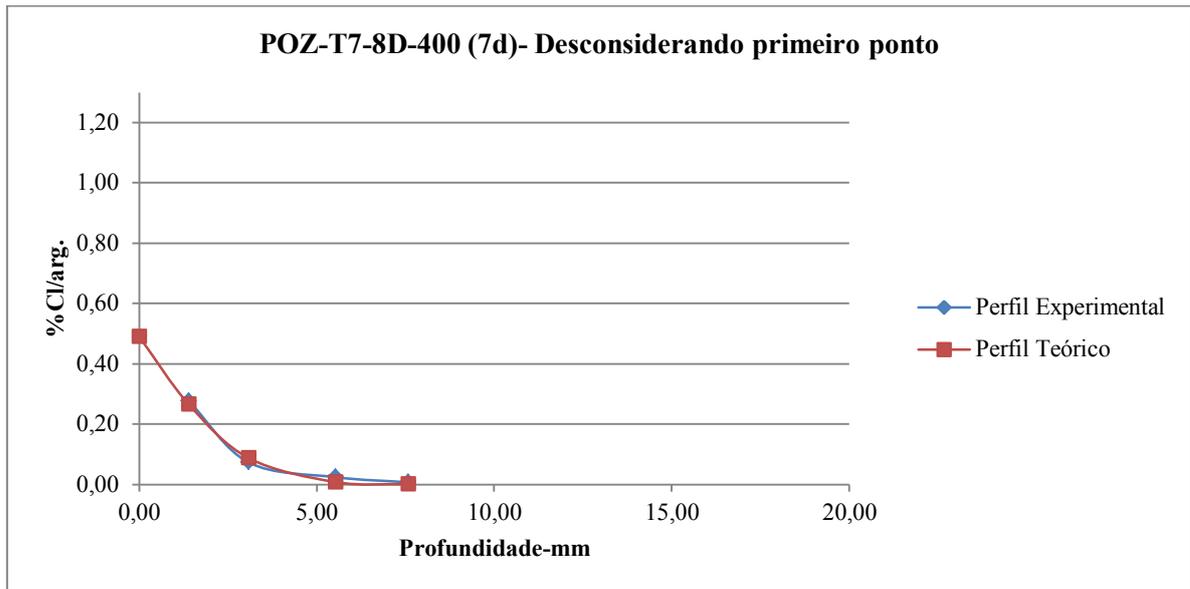


Figura 5.22- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-8D desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

A Figura 5.23 apresenta o perfil da amostra POZ-T7-11B considerando o primeiro ponto, enquanto a Figura 5.24 apresenta a mesma amostra desconsiderando o primeiro ponto.

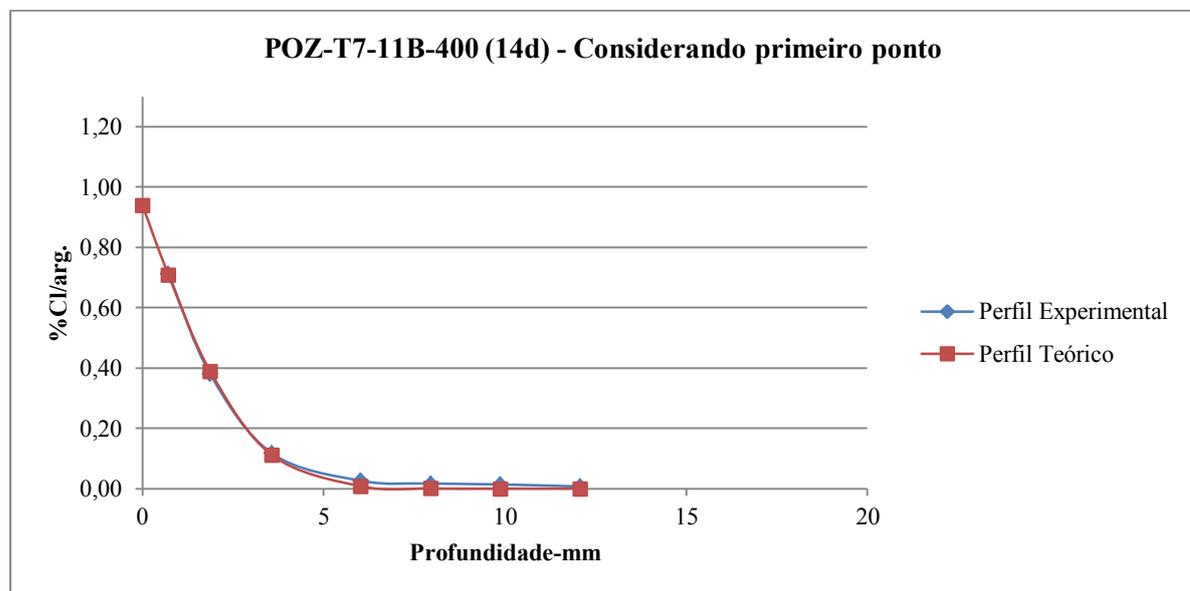


Figura 5.23- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-11B considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

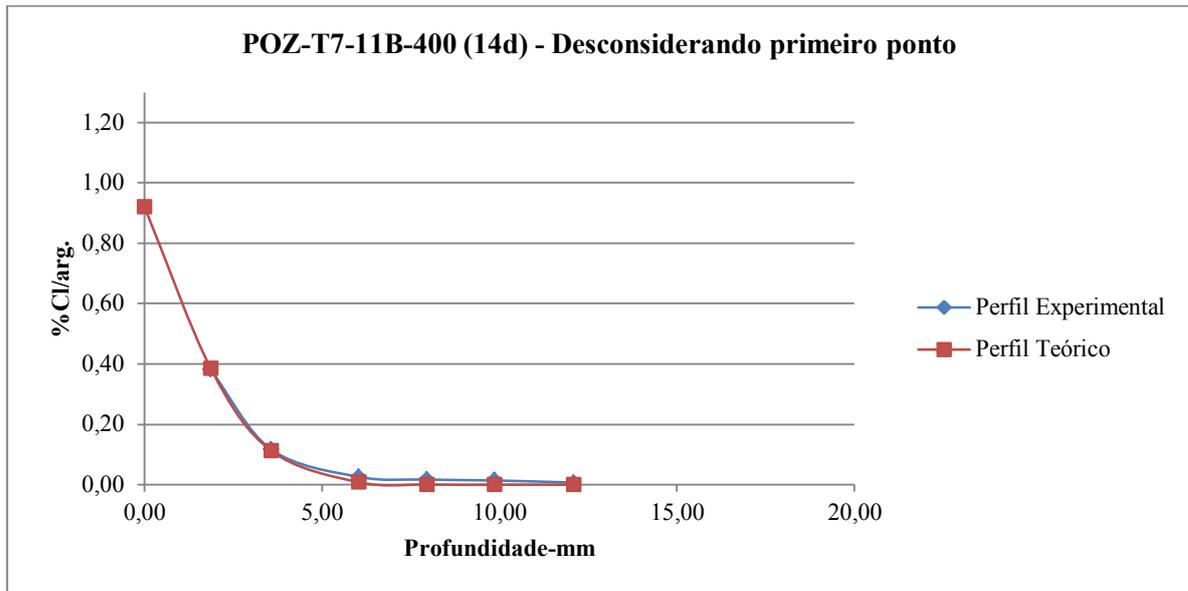


Figura 5.24- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-11B desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

A Figura 5.25 apresenta o perfil da amostra POZ-T7-11D considerando o primeiro ponto, enquanto a Figura 5.26 apresenta a mesma amostra desconsiderando o primeiro ponto.

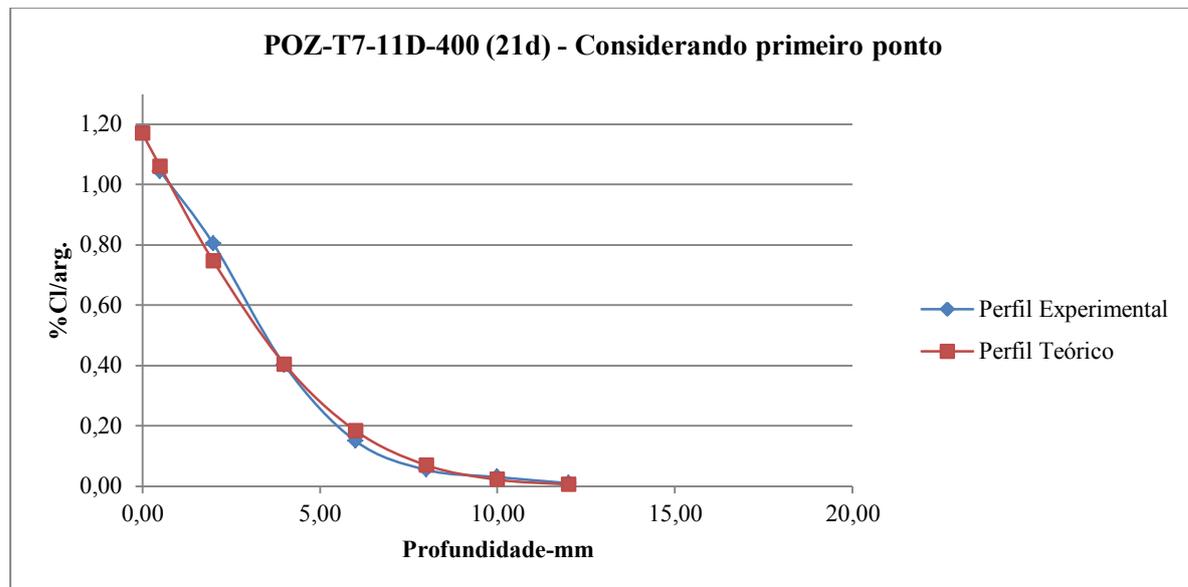


Figura 5.25- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-11D considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

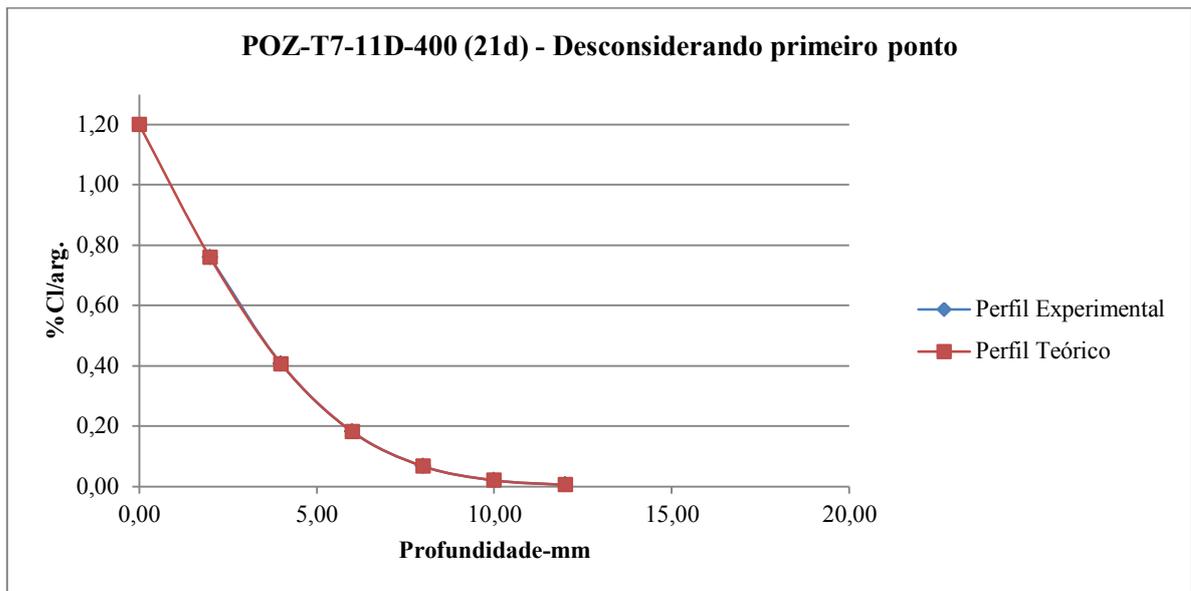


Figura 5.26- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-11D desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

A Figura 5.27 apresenta o perfil da amostra POZ-T7-1D considerando o primeiro ponto, enquanto a Figura 5.28 apresenta a mesma amostra desconsiderando o primeiro ponto.

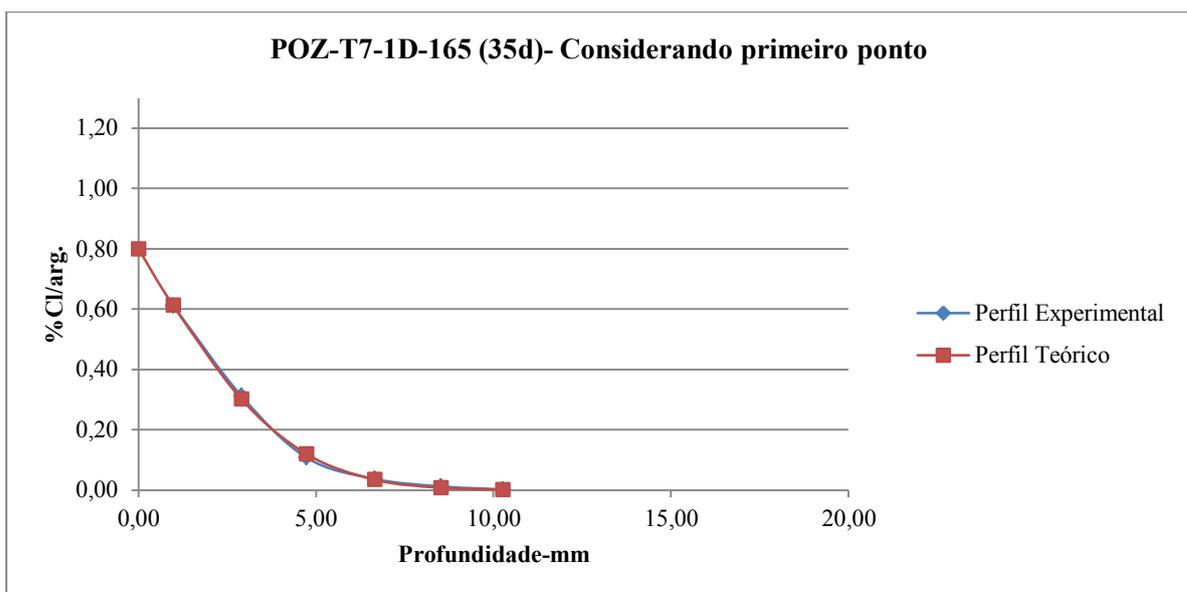


Figura 5.27- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-1D considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

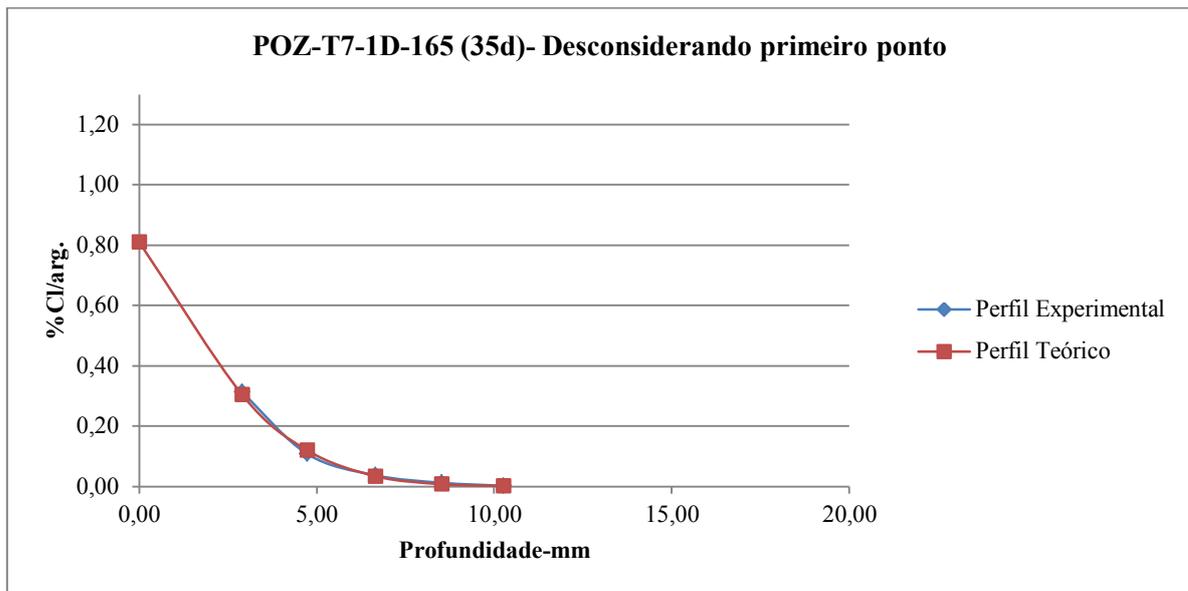


Figura 5.28- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-1D desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

A Figura 5.29 apresenta o perfil da amostra POZ-T7-5B considerando o primeiro ponto, enquanto a Figura 5.30 apresenta a mesma amostra desconsiderando o primeiro ponto. Neste perfil é possível observar algum erro ocorrido durante o processo de obtenção do perfil.

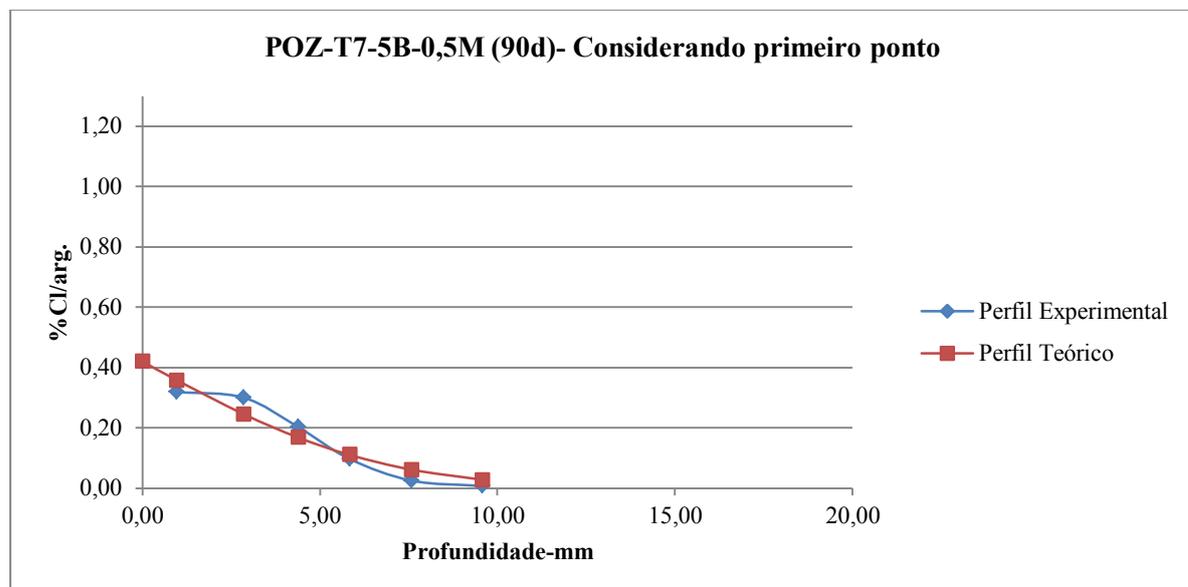


Figura 5.29- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-5B considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

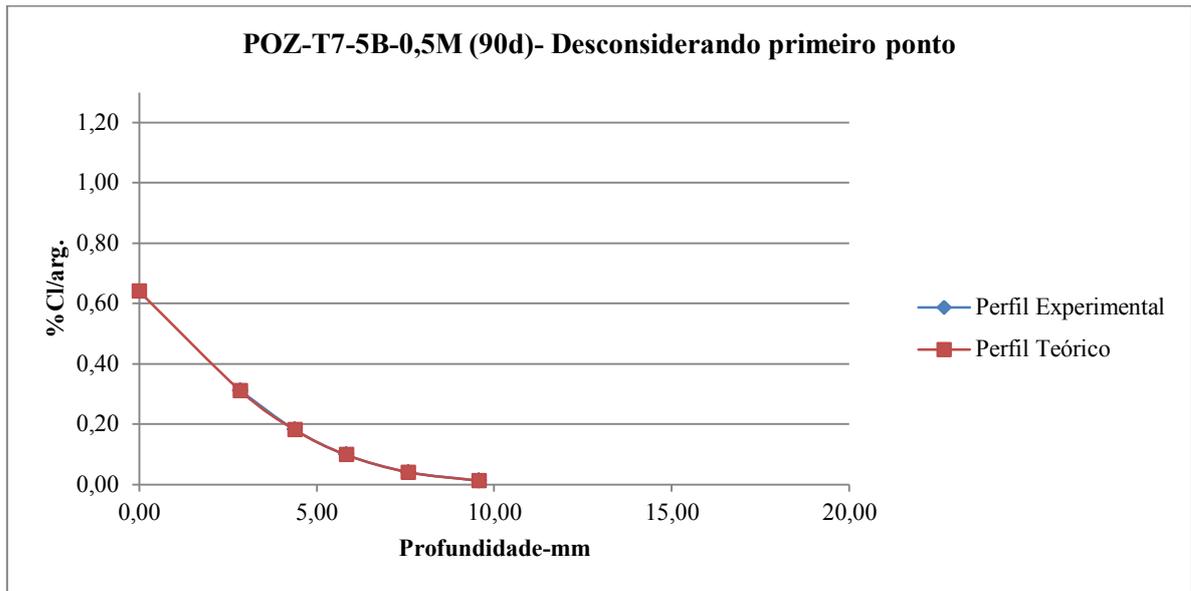


Figura 5.30- Perfis experimental e teórico para a amostra POZ-T7-5B desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

A Figura 5.31 apresenta o perfil da amostra ARI10-T3-1C considerando o primeiro ponto, enquanto a Figura 5.32 apresenta a mesma amostra desconsiderando o primeiro ponto.

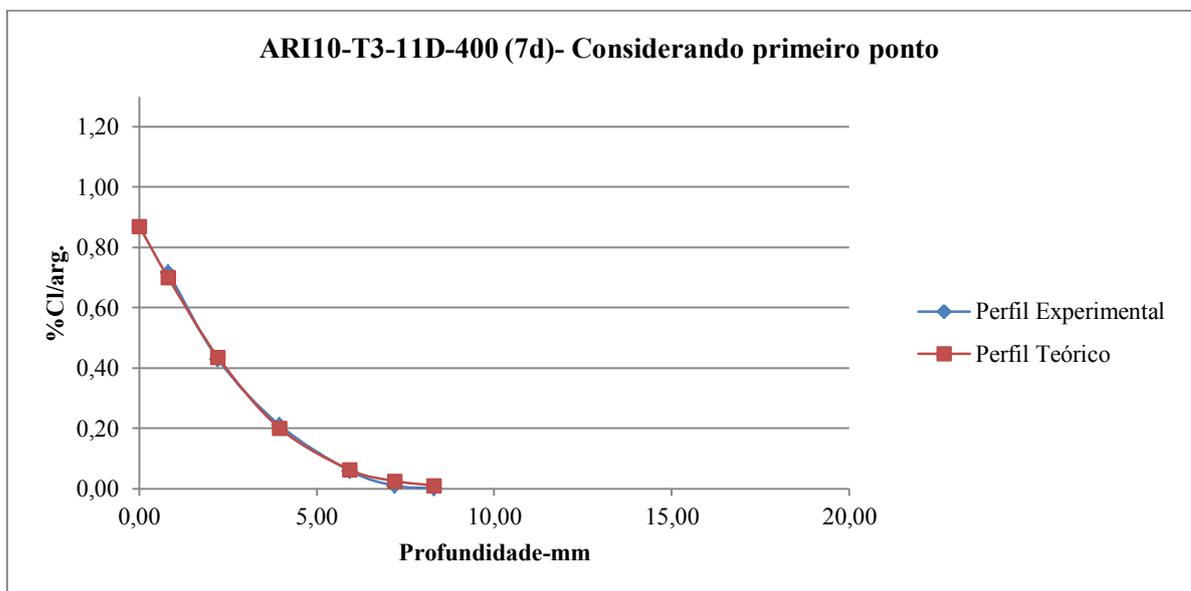


Figura 5.31- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-11D considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

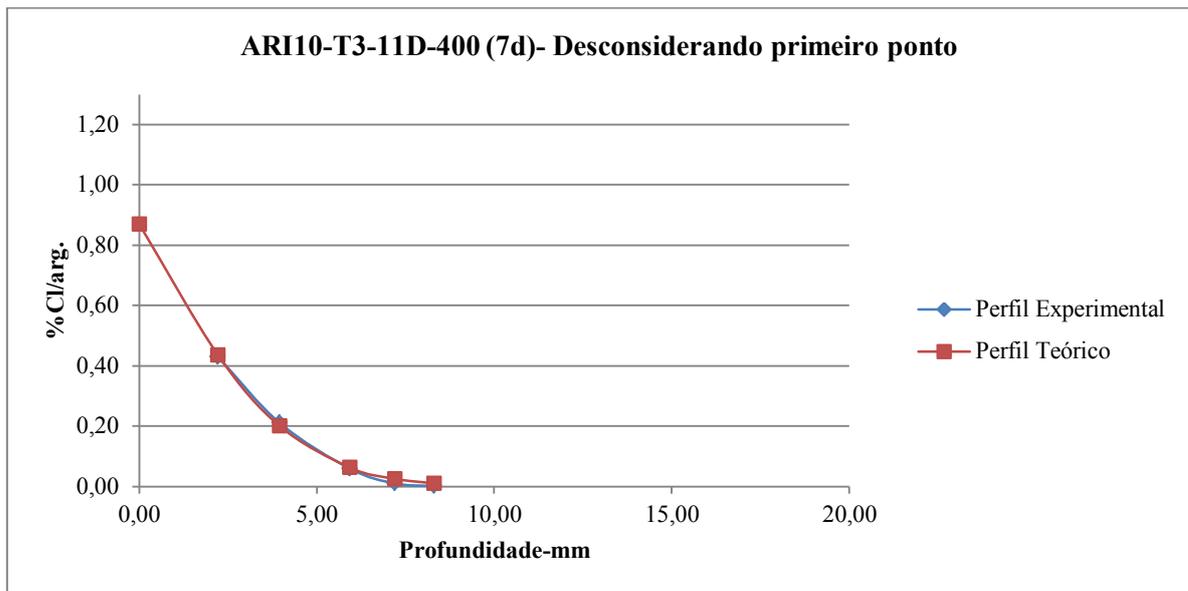


Figura 5.32- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-11D desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

A Figura 5.33 apresenta o perfil da amostra ARI10-T3-1C considerando o primeiro ponto, enquanto a Figura 5.34 apresenta a mesma amostra desconsiderando o primeiro ponto.

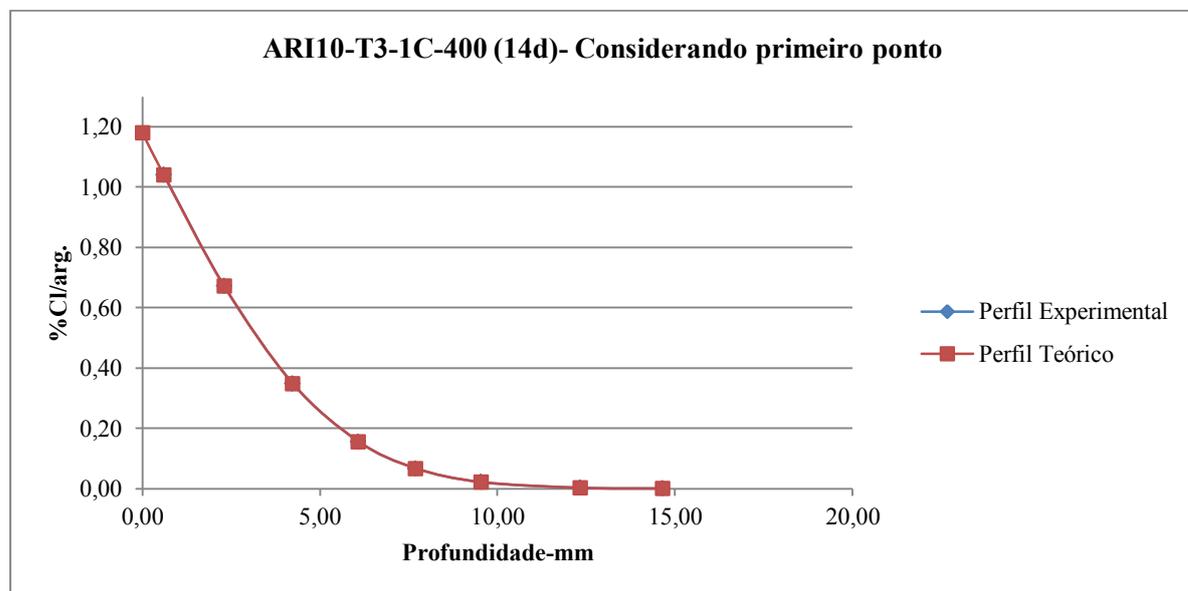


Figura 5.33- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-1C considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

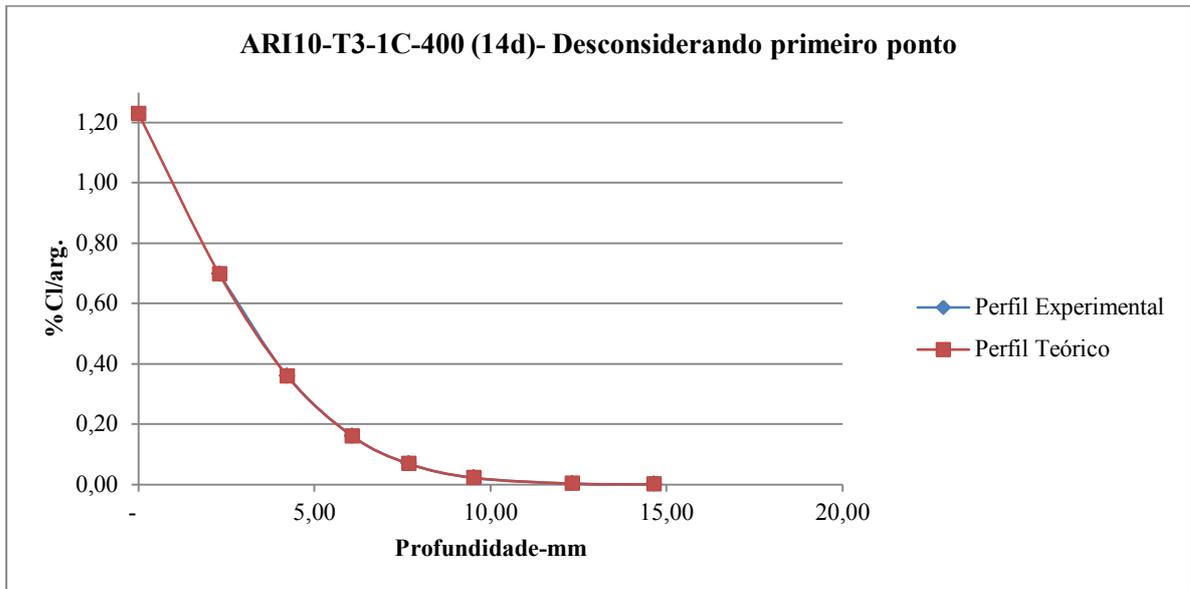


Figura 5.34- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-1C desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

A Figura 5.35 apresenta o perfil da amostra ARI10-T3-3A considerando o primeiro ponto, enquanto a Figura 5.36 apresenta a mesma amostra desconsiderando o primeiro ponto.

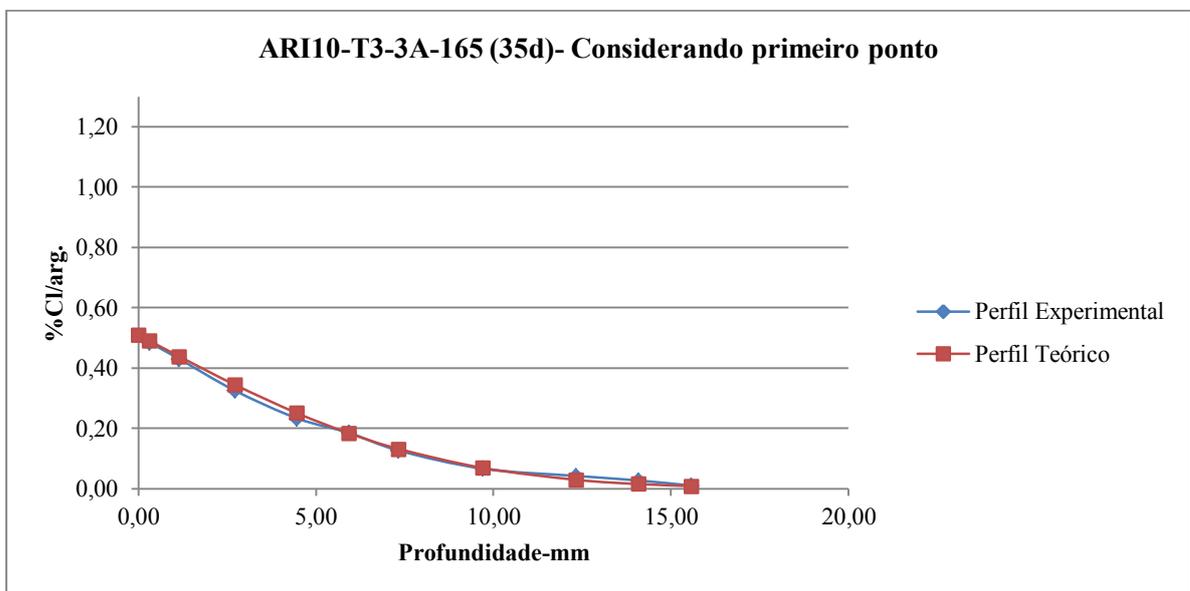


Figura 5.35- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-3A considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

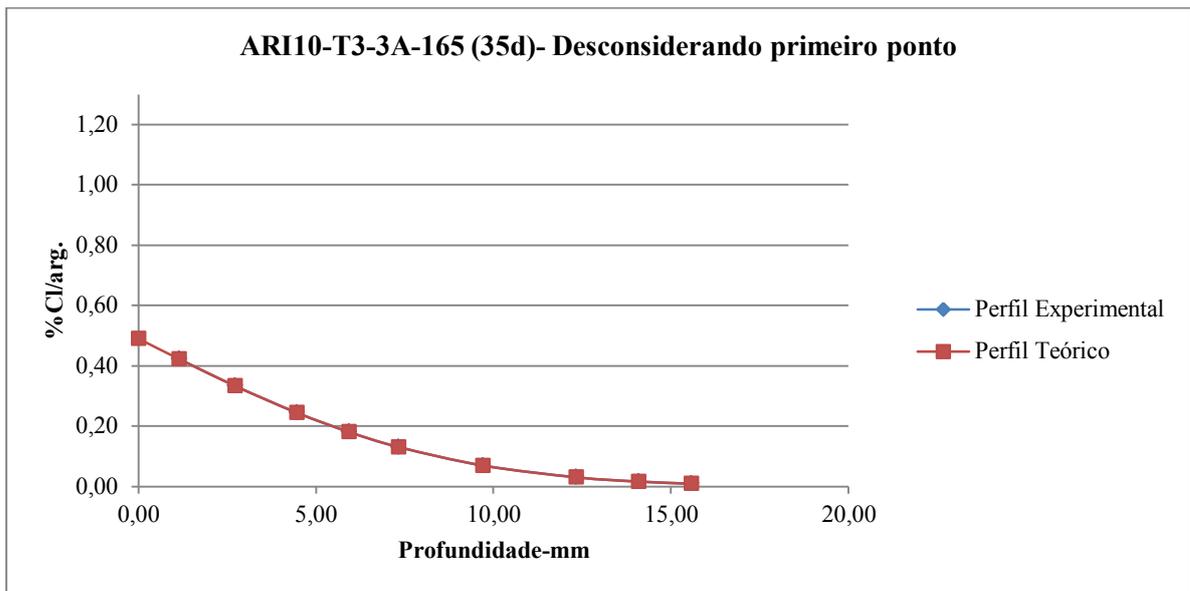


Figura 5.36- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-3A desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

A Figura 5.37 apresenta o perfil da amostra ARI10-T3-1B considerando o primeiro ponto, enquanto a Figura 5.38 apresenta a mesma amostra desconsiderando o primeiro ponto.

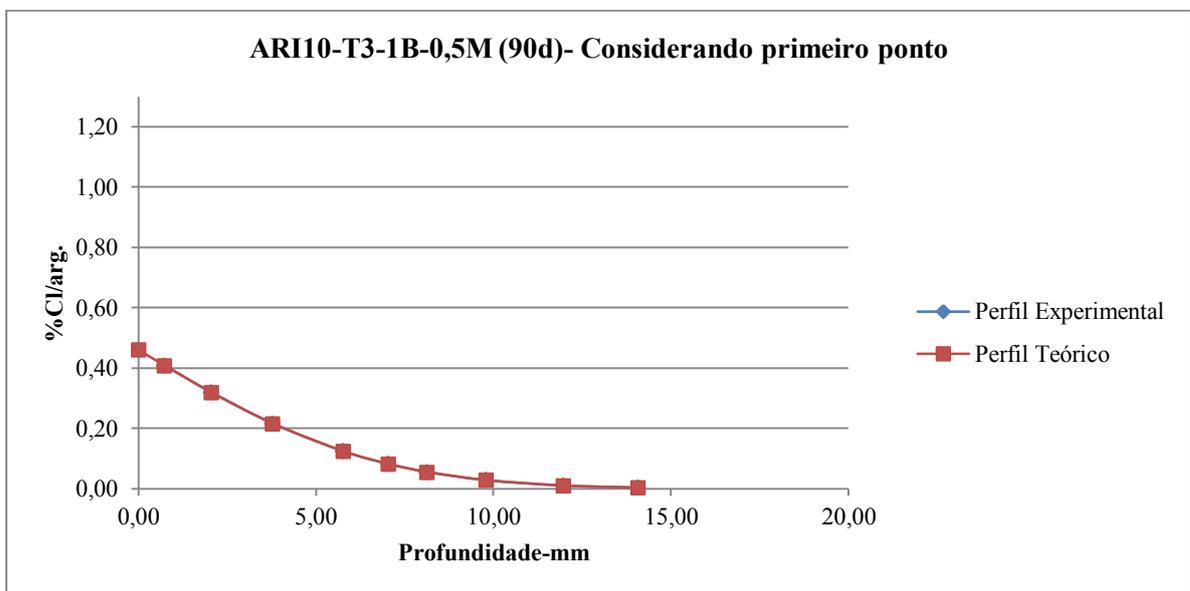


Figura 5.37- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-1B considerando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

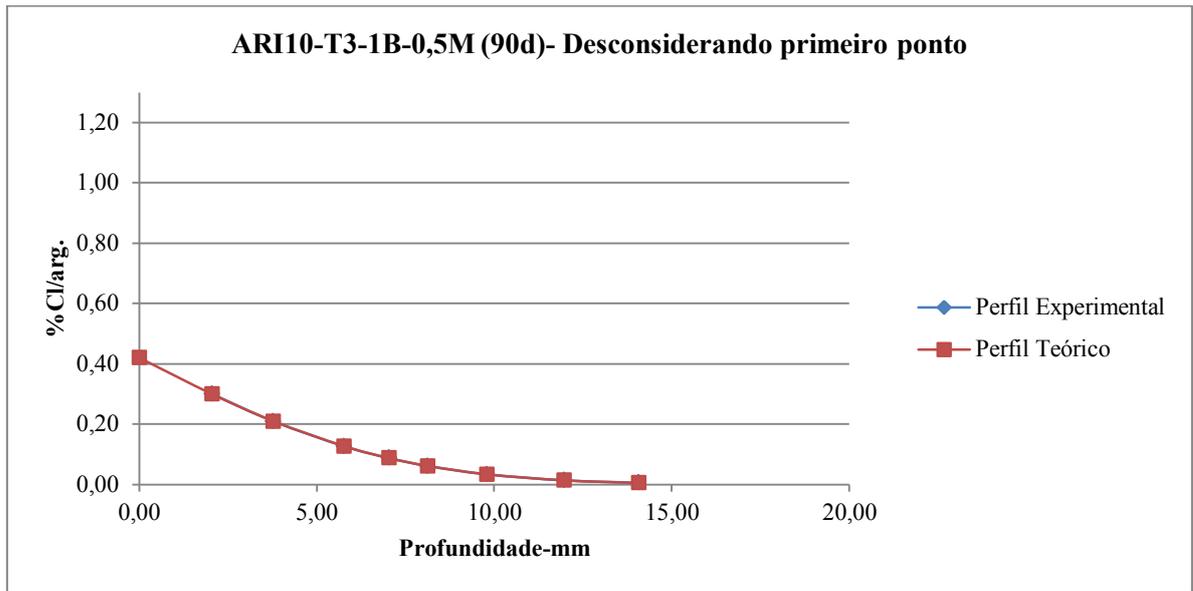


Figura 5.38- Perfis experimental e teórico para a amostra ARI10-T3-1B desconsiderando o primeiro ponto do perfil. (Fonte:Autor)

### 5.3. Coeficiente de difusão

#### 5.3.1. Resultados

Quanto ao coeficiente de difusão das amostras de ambos os traços, a Tab. 5.2 resume os resultados encontrados, tanto para o coeficiente de difusão quanto para a concentração superficial, encontrados via regressão por método dos mínimos quadrados.

Tabela 5.2- Coeficiente de difusão e concentração superficial para as amostras estudadas.

Concreto	Amostra	Idade (dias)	Cs (%/m. conc.)	C <sub>S</sub> médio (%/m. conc.)	D (10 <sup>-6</sup> mm <sup>2</sup> /s)	D <sub>médio</sub> (10 <sup>-6</sup> mm <sup>2</sup> /s)
T7-0,5	POZ-T7-5B	90	0,42	0,42	1,75	1,75
T7-165	POZ-T7-1D	35	0,80	0,80	1,78	1,78
	POZ-T7-8D	7	0,97	1,14	1,53	1,53
	POZ-T7-9B*	7	1,30		6,07	
	POZ-T7-10B	14	1,42	1,19	2,43	2,30
T7-400	POZ-T7-11B	14	0,94		2,16	
	POZ-T7-11A	21	1,17	1,18	4,72	4,84
	POZ-T7-11D	21	1,19		4,96	
	POZ-T7-11C	35	1,29	1,29	1,86	1,86
T3-0,5	ARI10-T3-1B*	90	0,46	0,46	1,75	1,75
T3-165	ARI10-T3-3A	35	0,41	0,41	6,95	6,95
	ARI10-T3-1D	7	0,68	0,78	7,90	8,45
	ARI10-T3-11B	7	0,87		8,99	
	ARI10-T3-1C	14	1,18	1,16	6,77	6,14
T3-400	ARI10-T3-2B	14	1,10		5,12	
	ARI10-T3-7C	14	1,20		6,52	

(\*): Não considerado na análise

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos no presente trabalho com outros tipos de ensaio, são apresentados os resultados de ensaios em condição saturada realizados por Bandeira (2014) e Guimarães (2005). Ambos os trabalhos utilizaram ensaio desenvolvido por Guimarães e Helene (2001) e depois modificado por Guimarães (2005), ensaio esse que apresenta elevada concentração de contaminação assim como o ensaio aqui proposto. A Tabela 5.3 resume os resultados encontrados por Bandeira (2014) utilizando concreto executado com cimento de alta resistência inicial e adição de 10% de sílica ativa, e por Guimarães (2005) com concreto executado com cimento Portland pozolânico.

Tabela 5.3 -Valores de GS,  $D_{med}$  e  $C_{Smed}$  para concretos desenvolvidos por Bandeira (2014) e Guimarães (2005).

Concreto	Bandeira (2014)	Guimarães (2005)
	M2	T2
G.S. (%)	100	100
$D_{med}(10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s})$	3,75	3,24
$C_{Smed}(\%/m.\text{conc.})$	1,33	1,64

O concreto desenvolvido por Bandeira (2014) é constituído por cimento de alta resistência inicial resistente a sulfatos proveniente da Espanha, com adição de 10% de microsilica, e relação água/cimento de 0,45. Já o concreto desenvolvido por Guimarães (2005) apresenta em sua composição cimento Portland pozolânico CP IV, com relação água/cimento de 0,45. Embora os concretos desenvolvidos por Bandeira (2014) e Guimarães (2005) apresentem diferenças em sua composição quando comparados com os concretos desenvolvidos nesse trabalho, sendo ambos com uma relação água/cimento diferente, cimentos com resistência características diferentes e teor de argamassa diferentes, é possível observar que os valores do coeficiente de difusão apresentam mesma ordem de grandeza com os resultados obtidos neste trabalho.

### 5.3.2. Análise dos resultados

Com os perfis de penetração, concentrações superficiais e coeficientes de difusão obtidos neste trabalho, a seguir ocorre a análise estatística dos resultados. Para a análise da formação de resultados, foi executado a cálculo do coeficiente de variação para cada tempo de ensaio individualmente, e depois para as médias dos ensaios semelhantes. O coeficiente de variação é definido conforme a Eq. (5.1):

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot (100) \quad (5.1)$$

Onde CV é o coeficiente de variação da amostra (em porcentagem);  $\sigma$  é o desvio padrão da amostra;  $\mu$  é a média da amostra.

Para valores que resultam em um coeficiente de variação superior a 30%, foram excluídos da amostra os valores que resultavam nos valores mais destoantes para o CV da variável considerada, segundo critério da EN 12390-11 (2015). Este critério foi aplicado para a concentração superficial e coeficiente de difusão em ensaios de mesma idade e mesmo tipo de concreto, para a demonstração da homogeneidade de cada resultado individual. Após, o mesmo critério foi aplicado para cada concreto utilizando as médias de cada idade de ensaio, para demonstrar a formação de famílias de resultado para o método proposto.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de CV para cada ensaio executado com mais de uma amostra.

Tabela 5.4- Resultado do coeficiente de variação para a média de cada idade de ensaio e concreto utilizado

Ensaio	Amostra	Idade (dias)	Cs (%/m. conc.)	$\mu$	$\sigma$	CV(%)	D ( $10^{-6}$ mm <sup>2</sup> /s)	$\mu$	$\sigma$	CV(%)
400 g/dm <sup>3</sup>	POZ-T7-8D	7	0,97	1,14	0,23	20,56	1,53	1,53	-	-
	POZ-T7-9B*		1,30				6,07			
	POZ-T7-10B	14	1,43	1,19	0,35	29,24	2,43	2,30	0,19	8,32
	POZ-T7-11B		0,94				2,16			
	POZ-T7-11A	21	1,17	1,18	0,01	1,20	4,72	4,84	0,17	3,51
	POZ-T7-11D		1,19				4,96			
400 g/dm <sup>3</sup>	ARI10-T3-1D	7	0,68	0,78	0,13	17,34	7,90	8,45	0,77	9,13
	ARI10-T3-11B		0,87				8,99			
	ARI10-T3-1C	14	1,18	1,16	0,05	4,56	6,77	6,14	0,89	14,49
	ARI10-T3-2B		1,10				5,12			
	ARI10-T3-7C		1,20				6,52			

(\*): Amostra removida da análise devido ao coeficiente de variação superior a 30%

A Tabela 5.5 demonstra os valores de CV obtidos analisando a variação da concentração superficial em cada ensaio e em cada tipo de concreto estudado. Vale salientar que os métodos segundo NT BUILD 443 (1995) e de concentração 0,5 M não foram considerados por já ser esperada a variação maior da concentração, visto que as concentrações da solução contaminante em cada método são significativamente diferentes entre si.

Tabela 5.5- Resultado do coeficiente de variação para o ensaio proposto em cada tipo de concreto estudado

Concreto	Ensaio	Idade (dias)	C <sub>Smed</sub> (%/m. conc.)	$\mu$	$\sigma$	CV(%)
POZ-T7	400 g/dm <sup>3</sup>	7	1,14	1,17	0,03	2,36
		14	1,19			
		21	1,18			
ARI10-T3	400 g/dm <sup>3</sup>	7	0,78	0,97	0,27	28,14
		14	1,16			

O coeficiente de variação demonstra que para os ensaios executados os valores de concentração superficial formam uma família de resultados. O valor ainda assim elevado de CV para o concreto ARI10-T3 pode ser decorrente de uma quantidade menor de ensaios realizados, sendo interessante a realização de futuros ensaios de validação. Vale ainda salientar que o valor elevado de CV para o concreto ARI10-T3 pode ter influência do número reduzido de amostras utilizadas para a análise, sendo que uma variação pequena nos resultados obtidos acarreta em uma variação grande do coeficiente de variação.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados de CV obtidos analisando o coeficiente de difusão em cada concreto. Ainda vale salientar que neste caso a análise engloba todos os métodos de ensaio em cada tipo de concreto, visto que o coeficiente de difusão é característica do material utilizado, não do método de ensaio.

Tabela 5.6- Resultados de CV para o coeficiente de difusão de cada tipo de concreto

Concreto	Ensaio	Idade (dias)	D <sub>med</sub> (10 <sup>-6</sup> mm <sup>2</sup> /s)	$\mu$	$\sigma$	CV(%)
POZ-T7	400 g/dm <sup>3</sup>	7	1,53	1,84	0,32	17,62
		14	2,30			
		21*	4,84			
	165 g/dm <sup>3</sup>	35	1,78			
	0,5M	90	1,75			
ARI10-T3	400 g/dm <sup>3</sup>	7	8,45	7,18	1,17	16,31
		14	6,14			
		165 g/dm <sup>3</sup>	35			
	0,5M	90*	1,75			

(\*): Amostra removida da análise devido ao coeficiente de variação

Para uma melhor representação dos dados, a Figura 5.39 apresenta os valores do coeficiente de difusão para as amostras do concreto POZ-T7 e a Figura 5.40 apresenta os resultados para o concreto ARI10-T3. Além dos resultados do coeficiente de difusão, também é apresentada uma

breve discussão sobre os dados de concentração superficial apresentados anteriormente.

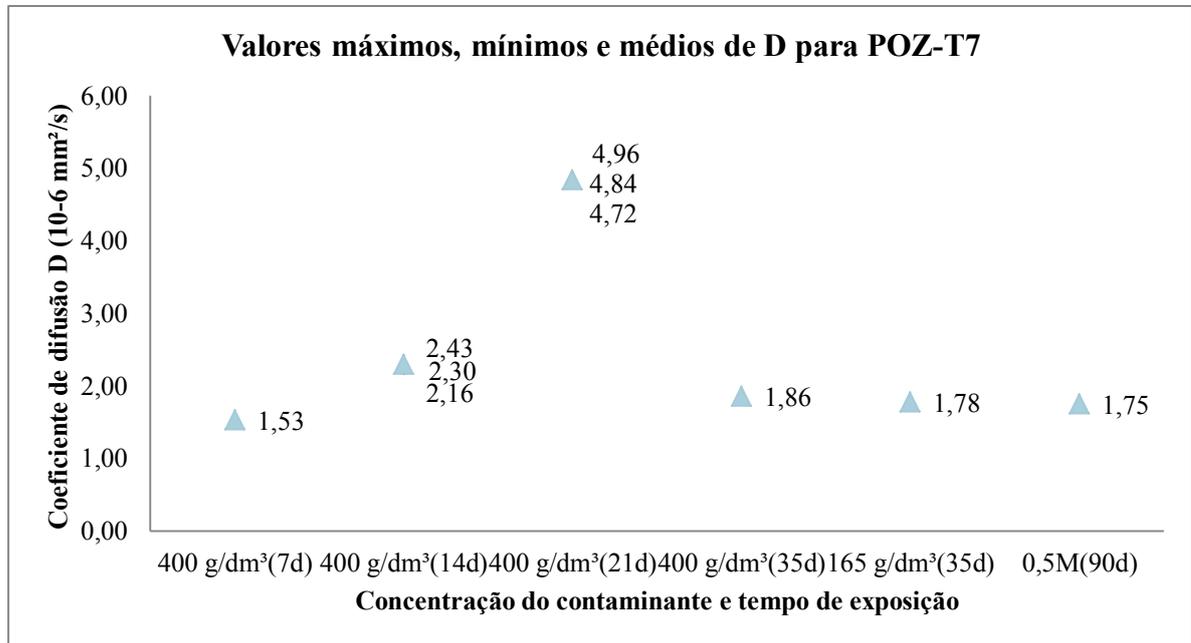


Figura 5.39- Valores mínimos, máximos e médios para o coeficiente de difusão do concreto POZ-T7. (Fonte:Autor)

Ao analisar a Fig. 5.38, é possível perceber uma sobreposição dos valores obtidos, sendo que os valores obtidos nas idades de 14 d e 35 d são bem próximos dos valores obtidos pelo ensaio normatizado da NT BUILD 443 (1995) e o ensaio 0,5M. Os valores para 7 d, 14 d e 35 d são muito semelhantes. O valor para 21 d é o mais discrepante dentre os analisados. Porém, como os valores para 7 d e 14 d são quase idênticos, existe a possibilidade dos ensaios realizados para a idade de 21 d apresentarem algum erro durante o processo. Com a remoção do ensaio de 21 d, o valor de CV fica bem abaixo do estipulado, como demonstrado no quase alinhamento dos valores de D na Fig. 5.35.

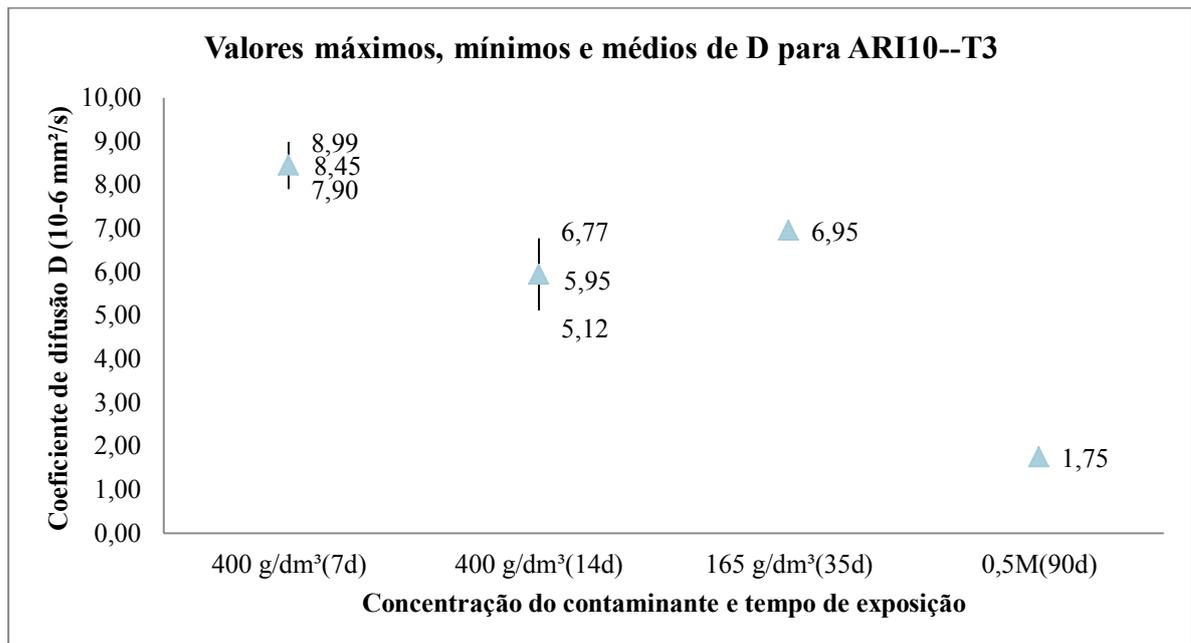


Figura 5.40- Valores mínimos, máximos e médios para o coeficiente de difusão do concreto ARI10-T3. (Fonte: Autor).

Já as amostras do concreto ARI10-T3 apresentam resultados bem mais dispersos, com alguma sobreposição na idade de 14 d com o método da NT BUILD 443 (1995). Nas idades ensaiadas, os valores do coeficiente de difusão para as idades de 7 d e 14 d se apresentam próximos entre si e próximos do ensaio conforme NT BUILD 443 (1995), confirmando novamente a tendência à formação de famílias de resultado. O valor encontrado para o ensaio 0,5M indica que houve algum erro durante sua execução, tendo em vista a grande variação encontrada no valor de CV e demonstrada no gráfico.

A Figura 5.41 apresenta valores máximos, mínimos e médios para Cs para o concreto POZ-T7, enquanto a Figura 5.42 apresenta os valores máximos, mínimos e médios para o concreto ARI10-T3.

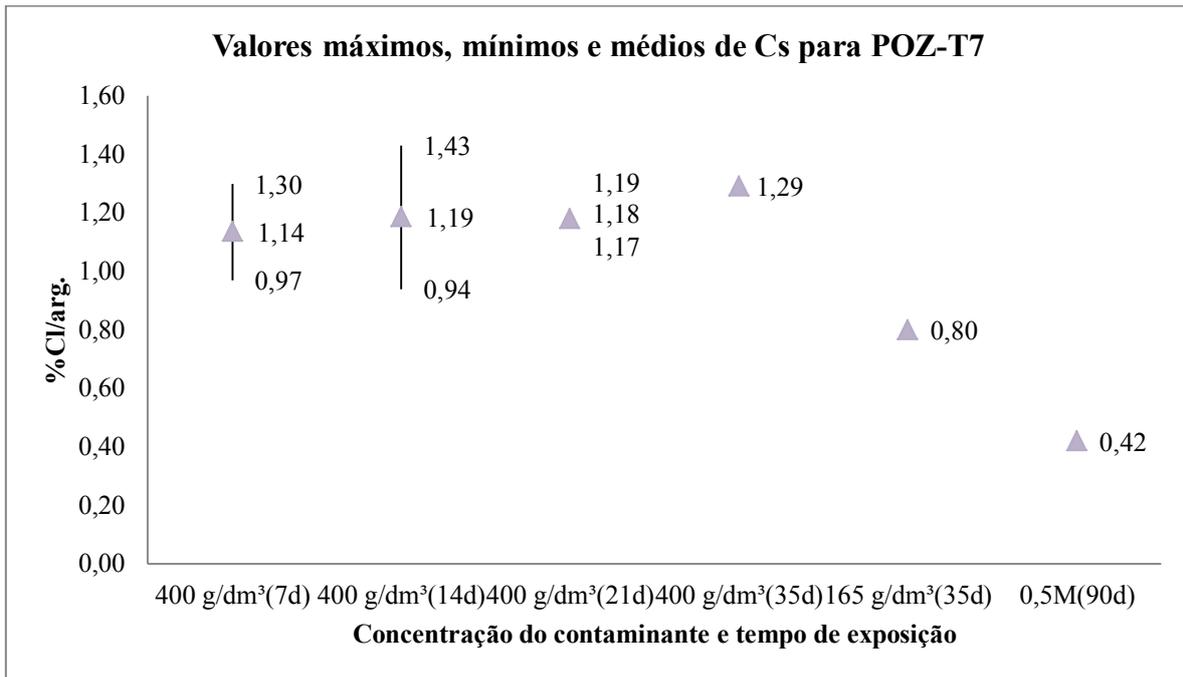


Figura 5.41- Valores máximos, mínimos e médios de Cs para o concreto POZ-T7. (Fonte:Autor)

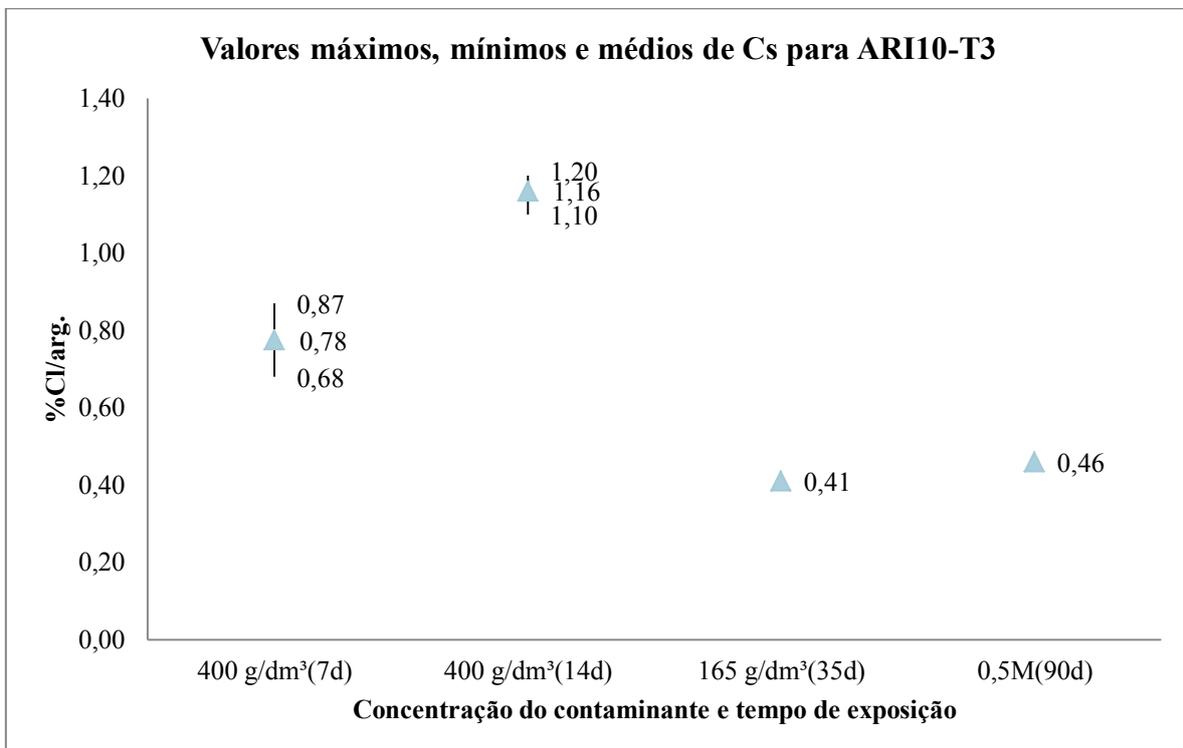


Figura 5.42- Valores máximos, mínimos e médios de Cs para o concreto ARI10-T3. (Fonte:Autor)

Analisando os resultados de Cs para o concreto POZ-T7, é possível observar que ocorre sobreposição entre os valores, o que aliado ao valor de CV dentro da margem de variação evidencia uma concentração superficial constante em relação ao tempo. O mesmo pode ser dito sobre o concreto ARI10-T3, visto que a variação de Cs se encontra dentro da variação admissível. A rede de poros interligada característica de um concreto executado com o cimento CP V ARI-RS é evidenciada pelo coeficiente de difusão obtido, mais elevado que os valores do concreto POZ-T7, mais resistente à frente de ataque de cloretos.

#### **5.4. Proposta final de metodologia de ensaio**

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho e nos ensaios conduzidos, neste item é proposta a metodologia final do ensaio de difusão acelerado, conforme descrito a seguir:

- Confecção de corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, seguido do processo de cura e separação em amostras menores de 10 cm de diâmetro por 4 cm de altura;
- Saturação das amostras, executada submergindo as amostras em água destilada saturada com hidróxido de sódio, em ambiente com temperatura controlada, entre 21°C e 23°C. As amostras devem ter um terço de seu volume coberto por água destilada nas primeiras 4 h, dois terços de seu volume nas próximas 4 h, e finalmente devem permanecer submersas durante as 64 h restantes, totalizando 72 h. As amostras devem então ter a constância de massa verificada. A massa de superfície seca, obtida secando a superfície da amostra somente, sem perda significativa de umidade, de cada amostra é verificada a cada 24 h. A amostra é considerada em constância de massa se, para duas pesagens sucessivas, a massa não varie mais que 0,1%. A amostra é então fervida durante 5 h e depositadas em recipiente com água destilada com hidróxido de sódio, passando por pesagens a cada 24 h até a constância de massa;
- Cada amostra deve ser então revestida com resina epóxi, aplicando a resina com pincel e mantendo somente uma das faces circulares livre, passando pelo subsequente processo de cura conforme especificado pelo fabricante, sendo a cura mínima de 24 h;

- Preparação de recipientes com solução de NaCl com concentração de  $400 \text{ g/dm}^3$ , utilizando um recipiente único por amostra. A solução deve ser mantida em repouso durante o tempo mínimo de 30 min para o assentamento do NaCl excedente no fundo do recipiente;
- A amostra é então inserida lentamente no recipiente com a solução de NaCl sustentada por apoios (evitando contato com o fundo) evitando a agitação da solução em repouso;
- Após o tempo de contaminação, retirar a amostra e executar a limpeza da superfície de ataque, com jato de ar comprimido, utilizando uma escova de aço para remover qualquer excedente nos poros mais superficiais;
- A amostra passa pelo processo de extração, consistindo no desgaste da primeira camada de 1 mm de espessura e mais 10 camadas de 2 mm de espessura, controlando a profundidade com paquímetro em três pontos do diâmetro;
- Executar a limpeza da superfície de extração entre cada camada executada;
- Cada camada removida é acondicionada separadamente e identificada, sendo o mínimo de material pulverulento a ser removido em cada camada de 5 g.
- Executar ensaio de teor de cloretos em cada camada extraída da amostra;
- Análise das camadas e determinação do perfil de penetração utilizando regressão por mínimos quadrados nos teores obtidos, utilizando como curva base a solução da 2ª Lei de Fick para coeficiente de difusão  $D$  e concentração superficial  $C_s$  constantes.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

### 6.1. Conclusões

Segundo os objetivos propostos no presente trabalho, demonstrando para tal o desenvolvimento experimental e os resultados obtidos, bem como a respectiva análise, para desfecho desta dissertação são obtidas as conclusões apresentadas abaixo.

O método proposto apresentou valores de coeficiente de difusão próximos aos ensaios segundo NT BUILD 443 (1995) e ensaio de difusão interna 0,5M, tanto no concreto POZ-T7 como no concreto ARI10-T3, confirmando resultados obtidos por Guimarães et al. (2011).

O processo de limpeza da superfície de contaminação se mostrou eficaz para a utilização da camada mais superficial a amostra ensaiada. Isso permite a obtenção de perfis mais superficiais em idades iniciais com uma melhor conformidade.

A concentração superficial para o concreto POZ-T7 não apresentou variação, conforme ocorrido em Guimarães et al. (2011), onde foram ensaiados concretos com traço mais pobre, que facilitam a penetração de cloretos e também a estabilização das concentrações. Isso ajuda a confirmar a tendência ao ensaio proposto a gerar resultados confiáveis. Por outro lado, o concreto ARI10-T3, que por apresentar coeficiente de difusão maior que o concreto POZ-T7 deveria também apresentar valores próximos de concentração superficial, apresentou diferenças consideráveis ao longo do tempo, embora ainda dentro dos limites de variação.

Considerando o ensaio que gerou uma média maior no concreto POZ-T7 na idade de 7 d como executado com algum erro e removendo-o da análise, a tendência para o tempo para obtenção de perfis significativos e resultados confiáveis é de 7 d tanto para o concreto POZ-T7 quanto para o concreto ARI10-T3.

Sendo assim, os resultados apresentados indicam a formação de famílias de resultados com o ensaio proposto, sendo estes muito semelhantes aos resultados obtidos na execução dos ensaios de referência.

A principal vantagem do ensaio proposto, além do tempo reduzido de execução devido à aceleração da penetração de cloretos, é o fato da concentração da solução contaminante ser mantida constante durante todo o tempo de execução, pois caso ocorra alguma variação no nível da água dentro do recipiente onde o ensaio é desenvolvido, a solução de contaminação será mantida

saturada.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Sendo assim, para a continuação da pesquisa apresentada neste trabalho, são sugeridos a execução de mais ensaios com o mesmo traço e com traços diferentes, para confirmação da tendência à estabilização através de testes estatísticos que exijam um maior número de amostras, e também uma investigação sobre a concentração superficial encontrada e os motivos para os resultados discrepantes obtidos entre os concretos estudados.

## 7. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11579. **Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).** Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

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

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

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL (ASTM). **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (C1202-97),** 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL (ASTM). **Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion (ASTM C1556-11a-2016),** 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), BUILDING. **Manual Americano del Hormingón,** 1977.

- BANDEIRA, J. L. S. **Desempenho de concreto saturado e não saturado executado com cimento ari-rs 52,5 MPa, com e sem adições, frente ao ataque de cloretos.** Rio Grande, 2015. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, RS, Brasil, 220 p.
- BARBOSA, P.; PEREIRA, F.; GRULLÓN, M.; MEDEIROS, M. HELENE, P. R.L; **Influência de ciclos de molhagem e secagem, da altura e do posicionamento de pilares no teor de íons cloreto presentes no concreto de estrutura com 30 anos de idade.** Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – SEMENGO. Rio Grande. Universidade Federal do Rio Grande- FURG. 2004.
- BRETTON D.; OLLIVIER J. P.; BALLIVY G.; **Diffusivite des Ions Chlore clans la Zone de Transition entre Pate Ciment et Roche Granite.** Interfaces in Cemenfifious Composites. E & FN Spon, Londres, Editor MASO J. C., 1992
- CAMACHO, Jesús M.B. **Evaluación de Parámetros que Influyen en el Transporte de Cloruros em Hormigón Parcialmente Saturado.** Madri 2014. Tesis Doctoral, Escuela Técnica de Superior de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos da Universidad Politécnica de Madrid. España. 374 p.
- CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de armaduras em concreto, inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo: Pini; Goiânia: Ed. UFG, 1997. 237 p.
- CASTRO, P.; DE RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. **Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments.** Cement and Concrete Research, v.31, p. 529-37, 2001.
- CLIMENT, M. A; CARMEN ANDRADE; VERA, G.; LÓPEZ, J. F.; VIQUEIRA, E.. **A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete, Part I. The instantaneous plane source diffusion case,** Cement and Concrete Research, 2002, volume 32, p. 1113-1123

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**, second ed., Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 1975, pp. 11 – 13.

European Standard, **Testing Hardened Concrete - Part 11: Determination of the Chloride Resistance of Concrete, Unidirectional Diffusion**, EN 12390-11, 2015.

GUIMARÃES, A. T. C. **Desempenho do Concreto em Ambiente Marítimo na Região do Extremo Sul do Brasil**. Rio Grande, 1997. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), FURG - Universidade Federal do Rio Grande.

GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. São Paulo, 2000. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo - PCC/USP, Engenharia Civil.

GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. **Chloride Diffusion and the Influence of the Saturation Degree of the Concrete**, 2002, Proceedings of the Third International RILEM Workshop, 9-10 September 2002, Madrid, Spain, p. 237-256.

GUIMARÃES, A. T. C. **Grau de saturação: Sua variação com o tipo de concreto e sua influência na difusão e íons cloreto**. São Paulo, 2005. Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de Pós-Doutorado em Engenharia Civil.

GUIMARÃES, A. T. C., CASTRO, P. e NUNES, J. L. O. **Teor de Cloretos Próximos a Superfície do Concreto em Ambientes Marítimos**. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1.

GUIMARÃES, A. T. C.; ANTÓN, M. A.; CLIMENT, M. A.; ALMENAR, G. V.; **Behaviour of Chloride Content at the Surface of Concrete in Submerged Test Conditions**. International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto: Portugal, 2011.

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

- HELENE, P. R. L. **Contribuição à normalização: A resistência sob carga mantida e a idade de estimativa da resistência característica; Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado.** São Paulo, 1994. (Monografias. EPUSP).
- ISAIA, G. C. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações.** Vol. 1 p.1-55. IBRACON, São Paulo: Editor Isaia, G.C., 2011.
- LIMA, M. G. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** Vol. 1 p.732-772. IBRACON, São Paulo: Editor Isaia, G. C., 2011.
- MARTYS, N. S. **Diffusion in Partially-Saturated Porous Materials.** Materials and Structures , v.32, p.555-62, 1999.
- MEHTA, P. K. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** Tradução de Paulo J. M. Monteiro. 1<sup>a</sup>. Edição. São Paulo: Pini,1994. 575 p.
- MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado.** Florianópolis, 2004. Tese de doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, programa de pós-graduação em Engenharia Civil.
- NEPOMUCENO, A. A. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações.** Vol. 2 p.793-827. IBRACON, São Paulo: Editor Isaia, G.C., 2005.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Trad. Salvador E. Giammusso. São Paulo, Pini, 1997.
- NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. R. **Chloride diffusion in partially saturated cementitious material,** Cement and Concrete Research, 2003, p. 133-138.

NORDTEST BUILD, **Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Diffusion Coefficient from Migration Cell Experiments**, NT Build 355. Nordtest, Finland, 1995.

NORDTEST BUILD, **Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration**, NT BUILD 443. Nordtest, Finland, 1995.

NORDTEST BUILD, **Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments**, NT BUILD 492. Nordtest, Finland, 1999.

NUNES, J. L. O. **Intensidade de ataques por cloretos ao concreto em relação à distância da água do mar**. Rio Grande (2006). Dissertação (Mestrado), Curso de Pós-graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande.

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

PATEL, A. R.; Phung, Q. T.; SEETHARAMA, S. C.; PERKO, J.; JACQUES, D.; MAES, N.; SCHUTTER, G.; YE, G.; BREUGEL, K. V.; **Diffusivity of saturated ordinary Portland cement-based materials: A critical review of experimental and analytical modelling approaches**, Cement and Concrete Research, 2016, volume 90, p. 52-72

SACILOTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura**. Santa Maria (2005), Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, RS.

SAMSON, E.; MARCHAND, J.; SNYDER, K. A.; **Calculation of ionic diffusion coefficients on the basis of migration test results**, Mater. Struct., 2003, volume 36, p. 156–165.

SILVA, C. A. **Comportamento dos perfis de cloreto em tetrápodes localizados nos molhes da barra. (Rio Grande - RS - Brasil)**. Rio Grande, RS. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). FURG - Universidade Federal do Rio Grande.

SPRAGG, R.; VILLANI C.; SNYDER K.; BENTZ D.; BULLARD J., WEISS J., **Factors that influence electrical resistivity measurements in cementitious systems**, Transportation Research Rec. 2342 2013, p. 90–98.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Suecis, 1982. 469 p. Tese (Doutorado), Swedish Cement and Concrete Research Institute.

## APÊNDICE A

### Apêndice A – Tabelas com teores de cloretos para os ensaios desenvolvidos

Tabela A.1- Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-8D

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>									
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 400 g/l</b>									
Data:					Hora:			CP:	<b>T7-8D</b>
<b>7 DIAS</b>									
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MED CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	Cl (%)	Clt(%)
0	33,40	34,00	33,90	33,8					
1	34,10	34,90	35,80	34,9	1,2	1,2	0,58	0,72	0,70
2	35,20	35,20	36,80	35,7	0,8	2,0	1,57	0,29	0,28
3	37,50	37,60	39,80	38,3	2,6	4,5	3,25	0,09	0,07
4	40,50	39,90	41,50	40,6	2,3	6,9	5,70	0,04	0,02
5	42,30	40,90	44,00	42,4	1,8	8,6	7,75	0,02	0,01
6	44,30	45,50	45,50	45,1	2,7	11,3	9,98		
7	45,60	47,00	47,00	46,5	1,4	12,8	12,05		
8	46,60	48,80	49,60	48,3	1,8	14,6	13,67		
9	48,40	50,50	50,10	49,7	1,3	15,9	15,23		
10	49,60	51,60	52,40	51,2	1,5	17,4	16,67		
11	50,80	52,50	55,00	52,8	1,6	19,0	18,22		

Tabela A.2-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-9B

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>									
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 400 g/l</b>									
Data:					Hora:			CP:	<b>T7-9B</b>
<b>7 DIAS</b>									
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MED CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	CI (%)	ClT(%)
0	33,00	33,00	32,90	33,0					
1	34,00	34,00	35,00	34,3	1,4	1,4	0,68	1,05	1,04
2	34,90	34,90	37,00	35,6	1,3	2,6	2,00	0,67	0,65
3	36,00	37,00	39,00	37,3	1,7	4,4	3,50	0,23	0,21
4	39,00	40,50	41,00	40,2	2,8	7,2	5,78	0,05	0,04
5	40,60	41,40	43,00	41,7	1,5	8,7	7,95	0,07	0,05
6	41,90	43,50	43,50	43,0	1,3	10,0	9,35	0,03	0,01
7	44,00	45,90	46,00	45,3	2,3	12,3	11,17		
8	45,50	47,80	48,00	47,1	1,8	14,1	13,23		
9	46,60	48,40	49,00	48,0	0,9	15,0	14,58		
10	48,40	49,50	49,90	49,3	1,3	16,3	15,67		
11	50,60	51,40	50,90	51,0	1,7	18,0	17,15		

Tabela A.3-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-11B

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>									
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 400 g/l</b>									
Data:					Hora:			CP:	<b>T7-11B</b>
<b>14 DIAS</b>									
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MED CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	CI (%)	ClT(%)
0	33,60	33,90	33,80	33,8					
1	34,60	35,50	35,50	35,2	1,4	1,4	0,72	0,73	0,71
2	35,50	36,20	36,50	36,1	0,9	2,3	1,87	0,40	0,38
3	38,20	38,20	39,40	38,6	2,5	4,8	3,57	0,13	0,12
4	40,20	41,40	41,40	41,0	2,4	7,2	6,03	0,04	0,03
5	41,60	42,50	43,20	42,4	1,4	8,7	7,95	0,03	0,02
6	44,90	44,50	45,10	44,8	2,4	11,1	9,87	0,03	0,01
7	46,10	47,90	46,60	46,9	2,0	13,1	12,08	0,02	0,01
8	47,40	50,00	50,00	49,1	2,3	15,4	14,23		
9	50,80	52,90	53,70	52,5	3,3	18,7	17,03		
10	52,20	54,40	55,20	53,9	1,5	20,2	19,43		
11	55,00	56,60	57,40	56,3	2,4	22,6	21,37		





Tabela A.8-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-1D

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>									
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 165 g/l</b>									
Data:					Hora:			CP:	<b>T7-1D</b>
<b>35 DIAS</b>									
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MED CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	CI (%)	Clt(%)
0	33,30	33,50	33,70	33,5					
1	35,50	35,00	35,90	35,5	2,0	2,0	0,98	0,63	0,61
2	38,00	37,00	37,00	37,3	1,9	3,8	2,90	0,33	0,31
3	39,90	39,00	38,50	39,1	1,8	5,6	4,73	0,12	0,11
4	41,70	41,40	40,40	41,2	2,0	7,7	6,65	0,05	0,04
5	43,20	43,00	42,40	42,9	1,7	9,4	8,52	0,03	0,01
6	44,80	44,80	44,40	44,7	1,8	11,2	10,27	0,02	0,00
7	46,00	47,00	46,80	46,6	1,9	13,1	12,13		
8	48,30	49,00	49,00	48,8	2,2	15,3	14,18		
9	50,50	51,30	51,50	51,1	2,3	17,6	16,43		
10	52,50	53,30	53,80	53,2	2,1	19,7	18,65		
11	54,50	55,50	56,00	55,3	2,1	21,8	20,77		

Tabela A.9-Teor de cloretos por camada da amostra POZ-T7-5B

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>									
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 0,5M</b>									
Data:					Hora:			CP:	
<b>90 DIAS</b>									
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MED CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	CI (%)	Clt(%)
0	33,30	33,50	33,70	33,5					
1	35,50	34,90	35,90	35,4	1,9	1,9	0,97	0,33	0,32
2	38,00	37,00	36,80	37,3	1,8	3,8	2,85	0,32	0,30
3	39,10	38,30	38,10	38,5	1,2	5,0	4,38	0,22	0,20
4	40,60	40,10	39,80	40,2	1,7	6,7	5,83	0,11	0,10
5	41,60	42,90	41,50	42,0	1,8	8,5	7,58	0,04	0,03
6	44,00	44,30	44,20	44,2	2,2	10,7	9,58	0,02	0,01
7	46,00	46,30	46,20	46,2	2,0	12,7	11,67		
8	48,00	48,30	48,20	48,2	2,0	14,7	13,67		
9	50,00	50,30	50,20	50,2	2,0	16,7	15,67		
10	52,00	52,30	52,20	52,2	2,0	18,7	17,67		
11	54,00	54,30	54,20	54,2	2,0	20,7	19,67		

Tabela A.10-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-11B

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>										
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 400 g/l</b>										
Data:					Hora:				CP:	<b>T3-11B</b>
<b>7 DIAS</b>										
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MÉDIA CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	Cl (%)	Clt(%)	
0	34,30	34,30	34,50	34,4						
1	35,00	36,00	37,00	36,0	1,6	1,6	0,82	0,73	0,72	
2	36,00	37,00	38,50	37,2	1,2	2,8	2,22	0,44	0,43	
3	38,00	39,00	41,40	39,5	2,3	5,1	3,95	0,22	0,21	
4	39,00	42,00	42,40	41,1	1,7	6,8	5,93	0,07	0,06	
5	39,00	43,00	44,00	42,0	0,9	7,6	7,20	0,02	0,01	
6	40,00	44,00	46,00	43,3	1,3	9,0	8,30	0,01	0,00	
7	43,00	45,00	48,00	45,3	2,0	11,0	9,97			
8	46,00	48,00	49,00	47,7	2,3	13,3	12,13			
9	47,00	50,20	51,40	49,5	1,9	15,2	14,23			
10	49,00	51,00	52,60	50,9	1,3	16,5	15,83			
11	51,00	53,00	53,00	52,3	1,5	18,0	17,23			

Tabela A.11-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-1D

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>										
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 400 g/l</b>										
Data:					Hora:				CP:	<b>T3-1D</b>
<b>7 DIAS</b>										
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MÉDIA CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	Cl (%)	Clt(%)	
0	34,00	33,90	34,70	34,2						
1	34,50	34,90	35,50	35,0	0,8	0,8	0,38	0,66	0,65	
2	35,40	36,20	37,90	36,5	1,5	2,3	1,53	0,39	0,38	
3	37,40	38,10	39,90	38,5	2,0	4,3	3,28	0,20	0,19	
4	38,40	39,60	41,00	39,7	1,2	5,5	4,87	0,10	0,09	
5	39,50	41,00	42,00	40,8	1,2	6,6	6,05	0,08	0,07	
6	43,00	43,00	45,00	43,7	2,8	9,5	8,05	0,03	0,03	
7	44,40	45,00	47,00	45,5	1,8	11,3	10,37	0,02	0,01	
8	45,40	47,00	48,80	47,1	1,6	12,9	12,07	0,02	0,02	
9	48,00	49,00	51,20	49,4	2,3	15,2	14,03	0,02	0,01	
10	49,00	51,40	52,70	51,0	1,6	16,8	16,02			
11	52,00	53,40	55,00	53,5	2,4	19,3	18,05			

Tabela A.12-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-1C

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>									
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 400 g/l</b>									
Data:				Hora:				CP:	<b>T3-1C</b>
<b>14 DIAS</b>									
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MÉDIA CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	Cl (%)	Clt(%)
0	38,00	37,40	38,40	37,9					
1	39,90	38,10	39,40	39,1	1,2	1,2	0,60	0,95	0,94
2	41,40	40,10	42,50	41,3	2,2	3,4	2,30	0,72	0,71
3	42,70	42,50	43,80	43,0	1,7	5,1	4,23	0,37	0,36
4	44,50	44,70	45,90	45,0	2,0	7,1	6,08	0,15	0,14
5	46,60	46,00	46,00	46,2	1,2	8,3	7,68	0,06	0,05
6	48,40	49,40	48,40	48,7	2,5	10,8	9,53	0,03	0,02
7	52,30	51,40	51,70	51,8	3,1	13,9	12,33	0,02	0,01
8	54,70	53,40	52,00	53,4	1,6	15,4	14,65	0,02	0,01
9	56,40	55,30	54,00	55,2	1,9	17,3	16,37		
10	58,40	56,60	56,00	57,0	1,8	19,1	18,18		
11									

Tabela A.13-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-2B

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>									
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 400 g/l</b>									
Data:				Hora:				CP:	<b>T3-2B</b>
<b>14 DIAS</b>									
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MÉDIA CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	Cl (%)	Clt(%)
0	33,70	33,50	34,00	33,7					
1	35,00	36,50	36,10	35,9	2,1	2,1	1,07	0,85	0,84
2	36,20	36,70	38,20	37,0	1,2	3,3	2,72	0,48	0,47
3	39,90	40,50	41,90	40,8	3,7	7,0	5,17	0,15	0,14
4	43,40	43,40	45,00	43,9	3,2	10,2	8,62	0,03	0,02
5	46,50	48,00	47,00	47,2	3,2	13,4	11,82	0,02	0,01
6	48,50	50,00	49,00	49,2	2,0	15,4	14,43	0,01	0,00
7	51,50	52,00	49,00	50,8	1,7	17,1	16,27		
8	51,50	52,90	52,00	52,1	1,3	18,4	17,75		
9	52,00	54,50	55,00	53,8	1,7	20,1	19,25		
10	53,00	55,00	56,60	54,9	1,0	21,1	20,62		
11	57,00	57,00	58,00	57,3	2,5	23,6	22,37		

Tabela A.14-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-7C

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>										
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 400 g/l</b>										
Data:				Hora:				CP:	<b>T3-7C</b>	
<b>14 DIAS</b>										
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MÉDIA CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	Cl (%)	Clt(%)	
0	33,70	33,40	33,60	33,6						
1	34,00	34,40	35,50	34,6	1,1	1,1	0,53	0,98	0,97	
2	34,80	35,50	37,40	35,9	1,3	2,3	1,70	0,75	0,74	
3	35,40	38,60	39,40	37,8	1,9	4,2	3,28	0,35	0,34	
4	37,80	40,00	40,90	39,6	1,8	6,0	5,12	0,14	0,13	
5	40,60	43,70	43,00	42,4	2,9	8,9	7,43	0,05	0,05	
6	43,50	45,00	45,70	44,7	2,3	11,2	10,02	0,03	0,03	
7	46,30	47,90	47,60	47,3	2,5	13,7	12,43	0,02	0,01	
8	47,20	50,70	50,00	49,3	2,0	15,7	14,72	0,01	0,00	
9	47,20	53,40	52,00	50,9	1,6	17,3	16,52			
10	49,20	54,40	55,10	52,9	2,0	19,3	18,32			
11	51,20	55,40	56,50	54,4	1,5	20,8	20,07			

Tabela A.15-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-3<sup>a</sup>

<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE</b>										
<b>PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 165 g/l</b>										
Data:				Hora:				CP:	<b>T3-3A</b>	
Mpro				Mcont				Dif	0	
<b>35 DIAS</b>										
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MÉDIA CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	Cl (%)	Clt(%)	
0	34,60	33,50	34,00	34,0						
1	35,00	34,00	35,00	34,7	0,6	0,6	0,32	0,49	0,48	
2	35,70	35,40	36,00	35,7	1,0	1,7	1,15	0,44	0,43	
3	36,90	37,50	39,00	37,8	2,1	3,8	2,72	0,33	0,33	
4	37,50	39,60	40,50	39,2	1,4	5,2	4,47	0,24	0,23	
5	39,40	40,90	41,90	40,7	1,5	6,7	5,93	0,19	0,19	
6	41,00	42,00	43,00	42,0	1,3	8,0	7,33	0,13	0,13	
7	44,80	45,00	46,60	45,5	3,5	11,4	9,70	0,07	0,07	
8	46,00	47,00	48,80	47,3	1,8	13,2	12,33	0,05	0,04	
9	47,50	48,60	50,80	49,0	1,7	14,9	14,08	0,04	0,03	
10	47,70	50,50	52,60	50,3	1,3	16,2	15,58	0,02	0,01	
11	49,90	52,90	54,50	52,4	2,2	18,4	17,32			

Tabela A.16-Teor de cloretos por camada da amostra ARI10-T3-1B

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE									
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA – 0,5 M									
Data:					Hora:			CP:	<b>T3-1B</b>
<b>90 DIAS</b>									
CAMADAS	V.1	V.2	V.3	MÉDIA CAMADAS	PROF.	ACUM.	MÉDIA	Cl (%)	Clt (%)
0	34,30	34,80	34,50	34,5					
1	35,00	36,00	37,00	36,0	1,5	1,5	0,73	0,49	0,48
2	36,00	37,00	38,50	37,2	1,2	2,6	2,05	0,44	0,43
3	38,00	39,00	41,40	39,5	2,3	4,9	3,78	0,33	0,33
4	39,00	42,00	42,40	41,1	1,7	6,6	5,77	0,24	0,23
5	39,00	43,00	44,00	42,0	0,9	7,5	7,03	0,19	0,19
6	40,00	44,00	46,00	43,3	1,3	8,8	8,13	0,13	0,13
7	43,00	45,00	48,00	45,3	2,0	10,8	9,80	0,07	0,07
8	46,00	48,00	49,00	47,7	2,3	13,1	11,97	0,05	0,04
9	47,00	50,20	51,40	49,5	1,9	15,0	14,07	0,04	0,03
10	49,00	51,00	52,60	50,9	1,3	16,3	15,67	0,02	0,01
11	51,00	53,00	53,00	52,3	1,5	17,8	17,07		