

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

**PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIO ACELERADO PARA A DETERMINAÇÃO DO
COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE ÍONS CLORETO EM CONCRETOS NA CONDIÇÃO
SATURADA**

Por:

TÁSSIA FANTON

RIO GRANDE, AGOSTO DE 2017

**PROPOSTA DE MÉTODO DE ENSAIO ACELERADO PARA A DETERMINAÇÃO DO
COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE ÍONS CLORETO EM CONCRETOS NA CONDIÇÃO
SATURADA**

Por:

TÁSSIA FANTON

Engenheira 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 parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: André Tavares da Cunha Guimarães, Dr. em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Miguel Ángel Climent

Universidad de Alicante

Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

UFSM

Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

RIO GRANDE, AGOSTO DE 2017

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ediva e Idarci, ofereço minha gratidão, vocês foram o começo de tudo e sempre serão os responsáveis pelas minhas conquistas, pois vocês me ensinaram a viver com dedicação e perseverança, mostrando-me sempre que os bons frutos são colhidos com a aplicação do trabalho e da honestidade.

Minha irmã, Talita, obrigada por sempre acreditar em mim, obrigada, também, pela compreensão, ajuda e apoio fornecidos ao longo de toda minha vida. É em ti que me espelho para poder sempre aprimorar os valores ensinados por nossos pais.

João, agradeço por teres acreditado no meu ideal; por teres me incentivado a acreditar em mim mesma e por teres escutado minhas angústias e decepções sempre como se fosse a primeira vez. Seu amor e cumplicidade me ajudaram a crescer e a jamais desistir dos meus sonhos.

Professor André Guimarães, obrigada pela cordialidade e disponibilidade constante na orientação deste trabalho, pelos conhecimentos transmitidos e por ter sido presente e amigo durante a elaboração deste trabalho, essa parceria somente aumentou a admiração que sempre tive por você, tanto como pessoa quanto como profissional, certamente, seguirei seus ensinamentos.

A todos os professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica, obrigada pela magnífica troca de conhecimentos e pelo agradável convívio.

Aos meus colegas do PPGeo, ofereço minha gratidão pela troca de conhecimentos e pelos momentos de diversão. Agradeço, especialmente, ao meu grande amigo Bolívar que desde a graduação se faz presente nas minhas conquistas, obrigada por estar sempre disposto a ouvir e me aconselhar objetivando o meu crescimento pessoal.

Aproveito esse momento para agradecer, também, a minha confidente Julia, que mesmo distante geograficamente e com grande quantidade de tarefas a executar nunca mediu esforços para me enviar palavras de carinho e dividir comigo seu conhecimento.

Fran, minha amiga e parceira na realização dos ensaios, agradeço por nunca se furtar de suas responsabilidades e pela disposição e motivação carregadas contigo todos os dias.

A todos que atuam no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Escola de Engenharia – FURG, agradeço pela convivência diária, incentivo e auxílio prestados no desenvolvimento desse trabalho.

Por fim, não menos importante, agradeço ao PPGeo pela oportunidade de dar continuidade a vida acadêmica e também ao suporte financeiro concedido pela Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – no decorrer dos meus estudos.

RESUMO

Uma maneira de realizar a previsão da vida útil de serviço de uma determinada estrutura de concreto armado ou protendido, exposta em ambientes que contenham o agente agressivo íon cloreto, é através da determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto, o qual indica a capacidade que um determinado tipo de concreto tem de resistir à penetração desse agente agressivo. A determinação do coeficiente de difusão, em laboratório, pode ser realizada com um período mínimo de contaminação, de acordo com ensaios normatizados de 35 dias, consumindo assim, grande quantidade de tempo. Levando isso em consideração, torna-se possível observar a necessidade da existência de métodos de ensaios precisos e ágeis capazes de avaliar como os materiais de uma determinada estrutura irão se comportar em ambientes que possuem a presença de cloretos. Tendo isso em vista, a presente pesquisa visa analisar o comportamento do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos na condição saturada, a partir de ensaios com menor tempo de contaminação e com a utilização de uma maior concentração de agente contaminante do previsto no ensaio normatizado, além disso, pretende-se analisar também, o comportamento da concentração superficial de cloretos ao longo do tempo. Para tanto, é importante salientar que foram estudados três traços de concreto, um utilizando cimento de alta resistência inicial em sua dosagem, outro cimento de alta resistência inicial com adição de 10% de sílica ativa e um com cimento do tipo pozolânico, todos os traços consideraram uma relação água/aglomerante de 0,40. Os ensaios foram realizados em idades de contaminação que variam entre 7, 14, 21 e 35 dias, a partir de dois métodos propostos, o primeiro, é chamado neste trabalho de método Acelerado Modificado – $NaCl\ 250g/dm^3$ e o outro desenvolvido por Guimarães Helene (2007), os resultados obtidos por esses ensaios foram comparados com os obtidos pela aplicação do método normatizado *NT BUILD 443 (1995)* e com os advindos do método tradicional, o qual utiliza de uma solução contaminante de íons cloretos semelhante a encontrada na água do mar ($NaCl\ 0,5M$). Assim sendo, a partir da aplicação da metodologia proposta, conclui-se que os valores da concentração superficial de cloretos, para os concretos dosados com cimento de alta resistência inicial com adição de 10% de sílica ativa e com cimento pozolânico, obtiveram uma variação com tendência crescente ao passar do tempo, já esse valor para o concreto dosado com cimento de alta resistência inicial, não apresentou variação significativa com o passar do tempo, apresentando, assim, uma determinada constância nos valores. No que diz respeito aos valores encontrados para coeficiente de difusão, constatou-se que para todos os traços estudados e métodos de ensaios propostos os valores para tal parâmetro foram satisfatórios na idade de contaminação de 7 dias quando comparados com os obtidos a partir do ensaio normatizado pela *NT BUILD 443 (1995)* e com o ensaio $NaCl\ 0,5M$.

Palavras-chaves: Métodos Acelerados. Difusão. Cloretos. Concreto.

ABSTRACT

A way of to realize the service life prediction of a particular reinforced or prestressed concrete structure exposed to environments containing the aggressive chloride ion agent is by determining the diffusion coefficient of chloride ions, which indicates the resistance level of a particular type of concrete to the penetration of such aggressive agent. The determination of the diffusion coefficient in the laboratory can be carried out during a minimum period of 35 days, which consumes a great period of time. Taking this into account, we come across a real need for accurate and agile test methods capable of evaluating how materials of a certain structure will behave under the presence of chlorides. This study aims to analyze the behavior of the diffusion coefficient of chloride ions in concrete under the saturated condition, through tests with a smaller contamination time and with a higher concentration of pollutant than those previously used during the standardized test. Besides, it is also intended to analyze the behavior of the chloride surface concentration over time. In order to do so, it is important to note that three mixes of concrete were taken under analysis: one using high initial strength cement in its dosage, another with high initial strength cement with addition of 10% of active silica and a pozzolanic type cement, with water/cement factor ratio of 0.40. The tests were carried out at ages of contamination ranging from 7, 14, 21 and 35 days, from two methods proposed, the first is called in this study as *Modified Accelerated Method - NaCl 250g / dm³* and the other was developed by Guimarães Helene (2007), the results obtained by these tests were compared with the those of the standard method *NT BUILD 443 (1995)* and with the traditional method, which uses a contaminant solution of chloride ions found in sea water (*NaCl 0.5M*). Therefore, from the application of the proposed methodology, it is concluded that the values of the chloride surface concentration for the concretes containing high initial strength cement with 10% of silica and with pozzolanic cement, was obtained a variation with a growing tendency, which was different for the concrete with high initial strength cement, that did not show significant variation through the age of the contamination, thus presenting a certain constancy in the values. Regarding the results obtained for the diffusion coefficient, it was found that for all the mixes studied and the proposed test methods, the values for such parameter were satisfactory at the age of contamination of 7 days when compared with those obtained according to the test standardized by *NT BUILD 443 (1995)* and the *NaCl 0.5M* experiment.

Keywords: Accelerated Testing. Diffusion. Chloride. Concrete

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivo	21
1.2 Estrutura da Pesquisa	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 Durabilidade das estruturas de concreto	23
2.2 Vida útil das estruturas de concreto	24
2.3 Estrutura de poros e mecanismo de transporte no concreto	28
2.3.1 Estrutura porosa dos concretos.....	29
2.3.2 Mecanismos de transporte que interferem na durabilidade do concreto armado.	30
2.3.2.1 Absorção capilar	30
2.3.2.2 Permeabilidade	31
2.3.2.3 Migração iônica	31
2.3.2.4 Difusão	32
2.4 Corrosão das armaduras.	34
2.4.1 Mecanismo de corrosão.....	35
2.4.2 – Corrosão generalizada – Carbonatação	38
2.4.3 Corrosão localizada– ação dos íons de cloreto.....	39
2.4.3.1 Fontes e teores críticos de cloreto	41
2.4.3.2 Parâmetros relacionados à formulação do concreto que interferem na velocidade e intensidade de penetração dos íons de cloreto	43
2.5 – Métodos de ensaios que visam à previsão da penetração de íons cloreto no concreto ...	47
3. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL	53
3.1 Materiais empregados na confecção dos concretos	53
3.1.1 Cimento	53
3.1.2 Agregados.....	54
3.1.3 Aditivo químico.....	55
3.1.4 Água.....	55
3.2 Definição dos traços de concreto estudados	55
3.3 Produção das amostras de concreto.....	56
3.4 Processo de saturação das amostras	57
3.5 Contaminação com <i>NaCl</i> e armazenamento das amostras.....	58

3.6	Extração do material para a elaboração dos perfis de penetração de cloretos	61
3.7	Análise do Teor Total de Cloretos no Concreto	63
3.7.1	Tratamento prévio das amostras pulverizadas.....	63
3.7.2	Aplicação da Potenciometria.....	66
3.7.3	Deteção do ponto de equivalência: métodos da primeira e segunda derivada	68
3.7.4	Determinação do percentual de cloretos em relação à massa de concreto.....	69
3.7.5	Traçado do perfil de cloretos e determinação da concentração superficial de cloretos (C_s) e do coeficiente de difusão (D).....	70
3.8	Análise estatística adotada para tratamento dos dados.....	72
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	75
4.1	Obtenção dos perfis de penetração de cloretos e determinação da Concentração Superficial de Cloretos e do Coeficiente de Difusão de Íons Cloreto	75
4.2	Análise Comparativa dos Coeficientes de Difusão de Íons Cloreto.....	93
4.2.1	Comparação dos resultados dos coeficientes de difusão íons cloreto com os obtidos pela pesquisa de Bender (2016).....	99
4.3	Análise do Comportamento Concentração Superficial de Cloretos ao longo do tempo.....	102
4.3.1	Influência da variação da concentração superficial de cloretos nos resultados obtidos para o coeficiente de difusão	106
4.3.2	Análise do comportamento da concentração superficial de íons cloreto no tempo nos resultados obtidos por Bender (2016).....	115
4.4	Análise do Comportamento do Coeficiente de Difusão de Íons Cloretos em Relação à Idade das Amostras Ensaaiadas.....	117
4.5	Proposta final da metodologia do ensaio <i>Acelerado Modificado</i> – $\text{NaCl } 250\text{g/dm}^3$	124
5	CONCLUSÃO	126
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
	ANEXO 01 – FICHA TÉCNICA RESINA EPÓXI.....	138
	APÊNDICE 01–CURVAS GRANULOMÉTRICAS AGREGADOS.....	145
	APÊNDICE 02 – RESULTADOS SPSS STATISTIC T01 CP V ARI.....	148
	APÊNDICE 03 – RESULTADOS SPSS STATISTIC T01 CP V ARI+10% S.A.	154
	APÊNDICE 04 – RESULTADOS SPSS STATISTIC T07 CP IV	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de vida útil proposto por Tuutti para estruturas de concreto armado.....	25
Figura 2.2 – Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras.....	26
Figura 2.3 – Corrosão das armaduras – tipos e fatores.....	37
Figura 2.4 - Variação da profundidade de carbonatação em função do tempo e da relação água/cimento.....	39
Figura 2.5 – Efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento sobre o coeficiente de difusão de íons cloreto.....	43
Figura 2.6 – Influência do teor de C_3A na quantidade de íons cloreto livre, a 20 e 70°C.....	46
Figura 2.7 – Efeito da cura e da relação a/c na profundidade de alcance dos íons cloreto.....	47
Figura 2.8 – Esquema do ensaio para a contaminação por imersão.....	49
Figura 2.9 – Esquema do ensaio para a contaminação pelo método de Guimarães Helene (2007).....	50
Figura 2.10 – Esquema do aparato para a avaliação da taxa de migração de cloretos, conforme a norma <i>ASTM C 1202/2009</i>	51
Figura 3.1 – Procedimento de corte das amostras de concreto.....	57
Figura 3.2 – Procedimento utilizado para estabelecer a saturação das amostras.....	58
Figura 3.3 – Processo de contaminação das amostras.....	59
Figura 3.4 – Processo de contaminação das amostras pelo método Guimarães e Helene.....	60
Figura 3.5 – Procedimento de contaminação das amostras pelo método Guimarães e Helene.....	60
Figura 3.6 – Processo de extração das amostras.....	62
Figura 3.7 – Processo de secagem das amostras.....	64
Figura 3.8 – Procedimento de ataque com ácido nítrico nas amostras.....	65

Figura 3.9 – Procedimento de elevação do pH das amostras.....	66
Figura 3.10 – Curva obtida pela titulação potenciométrica Potencial medido x volume de titulante.....	67
Figura 3.11 – Cálculo do ponto de inflexão da curva pelo método da primeira derivada.....	68
Figura 3.12 – Cálculo do ponto de inflexão da curva pelo método da segunda derivada.....	69
Figura 3.13 – Perfil real de penetração de cloretos.....	71
Figura 3.14 – Perfil de penetração de cloretos ajustado pelo Método dos Mínimos Quadrados a partir da solução da 2ª lei de Fick.....	72
Figura 4.1 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 250g/dm^3$ - 7 dias.....	76
Figura 4.2 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 250g/dm^3$ - 7 dias.....	76
Figura 4.3 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 250g/dm^3$ - 21 dias.....	77
Figura 4.4 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 250g/dm^3$ - 21dias.....	77
Figura 4.5 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 250g/dm^3$ - 35 dias.....	77
Figura 4.6 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 250g/dm^3$ - 35dias.....	78
Figura 4.7 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 165g/dm^3$ - 7 dias.....	78
Figura 4.8 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 165g/dm^3$ - 7 dias.....	78
Figura 4.9 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 165g/dm^3$ - 35 dias.....	79
Figura 4.10 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 165g/dm^3$ -35 dias.....	79
Figura 4.11 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T1-NaCl\ 0,5M$ - 90 dias.....	79
Figura 4.12 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T3-NaCl\ 250g/dm^3$ - 7 dias.....	81
Figura 4.13 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T3-NaCl\ 250g/dm^3$ - 7 dias.....	81
Figura 4.14 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ $T3-NaCl\ 250g/dm^3$ -14 dias.....	81

Figura 4.15 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm ³ -14 dias.....	82
Figura 4.16 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm ³ -21 dias.....	82
Figura 4.17 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm ³ -21 dias.....	82
Figura 4.18 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm ³ -35 dias.....	83
Figura 4.19 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm ³ -35 dias.....	83
Figura 4.20 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 165g/dm ³ -35 dias.....	83
Figura 4.21 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 165g/dm ³ -35 dias.....	84
Figura 4.22 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 0,5M - 90 dias.....	84
Figura 4.23 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm ³ - 7 dias.....	86
Figura 4.24 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm ³ - 7 dias.....	86
Figura 4.25 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm ³ -14 dias.....	86
Figura 4.26 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm ³ -14 dias.....	87
Figura 4.27 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm ³ -21 dias.....	87
Figura 4.28 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm ³ -21 dias.....	87
Figura 4.29 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm ³ -35 dias.....	88
Figura 4.30 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm ³ -35 dias.....	88
Figura 4.31 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 - GH- 7 dias.....	88
Figura 4.32 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 7 dias.....	89
Figura 4.33 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 14 dias.....	89
Figura 4.34 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 14 dias.....	89
Figura 4.35 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 21 dias.....	90

Figura 4.36 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ <i>T7 – GH</i> - 21 dias.....	90
Figura 4.37 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ <i>T7 – GH</i> - 35 dias.....	90
Figura 4.38 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ <i>T7 – GH</i> - 35 dias.....	91
Figura 4.39 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ <i>T7–NaCl 165g/dm³</i> -35 dias.....	91
Figura 4.40 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ <i>T7–NaCl 165g/dm³</i> -35 dias.....	91
Figura 4.41 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ <i>T7 – NaCl 0,5M</i> - 90 dias.....	92
Figura 4.42 – Valores máximos, mínimos e médios do coeficiente de difusão íons cloreto para o <i>T01 CP VARI</i>	94
Figura 4.43 – Valores máximos, mínimos e médios do coeficiente de difusão íons cloreto para o <i>T01 CP VARI +10%S.A</i>	96
Figura 4.44 – Valores máximos, mínimos e médios do coeficiente de difusão íons cloreto para o <i>T07 CP IV</i> método <i>NaCl – 250g/dm³</i> , <i>NT BUILD 443</i> e <i>NaCl 0,5M</i>	97
Figura 4.45 – Valores máximos, mínimos e médios do coeficiente de difusão íons cloreto para o <i>T07 CP IV</i> método <i>GH (2007)</i> , <i>NT BUILD 443</i> e <i>NaCl 0,5M</i>	97
Figura 4.46 – Valores médios do coeficiente de difusão íons cloreto para os três traços estudados nas distintas idades de contaminação e métodos de ensaio.....	99
Figura 4.47 – Comparação do <i>D</i> com Bender (2016) <i>T03 CP VARI +10%S.A</i>	100
Figura 4.48 – Comparação do <i>D</i> com Bender (2016) <i>T07 CP IV</i>	101
Figura 4.49 – Perfis médios <i>T01 CP VARI</i> obtidos pela regressão mínimos quadrados através do ensaio acelerado modificado <i>NaCl 250g/dm³</i>	102
Figura 4.50 – Valores máximos, mínimos e médios para o <i>Cs T01 CP VARI</i>	103
Figura 4.51 – Perfis médios <i>T03 CP VARI +10%S.A</i> . obtidos pela regressão mínimos quadrados através do ensaio acelerado modificado <i>NaCl 250g/dm³</i>	103
Figura 4.52 – Valores máximos, mínimos e médios para o <i>Cs T03 CP VARI +10%S.A</i>	104
Figura 4.53 – Perfis médios <i>T07 CP IV</i> obtidos pela regressão mínimos quadrados através do ensaio acelerado modificado <i>NaCl 250g/dm³</i>	104
Figura 4.54 – Valores máximos, mínimos e médios para o <i>Cs T07 CP IV</i> , método acelerado modificado <i>NaCl 250g/dm³</i>	105

Figura 4.55 – Perfis médios <i>T07 CP IV</i> obtidos pela regressão mínimos quadrados através do método Guimarães Helene (2007).....	105
Figura 4.56 – Valores máximos, mínimos e médios para o <i>Cs T07 CP IV</i> , método Guimarães Helene (2007).....	106
Figura 4.57- Coeficiente de proporcionalidade “Y” em função do expoente “n”.....	110
Figura 4.58 – Variação do <i>Cs</i> no tempo <i>T01 CP V ARI</i> para o método acelerado modificado - <i>NaCl 250g/dm³</i> e determinação do valor “n” a partir de um ajuste exponencial da curva.....	111
Figura 4.59 – Variação do <i>Cs</i> no tempo <i>T03 CP V ARI + 10%S.A.</i> para o método <i>Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³</i> e determinação do valor “n” a partir de um ajuste exponencial da curva.....	111
Figura 4.60 – Variação do <i>Cs</i> no tempo <i>T07 CP IV</i> para o método <i>Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³</i> e determinação do valor “n” a partir de um ajuste exponencial da curva.....	112
Figura 4.61 – Variação do <i>Cs</i> no tempo <i>T07 CP IV</i> para o método Guimarães Helene (2007) e determinação do valor “n” a partir de um ajuste exponencial da curva.....	112
Figura 4.62 – Valores máximos, mínimos e médios para o <i>Cs T01 CP V ARI</i> , método <i>NT BUILD 443 (1995)</i>	114
Figura 4.63 – Valores máximos, mínimos e médios para o <i>Cs T03 CP V ARI + 10%S.A.</i> , método <i>NaCl 400g/dm³</i> , BENDER(2016).....	115
Figura 4.64 – Valores para o <i>Cs T07 CP IV</i> método <i>NaCl 400g/dm³</i> , BENDER(2016).....	116
Figura 4.65 – Variação do <i>Cs</i> no tempo <i>T07 CP IV</i> para o método <i>NaCl 400g/dm³</i> e determinação do valor “n” a partir de um ajuste exponencial da curva.....	117
Figura 4.66 – Relação da idade das amostras com o <i>D</i> para <i>T01 CP V ARI</i>	119
Figura 4.67 – Correlação entre <i>D</i> e a idade das amostras para <i>T01 CP V ARI</i>	119
Figura 4.68 – Relação da idade das amostras com o <i>D</i> para <i>T07 CP IV</i>	121
Figura 4.69 – Correlação entre <i>D</i> e a idade das amostras para <i>T07 CP IV</i>	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação do concreto frente à penetrabilidade de cloretos, por meio da carga total passante de acordo com <i>ASTM C1202:2009</i>	51
Tabela 3.1 – Caracterização dos cimentos utilizados.....	54
Tabela 3.2 – Massa específica real e aparente dos agregados.....	54
Tabela 3.3 – Granulometria dos agregados.....	55
Tabela 3.4 – Materiais utilizados na dosagem dos concretos.....	56
Tabela 3.5 – Resistência à compressão aos 28 dias.....	57
Tabela 4.1 – Resultados do <i>Cs</i> e <i>D</i> para o traço <i>T01 CP VARI</i>	80
Tabela 4.2 – Resultados do <i>Cs</i> e <i>D</i> para o traço <i>T03 CP VARI +10%S.A.</i>	85
Tabela 4.3 – Resultados do <i>Cs</i> e <i>D</i> para o traço <i>T07 CP IV</i>	93
Tabela 4.4 – Resultados do <i>Cs</i> e <i>D</i> obtidos pro Bender (2016) a partir da contaminação em solução saturada de <i>NaCl</i> para o traço <i>T03 CP VARI+10%S.A.</i>	100
Tabela 4.5 – Resultados do <i>Cs</i> e <i>D</i> obtidos pro Bender (2016) a partir da contaminação em solução saturada de <i>NaCl</i> para o traço <i>T07 CP IV</i>	100
Tabela 4.6 – Relação entre idade da amostra e coeficiente de difusão <i>T01 CP VARI</i>	118
Tabela 4.7 – Relação entre idade da amostra e coeficiente de difusão <i>T07 CP IV</i>	120
Tabela 4.8 – Coeficiente de variação dos valores de <i>D</i> para os distintos métodos de ensaios e idades de contaminação <i>T07 CP IV</i>	122

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Teor limite de cloreto para diversas normas.....	42
Quadro 2.2 – Coeficiente de difusão a 25°C, em pastas de cimento com a/c igual a 0,5.....	42
Quadro 3.1 – Quantidade de amostras ensaiadas nos distintos traços de concreto e métodos de ensaio.....	61
Quadro 3.2 – Quantidade em gramas ensaiadas para obtenção dos perfis com idade de contaminação superior a 7 dias.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{\AA}$	Ångström
α	Nível de significância
J	Fluxo de difusão
dC/dx	Gradiente de concentração
D	Coeficiente de difusão [mm^2/s]
$D_{\text{médio}}$	Coeficiente de difusão médio [mm^2/s]
C	Teor de cloretos em relação à massa de concreto [%]
C_s	Concentração superficial de cloretos em relação a massa de concreto [%]
C_o	Concentração inicial de íons de cloreto no interior do concreto [%]
C_x	Concentração de cloretos na profundidade x [%]
t	Tempo [s]
x	Profundidade [mm]
V_{Cl}	Volume total de cloretos na amostra analisada [ml]
V_{Branco}	Volume de cloretos presentes no Branco [ml]
$V_{\text{add de Cl}}$	Volume adicionado de cloretos [ml]
$M_{Cl\ 1M\ de\ NaCl}$	Massa de cloreto em 1M de $NaCl$ [g/mol]
$C_{\text{solução}}$	Concentração da solução titulante
M_{amostra}	Massa da amostra seca submetida à titulação potenciométrica [g]
M_t	Massa total de cloretos difundidos no tempo t .

ΔE	Variação de potencial elétrico [mV]
ΔV	Variação de volume da solução titulante [ml]
α	Nível de significância [%]
H_o	Hipótese inicial
H_1	Hipótese alternativa
k	Constante de proporcionalidade
Y	Coefficiente de proporcionalidade
CV	Coefficiente de variação [%]

LISTA DE ABREVIATURAS

a/ag	Relação água aglomerante
a/c	Relação água cimento
$CP\ IV$	Cimento Portland Pozolânico
$CP\ II - F$	Cimento Portland Composto com adição de Fíler
$CP\ V\ ARI$	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
$CP\ I$	Cimento Portland comum
$CP\ II$	Cimento Portland composto
$CP\ III$	Cimento Portland alto-forno
$CORSAN.$	Companhia Riograndense de Saneamento
$CPs.$	Corpos-de-Prova
Cl^{-}	Íon cloreto
C_3A	Aluminato tricálcico
C_2S	Silicato dicálcico
C_3S	Silicato tricálcico
$C-S-H$	Silicato de cálcio hidratado
$CaOH_2$	Hidróxido de cálcio
CO_2	Gás carbônico
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio

e^-	Elétron livre
Fe^{++}	Íon de ferro
$Fe(OH)_2$	Hidróxido de ferro
$Fe(OH)_3$	Hidróxido férrico
Fe_2O_3	Óxido férrico
$FeCl_3$	Cloreto de ferro
H_2O	Água
IAR	Incorporador de ar
$NaCl$	Cloreto de sódio
O_2	Oxigênio
OH^-	Íon hidroxila
pH	Potencial de hidrogênio
PVC	Policloreto de Vinil
$S.A$	Sílica Ativa
$T01 CP VARI$	Traço de concreto dosado com cimento de alta resistência inicial
$T03 CP VARI + 10\%S.A.$	Traço de concreto dosado com cimento de alta resistência inicial com adição de 10% de sílica ativa.
$T07 CP IV$	Traço de concreto dosado com cimento pozolânico

1. INTRODUÇÃO

O concreto provou ser o material de construção mais adequado para a execução de estruturas, superando, com grande vantagem, alternativas viáveis como a madeira, o aço e a alvenaria. (HUSNI *et al*, 2003). Tal constatação deve-se ao fato de que esse material apresenta grandes vantagens em sua utilização, dentre as quais é possível citar a facilidade com que elementos estruturais podem ser executados em diferentes formas e tamanhos, bem como seu baixo custo, haja vista que os seus principais constituintes são o cimento Portland e agregados, materiais que são relativamente baratos e comumente disponíveis na maior parte do mundo. Esses fatores fazem com que o concreto seja um material largamente utilizado em todo mundo, ocupando o segundo lugar entre os produtos mais consumidos pela humanidade. (METHA e MONTEIRO, 2008).

Vale mencionar, que a durabilidade das estruturas de concreto armado, já foi considerada ilimitada, uma vez que a armadura presente no interior do concreto estaria protegida da corrosão, mesmo em ambientes agressivos. Porém, com o uso crescente do concreto armado, esse entendimento mudou, visto que a indústria da construção civil começou a confrontar-se com uma grande gama de manifestações patológicas nas estruturas de concreto e elevados gastos com seus reparos. Esse cenário despertou o interesse em várias instituições e organismos internacionais, especializados em concretos, a aumentarem seus estudos sobre a durabilidade e, assim, obterem um melhor entendimento do comportamento dessas estruturas em serviço. (ANDRADE, 2005).

Assim sendo, muito se tem discutido acerca da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado e protendido em sua fase de projeto, haja vista que a resistência do material deixou de ser a única característica cobijada pelos projetistas. Desse modo, o conhecimento da interação entre estrutura e meio ambiente, do ponto de vista físico e químico, bem como a modelagem dos fenômenos ali presentes são de suma importância no desenvolvimento de projetos que visem aspectos de durabilidade. (NEPOMUCENO, 2005).

Segundo Ribeiro e Cunha (2014), a durabilidade de uma estrutura é função de determinados parâmetros como a agressividade ambiental, as características da construção, os critérios de desempenho desejados e do tempo, ou seja, da vida útil requerida para uma estrutura. Além disso, Helene (1993) cita que a vida útil de uma estrutura de concreto armado ou protendido está diretamente ligada ao período de tempo necessário para que agentes agressivos penetrem em sua rede de poros ou fissuras do concreto, atingindo a armadura e provocando a corrosão. É válido destacar que a corrosão das armaduras é uma das patologias mais frequentes nas estruturas de concreto armado e que sua evolução tende a comprometer significativamente a segurança estrutural de uma determinada obra.

Nessa perspectiva, para a garantia da vida útil, ou seja, do período pelo qual uma estrutura conserva suas características mínimas de funcionalidade, resistência e aspectos exigidos, sem elevados custos de manutenção, torna-se indispensável o estudo de fatores que possam vir a ocasionar a destruição da película passiva que se forma sobre o aço envolvido pelo concreto. A película passiva é uma proteção química conferida ao aço devido à alta alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto. A perda ou ruptura dessa proteção, ainda que localizada, pode desencadear um processo de deterioração, na maioria das vezes, progressivo e autoacelerante. (SOUSA, 2014).

É válido citar que o filme passivante que envolve o aço é estável quando o pH da solução de poros no interior do concreto endurecido for maior que 12 e quando não houver presença de quantidade suficiente de cloretos ou diminuição da alcalinidade do concreto, esta última causada, principalmente, pelas reações de carbonatação do concreto (GUIMARÃES, 2000). Dessa forma, para estruturas em concreto armado ou protendido expostas em ambiente marítimo, a resistência ao ingresso de cloretos é um fator determinante para a sua vida útil, uma vez que dentre os íons despassivantes, os cloretos são os principais causadores da corrosão nas armaduras (RINCÓN *et al*, 1998).

Logo, quando um concreto se encontra exposto em um ambiente rico em sais, o mesmo pode ser contaminado através de agentes presentes no meio em que esse material foi inserido. Isso ocorre devido ao seu caráter poroso e a existência de uma solução alcalina na sua rede de poros, assim, os íons cloreto podem penetrar no interior do concreto e serem transportados desde superfícies mais expostas até as camadas mais internas. Dentre os mecanismos de transportes de cloretos através da rede de poros ou fissuras do concreto, destaca-se a difusão, mecanismo esse que ocorre por meio de um gradiente de concentração. (NEVILLE, 1997).

A previsão da vida útil das estruturas de concreto, geralmente, é realizada através da medição dos teores de íons cloreto em profundidades conhecidas do elemento analisado em um determinado tempo. A partir disso, e utilizando-se a solução realizada por Crank (1975), da segunda lei de Fick, uma das expressões matemáticas mais empregadas para efetuar a previsão da velocidade de penetração de cloretos, torna-se possível traçar o perfil de penetração de cloretos e determinar, então, o coeficiente de difusão de cloretos.

Nesse contexto, salienta-se que a determinação do coeficiente de difusão de íons de cloretos em concretos na condição saturada pode ser realizada em laboratório, de acordo com ensaios normatizados, em um período mínimo de contaminação de 35 dias. Assim sendo, constata-se a necessidade da existência de métodos de ensaios precisos e ágeis, capazes de avaliar como os materiais constituintes de uma determinada estrutura de concreto armado ou protendido irão se

comportar em ambientes que possuem a presença de cloretos. É imprescindível, ainda, considerar o fato de que trabalhos científicos, principalmente nos cursos de pós-graduação, dispõem de um pequeno período de tempo para serem desenvolvidos, o que justifica a importância de obter-se resultados confiáveis em um curto intervalo de tempo.

Sendo assim, cabe deixar claro que este estudo possui o intuito de investigar o comportamento do coeficiente de difusão (D) e da concentração superficial de cloretos (C_s) ao longo do tempo utilizando dois métodos de ensaios distintos: um utilizando uma solução contaminante com concentração de cloretos, aproximadamente, oito vezes superior à encontrada na água do mar, outro expondo a amostra em contato direto com o contaminante. Ambos os ensaios serão analisados nas idades de contaminação que variam entre 7, 14, 21 e 35 dias. Vale destacar, por fim, que com esta pesquisa pretende-se dar continuidade ao estudo de Guimarães *et al* (2011), o qual concluiu, através da aplicação do exposto na *NT BUILD 443* (1995) – $NaCl$ 165g/dm³, que o coeficiente de difusão de íons cloreto apresentou resultados muito próximos em idades de contaminação de 7 e 35 dias e que a concentração superficial de cloretos se manteve constante ao longo do tempo para o traço de concreto estudado. Assim, os autores recomendam realização de ensaios utilizando uma solução com concentração de $NaCl$ superior a esse método, uma vez que o seu valor de saturação ainda encontra-se distante de 165g/dm³.

1.1 Objetivos

A presente pesquisa possui como objetivo principal realizar a proposta de um novo método de ensaio acelerado para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos na condição saturada. Desse modo, no intuito de atingir o mencionado anteriormente, será necessário alcançar os objetivos secundários os quais visam avaliar o comportamento do coeficiente de difusão de íons cloreto e a concentração superficial de cloretos, em três tipos de concretos a partir da aplicação de dois métodos de ensaios Guimarães e Helene (2007) e o que será chamado nesse trabalho de Método Acelerado Modificado – $NaCl$ 250g/dm³, sendo que as idades de contaminação das amostras irão variar entre 7, 14, 21 e 35 dias. Os resultados encontrados serão comparados com os obtidos pelo método normatizado *NT BUILD 443* (1995) – $NaCl$ 165g/dm³ na idade de 35 dias e com o método tradicional $NaCl$ 0,5M para a idade de 90 dias de contaminação. Com isso pretende-se verificar se os resultados serão satisfatórios para o coeficiente de difusão de íons de cloretos em idades de contaminação entre 7 e 21 dias, sugerindo-se, assim, a diminuição do tempo de contaminação nesses ensaios, permitindo a obtenção de resultados de maneira mais ágil. Além disso, os objetivos secundários incluem, também, a verificação do comportamento do coeficiente de

difusão de íons cloretos em relação às idades das amostras ensaiadas, observando-se se há uma correlação linear entre esses dois parâmetros.

1.2 Estrutura da Pesquisa

Com vistas a tornar mais clara à exposição das ideias, o presente trabalho foi dividido em seis capítulos, dos quais, este é o primeiro.

No presente capítulo, são apresentadas a importância e a justificativa do tema, bem como exposto o objetivo da pesquisa desenvolvida.

O capítulo 2 é constituído de uma pesquisa bibliográfica sobre a temática investigada, desta forma, são relatados aspectos referentes sobre a durabilidade do concreto, bem como um apanhado dos principais mecanismos de transporte que ocorrem na rede de poros do concreto e têm influência sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado. Além disso, são abordados também, nesse título, dados acerca da corrosão das armaduras e da influência dos cloretos na mesma. Por fim, esse capítulo é encerrado apresentando alguns métodos de ensaios acelerados utilizados para prever a velocidade de penetração de íons cloreto no concreto.

A descrição dos ensaios realizados na pesquisa, bem como os dados referentes à caracterização dos materiais, tipos de concretos estudados, metodologia aplicada para a constatação do coeficiente de difusão de íons cloretos e da concentração superficial de cloretos, bem como a análise estatística aplicada na comparação dos dados obtidos são apresentados no capítulo 3.

Já o capítulo 4 expõem os resultados advindos dessa pesquisa, assim sendo, neste título são encontrados os perfis de penetração de cloretos para os diferentes traços de concreto e métodos de ensaios aplicados, os valores para os coeficientes de difusão de íons cloreto e sua comparação entre os valores para os ensaios propostos com os ensaios normatizado e tradicional, além de serem exibidos os valores para a concentração superficial de cloretos e uma breve análise do seu comportamento ao longo do tempo.

Então essa pesquisa é encerrada com os capítulos 5 e 6 onde são apresentadas as conclusões obtidas a partir do trabalho realizado, ainda, as sugestões para pesquisas futuras e o referencial bibliográfico utilizado na elaboração desta pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada uma revisão acerca dos fatores desencadeadores da deterioração das estruturas de concreto armado, sendo ressaltadas, principalmente, as causas relacionadas à ação dos cloretos. Além disso, serão abordados de forma sucinta alguns ensaios utilizados para prever a resistência do concreto à penetração de íons cloreto.

2.1 Durabilidade das estruturas de concreto

Segundo a norma ACI 201. 2R (2001), a durabilidade pode ser entendida como a capacidade que uma estrutura de concreto possui de resistir às ações de intempéries, ataque químico, abrasão ou outro processo de deterioração, mantendo suas características iniciais no que tange a sua qualidade e capacidade de utilização.

Já a NBR 6118:2014 define durabilidade como a capacidade das estruturas de concreto resistir às condições ambientais previstas na época do projeto, mantendo sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil, quando utilizadas conforme o preconizado em projeto.

Assim sendo, o concreto é considerado durável quando desempenha as funções que lhes foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade esperada durante um período de vida previsto. (SALTA, 1999).

Segundo Helene (1993), a durabilidade de uma estrutura de concreto está diretamente ligada a alguns fatores, como o traço do concreto (relação a/ag e tipo de cimento), adensamento efetivo do concreto na estrutura, cura e cobrimento das armaduras, pois são esses os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar da água, permeabilidade, migração de íons e difusividade de água ou de gases, bem como a maioria das propriedades mecânicas. Contudo, além disso, torna-se imprescindível levar em consideração as características do meio ambiente onde essa estrutura será inserida.

Vale lembrar que o concreto armado possui uma excelente durabilidade, característica que faz dele o material mais utilizado em todo o mundo. Apesar de sua qualidade, os agentes naturais presentes no ambiente onde essa estrutura será inserida, provocam o seu envelhecimento, isto é, a perda progressiva de desempenho estético, funcional e, até mesmo, estrutural. A velocidade em que ocorrerá a perda de desempenho dependerá das ações e cuidados tomados nas fases de projeto e execução, incluindo o controle de materiais e de produção (ANDRADE, 2005). Assim sendo, se não for elaborado um bom projeto e caso não

forem adotadas boas práticas construtivas durante a execução, as estruturas irão apresentar patologias provenientes do desgaste ambiental, previamente ao fim de sua vida útil.

Desta forma, a durabilidade não é simplesmente uma característica dos materiais utilizados, pois depende também do resultado da interação com o meio ambiente onde a estrutura está inserida (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Como, em geral, a melhoria das condições ambientais é impraticável e considerando que quanto mais interligada for a rede de poros presentes nos concretos, mais vulnerável esse material é ao transporte interno de agentes agressivos, sendo assim, maior a sua probabilidade de degradação. Portanto, fica evidente que a única maneira de evitar a degradação dos concretos é reduzir ao menor nível possível sua porosidade. (SOUZA E RIPPER, 1998).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a adição de material pozolânico, em teores adequados, aumenta a durabilidade dos concretos, desde que seja efetuada uma cura adequada. Isso ocorre devido ao fato do hidróxido de cálcio ($CaOH_2$), formado nas reações de hidratação do cimento, reagir com a pozolana, formando silicato de cálcio hidratado ($C-S-H$), o qual possui uma estrutura bem menos porosa quando comparado ao $CaOH_2$, proporcionando, assim, uma redução na porosidade dos concretos e aumentando sua resistência mecânica. Dessa forma, o concreto se torna mais resistente a ambientes agressivos, uma vez que é dificultado o ingresso de agentes que possam causar sua deterioração.

Portanto, a especificação dos cimentos, agregados e demais constituintes do concreto, bem como o cuidado nas etapas de produção até o planejamento da manutenção deve ser balizado, pois a durabilidade de uma estrutura de concreto está inexoravelmente ligada às condições do meio em que ela foi inserida. (RIBEIRO, 2014).

2.2 Vida útil das estruturas de concreto

A estimativa da vida útil das estruturas de concreto armado é de suma importância para que se possa abordar a questão da durabilidade das estruturas de forma quantitativa (PEREIRA, 2001). Nessa perspectiva, Helene (1997) expõe que o estudo da durabilidade evoluiu devido ao conhecimento adquirido sobre os mecanismos de transporte de fluídos em meios porosos, permitindo, assim, associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos. Por conta disso, tornou-se possível realizar a avaliação da vida útil de uma estrutura em número de anos, e não somente por critérios qualitativos de adequação da estrutura a certo grau de exposição.

A NBR 6118:2014 conceitua vida útil como o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto sem que haja intervenções significativas, desde que

atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos na fase de projeto, bem como a execução dos reparos decorrentes de danos acidentais. Em outros termos, pode-se dizer que vida útil é o período de tempo em que a estrutura conserva seus requisitos de projeto como segurança, funcionalidade e estética, sem custos inesperados de manutenção. (ANDRADE, 2000).

Conforme já dito, a criação de modelos com o intuito de estimar a vida útil de uma estrutura de concreto é de fundamental importância para melhorar o conhecimento sobre os mecanismos de degradação por parte dos projetistas. Dentre os modelos existentes, pode-se destacar o desenvolvido por Tuutti (1982), apresentado na Fig. 2.1, o qual estabeleceu um modelo qualitativo para estimar a degradação ocasionada pela corrosão das armaduras. Nessa concepção, para inferir a vida útil da estrutura, o processo de degradação é dividido em dois estágios: o estágio de iniciação e o estágio de propagação.

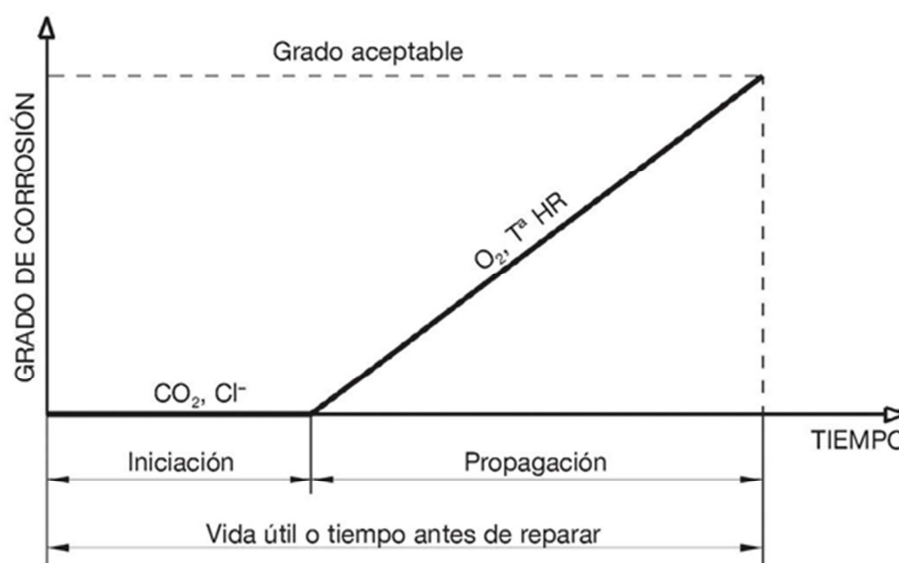


Figura 2.1 – Modelo de vida útil proposto por Tuutti para estruturas de concreto armado.

(Fonte: Tuutti, 1982)

Cabe salientar que o estágio de iniciação é caracterizado pela ocorrência da penetração de agentes agressivos para o interior do concreto, sem causar perda da funcionalidade das estruturas. A duração deste período está relacionada à velocidade com que a região do cobrimento é modificada pela presença de agentes agressivos ou redução de sua alcalinidade. Ressalta-se, dessa forma, que nesse estágio ocorre um baixo grau de corrosão. Já no estágio de propagação, os fenômenos de degradação ocorrem de maneira efetiva e, sendo assim, começa a ser evidenciado diversos tipos de manifestações patológicas na estrutura de concreto armado.

Nessa fase, o desempenho da estrutura é atingido, visto que ela, geralmente, apresenta uma acelerada perda de seção da armadura e, além disso, em função do grau de corrosão, pode haver o surgimento de fissuras, o que acelera ainda mais o processo de deterioração.

A partir do modelo exposto por Tuutti (1982), Helene (1993) propôs a conceituação de vida útil de uma estrutura em concreto armado, apresentando situações distintas frente à corrosão das armaduras. Tais situações podem ser observadas na Fig. 2.2.

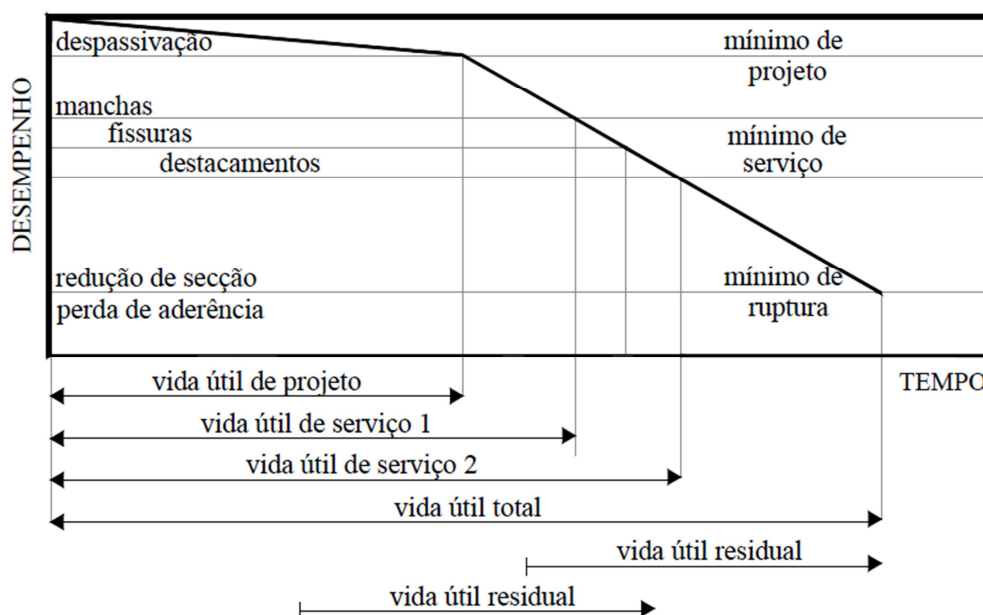


Figura 2.2 – Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras (Fonte: Helene, 1993).

A partir do apresentado na Fig 2.2, Helene (1993), define:

- Vida útil de projeto, também conhecida como período de iniciação, se caracteriza pelo fato de que nesta fase os agentes agressivos, tais como cloretos, gás carbônico e sulfatos, ainda estão penetrando através da rede de poros do concreto localizado na camada de cobrimento das armaduras, nesse período não são causados danos efetivos as armaduras. O valor usualmente adotado para tal vida útil em estruturas de concreto armado convencionais é de 50 anos, enquanto para pontes esse período pode se estender para 100 ou até 200 anos, no caso de barragens. (RIBEIRO, 2014).
- Vida útil de serviço ou utilização: neste estágio, os efeitos dos agentes agressivos começam a se manifestar através do aparecimento de manchas no concreto consequentes da corrosão das armaduras, ou pela presença de fissuras provenientes dos esforços internos de tração causados pela expansão dos óxidos de ferro atacado por agentes químicos. Essa vida

útil é de difícil determinação, uma vez que é variável de caso para caso, pois em certos locais é inadmissível que uma estrutura de concreto apresente manchas de corrosão ou fissuras. Em outros casos, somente o início desprendimento de lascas de concreto, colocando em risco a integridade de pessoas e bens, pode definir o momento a partir do qual deve-se considerar terminada a vida útil de serviço.

c) Vida útil total: período de tempo correspondente à ruptura ou colapso total ou parcial da estrutura. Neste momento a estrutura está condenada ou os custos de reparos são demasiadamente elevados.

d) Vida útil residual: corresponde o período de tempo que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, contado a partir da data que a estrutura veio a receber uma vistoria e/ou intervenção.

Conforme Andrade (2005), a vida útil de uma estrutura depende do desempenho dos elementos estruturais e não estruturais como, por exemplo, juntas, aparelhos de apoio, drenos entre outros, os quais, geralmente, possuem vida útil menor que a do concreto, sendo necessário, assim, o estabelecimento de um programa adequado de manutenção a fim de que não prejudiquem a estrutura como um todo.

Dessa forma, as medidas necessárias para estimar a vida útil das estruturas são escolhidas levando-se em consideração as características dos materiais, as condições de exposição e os modelos de deterioração. Porém, a determinação da durabilidade e da vida útil das estruturas é extremamente difícil de ser realizada devido ao sinergismo entre os diversos fatores que regem as várias formas de degradação.

Dentre os diversos métodos utilizados para prever a vida útil das estruturas de concreto armado, pode-se destacar aqueles fundamentados em experiências anteriores, sendo que, tal tipo de verificação foi à primeira tentativa para assegurar que as estruturas construídas apresentassem um nível mínimo de desempenho durante seu período de utilização. Desta forma, a metodologia era baseada no resgate dos dados de projeto de obras construídas que apresentaram um desempenho satisfatório para servir de referencial na construção de novas estruturas, ou seja, são os métodos que apresentam limites aceitáveis da relação a/c , limites mínimos do consumo de cimento e espessura de cobrimento das armaduras, considerando de forma qualitativa a agressividade ambiental. Citam-se também os ensaios acelerados que são realizados visando determinar um fator que relacione os resultados de degradação obtidos em laboratório com os obtidos através da verificação da evolução do dano nos componentes quando expostos em condições naturais de envelhecimento. Possibilitando, assim, obter informações relevantes a respeito dos materiais quando submetidos às condições de utilização. Vale destacar ainda a

abordagem determinística, a qual se baseia, fundamentalmente, nos mecanismos de transporte de gases, massa de íons, através da microestrutura porosa do concreto. Por fim, é importante salientar a abordagem probabilística, a qual, no caso da previsão da vida útil de estruturas, utiliza de métodos de confiabilidade que já são ferramentas amplamente aplicadas na Engenharia Estrutural, para predizer como se comportará os materiais de uma determinada estrutura frente à ação de agentes agressivos (HELENE, 1997).

Cabe reforçar que utilização dos métodos citados anteriormente, na previsão da vida útil de estruturas de concreto armado e protendido requer o conhecimento e entendimento do funcionamento da rede de poros do concreto e dos mecanismos de transporte que podem atuar sobre ela, dessa forma, o subtítulo a seguir abordará dos respectivos temas.

2.3 Estrutura de poros e mecanismo de transporte no concreto

Segundo Neville (1997), a durabilidade das estruturas de concreto armado e protendido está diretamente ligada à facilidade ou dificuldade com que os agentes agressivos irão penetrar no concreto e se deslocar no seu interior. Portanto, a durabilidade está intimamente ligada à capacidade de interação do material com o meio exterior e às características da sua estrutura porosa. (CASCUDO E CARASEK, 2014).

Além do grau de interligação da rede de poros do concreto, o transporte de fluídos e materiais no concreto depende ainda da concentração superficial das substâncias que penetram no material, das condições ambientais, do teor de umidade interna e da temperatura. (NEPOMUCENO, 2005).

Dessa forma, nessa seção da pesquisa será realizada uma breve apresentação da estrutura porosa dos concretos, além da exposição de algumas grandezas físicas que permitem caracterizar as forças impulsoras do transporte de agentes agressivos no concreto. É válido destacar que entre os mecanismos de transporte que atuam em concretos na condição saturada tem-se a difusão, a qual corresponde ao mecanismo de transporte da matéria em escala molecular que se dá a partir da diferença de um gradiente de concentração. Porém, a difusão também ocorre quando o concreto não se encontra completamente saturado, podendo ocorrer de forma isolada ou combinada a outros mecanismos de transporte, dentre os quais se pode destacar os que atuam por diferença de pressão (permeabilidade), por sucção capilar (absorção), por diferença de potencial (migração) e por um gradiente de densidade ou temperatura (convecção). Tais mecanismos de transporte serão discutidos na seção 2.3.2.

2.3.1 Estrutura porosa dos concretos

Apesar da aparente simplicidade do concreto, esse material apresenta uma estrutura altamente heterogênea e complexa, uma vez que é um material composto por diferentes tipos de sólidos e vazios. (COIMBRA *et al*, 2006).

A busca por alta compacidade será sempre uma condição necessária para se alcançar boa durabilidade nos concretos, uma vez que é um material compósito que associa uma fase granular (fase agregado) com uma fase ligante (pasta), sendo sua estrutura porosa totalmente dependente do arranjo dos agregados e da estruturação da fase ligante. Tendo em vista que o desempenho do concreto, frente ao ataque por agentes agressivos, está diretamente ligado à estrutura, distribuição e tamanhos dos poros, conceber um concreto durável, consiste, então, em aperfeiçoar o esqueleto granular e buscar uma fase ligante densa, conciliando tais ações às exigências de produção nos canteiros de obra. (CASCUDO E CARASEK, 2014).

Cabe mencionar que o surgimento de vazios e caminhos na estrutura do concreto ocorre devido à inevitável incorporação de ar, às falhas no processo de adensamento, bem como ao uso de uma quantidade superior de água necessária para a hidratação do cimento durante a dosagem do concreto, de forma que essa água em excesso, ao evaporar em conjunto com o teor de ar incorporado e com o ar aprisionado, cria vazios em sua estrutura. Esses vazios ou poros formam uma rede conectada com o exterior que é relevante no processo de transporte de gases, água e substâncias dissolvidas para o interior do concreto. A destruição do concreto e a corrosão das armaduras dependem, portanto, dessa estrutura de poros, na qual os mecanismos de degradação se fundamentam. (RIBEIRO, 2014).

Desse modo, a estrutura de poros presente na pasta de cimento endurecida deve ser avaliada tanto pela sua dimensão como pela sua interligação e interconexão por meio de canais. De acordo com Cascudo (1997), os poros presentes no concreto podem ser classificados em: poros de ar aprisionado (decorrentes do processo de adensamento), poros de ar incorporado (originados pela aplicação de aditivos IAR), poros capilares (oriundos da saída de água livre do concreto) e poros de gel (devido à água de gel). Outra classificação comumente encontrada é a apresentada por Mehta e Monteiro (2008), onde os poros são divididos em macroporos, poros capilares e microporos.

Em sua classificação Mehta e Monteiro (2008) expõem que os macroporos são os vazios incorporados ou aprisionados à massa de concreto e são tipos de poros com dimensões bem maiores que os demais, sendo que os vazios de ar aprisionado podem chegar a 3mm, enquanto que os vazios de ar incorporado normalmente variam entre 50 e 200 μ m. Já os poros capilares são espaços não ocupados pelos produtos de hidratação do cimento,

originando vazios ocupados pela água de amassamento em excesso, a dimensão desses poros depende muito da relação água/cimento e do grau de hidratação da pasta, assim, o autor destaca que em pastas de cimento bem hidratadas e com baixa relação a/c os vazios capilares podem variar entre 10 e 50nm, já em pastas com alta relação a/c , nas primeiras idades de hidratação, os vazios capilares podem ser maiores, entre 3 e 5 μ m. No que se refere aos microporos, também chamados de vazios interlamelar, são espaços localizados entre os produtos de hidratação do cimento e sua dimensão pode variar de 5 a 25 Å.

Nessa perspectiva, Carcaño e Moreno (2006), expõem que os poros que apresentam maior relevância no que se refere à durabilidade do concreto são os macroporos e os poros capilares. Os poros de gel, no entanto, em virtude do tamanho, geralmente, não exercem trocas de fluídos com o ambiente externo. Por conta disso, o controle na execução das estruturas no que diz respeito ao correto adensamento e respeito das proporções do traço, principalmente do fator água/cimento, é de suma importância para a garantia da vida útil das estruturas de concreto armado.

2.3.2 Mecanismos de transporte que interferem na durabilidade do concreto armado.

Como já mencionado anteriormente, os principais mecanismos de transporte que atuam no concreto e podem ser considerados como os mais influentes no fenômeno de corrosão das armaduras são a permeabilidade, a absorção capilar, a migração iônica e a difusão, os quais podem atuar de forma simultânea ou isolada ao longo do tempo, dependendo das condições de exposição que o concreto esteja submetido (CALÇADA, 2004).

O estudo desses mecanismos é extremamente significativo para se estabelecer parâmetros de projeto que visem à garantia da vida útil das estruturas. No entanto, devido à complexidade dos fenômenos, ainda é preciso uma grande quantidade de estudos que visem simplificar a modelagem dos fenômenos envolvidos, correlacionados com o comportamento dos materiais quando submetidos a ambientes agressivos.

Dessa forma, a seguir, serão abordados, de forma sucinta, os mecanismos básicos de penetração de agentes agressivos através da rede de poros do concreto.

2.3.2.1 Absorção capilar

Segundo Ribeiro (2014b) a absorção capilar pode ser definida como o fluxo de um fluído devido a um gradiente de umidade ou como o transporte de líquidos ocasionado por conta da tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. Nepomuceno (2005) expõe que a

tensão superficial do líquido que penetra no interior dos poros do concreto gera forças capilares que controlam o ingresso do fluido e são dependentes da viscosidade e densidade do líquido, bem como das características do próprio concreto, como a sua estrutura de poros (raio médio, tortuosidade e interconexão) e grau de saturação. É válido salientar que esse mecanismo de transporte não ocorre em concretos saturados, pois deve haver a presença de poros secos ou parcialmente secos para que seja possível a absorção da água por capilaridade (HELENE, 1993).

De acordo com Andrade (2001) a absorção de água no concreto é um dos fatores mais difíceis de serem controlados. Em princípio, quanto menor o diâmetro dos poros, maior a pressão e, conseqüentemente, maior a profundidade de penetração de água no concreto, no entanto, poros menores apresentam uma menor interligação. Assim, poros capilares com maiores diâmetros, absorvem pouca água por capilaridade, porém, por apresentarem uma estrutura de poros mais robusta podem acarretar em problemas de permeabilidade e carbonatação acentuada.

2.3.2.2 Permeabilidade

O fluxo de um fluido ocasionado por um gradiente de pressão é definido como permeabilidade, tal fenômeno é caracterizado pela facilidade com que um líquido atravessa um sólido poroso sob uma diferença de pressão (HELENE, 2014).

Neville (1997) destaca que a permeabilidade do concreto de cobrimento, das estruturas em concreto armado, quando dosado com agregados densos e não apresentar imperfeições e/ou microfissuras geradas, por exemplo, pelos fenômenos de exsudação e retração, é fortemente determinada pela permeabilidade da pasta de cimento. De forma que, a permeabilidade da pasta de cimento depende do grau de hidratação e da relação água/cimento do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008). A ocorrência desse mecanismo de transporte de fluidos no concreto é típica de locais como estações de tratamento de águas, esgotos, tanques industriais, reservatórios, além das estruturas marítimas (ANDRADE, 2001).

2.3.2.3 Migração iônica

Helene (1993) define migração iônica como o processo de transporte ocasionado por conta de uma diferença de potencial elétrico, o qual possibilita o deslocamento de íons presentes no meio aquoso para que se neutralize o efeito da diferença de potencial. Ainda, segundo esse mesmo autor, o campo elétrico gerado pode ser oriundo da deflagração de

pilhas de corrosão eletroquímicas ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa.

Dentre as estruturas que geralmente sofrem, com migração gerada por uma fonte externa, Nepomuceno (1992) cita as de suporte de veículos que utilizam corrente elétrica para sua movimentação (dormentes de metrô) e estruturas de concreto com proteção catódica por corrente impressa.

Alguns ensaios acelerados utilizam desse mecanismo de transporte para avaliar a resistência à penetração dos íons de cloretos no concreto. Além disso, os ensaios de migração podem servir de base para o cálculo de coeficiente de difusão aparente ou estacionário de íons no concreto (NEPOMUCENO, 2005).

2.3.2.4 Difusão

A difusão pode ser entendida como um processo de transporte de substâncias de um meio para outro devido a existência de um gradiente químico, geralmente, de concentração (RIBEIRO, 2014b). Durante esse fenômeno, ocorre o transporte de massa por efeito da diferença de concentração, proporcionado por dois meios distintos em contato íntimo, assim, substância se difunde em uma direção de forma a igualar as concentrações, eliminando o gradiente. (SILVA FILHO, 1994).

Existem vários modelos matemáticos, os quais abordam a corrosão das armaduras do concreto devido à ação da difusão de cloretos, que podem ser utilizados na previsão da vida útil das estruturas de concreto armado. Dentre eles, destacar-se o modelo proposto por Fick, o qual é comumente empregado (ANDRADE, 2001). Assim sendo, de acordo com o modelo de Fick o fluxo de difusão pode ser definido a partir de dois estágios. O primeiro é caracterizado pela ocorrência de fluxo constante, ou seja, o gradiente se mantém através da entrada e saída contínua da substância no sentido do extremo de maior concentração para o de menor e é chamado de estado estacionário. Esse estado é representado pela primeira lei de Fick, a qual estabelece que o fluxo de difusão J é proporcional ao gradiente de concentração $\partial C / \partial x$, conforme Eq. 2.1. É válido salientar, que o sinal negativo apresentado na equação indica que o fluxo ocorre no sentido oposto ao do gradiente de concentração, isto é, no sentido das concentrações altas para as concentrações baixas. (CRANK, 1975)

$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.1)$$

Onde:

J – fluxo de difusão

D – coeficiente de difusão

$\frac{\partial C}{\partial x}$ – Gradiente de concentração

C – concentração de íons na solução

x – profundidade considerada

No entanto, segundo Justnes & Rodum (1997) *apud* Hoffmann (2001), o coeficiente de difusão no estado estacionário não representa na prática o transporte dos íons cloreto através dos poros ou fissuras do concreto, não podendo assim ser diretamente utilizado para a estimativa da vida útil das estruturas.

Já o segundo estado é o chamado de não estacionário ou aparente, o qual descreve a maioria das situações práticas que envolvem difusão, pois considera que o fluxo de difusão é dependente do tempo (t) e da profundidade (x). Para descrever esse mecanismo de transporte é utilizada a equação diferencial parcial conhecida como segunda lei de Fick a qual é apresentada na Eq. 2.2.

$$\frac{dC}{dt} = D_{ap} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

A solução da equação 2.2 é apresentada a seguir pela Eq. 2.3:

$$C(x, t) = C_o + (C_s - C_o) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{ap} \cdot t}}\right) \quad (2.3)$$

Onde:

$C(x, t)$ = concentração de íons de cloretos em relação à massa de cimento na profundidade (x) a partir da superfície do concreto em um dado tempo (t). [%]

C_o = concentração inicial de íons de cloreto no interior do concreto. [%]

C_s = concentração superficial de cloretos admitida como constante. [%]

D_{ap} = coeficiente de difusão aparente considerado constante. [mm²/s]

t = tempo. [s]

x = profundidade. [mm]

erfc – função complementar erro de Gauss

A solução da segunda lei de Fick é largamente utilizada para prever a vida útil de um elemento de concreto armado, pois conhecendo-se parâmetros como $C(x,t)$, C_0 , C_s e D , é possível estimar o tempo (t) para que os agentes agressivos atinjam a armadura ou ainda, obter o tempo (t) necessário para que a concentração de cloretos (C) atinja a concentração limite para que haja corrosão (ANDRADE, 2000). Além da formulação apresentada por Fick, existem formulações mais recentes que visam modelar a penetração de agentes agressivos para o interior do concreto, porém, a solução da Segunda lei de Fick ainda é fortemente empregada visto que apresenta extrema simplicidade de resolução matemática e forte consagração, quando comparada às demais formulações propostas, as quais necessitam de validações mais consistentes. (CABRAL, 2000).

Contudo, essas leis são válidas para materiais homogêneos, com poros contínuos e que não mudam com o tempo (CASCUDO E CASAREK, 2014). Então, torna-se necessário conhecer a estrutura de poros de um material quando o mesmo for analisado sob o transporte de agentes por difusão. Todavia, como já citado no item 2.3.1, a estrutura de poros do concreto é extremamente complexa, dificultando, assim esse estudo. Por conta disso, os estudos de difusão nesse tipo de material, em geral, sofrem algumas simplificações (FRANCINETE JR. E FIGUEIREDO, 1999), como é o caso da solução da segunda lei de Fick apresentada por Crank (1975), o qual visando à adequada aplicação do modelo adota algumas simplificações, como a admissão de que o concreto é um material homogêneo e isotrópico, a não ocorrência de interações entre os cloretos e os componentes do concreto no momento da penetração, a consideração de que o único mecanismo de transporte é a difusão e, ainda, o fato de que tanto o coeficiente de difusão como a concentração superficial de cloretos são constantes ao longo do tempo (CRANK, 1975).

Nesse sentido, de acordo com Helene (1993) o coeficiente de difusão no concreto depende de alguns fatores, tais como, a concentração superficial do agente agressor na superfície, tipo de cimento, a presença de adições no concreto, o grau de saturação dos poros, a porosidade, a temperatura e a relação água/cimento.

2.4 Corrosão das armaduras.

A corrosão das armaduras caracteriza-se por ser um processo físico-químico gerador de óxidos e hidróxidos de ferro, denominados produtos de corrosão. Conforme exposto por Gentil (1996), o processo de corrosão nos metais pode ocorrer de duas formas. A primeira de carácter puramente químico, conhecida por oxidação, onde ocorre a formação de um filme delgado sobre a superfície do metal, devido a uma reação do tipo gás/sólido.

A segunda forma de corrosão é a chamada corrosão eletroquímica, que é o tipo de deterioração observada nas estruturas de concreto armado. Dentre os fatores que estão associados à ocorrência desse fenômeno, destacam-se as características do concreto, o grau de agressividade do meio ambiente e o respeito da camada mínima de cobrimento das armaduras (HUSNI, *et al*, 2003). Esse tipo de corrosão, que ocorre nas estruturas de concreto, provoca a perda de aderência entre a interface aço/concreto prejudicando a transferência das solicitações entre eles, além disso, implica progressivamente na perda da seção transversal das barras de aço, além de ocasionar a formação, no entorno das armaduras, de produtos de corrosão com carácter expansivo, os quais provocam tensões de tração internas que causam, primordialmente, fissuras no concreto, podendo, com sua evolução, gerar lascamento ou até mesmo desprendimento da camada de cobrimento (CASCUDO, 2005). Desta forma, a corrosão das armaduras, em estágios avançados compromete a capacidade de suporte de carga das estruturas, comprometendo sua segurança e durabilidade, podendo levar ao seu colapso.

A aplicação de grande quantidade de recursos financeiros no reparo de estruturas que apresentam corrosão da sua armadura é alvo de grande preocupação, visto que tal patologia é apontada como o principal processo de deterioração das estruturas de concreto armado (AITCIN, 2000). De acordo com Mehta e Monteiro (2008), cerca de 40% dos custos da indústria da construção civil dos países desenvolvidos são destinados à recuperação de estruturas prontas. Além disso, um estudo realizado por Andrade (1997) constatou, que 64% das manifestações patológicas ocorrentes em construções localizadas no estado de Pernambuco ocorrem devido à corrosão das armaduras. Isaia (1995) destaca que no Brasil as falhas no processo executivo e a manutenção inadequada das estruturas são os principais fatores que levam a corrosão das armaduras.

2.4.1 Mecanismo de corrosão

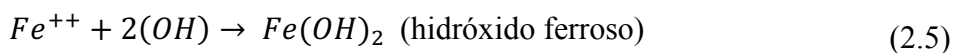
As armaduras de aço utilizadas na construção civil são obtidas através da redução térmica do minério de ferro associado a um pequeno consumo de carbono. Assim, o produto resultante dessa mistura encontra-se em um nível energético maior do que a sua matéria-prima, devido ao processo de fabricação. Então, o processo corrosivo nada mais é do que a perda desta energia, com um consequente retorno do produto metalúrgico a seu estado inicial como matéria-prima (GENTIL, 1996). Portanto, o processo de corrosão é espontâneo, causado pela necessidade do material em atingir o seu estado de menor energia, que é o seu estado mais estável.

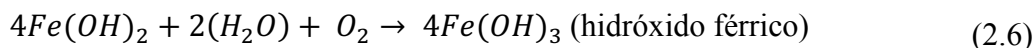
A maior parte dos metais é encontrada na natureza sob a forma de compostos, como óxidos e hidróxidos, nesse estado o seu grau energético é menor. Assim, quando esses compostos são processados passam para o estado metálico, adquirindo um maior nível de energia, por conta disso, há uma tendência natural dos metais reagirem e tenderem a voltar ao seu estado original. O ferro, por exemplo, que é o principal componente da armadura de aço, reage com o ambiente se transformando em Fe_2O_3 hidratado, conhecido popularmente como ferrugem, assim atinge um estado de menor energia, se tornando mais estável que o ferro metálico. (BERTOLINI *et al*, 2013).

A corrosão que ocorre na armadura de aço, envolta pelo concreto, é caracterizada pela transferência de elétrons e íons em duas regiões distintas dos metais. Assim sendo, em uma região ocorre as reações de perdas de elétrons (região anódica), enquanto em outra se processam reações de recebimento de elétrons (região catódica). A circulação desses íons ocorre por eletrólito, que no caso do concreto é a solução contida nos seus poros. Na região anódica ocorre às reações de oxidação do metal que consiste na dissolução do átomo metálico ou na liberação de íons metálicos para o eletrólito e estabelecimento de um fluxo de elétrons através do eletrodo (metal) para a região catódica. (GONZALEZ *et al*, 1996). Na região catódica ocorrem as reações de redução dos íons presentes no eletrólito. Em outras palavras os íons de Fe^{+2} , com carga positiva no ânodo, passam para a solução, enquanto os elétrons livres (e^-), com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e combinam-se com a água e o oxigênio para formar íons de hidroxila (OH^-). Estes íons deslocam-se pelo eletrólito e combinam-se com os íons ferrosos, formando hidróxido ferroso, que por outra oxidação se transforma em hidróxido férrico (GENTIL, 1996).

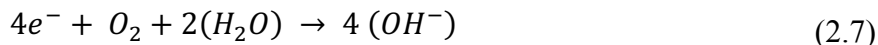
Então, o processo eletroquímico é caracterizado pela formação de células de concentração, onde parte da barra se torna anódica e a outra catódica, Neville (1997) apresenta as reações que ocorrem nessa fase, as quais podem ser observadas nas Equações 2.4; 2.5; 2.6; e 2.7.

Reações anódicas:





Reações catódica:



Estas reações são desencadeadas quando ocorre o rompimento da camada passiva protetora do aço envolvido pelo concreto. A ação de proteção que o concreto oferece às armaduras nele inseridas é proporcionada pela formação de uma capa ou película de carácter passivo sobre o aço, tal proteção surge devido ao carácter básico do concreto. A alcalinidade do concreto deriva das reações de hidratação dos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) que liberam certa porcentagem de $CaOH_2$, o qual fornece um pH para a pasta matriz na ordem de 12,5 (GUIMARÃES, 2000).

De acordo com Andrade (1992), o rompimento da capa passiva pode ser tanto de forma generalizada, ocorrendo de maneira uniforme ao longo de toda a superfície da armadura, ou localizada, se concentrando em uma determinada área. A corrosão localizada pode ser considerada o tipo mais grave de corrosão que ocorre nas armaduras de aço, a qual é desencadeada, principalmente, pela ação de íons cloreto, os quais podem estar presentes no concreto através da sua adição ainda no momento da confecção do traço ou a partir da penetração pela sua rede de poros e/ou fissuras. Já a corrosão generalizada é oriunda da diminuição do pH do concreto, sendo a carbonatação a principal causa desse fenômeno. Na Figura 2.3, é possível observar as causas, bem como o perfil desses dois tipos de corrosão:

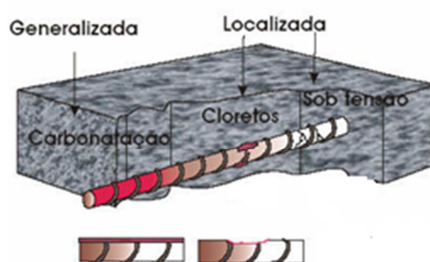


Figura 2.3 – Corrosão das armaduras – tipos e fatores (Fonte: Andrade, 1992)

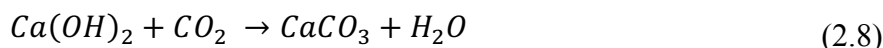
Desta forma, a tipologia da corrosão da armadura irá depender do agente agressivo que está agindo sobre a estrutura. Logo, se existir a entrada de íons de cloretos, a corrosão irá ocorrer em pontos específicos. Já a penetração de gás carbônico – que origina o fenômeno conhecido como carbonatação - irá degradar a barra de maneira generalizada. A seguir será

realizada uma breve apresentação desses dois principais agentes causadores da corrosão nas estruturas de concreto armado.

2.4.2 – Corrosão generalizada – Carbonatação

A carbonatação é um processo físico-químico de neutralização da fase líquida intersticial do concreto, saturada de hidróxido de cálcio e outros componentes alcalinos hidratados. De acordo com Helene (1997) a despassivação da armadura por carbonatação ocorre pela ação do gás carbônico presente na atmosfera, o qual penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução de poros do concreto, reduzindo seu *pH*.

As reações de carbonatação são muito complexas, porém, simplificadaamente pode ser expressa de acordo com a Eq. 2.8.



Nesse contexto, como pode ser observado, o gás carbônico reage com o hidróxido de cálcio, que é um dos produtos resultantes da reação de hidratação do cimento Portland, em meio aquoso formando carbonato de cálcio o qual precipita, fazendo com que o *pH* da solução da rede de poros do concreto passe de 12,5 para valores abaixo de 9, reduzindo assim, as condições de estabilidade química da capa passivadora que envolve a armadura. (FIGUEIREDO, 2005).

Cabe mencionar, que Cascudo (1997) ressalta que o processo de carbonatação possui a existência de uma frente de avanço do processo, chamada de frente de carbonatação, a qual separa o fenômeno em duas zonas com *pH* muito diferentes: uma com *pH* menor que 9 (região carbonatada) e outra com *pH* maior que 12,5 (região não carbonatada). Assim, quando a frente de *pH* baixo atinge a armadura, a película passivadora é rompida, ocorrendo, assim, o processo de corrosão. Essa corrosão ocorre de forma generalizada e homogênea, de modo semelhante ao da armadura exposta à atmosfera sem nenhuma proteção. (MONTEMOR et al, 2000).

A medição da frente de carbonatação, geralmente é realizada através da utilização de indicadores de *pH* a base de fenolftaleína ou timolftaleína, as quais em contato a meios alcalinos adquirem colorações típicas a partir de um determinado *pH* da solução. A timolftaleína adquire uma coloração azulada a partir de um *pH* da ordem de 10,5, enquanto, que a fenolftaleína proporciona uma coloração vermelho carmim para *pH* superiores a 9,5 (GUIMARÃES, 2000). É válido salientar, que de acordo com Helene (1993) a determinação

da frente de carbonatação deve ser realizada em uma peça recém fraturada de concreto, pois as superfícies expostas carbonatam rapidamente. Feita tal fratura, deve-se aspergir a solução indicadora de pH , após aproximadamente 30 segundos, sendo que as áreas carbonatadas não apresentarão coloração alguma, enquanto que as áreas não carbonatadas assumirão a coloração típica do indicador químico empregado.

Entretanto, é válido destacar, que estudos realizados por Sortez, citados por Helene (1999), mostraram que a profundidade de carbonatação aumenta, inicialmente, com grande rapidez, prosseguindo de forma mais lenta, tendendo assintoticamente a uma profundidade máxima, conforme é mostrado por Ribeiro e Cunha (2014) na Figura 2.4.

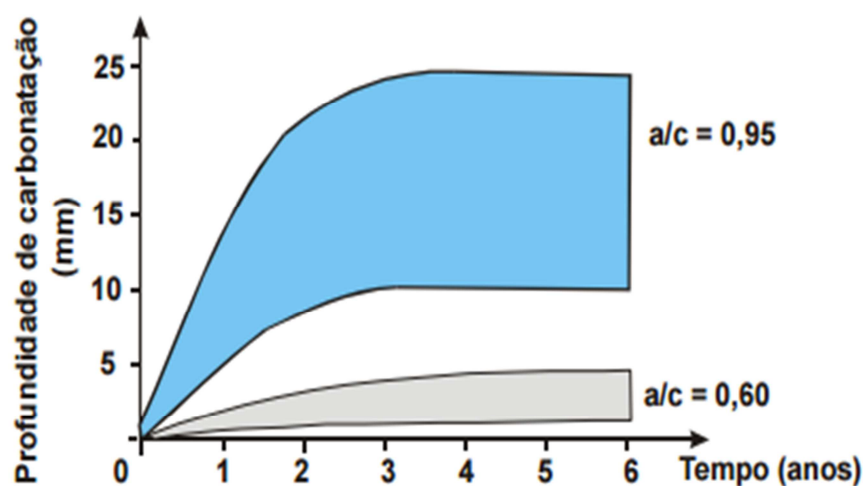


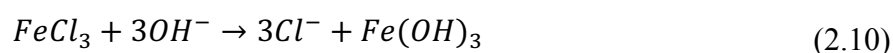
Figura 2.4 - Variação da profundidade de carbonatação em função do tempo e da relação água/cimento. (Fonte: Ribeiro e Cunha, 2014).

Essa tendência à estabilização pode ser explicada segundo Ribeiro e Cunha (2014) pela hidratação crescente dos compostos do cimento, a qual aumenta de forma gradativa a compacidade do concreto e pela precipitação do carbonato de cálcio formado na reação de carbonatação o qual pode obstruir os poros superficiais, dificultando o acesso do gás carbônico, presente no ar, para o interior do concreto.

2.4.3 Corrosão localizada– ação dos íons de cloreto

A literatura frequentemente aponta que a corrosão das armaduras devido à ação dos íons de cloretos é uma das principais e mais preocupantes causas de deterioração das estruturas de concreto (HELENE, 1986; FUJIWARA *et al*, 1990; FIGUEIREDO 2005; entre outros).

Neville (1997) destaca que o íon cloreto é um destruidor de filme passivante sem igual, pois não se observou comportamento tão agressivo para outros íons. Haja vista que esses íons são altamente agressivos, pois, diferentemente do ataque por gás carbônico ou outras soluções ácidas, os cloretos podem danificar as armaduras mesmo em condições de alta alcalinidade na solução de poros do concreto, além disso, esses íons não são consumidos no processo de corrosão, permanecendo disponíveis para novas reações. Desta forma, a presença de uma pequena quantidade de íons de cloretos pode provocar altas taxas de corrosão (HELENE, 1986). De forma simplificada as reações que ocorrem no processo de corrosão por ação de cloretos são mostradas a seguir, pelas Eq 2.9 e 2.10.



Conforme já mencionado e a partir da análise das equações 2.9 e 2.10 apresentadas acima, fica evidente que os íons cloreto participam da reação apenas como catalisador para a formação do hidróxido férrico ou ferrugem ($Fe(OH)_3$), sendo liberado para reagir novamente com o metal.

Segundo Lima (1990) o íon de cloreto apresenta um pequeno raio atômico (3,6 Å) o que faz com que ele penetre com maior facilidade que os outros íons no concreto. Esses íons de cloreto penetram nos poros do concreto, conjuntamente com a água e o oxigênio, e ao atingirem a película passivadora da armadura, provocam desestabilizações pontuais nessa película (FIGUEIREDO E MEIRA, 2013). Além disso, o cloreto é um bom condutor de corrente elétrica, assim, sua presença torna a solução de poros menos resistiva, o que ajuda a acelerar a corrosão. (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

O tempo que os cloretos levam para chegar até a armadura, denominado período de iniciação no modelo de Tuutti (descrito no item 2.2), dependerá, de alguns fatores, tais como a qualidade do concreto, seu grau de saturação, quantidade de fissuras entre outros que serão melhores discutidos na seção 2.4.3.2 deste trabalho. Além disso, a seguir serão apresentadas as principais fontes de cloretos, bem como seus teores críticos.

2.4.3.1 Fontes e teores críticos de cloreto

Os cloretos podem ser introduzidos no concreto no momento da mistura dos seus constituintes ou serem provenientes do meio externo. Para o primeiro caso, as formas de incorporação de cloretos são oriundas do uso indevido de agregados contaminados, principalmente, os provenientes de regiões litorâneas, do uso de aditivos aceleradores de pega a base de cloreto de cálcio ($CaCl_2$) e também através da água contaminada. Já no segundo caso, a penetração do agente contaminante ocorre no estado endurecido do concreto, sendo os cloretos, provenientes de fontes externas tais como águas do mar, atmosferas marinhas, névoa salina, lavagem de pisos e fachadas com ácido clorídrico e sais de degelo. (FIGUEIREDO, 2005).

Conforme exposto por Mineo e Jàuregui (2002), os íons cloretos adicionados no momento da mistura dos componentes do concreto, tendem a se distribuir uniformemente na massa de concreto, o que dificulta a formação de regiões com alta concentração desses íons. Assim, segundo Hoffmann e Dal Molin (2002), o problema de ataque por cloretos surge, principalmente, quando os íons são oriundos de fontes externas ao concreto.

De acordo com Alonso *et al* (2000), vários estudos têm sido realizados com o intuito de determinar o teor crítico de cloretos que daria início ao processo de corrosão das armaduras. Porém, a determinação do valor crítico de cloretos depende de inúmeros fatores, tais como a composição do concreto, o teor de C_3A do cimento, a temperatura, a umidade relativa, o pH da solução de poros, a proporção de cloretos solúveis, o conteúdo de água na rede poros, dentre outros.

Apesar do conhecimento do teor crítico de cloretos que causaria a despassivação da armadura ser de grande importância na aplicação de modelos para previsão da vida útil das estruturas, esse valor não é de consenso geral. Segundo Page *et al* (1991) o teor considerado como crítico de cloretos, pelos diversos pesquisadores da área, pode oscilar entre 0,1 a 1,0% da massa total de cloretos em relação a massa de cimento.

Neste contexto, o BRE (1980) considera que um baixo risco de corrosão está associado a uma quantidade de cloretos por massa de cimento inferior a 0,4%, um risco intermediário surge para valores entre 0,4 e 1% e um alto risco para quantidades superiores a 1%. Já a BSI-BS 8110 (1985) estabelece 0,4% como limite máximo para as estruturas correntes de concreto armado. Assim sendo, Quadro 2.1, apresentado por Figueiredo (2005) visa expor os limites críticos de cloretos estabelecidos por algumas normas.

Quadro 2.1 – Teor limite de cloreto para diversas normas (Fonte: Figueiredo, 2005)

NORMA	PAÍS	ANO	TEOR DE CLORETOS
ACI 318-21	USA	2001	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos
			$\leq 0,30\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente normal
			$\leq 1,0\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente seco
			$\leq 0,06\%$ em relação à massa de cimento, concreto protendido
CEB	Europa	1991	
ENV 206	Portugal	1991	0,40% em relação à massa de cimento
BS 8110:1	Inglaterra	1985	

É válido salientar que a *NBR 6118:2014* não se reporta ao teor crítico de cloretos, porém faz referência ao cobrimento mínimo das armaduras a ser adotado tendo em vista a agressividade do ambiente, bem como, a limitação das fissuras e a recomendação da utilização de cimentos com adição de escória ou material pozolânico.

No entanto, antes dessas recomendações serem atualizadas na *NBR 6118:2014*, Rodrigues (2009), a partir da simulação do comportamento do concreto nos tetrápodes dos Molhes da Barra, verificou que a penetração de cloretos em concreto dosados com cimento ARI foi bem mais severa quando comparada ao concreto dosado com cimento pozolânico. Assim, em seu trabalho, o autor indica que para as classes de agressividade III e IV, deve ser realizada a utilização de concretos com uso de adições, sendo que, tendo em vista os fatores econômicos e de desempenho das estruturas o uso do cimento pozolânico seria mais indicado.

Porém, a atualização recente da *NBR 12655:2015* trouxe uma melhora no que se trata o ter máximo de íons cloreto (*CI*) permitido no concreto, de modo que o valor máximo da concentração de íons cloreto no concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os componentes do concreto, não pode exceder o apresentado no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Teor máximo de íons cloreto para a proteção das armaduras de concreto (Fonte: NBR 12655:2015)

Classe de Agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto no concreto. % sobre a massa de cimento.
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura.	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço)	0,40

Portanto, constata-se que ainda não há a existência de um consenso internacional a respeito do teor crítico de cloretos que pode ser incorporado à massa do concreto sem que cause a corrosão de sua armadura, tal divergência advém do fato de existirem muitas variáveis que influenciam diretamente no processo corrosivo.

2.4.3.2 *Parâmetros relacionados à formulação do concreto que interferem na velocidade e intensidade de penetração dos íons de cloreto*

Existem vários fatores que podem influenciar a velocidade e a profundidade de penetração dos íons de cloreto. Dentre esses fatores, pode-se dar destaque a relação água/aglomerante, temperatura, tipo e composição do cimento, existência de fissuras e processo de cura.

Dessa forma, cabe salientar, que Wee (1999) ao abordar a influência da relação água/aglomerante frente à penetração de íons cloreto nos concretos, relatou, que de modo geral, a relação a/ag possui relação inversamente proporcional com a resistência à penetração de cloretos, ou seja, quanto maior for a relação a/ag mais facilmente os íons cloreto conseguirão penetrar no concreto, isso se justifica perante ao aumento da porosidade da pasta matriz do concreto quando mais água é utilizada durante seu amassamento. Dentro desse mesmo contexto, Pereira (2001), concluiu o já apontado por Wee (1999), estudando diferentes traços de concreto dosados com cimento *CP IV* e *CP II F*, conforme pode ser observado na Fig. 2.5. A partir da análise dessa imagem, verifica-se clara tendência do aumento do coeficiente de difusão de cloretos com a elevação da relação água/cimento para ambos os tipos de cimento.

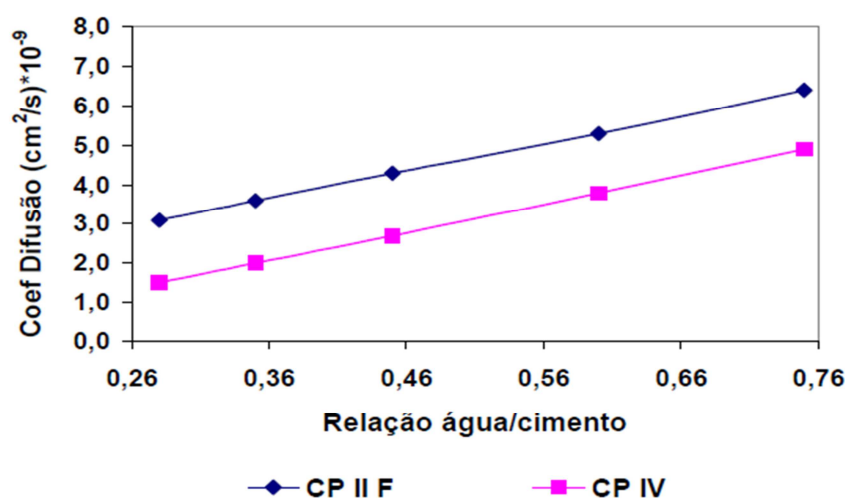


Figura 2.5 – Efeitos isolados da relação água/cimento e do tipo de cimento sobre o coeficiente de difusão de íons cloreto (Fonte: Pereira, 2001).

Ainda, Pereira (2001) afirma que a relação água/cimento está diretamente ligada ao tamanho e a interconectividade dos poros do concreto. Logo, o fato do coeficiente de difusão vir aumentar se justifica pelo aumento da porosidade da pasta do concreto. Moreira (2001) também observou o mesmo relatado por Pereira (2001), portanto, a massa de água em relação à massa de aglomerante, utilizada na confecção dos concretos, demonstrou ser um parâmetro bastante eficiente de durabilidade, tendo sido os concretos de maior relação a/ag os mais atingidos pelas soluções agressivas.

Além disso, diversos autores relatam que a composição química, bem como o tipo de cimento interfere na velocidade de penetração de íons cloreto no concreto. (HELENE, 1993; FIGUEIREDO, 2005; entre outros).

Gastaldini e Isaia (2000) destacam que o teor de C_3A e C_4AF pode influenciar de maneira benéfica na quantidade de íons de cloretos livres na solução de poros do concreto. Isso porque a combinação dos cloretos livres com os aluminatos forma um sal complexo insolúvel, o cloro-aluminato de cálcio hidratado, também conhecido como *Sal de Friedel*, o qual possui a capacidade de imobilizar os íons cloreto. Desta forma, a redução da concentração de íons cloreto livre na solução aquosa e poros do concreto está diretamente associada à quantidade de aluminatos presentes na composição química do cimento. Vale explanar ainda, que conforme Birnin-Yauria e Glasser (1998), o *Sal de Friedel* também pode ser formado a partir da desestabilização dos compostos hidratados que contenham aluminatos, como, por exemplo, a etringita.

Ainda, alguns autores expõem que o uso de adições minerais nos cimentos e concretos tem grande influência sobre a resistência à penetração de cloretos. Esses pesquisadores observaram que adições de sílica ativa, escórias de alto forno e pozolanas levaram a uma diminuição da difusividade de cloretos. (PEREIRA, 2001; MEIRA, 2004).

Page *et al* (1981), citado por Meira (2004), estudaram o comportamento da difusão de cloretos em pastas de cimento elaboradas com cimento Portland comum, cimento resistente a sulfatos (baixo teor de C_3A), cimento com adição de 30% de cinza volante e cimento com 65% de escória de alto forno. Os resultados obtidos apresentaram significativa diminuição do coeficiente de difusão a partir das adições minerais, conforme exposto no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Coeficiente de difusão de cloretos a 25°C, em pastas de cimento com a/c igual a 0,5. (Fonte: MEIRA, 2004).

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

Os autores afirmam que a diminuição do coeficiente de difusão de cloretos através da adição de escória de alto forno e cinza volante, deve-se ao fato da variação da estrutura porosa da pasta de cimento uma vez que a porosidade é diminuída devido ao desenvolvimento das reações pozolânicas. Tal reação proporciona a formação de silicato de cálcio hidratado, compostos esse que é denso e homogêneo e induz a uma diminuição dos teores de hidróxido de cálcio, substituindo, assim, compostos com maior porosidade ($CaOH_2$) por outros de menor porosidade ($C-S-H$). (PAGE *et al*, 1981 *apud* MEIRA, 2004).

Entretanto, Basheer *et al* (2002) destaca que, quando as adições minerais são utilizadas no concreto, não é apenas a porosidade que é reduzida, mas também, há uma redução na mobilidade dos íons cloreto, uma vez que, essas adições, contém em sua composição aluminatos que podem reagir com os íons de cloretos formando o *Sal de Friedel*.

Portanto, de maneira geral, as adições minerais apresentam uma influência benéfica na redução da penetração de cloretos, pois além de provocarem um refinamento na rede de poros, densificando a pasta do concreto, obstruindo e secionando, assim, a interligação da rede poros, possuem a capacidade de fixação de cloretos, reduzindo a quantidade de íons cloreto livre. (BASHEER *et al*, 2002).

Conforme ressaltado por Figueiredo (2005), a temperatura do ambiente onde a estrutura será inserida, também, é um fator importante a ser levado em conta no processo de penetração de cloretos. Helene (1993) coloca que o aumento na temperatura de 15°C para 30°C praticamente duplica o coeficiente de difusão de cloretos.

De acordo com Hussain e Rasheeduzzafar (1993) *apud* Pereira (2001) as temperaturas elevadas favorecem a decomposição dos cloros aluminatos (*Sal de Friedel*) aumentando, desta forma, a concentração de cloretos livres, conforme exposto na Fig. 2.6.

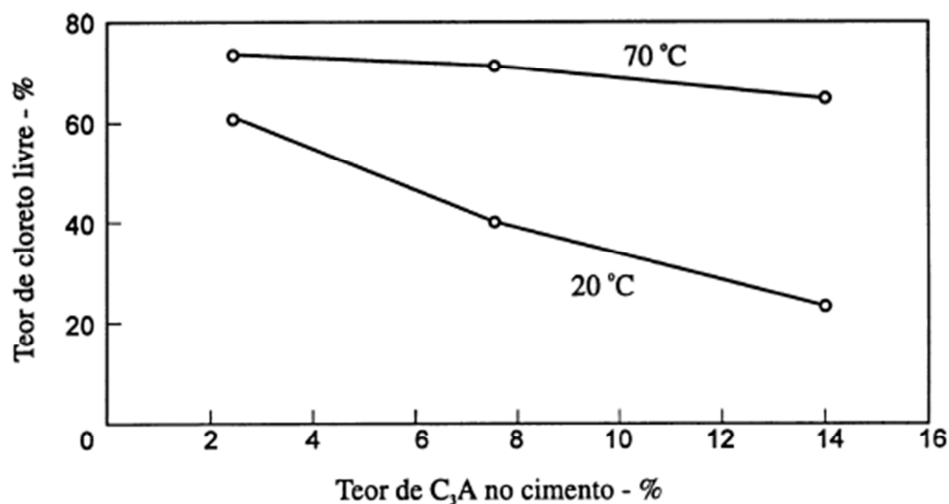


Figura 2.6 – Influência do teor de C_3A na quantidade de íons cloreto livre, a 20 e 70°C
(Fonte: HUSSAIN E RASHEEDUZZAFAR, 1993 *apud* Pereira, 2001).

Além do exposto anteriormente, o aumento da temperatura favorece a mobilidade molecular, facilitando o transporte dos íons cloreto pela microestrutura do concreto. Logo, a temperatura é um fator importante que afeta a velocidade de penetração de cloretos no concreto (FIGUEIREDO, 2005).

É importante destacar, ainda, que os autores como Atcin (2000) e Page *et al* (1981) *apud* Meira (2004), ressaltam que a realização de uma cura inadequada no concreto, também, pode ser um fator crítico para a durabilidade do concreto frente agentes agressivos, visto que interfere diretamente sobre as propriedades de transporte na pasta de cimento endurecida e, por conseguinte, sobre a difusibilidade efetiva dos íons cloreto. De acordo com esses pesquisadores, as condições de cura modificam a estrutura dos poros da pasta e, por conseguinte, alteram a porosidade final.

Desta forma, o aumento no tempo de cura do concreto acarreta significativa redução da porosidade da pasta com o decorrer do tempo. Assim, um concreto com curto período de cura está mais suscetível a sofrer ataque por cloretos que um concreto que recebeu uma cura mais prolongada. A Figura 2.7 é adaptada de um estudo realizado por Jaergmann (1990), o qual relaciona o efeito do tempo de cura e da relação água/cimento sobre a profundidade de alcance dos cloretos para um concreto exposto em um ambiente com presença de cloretos para o período de um ano.

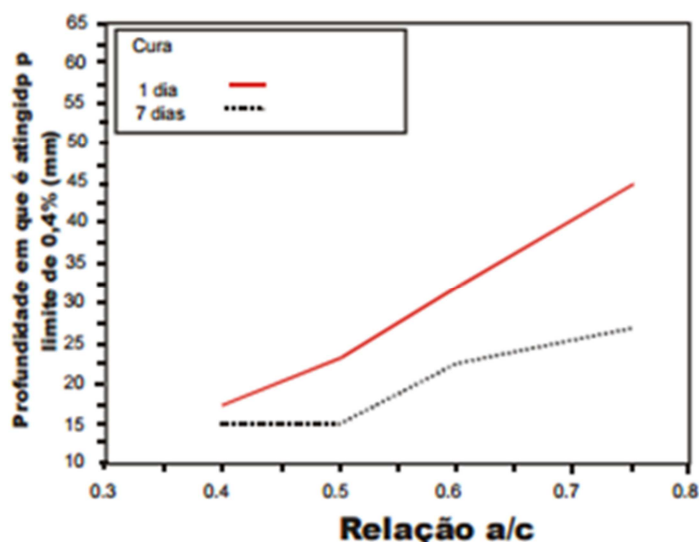


Figura 2.7 – Efeito da cura e da relação a/c na profundidade de alcance dos íons de cloreto. (Fonte: JAERGEMANN, 1990).

A partir disso, Jaergmann (1990) conclui que a cura exerce um papel importante na melhoria de resistência à penetração de cloretos no concreto. Coincidindo com o analisado por Monteiro (2002) o qual estudando a influência do tipo de cimento em concretos, constatou que o aumento do período de cura melhora o desempenho de todos os cimentos analisados, principalmente quando se utiliza de baixas relações a/c. Além disso, salienta-se o exposto por Helene (1997) o qual se refere que a cura é um dos procedimentos fundamentais para a obtenção de uma estrutura de concreto durável e de qualidade.

2.5 – Métodos de ensaios que visam à previsão da penetração de íons cloreto no concreto

Como discutido anteriormente, nos últimos anos, constatou-se um elevado número de construções em concreto armado que apresentaram patologias de deterioração do aço precocemente, fenômeno esse, causado pela penetração de fluídos e íons agressivos pela rede de poros do concreto. Além disso, ressalta-se que dentre os agentes agressivos os íons cloreto são os principais causadores da corrosão das armaduras do concreto.

Ainda dentro desse contexto, de acordo com Ribeiro e Cunha (2014), o processo corrosivo é um processo camuflado, uma vez que sua identificação precoce é muito difícil, pois os primeiros sinais da corrosão aparecem muito tempo depois dela ter iniciado e se propagado.

Desta forma, visando atenuar prejuízos que estejam relacionados com tal patologia, um grande esforço no meio científico vem sendo aplicado no âmbito de desenvolver e aprimorar ensaios que melhor caracterizem o comportamento do concreto frente à ação de íons cloreto. Assim sendo, torna-se interessante expor que existem vários métodos que visam prever a velocidade de penetração Cl^- nos poros do concreto. Tais métodos podem ser divididos em dois grupos principais: métodos naturais e métodos acelerados. No entanto a utilização de métodos naturais, principalmente no que tange a determinação do coeficiente de difusão íons cloreto é muito demorada, consumindo, assim, grande quantidade de tempo.

Desta forma, a aplicação de ensaios acelerados, os quais procuram investigar o comportamento de um determinado material quando o mesmo é submetido ao ataque de íons cloreto a partir de resultados que sejam obtidos em um curto intervalo de tempo, torna-se externamente interessante.

Dentre os métodos mais eficazes para se determinar a difusão de cloretos no concreto, destacam-se os que se baseiam na imersão de amostras de concreto em uma solução salina, desta forma, a partir de um determinado tempo de contaminação, torna-se possível determinar o perfil de penetração íons cloreto, relacionando a concentração de Cl^- pela sua profundidade de ataque. Assim sendo, o coeficiente de difusão íons cloreto pode ser encontrado a partir do uso da segunda lei de Fick.

Um método que se baseia nesse tipo de metodologia é o já tradicional e consagrado método que envolve uma concentração de íons de cloretos semelhantes a da água do mar em sua solução contaminante $NaCl$ 0,5M, porém, tal metodologia depende de um período de contaminação considerado longo e equivalente a 90 dias, o que traz ao método uma desvantagem por necessitar-se de um longo intervalo de tempo para se obter resultados.

Além do método citado anteriormente, pode-se destacar o método prescrito pela *NT BUILD 443 (1995) – Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration*, o qual também utiliza a contaminação das amostras por imersão, porém, tal metodologia utiliza de uma solução contaminante com um teor de cloretos na ordem de cinco vezes maior que o teor encontrado na água do mar, reduzindo seu tempo de contaminação para 35 dias. Assim, tal método além de apresentar a vantagem de fornecer um coeficiente de difusão em prazos razoáveis permite, também, a obtenção do coeficiente dentro das condições naturais de difusão. A Figura 2.8 apresenta um exemplo de contaminação das amostras submetidas a ensaios de imersão.

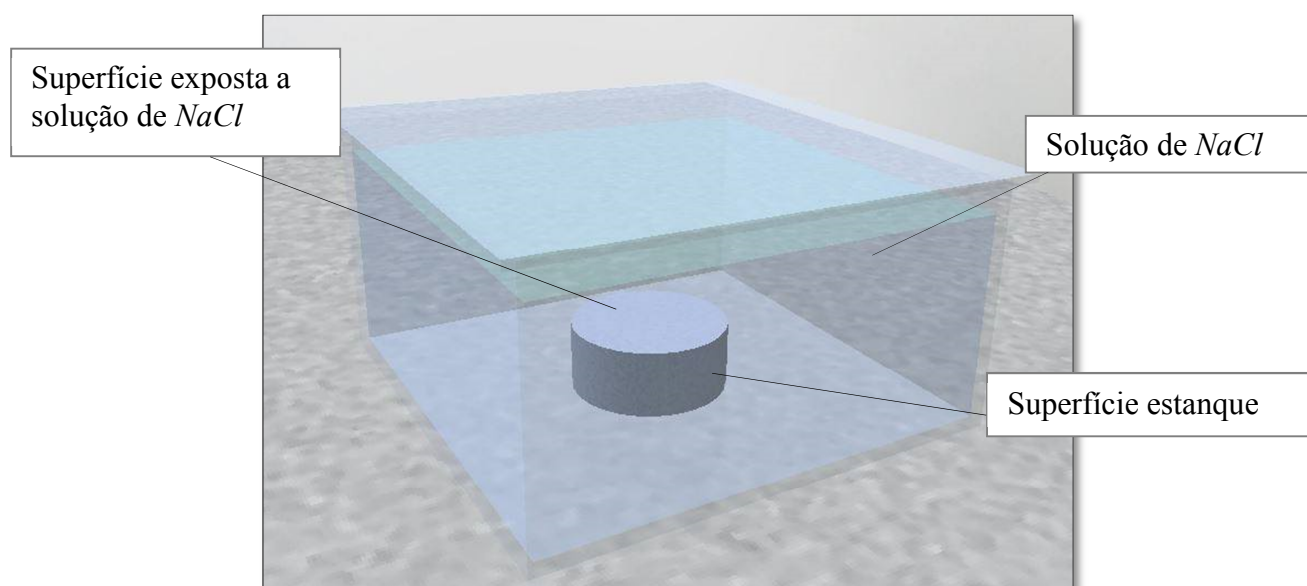


Figura 2.8 – Esquema do ensaio para a contaminação por imersão.

Outro método que utiliza de uma metodologia semelhante à apresentada pela *NT BUILD 443 (1995)*, foi proposto por Bender (2016). Em sua metodologia o autor utiliza de uma solução contaminante saturada de $NaCl$, sendo que a dosagem de tal solução equivale a 400g de $NaCl$ para 1dm³ de água destilada, porém, devido ao fato da solução estar saturada de $NaCl$ o contaminante excedente tende a se depositar no fundo do recipiente, por conta disso, Bender (2016) recomenda manter a solução em repouso por 30min antes da inserção da amostra na solução, tal procedimento é realizado no intuito de que ocorra a precipitação do componente não consumido na reação de dissolução. Após isso, a amostra deverá ser imersa de forma vagarosa no recipiente, evitando ao máximo a agitação da solução contaminante. Com relação ao tempo de contaminação para tal método de ensaio, pode-se dizer que até o presente momento Bender (2016) atingiu resultados satisfatórios do coeficiente de difusão de íons cloreto para 7 dias de contaminação quando comparado seus resultados aos obtidos pelo ensaio ao prescrito pela *NT BUILD 443 (1995)*. No entanto, é válido salientar que o autor recomenda que sejam analisadas mais amostras de diferentes tipos de concreto nessa idade de contaminação a partir do seu método de ensaio para que se tenha uma análise estatística mais robusta dos resultados. Além disso, outro fato importante que deve ser destacado é o de Bender (2016) sugerir uma limpeza na camada superficial e, então com isso, aproveitar o primeiro ponto do perfil de penetração de cloretos, o que difere do recomendado pela *NT BUILD 443 (1995)* que recomenda o descarte da primeira camada de extração.

Ainda dentro desse contexto, outro método desenvolvido para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos sujeitos a diferentes graus de saturação é o apresentado por Guimarães e Helene (2007), o qual não utiliza da metodologia de imersão, desta maneira, a contaminação das amostras é feita pelo contato direto do contaminante ($NaCl$) sobre a superfície amostra a ser ensaiada, de forma que, após a contaminação, as amostras são armazenadas em um ambiente que mantenha seu grau de saturação constante, conforme pode ser observado na Fig. 2.9. No entanto, é válido salientar, que tal método apresentou resultados satisfatórios em pesquisas anteriores para idades de contaminação de 35 dias, coincidindo, então, com o tempo de contaminação do método acelerado *NT BUILD 443 (1995)*.

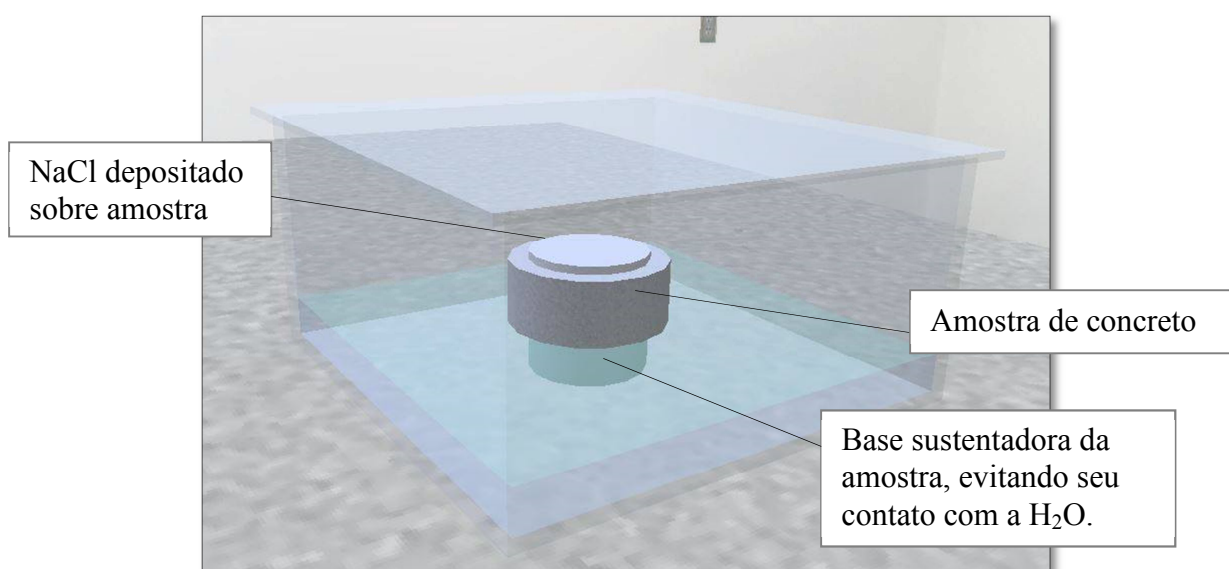


Figura 2.9 – Esquema do ensaio para a contaminação pelo método de Guimarães Helene (2007).

Além dos métodos baseados em imersão das amostras em solução contaminante, enfatizam-se os métodos de migração, os quais utilizam da ação de um campo elétrico com o intuito de acelerar a penetração dos íons cloreto.

Dentre os métodos que utilizam da migração cita-se o método, conhecido principalmente pela *ASTM C1202:2009*, o qual foi proposto inicialmente por Whiting (1981).

Desta forma, tal método, que visa avaliar o grau de penetração dos íons cloreto por meio da carga total passante, consiste em submeter uma fatia cilíndrica de concreto, já saturada, com 5cm de altura e 10cm de diâmetro entre duas células acrílicas, uma preenchida com uma solução aquosa de $NaOH$ a 0,1M e a outra com solução aquosa com 3% de $NaCl$. Os

dois polos da célula são submetidos a uma diferença de potencial de 60V durante um período de 6h e a corrente passante no corpo-de-prova é registrada a cada 30min. A Figura 2.10 apresenta a configuração de tal ensaio. A partir da integral da curva corrente versus tempo pode-se calcular a carga total passante e, desta forma, de acordo com o resultado encontrado é possível classificar o concreto de forma qualitativa quanto a sua durabilidade de acordo com o exposto na Tabela 2.1.

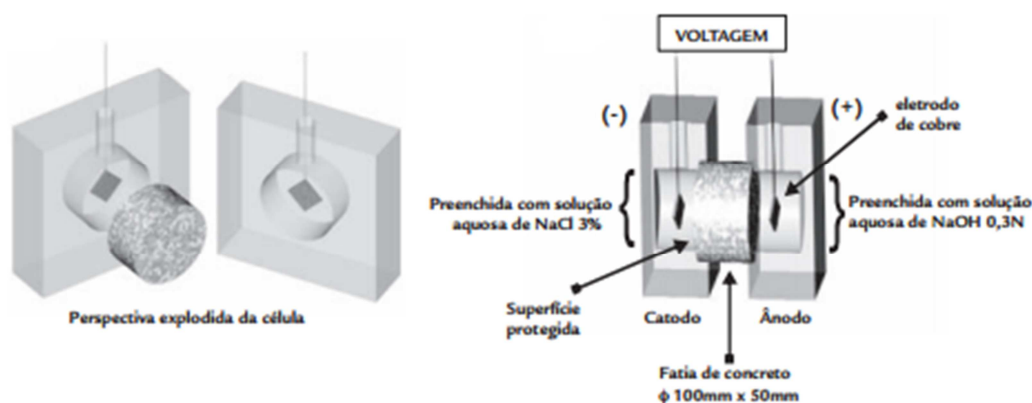


Figura 2.10 – Esquema do aparato para a avaliação da taxa de migração de cloretos, conforme a norma ASTM C 1202/2009. (Fonte: Medeiros *et al* 2012)

Tabela 2.1– Classificação do concreto frente a penetrabilidade de cloretos, por meio da carga total passante de acordo com ASTM C1202:2009.

Carga total passante	Penetrabilidade de cloretos no concreto
>4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
<100	Desprezível

No entanto, algumas críticas foram realizadas por Andrade *et al* (1993) perante tal metodologia, as quais enfatizam que muitos parâmetros podem afetar a leitura da carga total passante. Desse modo, os autores observaram que todos os íons presentes no eletrólito podem participar da migração, sendo que os íons podem possuir diferente mobilidade iônica, cita-se aqui o fato dos íons OH^- conduzirem muito mais corrente que os íons Cl^- . Assim, a corrente total utilizada para o cálculo não corresponde ao fluxo de cloretos. Além disso, outra crítica, ressaltada por Ribeiro e Cunha (2014) faz referência a proximidade da amostra em relação à malha que funciona como eletrodo e a alta diferença de potencial aplicada

(60V) que juntos, causam o efeito Joule, o qual gera um aquecimento da amostra, influenciando assim, na velocidade do fluxo de íons e, conseqüentemente, nos resultados obtidos.

Assim sendo, Andrade (1993) utilizou de metodologias similares a da proposta pela ASTM C1202:2009 para obter o coeficiente de difusão no estado estacionário. É válido salientar que os métodos que envolvem migração surgiram no intuito de se ter uma resposta rápida da durabilidade quanto à difusão de cloretos. Com base nisso, muitos autores estão sempre tentando correlacionar estes métodos com aqueles que se configuram como sendo ensaios de difusão. Desta forma, Yang (2005) *apud* Mendes (2009) comparou os coeficientes de difusão obtidos pelo ensaio de migração de cloretos no estado estacionário com os resultados do coeficiente de difusão obtidos por meio do ensaio de imersão em solução contaminante de cloretos, o qual concluiu que o coeficiente resultante do ensaio de migração equivale, aproximadamente, à metade do coeficiente obtido por imersão, principalmente no que tange a concretos que não apresentam bom desempenho frente à ação de íons cloretos. Uma consideração semelhante foi evidenciada por Ferreira (2000) em seu trabalho, o qual cita que estudos comparativos entre esses ensaios de migração com os ensaios de difusão natural revelam que os coeficientes de difusão obtidos nos ensaios de migração são, em geral, menores do que os obtidos nos ensaios de difusão.

Além disso, alguns autores têm utilizado de ensaios de migração para calcular o coeficiente de difusão no estado não estacionário (CASTELLOTE et al. (2001) e TONG et al. (2001)). No entanto, mesmo assim, na visão de Ferreira 2000 é questionável se o desempenho em longo prazo pode ser previsto com base em resultados de experiências que envolvem migração. Uma vez que tais experiências poderão apenas ajudar a quantificar diferenças entre os concretos, em vez de prever com precisão o desempenho do concreto.

3. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

A investigação experimental deste estudo foi elaborada visando atingir o objetivo principal dessa pesquisa o qual se resume na realização de uma proposta de método de ensaio acelerado para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos na condição satura e, assim, a partir disso, consequentemente, atingir os objetivos secundários, os quais possuem o intuito de analisar o comportamento do coeficiente de difusão (D) e da concentração superficial de cloretos (C_s) ao longo do tempo testando diferentes concentrações de $NaCl$. Foram realizados ensaios a partir de quatro métodos, para os métodos Guimarães e Helene (2007) e o chamado nesta pesquisa de Acelerado Modificado - $NaCl$ 250g/dm³ as amostras serão analisadas nas idades de contaminação que variam entre 7, 14, 21 e 35 dias.

Já para o método normatizado Acelerado *NT BUILD* 443 (1995) $NaCl$ 165g/dm³ a idade de contaminação será de 35 dias e para o método tradicional, o qual já é consagrado e remete a concentração de íons de cloretos da água do mar, $NaCl$ 0,5M a idade será de 90 dias. É válido salientar, que os resultados obtidos para os métodos Guimarães e Helene (2007) e Acelerado Modificado - $NaCl$ 250g/dm³ serão comparados, no capítulo 4, com os obtidos pelo método normatizado *NT BUILD* (1995) - $NaCl$ 165g/dm³ e o já consagrado $NaCl$ 0,5M.

Desta forma, nesta seção serão apresentados os materiais empregados na confecção do concreto, bem como a sua caracterização, os traços de concreto empregados, o sistema de produção das amostras estudadas, os métodos de contaminação empregados, o método empregado na obtenção dos perfis de penetração de cloreto e análise estatística que será adotada na comparação dos resultados obtidos.

3.1 Materiais empregados na confecção dos concretos

Para a realização deste trabalho foram preparados três traços de concreto, chamados de *T1 CP V ARI*, *T3 CP V ARI +10% S.A.* e *T7 CP IV* Os materiais empregados na confecção de cada traço são descritos nos próximos subtítulos.

3.1.1 Cimento

Os cimentos selecionados para a confecção dos traços de concreto foram provenientes de um fabricante nacional, sendo classificados de acordo com a *NBR 5733:1991* e *NBR 5736:1991*, respectivamente, em cimento Portland de alta resistência inicial e cimento

Portland do tipo pozolânico. Além disso, ambos os cimentos possuem resistência mínima à compressão aos 28 dias de 32 MPa e são resistentes a sulfatos (*CP V ARI 32 RS e CP IV 32 RS*). Optou-se por esses aglomerantes, visto que, em pesquisas anteriores os mesmos apresentaram comportamento bem distinto quando expostos em ambientes com presença de cloretos. Sendo que cimento do tipo pozolânico, apresentou menores valores de difusividade de cloretos quando comparado ao de alta resistência inicial.

A caracterização dos cimentos foi realizada de acordo com as normas vigentes, desta forma, na Tabela 3.1 são apresentados os resultados obtidos no seu processo de caracterização.

Tabela 3.1 – Caracterização dos cimentos utilizados

Características ou Propriedades Determinadas		Método de Ensaio	CP V ARI	CP IV
Resistência à compressão	7 dias (MPa)	NBR 7215:1997	33,0	21,6
	14 dias (MPa)		39,2	26,0
	28 dias (MPa)		39,7	32,5
Massa específica (g/cm ³)		NM 23:2001	3,05	2,80
Consistência Normal (%)		NM 43:2003	32,8	33,8
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	NBR 11579:2012	1,98	0,38
Tempos de Pega	Início de pega (h, min)	NM 65:2003	04:10	06:18
	Fim de pega (h, min)		07:30	08:45

3.1.2 Agregados

Os agregados miúdo e graúdo empregados nos traços foram adquiridos no comércio local e se tratam, respectivamente, de areia quartzosa, e de brita granítica cujas especificações se fazem presentes nas Tabelas 3.2 e 3.3. Já as curvas granulométricas podem ser encontradas no Apêndice 01.

Tabela 3.2 – Massa específica real e aparente dos agregados

Propriedades Determinadas	Método de Ensaio	AREIA	BRITA
Massa específica real (g/cm ³)	NM 52:2009	2,55	2,64
Massa específica aparente (g/cm ³)	NM 53:2009	1,52	1,40

Tabela 3.3 – Granulometria dos agregados

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	Porcentagem retida acumulada[%]	
	AREIA	BRITA
Abertura das peneiras (mm)		
19,00		0,00
12,70		45
9,50	0	68
4,80	0	100
2,40	6	100
1,20	31	100
0,60	63	100
0,30	89	100
0,15	98	100
0,075	100	100,00
Módulo de Finura	2,9	6,7
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	19,0

3.1.3 Aditivo químico

Com o objetivo de manter a igualdade de consistência entre os três traços investigados, foi utilizado o aditivo químico superplastificante, possuindo como base uma cadeia de éter policarboxílico, isento de cloretos.

3.1.4 Água

Foi utilizada, para a execução do concreto, água proveniente da rede pública de abastecimento local de Rio Grande, onde o órgão responsável pela sua potabilidade é a *CORSAN*.

3.2 Definição dos traços de concreto estudados

Conforme citado anteriormente, para a presente pesquisa, realizou-se a confecção de três traços de concreto. Para ambos foi mantida fixa a relação a/ag de 0,40, a qual é inferior a relação a/ag máxima prescrita pela *NBR 6118:2014* para um risco elevado de deterioração da estrutura (classe de agressividade IV). Também, fixou-se o abatimento tronco cone em 150 ± 20 mm, no entanto, foi realizada a variação dos tipos de cimento, bem como para o traço *T03* a adição de sílica ativa como substituição de parte do cimento. Na Tabela 3.4 é

apresentada a quantificação dos materiais utilizados na confecção dos traços de concreto em questão.

Tabela 3.4 – Materiais utilizados na dosagem dos concretos

Material	Unidade	T01 CP V ARI	T03 CP V ARI +10% S.A.	T07 CP IV
Cimento	kg/m ³	493	444	493
Sílica Ativa	kg/m ³	0	49	0
Areia	kg/m ³	785	785	785
Brita 1	kg/m ³	925	925	925
Água	kg/m ³	197	197	197
SP - *superplastificante	%	2,00	2,50	2,50
Relação água/cimento	-	0,40	0,40	0,40

(*): % referente ao peso de material cimentício

A partir disso, foi realizada a confecção dos concretos, conforme exposto na seção 3.3.

3.3 Produção das amostras de concreto

Para a produção dos concretos utilizou-se misturador mecânico do tipo betoneira de eixo vertical. A realização da mistura seguiu a ordem comumente utilizada no laboratório, ou seja, primeiramente foi adicionada aproximadamente a metade da quantidade de água e toda a brita, feito isso foi adicionado em torno de 50% da areia, após o cimento foi introduzido na mistura e, por fim, o restante de água e areia. A inserção do aditivo superplastificante foi realizada após todos os constituintes da mistura do concreto estar presentes no agitador mecânico.

A verificação do abatimento foi realizada de acordo com o exposto na *NBR NM 67: 1998* após a completa mistura de todos os materiais na betoneira.

Após a confecção do concreto, as amostras foram moldadas, a partir de uma única betonada para cada traço, em corpos-de-prova (*CPs*) cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Todo o processo de moldagem obedeceu ao exposto na *NBR 5738: 2015*, é válido ressaltar que o adensamento adotado foi o manual. Após 28 dias da data de moldagem dos *CPs* foi realizado o ensaio de resistência à compressão de acordo com o exposto na *NBR 5739:2007*, sendo os valores obtidos apresentados na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 – Resistência à compressão aos 28 dias

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO [MPa]	
T01 CP V ARI	51,50
T03 CP V ARI +10% S.A.	47,00
T07 CP IV	43,50

Além disso, é válido salientar que as amostras permaneceram em cura úmida, sendo as provenientes do *T01 CP V ARI* por um período de três meses e as do *T3 CP V ARI +10% S.A* e *T7 CP IV* por seis meses a contar da sua data de moldagem, períodos esses necessários para que as reações de hidratação do concreto ocorressem quase que por completo.

Passado esse período de cura, os corpos-de-prova foram fatiados em 4 partes com altura de aproximadamente 4cm, desconsiderando-se, 1cm em cada extremidade do CP, conforme Fig. 3.1. Além disso, as amostras foram identificadas de acordo com o traço de concreto em *T1* (concreto dosado com cimento *CP V ARI*), *T3* (concreto dosado com cimento *CP V ARI* + 10% de sílica ativa) e *T7* (concreto dosado com cimento *CP IV*), ainda os CPs foram numerados e foi identificada também a posição da amostra no corpo-de-prova original, sendo que essa identificação variou de “A” até “D”, onde “A” é referente ao topo e “D” ao fundo do CP, conforme pode ser visualizado nas Fig 3.1 (b) e 3.1(c).

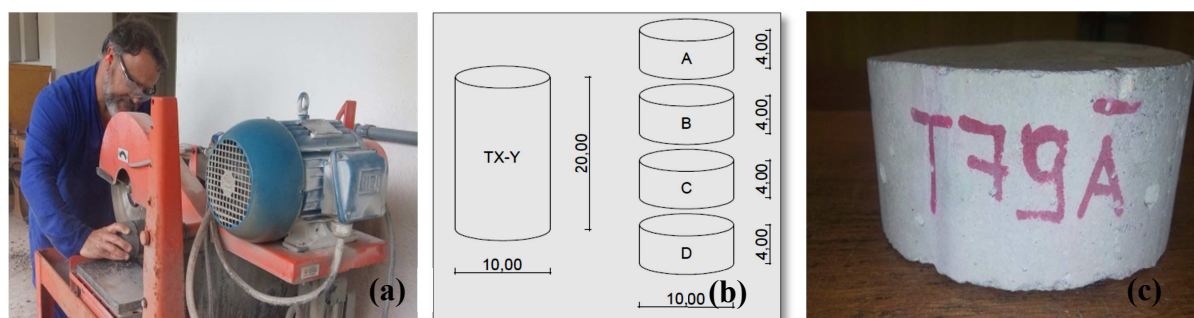


Figura 3.1 – Procedimento de corte das amostras de concreto. (a) Fatiamento dos CPs. (b) Método de identificação das amostras. (c) Perfil das amostras utilizadas na pesquisa.

3.4 Processo de saturação das amostras

Como os ensaios acelerados são executados com o concreto estando saturado, foi necessário realizar o procedimento de saturação nas amostras. Para isso, utilizou-se do

prescrito na *NBR 9778:1987*, desse modo as amostras foram imersas em água destilada em um ambiente com temperatura controlada, entre 21°C e 23°C, durante 72 horas, sendo que 1/3 do seu volume foi submerso nas primeiras 4h, 2/3 nas 4h subsequentes, sendo completamente imersas nas 64h restantes. Além disso, foi verificada a constância de massa das amostras, aferindo o peso das amostras em intervalos espaçados de 24 horas, sendo que a constância de massa é constatada quando duas pesagens consecutivas, espaçadas de 24h resultem em uma variação de massa igual ou inferior a 0,5%. É válido explanar, que as pesagens foram realizadas enxugando a superfície das amostras com toalhas absorventes, ou seja, a massa aferida foi da amostra com superfície seca. Verificada então a constância de massa, as amostras foram transferidas para um recipiente cheio de água destilada, o qual foi levado progressivamente à ebulição, permanecendo ali por 5h. Em seguida, as amostras foram resfriadas por perda natural de calor. Realizado todo esse processo, o grau de saturação das amostras é considerado como sendo de 100%. Na Figura. 3.2 são detalhados os procedimentos realizados na saturação das amostras.



Figura 3.2 – Procedimento utilizado para estabelecer a saturação das amostras. (a) Amostras imersas em 1/3 do seu volume. (b) Amostras completamente imersas por um período de 64h. (c) Ebulição das amostras por 5h.

3.5 Contaminação com *NaCl* e armazenamento das amostras

Conforme mencionado no início desta seção, para verificar o comportamento do coeficiente de difusão (D) ao longo do tempo estão sendo realizados ensaios a partir de quatro métodos: Guimarães e Helene (2007), Acelerado Modificado - *NaCl* 250g/dm³, Acelerado *NT BUILD* 443 (1995) - *NaCl* 165g/dm³ e *NaCl* 0,5M.

Assim sendo, considerando que para os métodos Acelerado Modificado - *NaCl* 250g/dm³, Acelerado da *NT BUILD* 443 (1995) - *NaCl* 165g/dm³ e *NaCl* 0,5M a contaminação se dá por imersão das amostras, torna-se necessário revestir com resina epóxi as laterais e uma das faces planas das amostras, garantindo estanqueidade e um fluxo unidirecional do

contaminante. Vale explicar, que a espessura do revestimento deve ser maior que 1mm e que o processo de aplicação e cura da resina deve seguir as instruções do fabricante, desse modo, a ficha técnica da resina utilizada pode ser encontrada no Anexo 01. Realizada a aplicação do revestimento e estando ele seco, as amostras foram colocadas em uma solução de água destilada saturada com CaOH_2 por um período mínimo de 3 dias ou até que duas pesagens espaçadas de 24h diferissem menos que 0,5% entre si. Assim, é possível considerar que as amostras recuperaram uma possível perda de água durante o processo de revestimento, obtendo novamente uma constância de massa.

Assim sendo, estando às amostras saturadas e revestidas com epóxi, pode ser realizada a contaminação, de forma que para método o chamado nessa pesquisa de Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³, as amostras foram inseridas em recipientes que abrigavam uma solução de 250g +/- 1g de cloreto de sódio (NaCl) para 1dm³ de água destilada. O volume da solução empregado foi necessário para cobrir as amostras por completo e, ainda, manter uma relação mínima entre o quociente do volume da solução de NaCl pela superfície da amostra exposta ao contaminante de 12,5 ml/cm². O procedimento de contaminação para as amostras nos métodos Acelerado *NT BUILD* (1995) - NaCl 165g/dm³ e NaCl 0,5M ocorreu de forma análoga, modificando-se apenas a concentração da solução que agora é, respectivamente, de 165g de NaCl para 1 dm³ de água destilada e 29,2g de NaCl para 1dm³ de água destilada. A partir disso, as amostras ficaram armazenadas no laboratório com temperatura controlada de 23°C até a data de sua extração, conforme exposto na Fig.3.3.



Figura 3.3 – Processo de contaminação das amostras. (a) Amostra identificada e revestida com resina epóxi. (b) Amostra imersa em solução de NaCl . (c) Armazenamento das amostras em laboratório com temperatura controlada

Já a contaminação para as amostras a partir do método de Guimarães e Helene (2007), a qual se dá a partir do contato direto entre o cloreto de sódio e uma das faces amostra, procedeu-se de forma que 10g de NaCl moído e passante pela peneira de nº100 foi inserido

sobre uma das faces planas da amostra de concreto, respeitando-se um espaçamento mínimo entre o contaminante e a borda da amostra de 1cm, tal cuidado foi tomado tendo em vista a conservação de um fluxo unidirecional na penetração dos cloretos. Além disso, para manter o sal fixo sobre a face da amostra foi utilizada uma fita de alta aderência. Após isso, as amostras foram armazenadas sobre tubos de *PVC* em uma caixa fechada hermeticamente, e mantidas em local com temperatura de 23°C até o seu período de extração. Porém, é válido mencionar que as caixas onde as amostras foram armazenadas continham água destilada a uma altura inferior ao do tubo de *PVC*, fornecendo, assim, um maior controle da umidade relativa, dificultando a perda de água das amostras e modificação do seu grau de saturação. Nas Figuras 3.4 e 3.5 é ilustrado os procedimentos realizados na contaminação das amostras para esse método de ensaio.

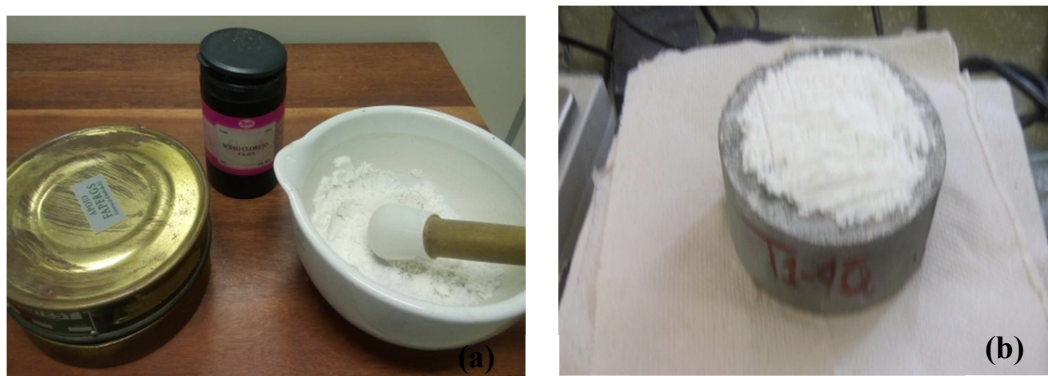


Figura 3.4 – Processo de contaminação das amostras pelo método Guimarães e Helene. (a) Trituração de $NaCl$ e passante pela malha 0,149mm. (b) Contaminação da amostra (10g $NaCl$) deixando aproximadamente 1cm livre até a borda.

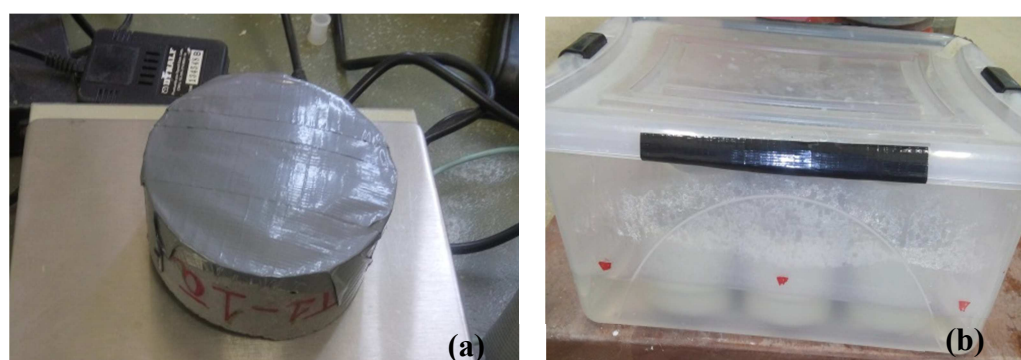


Figura 3.5 – Procedimento de contaminação das amostras pelo método Guimarães e Helene. (a) Fixação do $NaCl$ sobre a mostra com fita de alta aderência. (b) Armazenamento das amostras sobre cilindro de *PVC* com presença de água destilada.

É válido salientar que para cada método de ensaio e cada idade de contaminação serão ensaiadas duas amostras, exceto para o método $NaCl$ 0,5M, onde serão analisados ensaios

apenas para uma amostra. O Quadro 3.1 apresenta o número de amostras ensaiadas para cada traço de concreto a partir dos diferentes métodos de ensaio nas distintas idades de contaminação.

Quadro 3.1 – Quantidade de amostras ensaiadas nos distintos traços de concreto e métodos de ensaio.

ENSAIO	Idade de Contaminação	Número de amostras ensaiadas [unid]			
		T01 CP V ARI	T03 CP V ARI +10%S.A	T07 CP IV	Total
NaCl 250g/dm ³	7 dias	2	2	2	6
	14 dias	-	2	2	4
	21 dias	2	2	2	6
	35 dias	2	2	2	6
GUIMARÃES E HELENE(2007)	7 dias	-	-	2	2
	14 dias	-	-	2	2
	21 dias	-	-	2	2
	35 dias	-	-	2	2
NT BUILD 443	7 dias	2	-	-	2
	35 dias	2	2	2	6
0,5M NaCl	90 dias	1	1	1	3
Total de amostras a serem ensaiadas					41

3.6 Extração do material para a elaboração dos perfis de penetração de cloretos

Depois de efetivado o tempo de contaminação, deve-se realizar a extração do material de forma pulverizada. Assim sendo, após a retirada das amostras do recipiente de armazenamento e devida aferição da massa com superfície seca, efetuou-se a limpeza da face exposta ao contaminante, através de lixamento e jato de ar comprimido. A realização desta limpeza possui o intuito de evitar uma concentração elevada de cloretos na camada inicial causada por resíduos de *NaCl*, a qual poderá interferir no primeiro ponto do perfil de penetração de cloretos. É válido citar que a efetividade de tal limpeza foi comprovada por Bender (2016), o qual fez uma análise comparando perfis de penetração de cloretos considerando o primeiro ponto com aplicação de limpeza com perfis que descartam esse

ponto, conforme é recomendado pela *NT BUILD 443 – NaCl 165g/dm³*, concluindo então que não se tem variação significativa nos valores do *Cs* e *D* a partir da análise dos perfis considerando o primeiro ponto com limpeza e descartando o primeiro ponto. Além disso, Bender (2016) alerta para o fato de que a limpeza da superfície é importante para a inclusão da primeira camada na determinação do perfil de penetração de cloretos em ensaios que envolvam pequenas idades de contaminação, visto que o perfil se define nas camadas superficiais e desse modo os primeiros pontos exercem uma grande influência no comportamento do perfil.

Desse modo, após realizada a limpeza, a amostra foi colocada em um equipamento, especialmente projetado para efetuar a sua obtenção na forma pulverulenta, conforme Fig. 3.6 (a). Esse processo foi efetuado, inicialmente, para algumas amostras do traço *T01 CP V ARI* em 10 camadas com profundidade de 2mm. No entanto, ao decorrer da pesquisa verificou-se a necessidade da extração ser realizada em 11 camadas, sendo esse padrão adotado para a totalidade das amostras dos traços *T03 CP V ARI +10% S.A* e *T07 CP IV*, desse modo, as amostras foram extraídas com profundidade de aproximadamente 1mm na primeira e segunda camada, sendo adotado para as demais camadas uma profundidade aproximada de 2mm, o controle das profundidades foi realizado por meio de um paquímetro em três pontos ao longo do diâmetro da amostra tomando-se, assim, a profundidade média.

Depois de pulverizadas, as amostras foram armazenadas em sacos fechados hermeticamente, conforme exposto da Fig. 3.6 (b), para posterior obtenção do perfil de penetração de cloretos por potenciometria.



Figura 3.6 – Processo de extração das amostras. (a) Extração em equipamento projetado para obtenção das amostras de forma pulverizada. (b) Armazenamento da amostra.

3.7 Análise do Teor Total de Cloretos no Concreto

Tendo em vista que o intuito da extração das amostras de concreto na forma pulverizada é obter um perfil que relacione a concentração de cloretos com a sua profundidade de penetração, torna-se necessário a aplicação de uma metodologia de ensaio que permita a obtenção dos perfis de penetração de cloretos no concreto estudado. Assim sendo, para esta pesquisa adotou-se como base o método proposto por Climent *et al* (1999), o qual, em um primeiro instante, solicita que seja realizado um tratamento prévio nas amostras, para uma posterior análise potenciométrica, detecção do ponto de equivalência, determinação do percentual de cloretos e, então, a obtenção do perfil de penetração de cloretos.

Contudo, torna-se válido salientar que a aplicação das etapas referentes ao tratamento prévio das amostras, potenciometria, detecção do ponto de equivalência e a determinação do percentual de cloretos em relação à massa de concreto foram aplicadas em cada uma das camadas extraídas na forma pulverulenta das amostras contaminadas. A partir disso, foram traçados perfis que relacionem o teor de cloretos com a sua profundidade de penetração e através de um ajuste, pelo método dos mínimos quadrados, da solução da segunda lei de Fick (Equação 2.3), foi possível determinar os valores do D e C_s . Assim sendo, tais etapas aplicadas nas amostras extraídas de concreto serão melhores detalhadas nos próximos subtítulos.

3.7.1 Tratamento prévio das amostras pulverizadas

Nesse procedimento, primeiramente, as amostras de concreto pulverizadas foram homogeneizadas manualmente, então uma massa desse material foi separada para o ensaio. O restante foi acondicionado, novamente, em um saco plástico hermeticamente fechado e mantido assim como reserva caso houvesse a necessidade de repetição do ensaio. Após, as amostras foram secas em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por um período mínimo de 24 horas. Tal etapa foi realizada no intuito de remover a umidade contida na amostra e, ainda, facilitar a decomposição dos cloroaluminatos.

Transcorrido o tempo de secagem, as amostras foram retiradas da estufa e postas a esfriar no interior de um dessecador com sílica em gel, tal processo tem o objetivo de evitar que as amostras venham absorver umidade do próprio ambiente. Desta forma, na Figura 3.7 são apresentadas as duas etapas do processo de secagem descritas anteriormente.

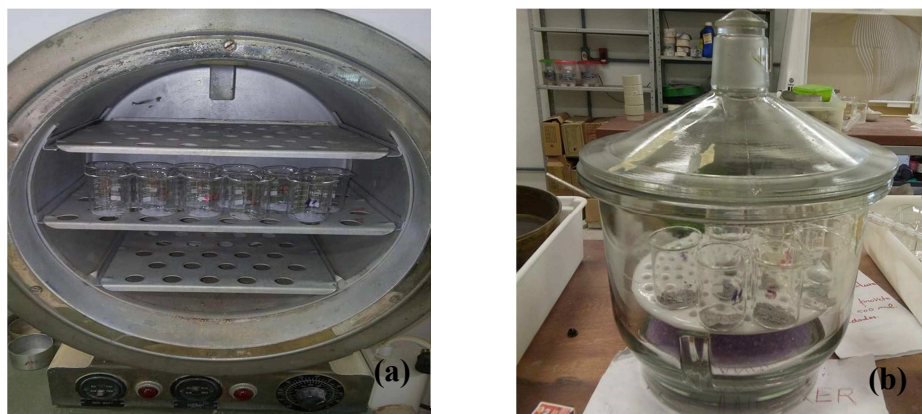


Figura 3.7 – Processo de secagem das amostras. (a) Amostras inseridas na estufa à 100°C . (b) Resfriamento das amostras em secador com sílica em gel.

Estando as amostras frias, as mesmas foram submetidas à pesagem por uma balança analítica com 0,1mg de precisão. É válido salientar que para as amostras, com idade de contaminação de 7 dias, pesaram-se entre 0,9 a 1,0 g de material pulverizado para todas as camadas de extração. Já para as amostras com idade de contaminação superior a 7 dias, a quantidade de amostra pulverizada ensaiada seguiu o exposto no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Quantidade aproximada da massa de concreto pulverizado ensaiado para obtenção dos perfis com idade de contaminação superior a 7 dias.

Camada de extração (n°)	Profundidade (mm)	Quantidade (g)
1	0,0 - 1,0	0,6 – 0,7
2	1,0 – 2,0	
3	2,0 – 4,0	
4	4,0 - 6,0	
5	6,0 – 8,0	0,7 – 0,8
6	8,0 – 10,0	
7	10,0 – 12,0	
8	12,0 – 14,0	0,8 – 0,9
9	14,0 – 16,0	
10	16,0 – 18,0	0,9 – 1,0
11	18,0 – 20,0	

Posteriormente a pesagem, com o intuito desfazer a combinação dos cloroaluminatos, foi adicionado às amostras 15ml de solução de ácido nítrico (HNO_3) na proporção de 1:2 e, então, o conjunto amostra pulverizada seca mais ácido foi submetido a ebulição com agitação constante. Nessa etapa, torna-se interessante salientar a utilização de um vidro relógio com uma pequena quantidade de água sobre o recipiente de ensaio, permitindo assim a condensação de algum cloreto que pudesse vir a se dispersar no ambiente em forma de vapor. Feito isso, o recipiente de ensaio foi inserido em uma vasilha com água em temperatura ambiente, no intuito de acelerar seu processo de resfriamento. Assim sendo, os procedimentos descritos anteriormente podem ser observados na Fig. 3.8.

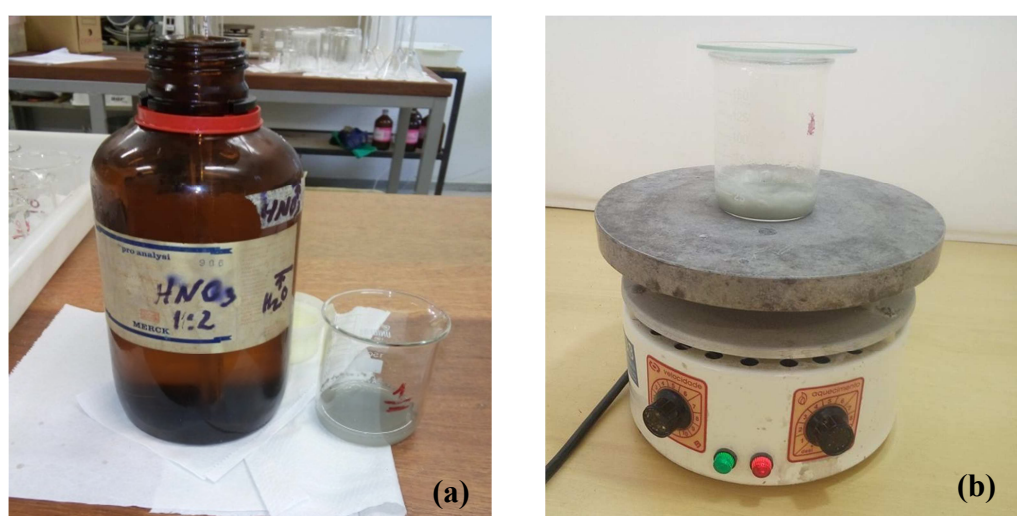


Figura 3.8 – Procedimento de ataque com solução ácido nítrico nas amostras. (a) Adição de 15ml de solução de ácido nítrico. (b) Ebulição do conjunto HNO_3 mais concreto pulverizado.

Após o resfriamento da solução resultante, torna-se necessário lavar as paredes do recipiente utilizado no ensaio, bem como o fundo do vidro relógio com água destilada, a fim de depreender algum íon cloreto fixo nessas paredes. Realizado isso, por conta da forte acidez fornecida à solução resultante por conta do ataque do HNO_3 , torna-se necessário elevar o pH da solução para um valor compreendido entre 2 e 3, para isso, realizou-se adições discretas de hidróxido de sódio ($NaOH$) a 2M e fez-se o controle do pH com auxílio de um pH -metro, conforme apresentado na Fig. 3.9.

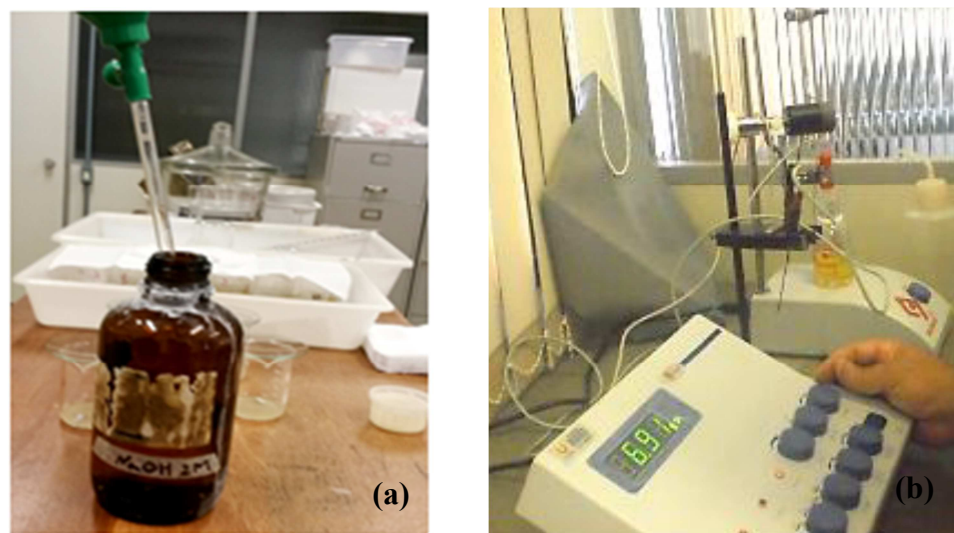


Figura 3.9 – Procedimento de elevação do pH das amostras. (a) Adição de 30ml de hidróxido de sódio. (b) Controle do pH com auxílio de um pH -metro.

Finalizada essa etapa, devido ao fato de que as amostras apresentam, geralmente, um baixo teor de Cl^- , torna-se necessário adicionar às amostras a serem ensaiadas 1 ml de solução de $NaCl$ a 0,01M, a fim de se alcançar concentrações mínimas de cloretos, as quais possam ser medidas pelo equipamento utilizado. Desse modo, salienta-se que se optou pela adição de 1ml de $NaCl$ em todas as amostras ensaiadas haja vista a padronização do procedimento e, assim, evitar que erros técnicos na realização do cálculo das concentrações de cloretos ocorressem.

Por fim, é válido enfatizar que todo esse processo de preparação das amostras foi realizado para mais uma solução, chamada nessa pesquisa de “Branco”, a qual não apresenta em sua composição concreto pulverizado. Assim sendo, o objetivo de ensaiar o “Branco” é o de constatar o volume de cloretos presente na água destilada e demais soluções utilizadas no tratamento prévio das amostras, para posteriormente esse valor, juntamente com o volume de cloreto adicionado, ser descontado do volume equivalente de cloretos que será encontrado por potenciometria nas demais amostras. Desta forma, para uma melhor compreensão deste processo, o item a seguir descreve a aplicação do método potenciométrico nas amostras ensaiadas.

3.7.2 Aplicação da Potenciometria

Para determinar a quantidade de cloretos existentes em cada camada extraída da amostra analisada, após o tratamento prévio, utilizou-se da titulação potenciométrica, a qual consiste

em medir os valores de potenciais elétricos em função da variação de uma espécie química em solução com concentração conhecida, sendo, então, as medidas potenciométricas realizadas ao mesmo tempo em que transcorre a titulação. Assim sendo, para a presente pesquisa, a titulação potenciométrica utilizou uma solução padronizada de nitrato de prata como titulante, eletrodo maciço de prata como eletrodo indicador e eletrodo prata/cloreto de prata como eletrodo de referência.

A partir da aplicação dos resultados obtidos na titulação potenciométrica, traça-se um gráfico relacionando as medidas da diferença de potencial entre o eletrodo indicador e o eletrodo de referência em mV com o volume da solução padrão consumida (ml), conforme Fig. 3.10.

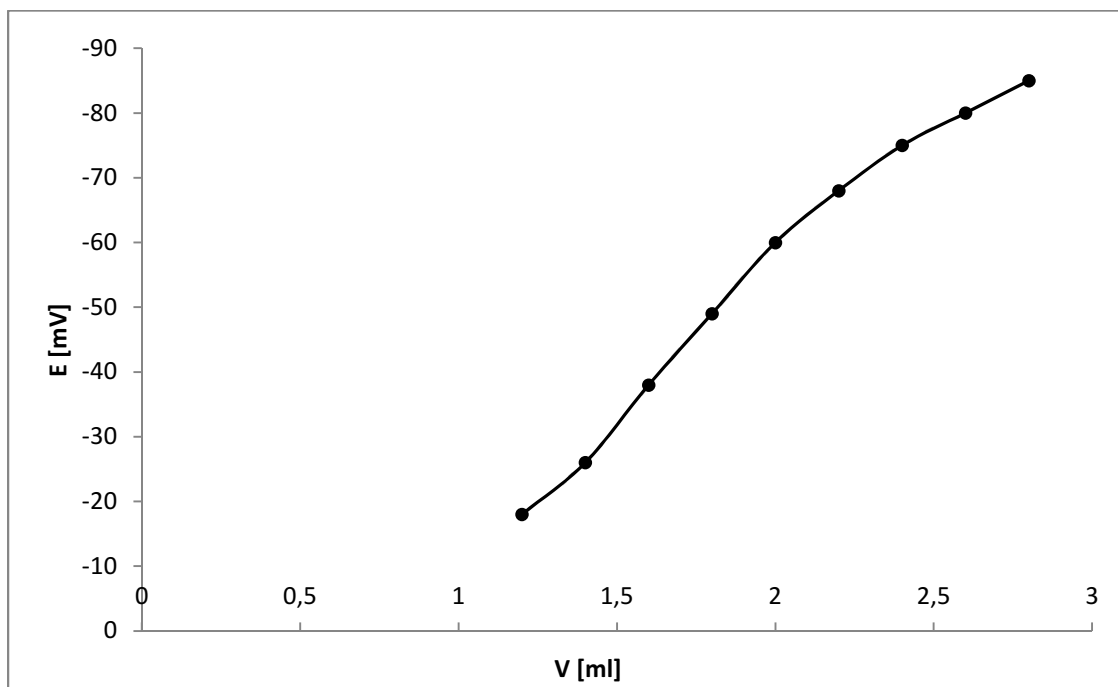


Figura 3.10 – Curva obtida pela titulação potenciométrica Potencial medido x volume de titulante.

O ponto onde se encontra a máxima concentração de cloretos da amostra é chamado de ponto de equivalência ou ponto final e corresponde ao momento onde o titulado foi totalmente consumido pelo titulante, nesse caso a diferença de potencial medida a partir desse ponto corresponde somente ao acúmulo do titulante na solução em análise. Isso, porventura, causa uma mudança brusca no potencial medido, indicando assim o término da reação, o qual é representado na curva pelo seu ponto de inflexão. Assim sendo, para a determinação do ponto final utiliza-se de métodos matemáticos, dentre os quais se destacam

os métodos da primeira e segunda derivada da curva obtida pelo ensaio, tal metodologia foi aplicada nessa pesquisa e será mais bem descrita no subtítulo a seguir.

3.7.3 Detecção do ponto de equivalência: métodos da primeira e segunda derivada

Um método muito empregado para detecção do ponto de equivalência na titulação potenciométrica, apresentado por Climent *et al* (2004), é o baseado no cálculo da primeira e segunda derivada da curva Potencial medido x Volume de titulante consumido (Fig. 3.10). Tal método consiste em detectar o ponto máximo da curva a partir da aplicação da primeira derivada ou detectar o ponto onde a segunda derivada da curva equivale à zero, uma vez que ambas as condições correspondem ao ponto de inflexão da curva de titulação e, assim, ao ponto de equivalência.

A aplicação da primeira derivada consiste em calcular a variação de potencial elétrico (ΔE) pela variação de volume da solução titulante (ΔV), o gráfico que relaciona $\Delta E / \Delta V \times V$ apresenta um ponto de máximo, o qual corresponde ao ponto de equivalência, conforme Fig. 3.11.

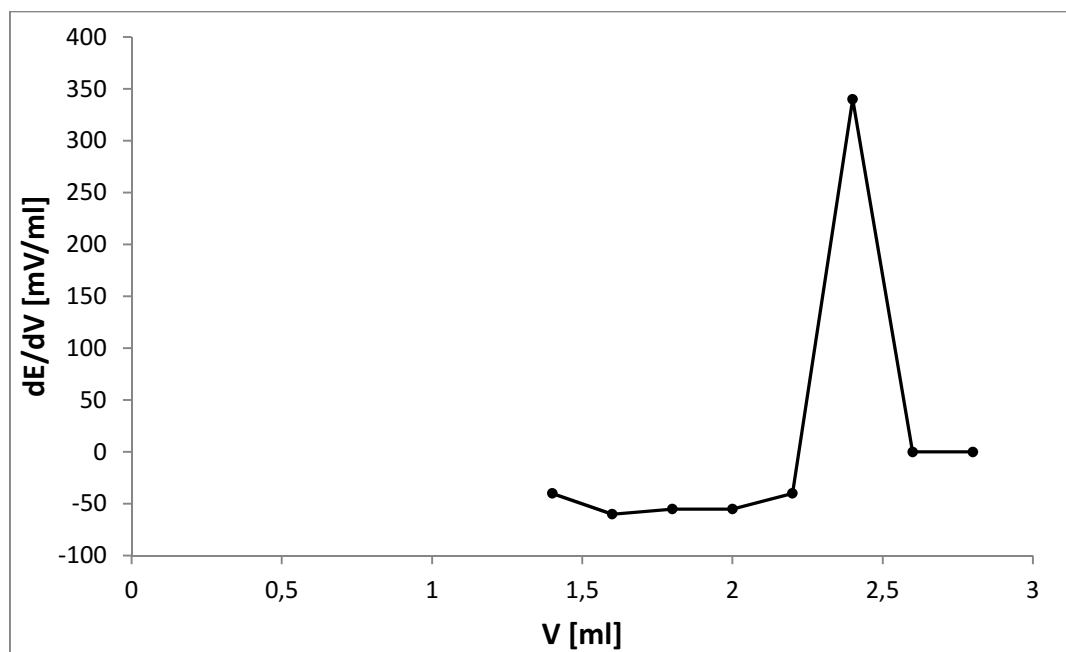


Figura 3.11 – Cálculo do ponto de inflexão da curva pelo método da primeira derivada.

No entanto, a constatação do volume da solução titulante utilizada na titulação potenciométrica, a partir do ponto em que a segunda derivada da curva sigmodal, Figura 3.12, apresenta um valor nulo para a variação da diferença de potencial, proporciona maior confiabilidade, sendo assim adotada nessa pesquisa. A função se faz igual à zero em um

determinado ponto entre dois volumes quando ocorre uma mudança de sinal. O volume correspondente a esse ponto é encontrado por interpolação e chamado, então, de volume equivalente (V_{eq}), e tal dado é imprescindível para o cálculo de teor de cloretos na amostra analisada.

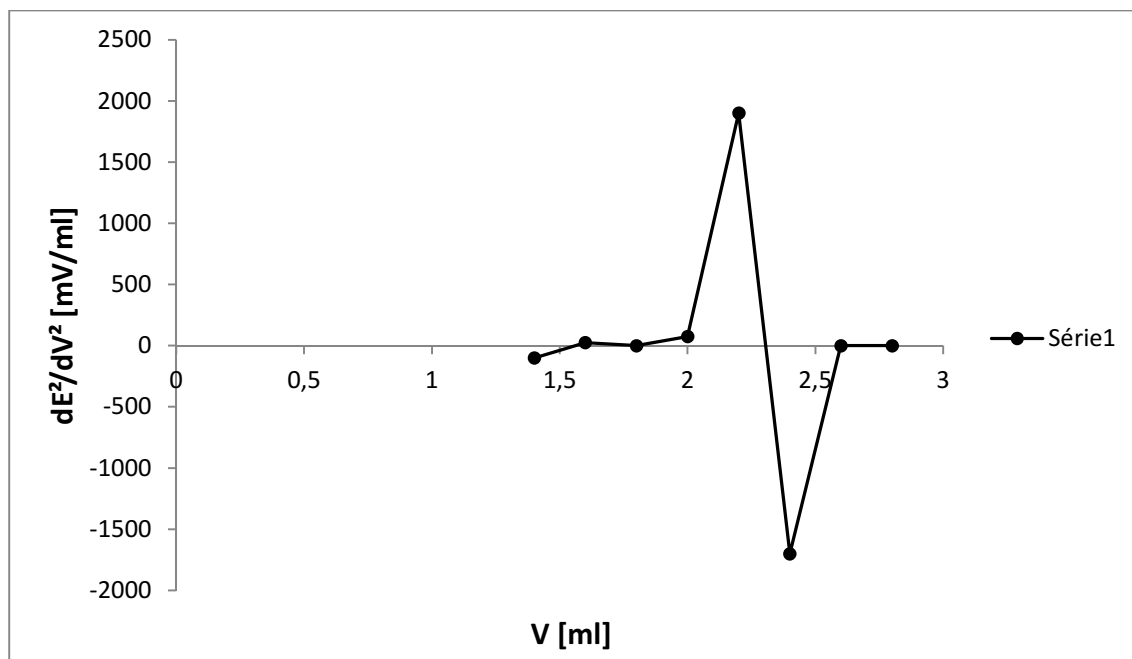


Figura 3.12 – Cálculo do ponto de inflexão da curva pelo método da segunda derivada.

Contudo, é importante salientar que esses métodos baseiam-se no pressuposto de que a curva de titulação é simétrica no entorno do ponto de equivalência e, por consequência, a inflexão da curva corresponde a esse ponto.

3.7.4 Determinação do percentual de cloretos em relação à massa de concreto

A partir da determinação do volume equivalente (V_{eq}) por titulação potenciométrica, torna-se possível determinar o percentual de cloretos presente na massa de concreto analisada.

Primeiramente calcula-se o volume de cloretos totais (V_{Cl}) presentes na amostra através da seguinte equação:

$$V_{Cl} = V_{eq} - V_{Branco} - V_{add\ de\ Cl} \quad (3.1)$$

Onde:

V_{Cl} – Volume total de cloretos na amostra analisada [ml]

V_{Branco} – Volume de cloretos presentes no Branco [ml]

$V_{add\ de\ Cl}$ – Volume adicionado de cloretos 1ml [ml]

A partir da determinação do volume total de cloretos, torna-se possível determinar o teor de cloretos em relação à massa de concreto através da seguinte equação:

$$C = \frac{V_{Cl} \cdot M_{Cl\ 1M\ de\ NaCl} \cdot C_{solução}}{M_{amostra}} \times 100 \quad (3.2)$$

C – Teor de cloretos em relação à massa de concreto [%]

V_{Cl} – Volume total de cloretos na amostra analisada

$M_{Cl\ 1M\ de\ NaCl}$ – Massa de cloreto em 1M de NaCl [g/mol] = 35,453

$C_{solução}$ – Concentração da solução titulante = 0,01mol/l

$M_{amostra}$ – Massa da amostra seca submetida à titulação potenciométrica [g]

Assim sendo, a partir da determinação do teor de cloretos torna-se necessário, antes do traçado do perfil real de penetração de cloretos, descontar do valor obtido para o C a concentração inicial de íons cloreto no interior do concreto, chamada de Co . A constatação do valor de Co nessa pesquisa se deu a partir da verificação da repetição dos valores do teor de cloretos em relação à massa de concreto das últimas camadas analisadas para cada perfil, de modo que, tomou-se como média tais valores, visto que essa repetição frequente de um determinado valor de concentração de cloretos se remete a quantidade de cloretos presentes na amostra de concreto antes de sua contaminação. Desta forma, foi possível realizar o traçado do perfil real de penetração de cloretos e posteriormente calcular o coeficiente de difusão, sendo que tal assunto será melhor abordado no item a seguir.

3.7.5 Traçado do perfil de cloretos e determinação da concentração superficial de cloretos (C_s) e do coeficiente de difusão (D)

Primeiramente, é válido enfatizar que a determinação do percentual de cloretos em relação à massa de concreto é realizada para cada camada pulverizada da amostra de concreto contaminada. Assim, a partir da determinação do teor de cloretos real para cada

camada, o mesmo é relacionado com a sua profundidade média de extração, obtendo-se, então, um perfil que relaciona a concentração de cloretos com a sua profundidade de penetração, chamado de perfil real, conforme é apresentado na Fig 3.13.

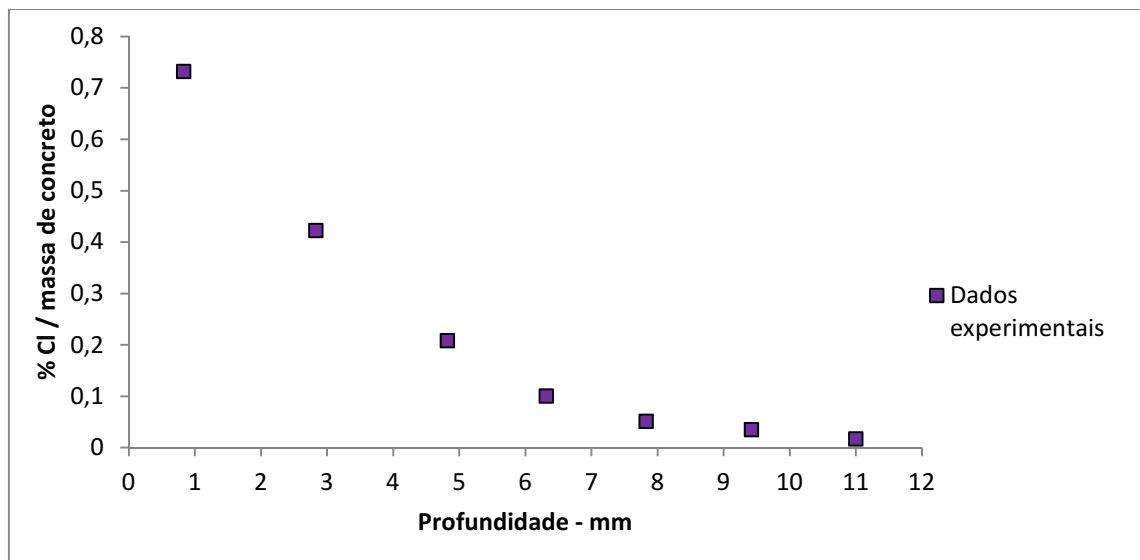


Figura 3.13 – Perfil real de penetração de cloretos

Obtido o perfil de penetração de cloretos resultante, são determinados os valores da concentração superficial de cloretos (C_s) e do coeficiente de difusão de cloretos (D), sendo que os dados são ajustados empregando-se o Método dos Mínimos Quadrados na solução da segunda lei de Fick apresentada por Crank (1975), Eq. 2.3. Assim sendo, é interessante apresentar que para essa pesquisa optou-se por realizar o ajuste das curvas a partir da aplicação do software Excel, deste modo, o método foi aplicado ponto a ponto visando obter-se o menor erro entre os pontos do perfil real e do perfil teórico. Desta forma, tendo o intuito de apresentar a relação entre os pontos do perfil obtido por investigação experimental com o perfil ajustado a partir da aplicação do Método dos Mínimos quadrados serão apresentados, no Capítulo 04, gráficos que relacionam os pontos do perfil real e a curva do perfil teórico considerada como sendo de “dispersão com linhas retas”.

Um exemplo de um perfil de penetração de cloretos ajustado de acordo com o método exposto anteriormente é apresentado na Figura 3.14.

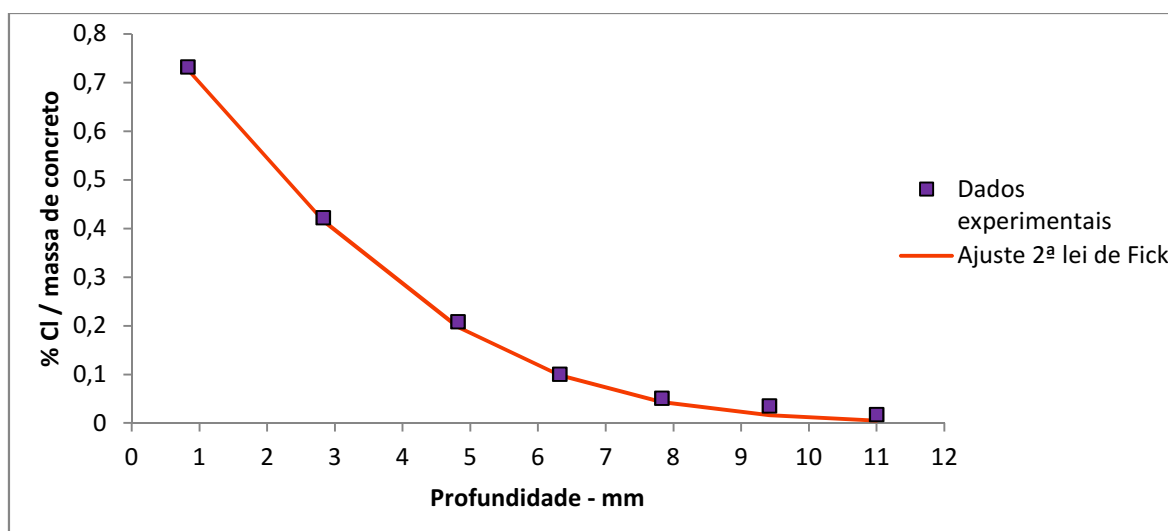


Figura 3.14 – Perfil de penetração de cloretos ajustado pelo Método dos Mínimos Quadrados a partir da solução da 2ª lei de Fick.

Desta forma, torna-se interessante expor que o Método dos Mínimos Quadrados é bastante utilizado na Matemática e Estatística para a realização de estimativas de dados, visto que o mesmo visa encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados, tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados.

Além disso, verifica-se que o ajuste dos perfis de cloretos através da segunda lei de Fick apresenta-se satisfatório quando se deseja avaliar a vida útil de uma estrutura em um determinado tempo, sendo essa forma de análise comumente aplicada haja vista sua extrema simplicidade na determinação dos parâmetros C_s e D através de ajustes.

3.8 Análise estatística adotada para tratamento dos dados

Para realizar a comparação entre os coeficientes de difusão de cloreto (D) encontrados pelos métodos acelerados propostos, em cada idade de contaminação, com o D obtido pelo método de ensaio acelerado normatizado *NT BUILD 443 (1995)* – $NaCl\ 165g/dm^3$ foi realizada a aplicação de um teste estatístico de hipóteses não paramétrico, o qual é aplicável a não normalidade da população e para amostras pequenas. Assim sendo, o método utilizado foi o teste U de Mann Whitney, visto que o mesmo é usado para comparar as medianas de amostras independentes. Esse teste é, portanto, uma alternativa para o teste t de Student para amostras independentes quando a amostra for pequena e/ou as pressuposições, exigidas pelo teste t, estiverem seriamente comprometidas.

Assim sendo, para a aplicação do método adotou-se um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Já no que diz respeito às hipóteses consideradas, adotou-se para a hipótese inicial (H_0) que a diferença entre as duas medianas, a serem comparadas, é nula, ou seja, as medianas são iguais, já na hipótese alternativa (H_1), considerou-se que as medianas a serem comparadas possuem diferença. Tais considerações podem ser melhores evidenciadas na Eq. 3.3.

$$\begin{aligned} H_0: \mu_0 &= \mu_1 \\ H_1: \mu_0 &\neq \mu_1 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Além disso, tem-se em vista que o método proposto será aplicado através do software *SPSS Statistic*, o qual calcula a probabilidade (p) através de uma aproximação à distribuição normal, por meio de um dado valor z . Torna-se necessário conhecer tal valor e para isso, é necessário determinar os valores de n_1 e n_2 , os quais correspondem o número de casos observados no grupo₁ e grupo₂, respectivamente. Feito isso, é necessário ordenar de forma crescente os valores das duas amostras conjuntamente. Após, é estabelecido um ranking de ordem a cada valor, de modo que o posto 1 corresponde ao menor valor algébrico, assim sendo, os postos variam de 1 a N , sendo $N = n_1 + n_2$. Caso haja repetição nos valores observados é realizada uma correção a esses postos, de forma que o posto assumirá a média dos postos correspondentes.

Realizada ordenação dos valores e a definição dos seus postos, torna-se necessário calcular R_1 e R_2 , sendo que os mesmos correspondem a somas dos postos da primeira e da segunda amostra, respectivamente. Com isso, é possível determinar o valor de U , o qual corresponde ao menor valor obtido entre U_1 e U_2 , de acordo com a Eq.3.4. Já as Equações 3.5 e 3.6 referem-se à determinação de U_1 e U_2 .

$$U = \min(U_1, U_2) \quad (3.4)$$

$$U_1 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_1 \cdot (n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (3.5)$$

$$U_2 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_2 \cdot (n_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (3.6)$$

Definido o valor de U , tem-se os parâmetros necessários para realizar o cálculo de z , o qual é obtido pela equação 3.7.

$$z = \frac{U - \frac{n_1 \cdot n_2}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 + 1)}{12}}} \quad (3.7)$$

Com os valores determinados até então, é possível obter-se a probabilidade associada (p) a U a partir da aplicação da tabela específica para o teste e, então, compará-la com o nível de significância (α) adotado. Assim sendo, caso $p < \alpha$ rejeita-se a hipótese nula (H_o), caso contrário a hipótese nula não deverá ser rejeitada.

Por fim, é válido salientar que as análises estatísticas desta pesquisa foram todas realizadas através da aplicação do software *SPSS Statistics 20*, sendo que os resultados obtidos serão apresentados e discutidos no próximo capítulo.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresentará os resultados obtidos nesta pesquisa, realizando a sua análise e uma breve discussão sobre os mesmos. Assim sendo, a partir da aplicação da metodologia apresentada no Capítulo 3 foi possível, então, determinar, primeiramente, os perfis de penetração de cloretos para os diferentes traços de concreto a partir das distintas idades de contaminação e métodos de ensaios, calculando-se, então, a concentração superficial de cloretos e o coeficiente de difusão íons cloreto. Desta forma, tendo como base tais resultados e visando atingir os objetivos desta pesquisa, foi realizada a comparação entre os coeficientes de difusão de íons cloreto dos ensaios propostos com o ensaio normatizado a partir da análise estatística descrita em 3.8. Posteriormente, realizou-se a análise do comportamento da concentração superficial de cloretos em relação ao tempo. Ainda, tendo como base uma constatação realizada por Guimarães *et al* (2011), foi analisada se uma possível variação da concentração superficial de íons cloreto no tempo afeta significativamente o valor do coeficiente de difusão calculado a partir da simplificação de que a concentração superficial de cloretos é constante ao longo do tempo. Por fim, realizou-se uma análise do comportamento do D em relação à idade das amostras de concreto utilizadas nos ensaios.

4.1 Obtenção dos perfis de penetração de cloretos e determinação da Concentração Superficial de Cloretos e do Coeficiente de Difusão de Íons Cloreto

A partir da metodologia explanada no capítulo anterior, foi possível traçar os perfis de penetração de cloreto, os quais relacionam a concentração de íons cloreto em relação à massa de concreto com a sua profundidade de penetração. Desta forma, como exposto anteriormente, no intuito de fornecer maior credibilidade a esta pesquisa, foram ensaiadas duas amostras para os distintos traços de concreto em cada idade de contaminação, exceto para o método tradicional $NaCl\ 0,5M$, o qual será analisado somente com uma amostra.

Assim sendo, os perfis de penetração de cloretos obtidos para as amostras de concreto, dosado com cimento de alta resistência inicial ($T01\ CP\ VARI$), são ilustrados nas imagens a seguir. É válido destacar que cada imagem apresenta a relação entre os pontos do perfil real (*Perfil_Exp*), obtido por potenciometria volumétrica de forma experimental, e o perfil teórico (*Perfil_Reg*), advindo do ajuste de curva, pelo método dos mínimos quadrados, a partir da aplicação da resolução da Segunda Lei de Fick exposta por Crank (1975), a qual

permite a obtenção de forma simplificada dos valores da concentração superficial de cloretos (C_s) e do coeficiente de difusão íons cloretos (D). Além disso, é importante evidenciar que para o método, chamado nessa pesquisa de *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³*, as amostras para o traço de concreto em questão foram ensaiadas em idade de contaminação de 7, 21 e 35 dias e os perfis obtidos encontram-se nas Fig. 4.1 a 4.6. Já nas Figuras 4.7 a 4.10 são apresentados os perfis obtidos para as amostras analisadas pelo método normatizado *NT BUILD 443 (1995) – NaCl 165g/dm³*, as quais foram ensaiadas para a idade de contaminação de 7 e 35 dias. Na Figura 4.11 é apresentado o perfil para o método *NaCl 0,5M*, no qual realizou-se o ensaio a partir de uma única amostra imersa em solução contaminante por 90 dias.

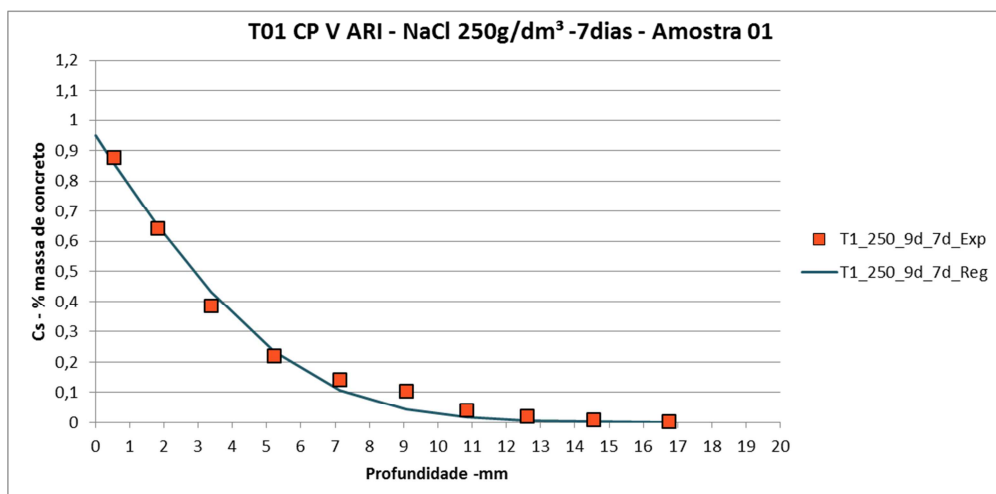


Figura 4.1 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ T1– *NaCl* 250g/dm³ - 7 dias.

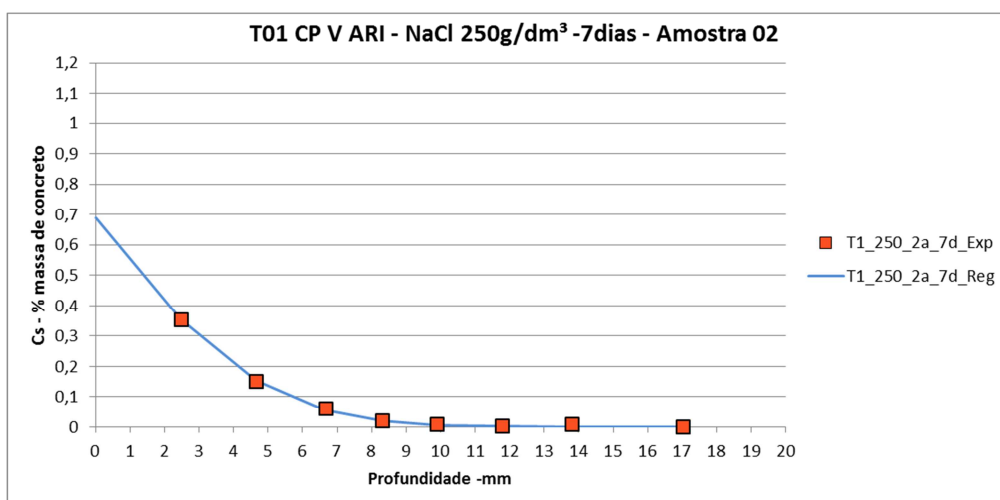


Figura 4.2 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/ T1 - *NaCl* 250g/dm³ - 7 dias.

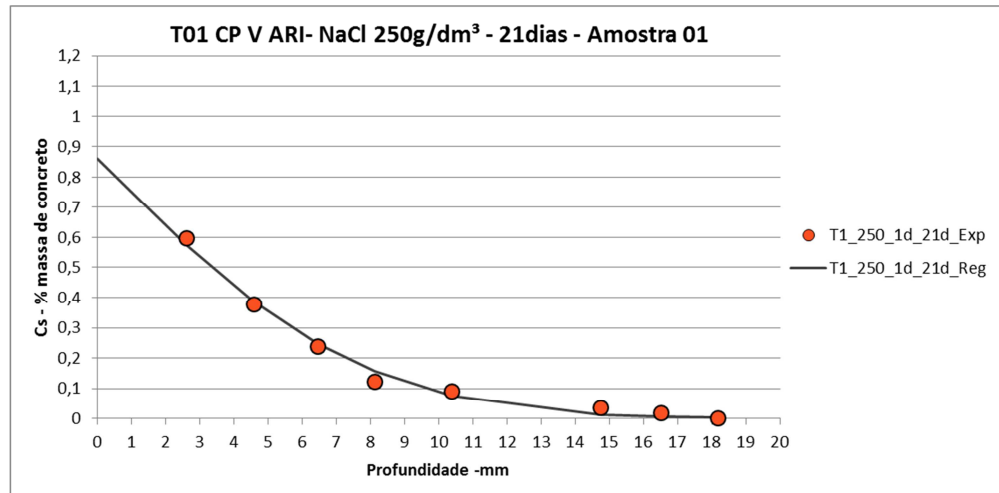


Figura 4.3 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T1–NaCl 250g/dm³ - 21 dias.

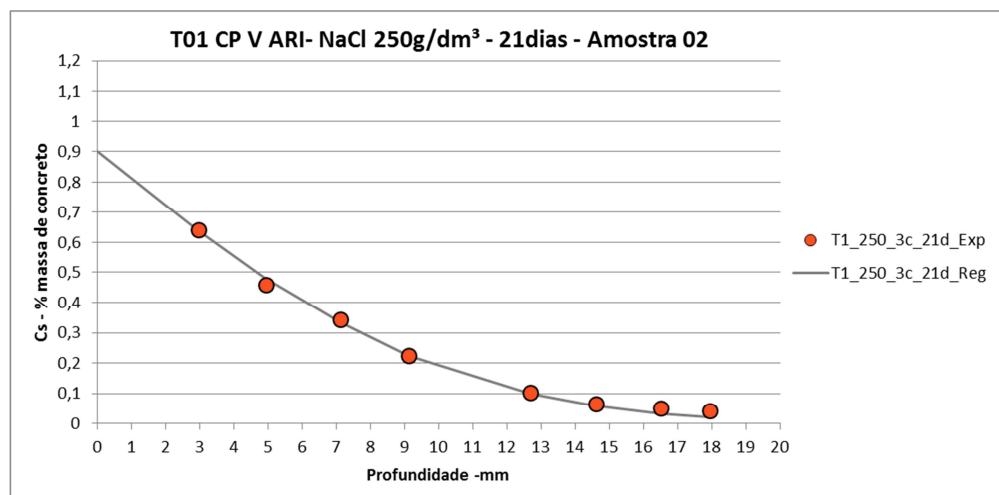


Figura 4.4 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T1–NaCl 250g/dm³ - 21 dias.

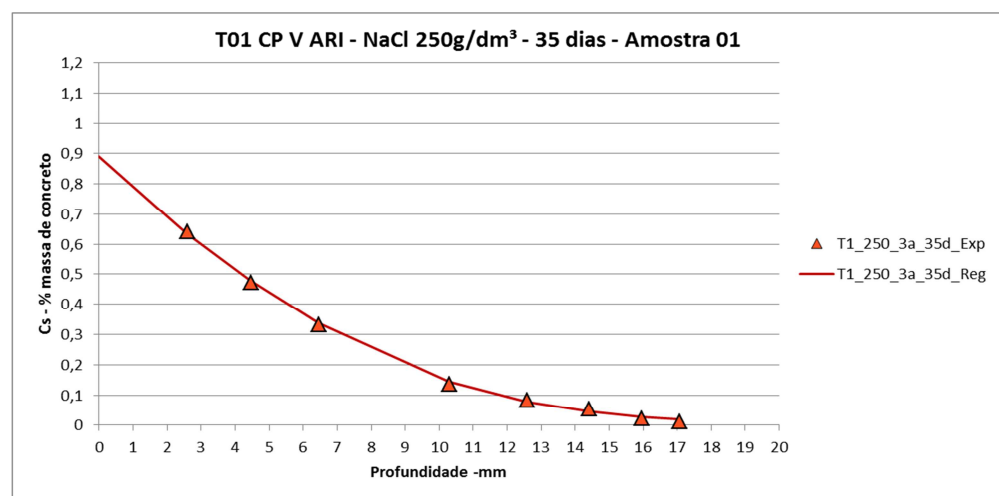


Figura 4.5 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T1–NaCl 250g/dm³ - 35 dias.

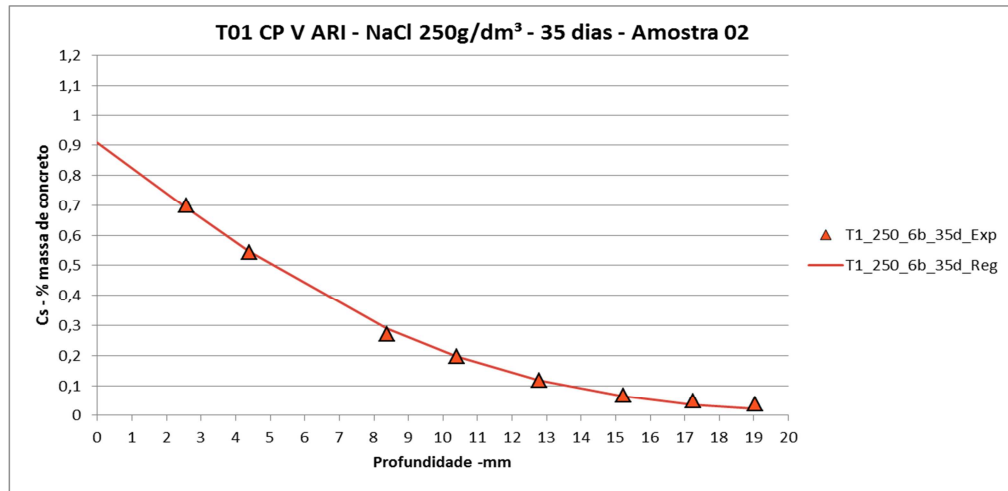


Figura 4.6 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T1– NaCl 250g/dm³ - 35dias.

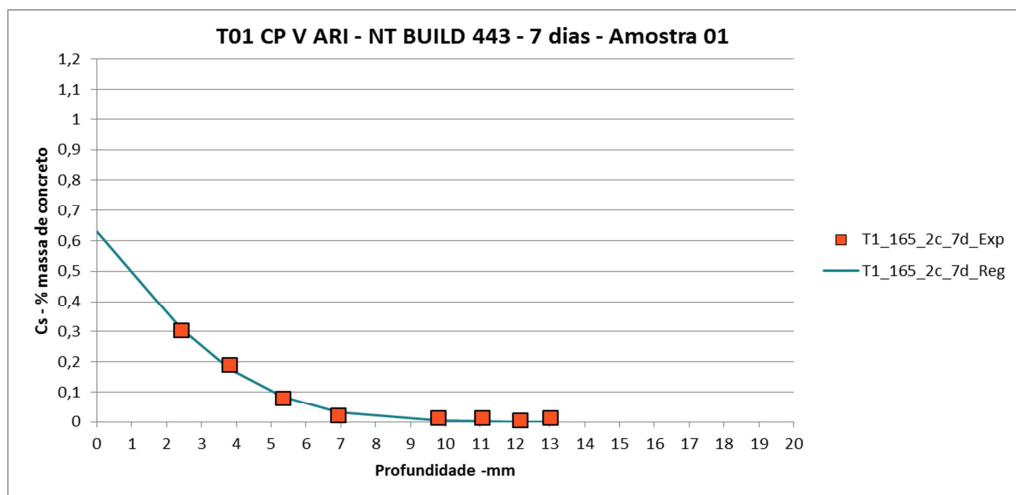


Figura 4.7 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T1– NaCl 165g/dm³ - 7 dias.

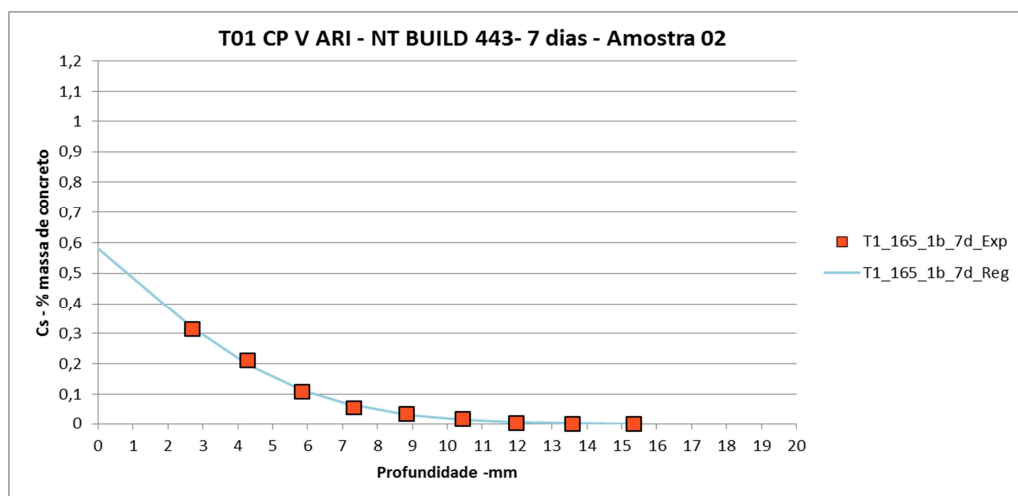


Figura 4.8 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T1– NaCl 165g/dm³ - 7 dias.

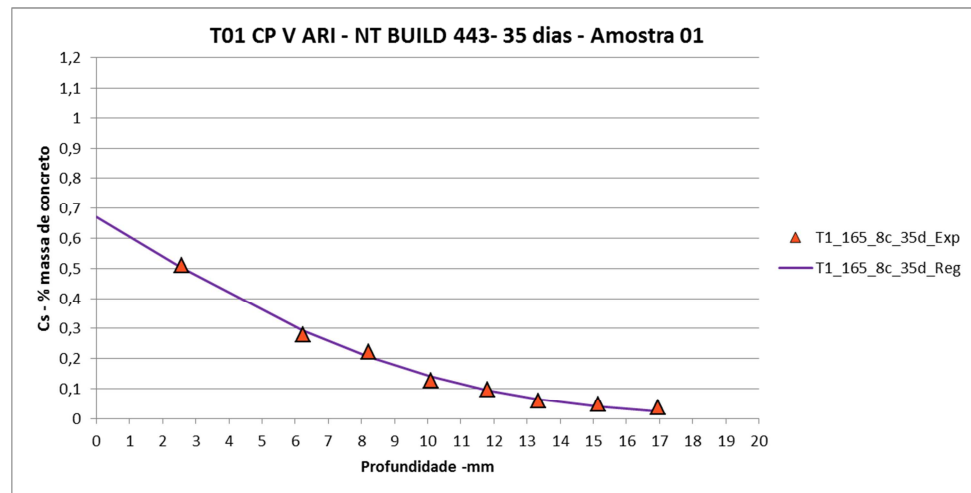


Figura 4.9 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T1–NaCl 165g/dm³ - 35 dias.

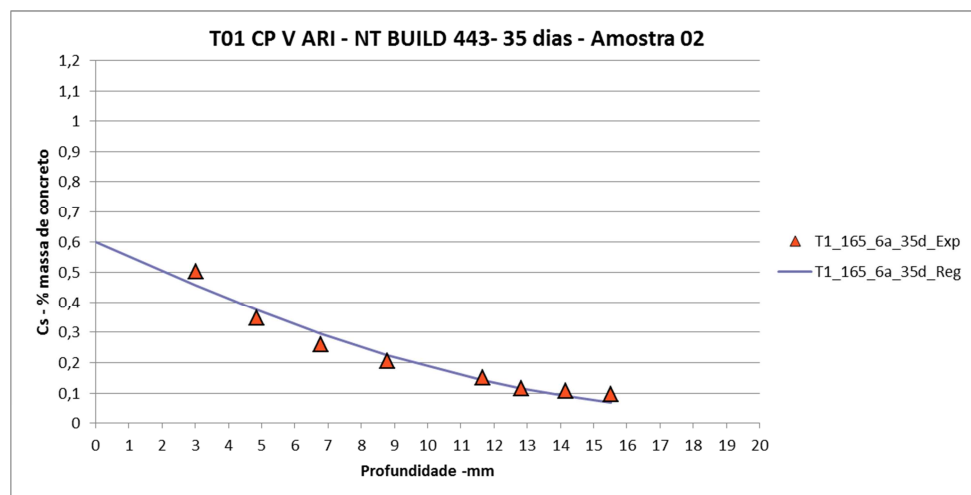


Figura 4.10 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T1–NaCl 165g/dm³-35 dias.

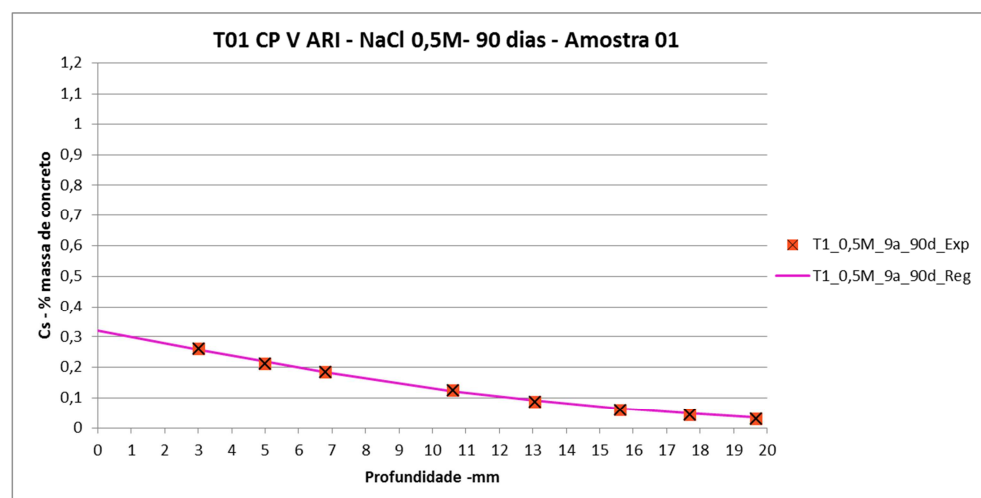


Figura 4.11 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T1– NaCl 0,5M - 90 dias.

Tendo como base os perfis apresentados anteriormente, a Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para a concentração superficial de cloretos (C_s) e o coeficiente de difusão íons cloretos (D) e seus valores médios para o traço *T01 CP VARI*, nos distintos métodos de ensaios e idades de contaminação.

Tabela 4.1 – Resultados do C_s e D para o traço *T01 CP VARI*

Método de Ensaio	Testemunho	tempo de contaminação [dias]	C_s [% massa de concreto]	C_s méd [% massa de concreto]	D [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]	D méd [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]
NT BUILD 443 (1995)	T1_165_1b_7d	7	0,58	0,61	16,89	13,64
	T1_165_2c_7d	7	0,63		10,38	
	T1_165_6a_35d	35	0,60	0,64	16,15	13,43
	T1_165_8c_35d	35	0,67		10,70	
NaCl 250g/dm ³	T1_250_2a_7d	7	0,69	0,82	12,00	14,45
	T1_250_9d_7d	7	0,95		16,89	
	T1_250_1d_21d	21	0,86	0,88	10,16	13,75
	T1_250_3c_21d	21	0,90		17,34	
	T1_250_3a_35d	35	0,89	0,90	9,18	10,44
	T1_250_6b_35d	35	0,91		11,70	
NaCl 0,5M	T1_0,5M_9a_90d	90	0,32	0,32	9,58	9,58

Já no que diz respeito aos perfis obtidos para as amostras de concreto dosado com cimento de alta resistência e adição de 10% de micro sílica (*T03 CP VARI +10% S.A*), as amostras foram ensaiadas a partir do método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³* nas idades de contaminação de 7, 14, 21 e 35 dias. Para o método normatizado *NT BUILD 443 (1994) – NaCl 165g/dm³* utilizou-se do ensaio somente para a idade de contaminação de 35 dias e para o método que utiliza uma solução com teor de íons cloreto semelhantes a da água do mar *NaCl 0,5M*, a análise se dá sobre uma amostra com um período de contaminação de 90 dias. Novamente, seguindo o já exposto anteriormente, foram ensaiadas duas amostras para cada idade de contaminação nos métodos de ensaios propostos, exceto para o método tradicional *NaCl 0,5M*, no qual ensaiou-se uma única amostra. Desta forma, os perfis de penetração de cloretos obtidos para o traço de concreto em questão são apresentados a seguir, de forma que as Figuras 4.12 a 4.19 fazem referências aos perfis obtidos para o ensaio *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³*, as Figuras 4.20 e 4.21 remetem aos perfis para o ensaio normatizado *NT BUILD 443 – 165g/dm³* e a Figura 4.22 traz o perfil obtido para o método *NaCl 0,5M*.

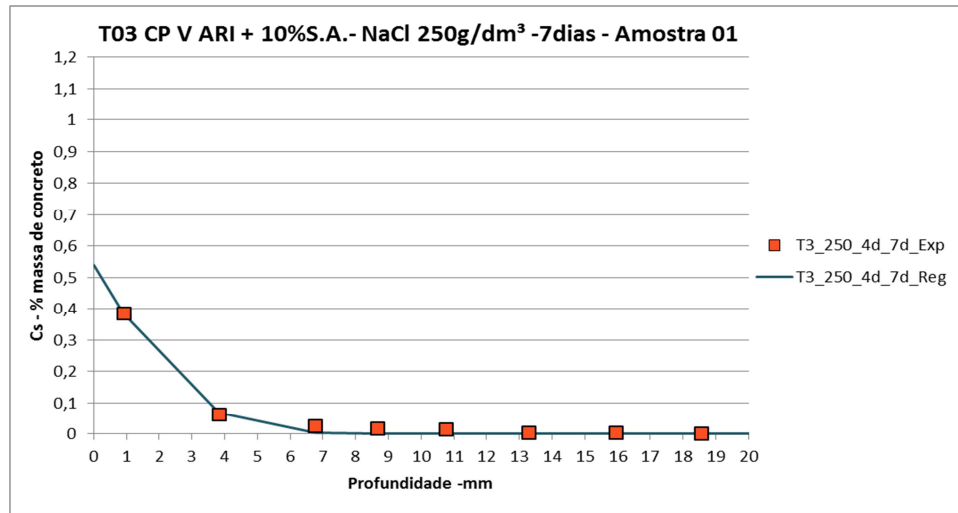


Figura 4.12 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm³ - 7 dias.

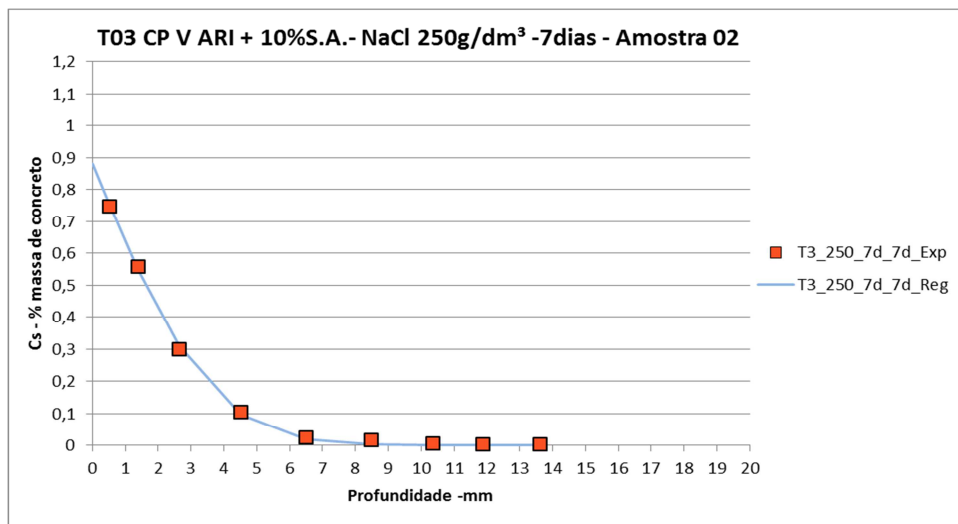


Figura 4.13 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm³ - 7 dias.

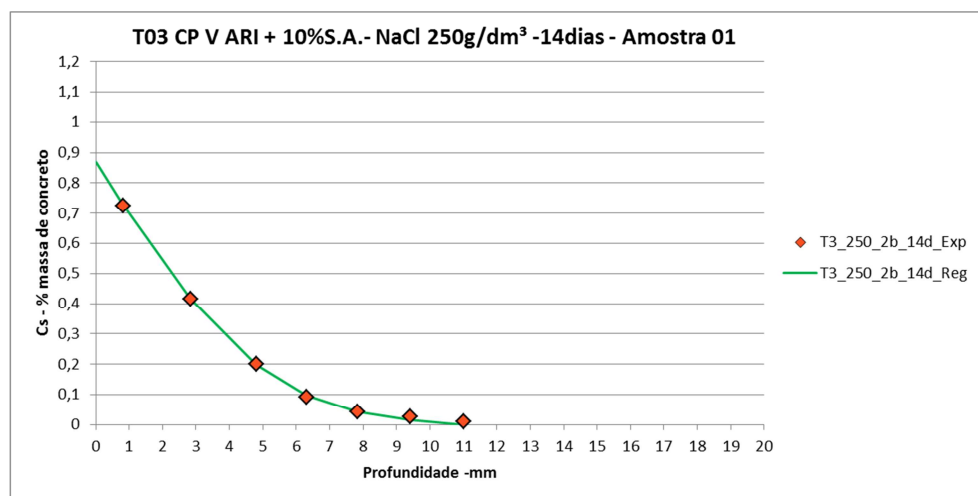


Figura 4.14 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm³-14 dias.

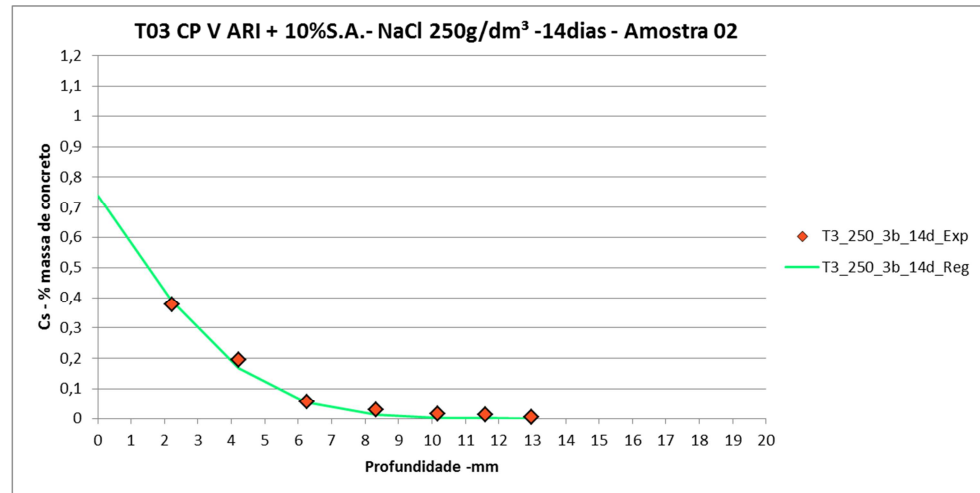


Figura 4.15 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm³-14 dias.

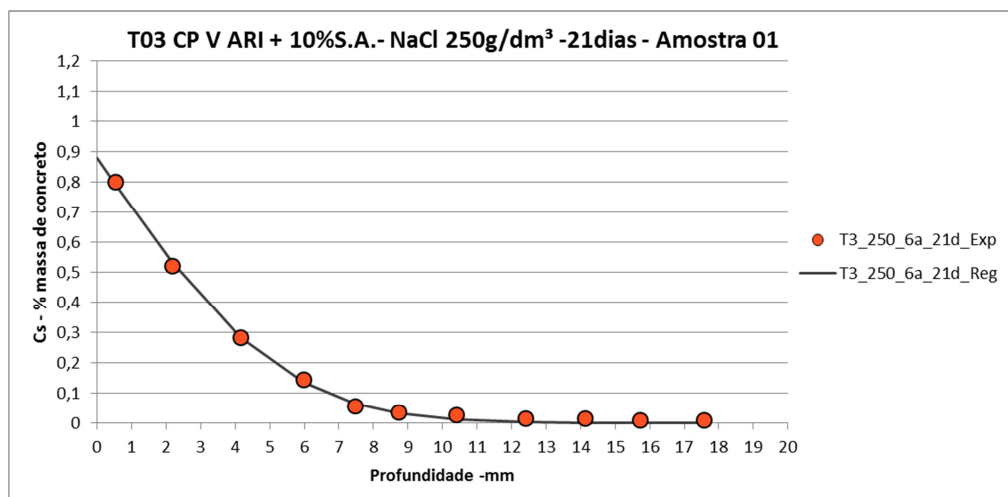


Figura 4.16 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm³-21 dias.

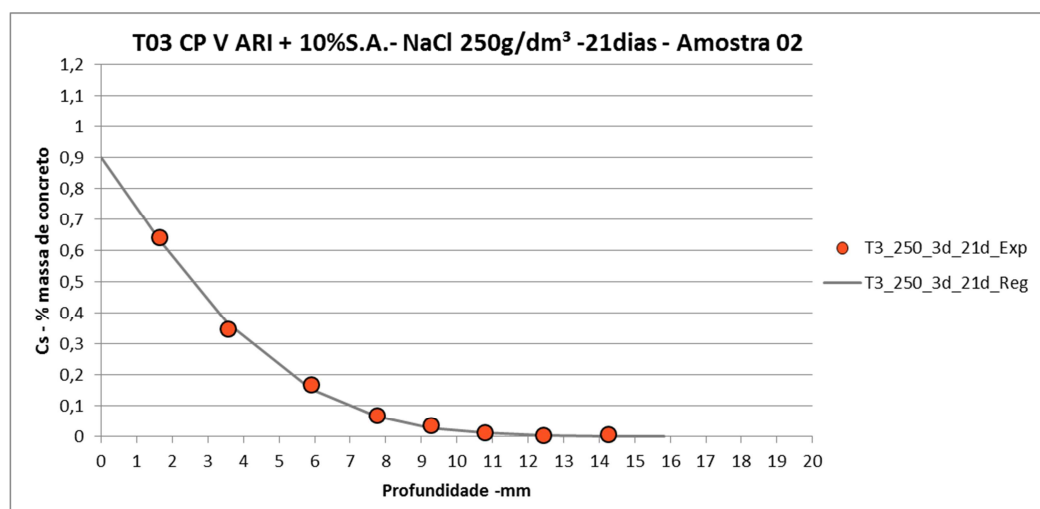


Figura 4.17 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm³-21 dias.

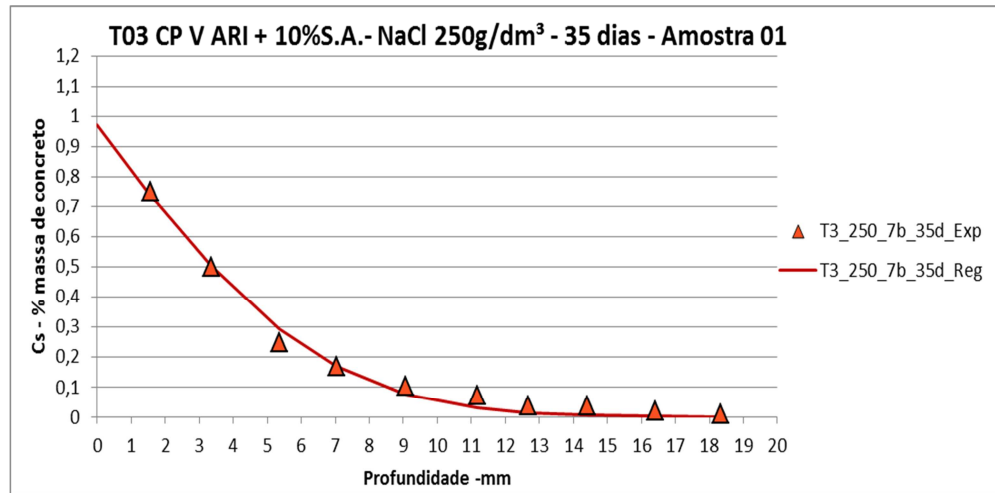


Figura 4.18 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm³-35 dias.

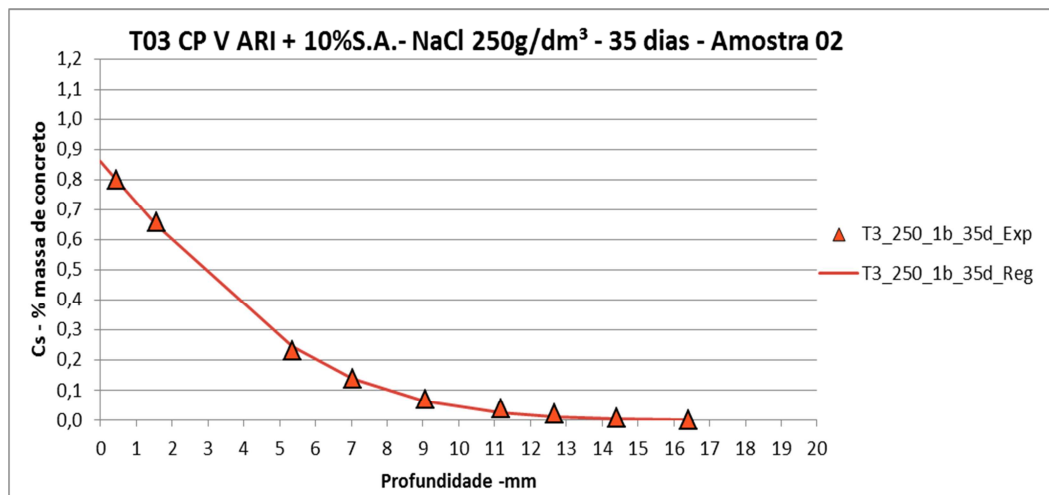


Figura 4.19 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 250g/dm³-35 dias.

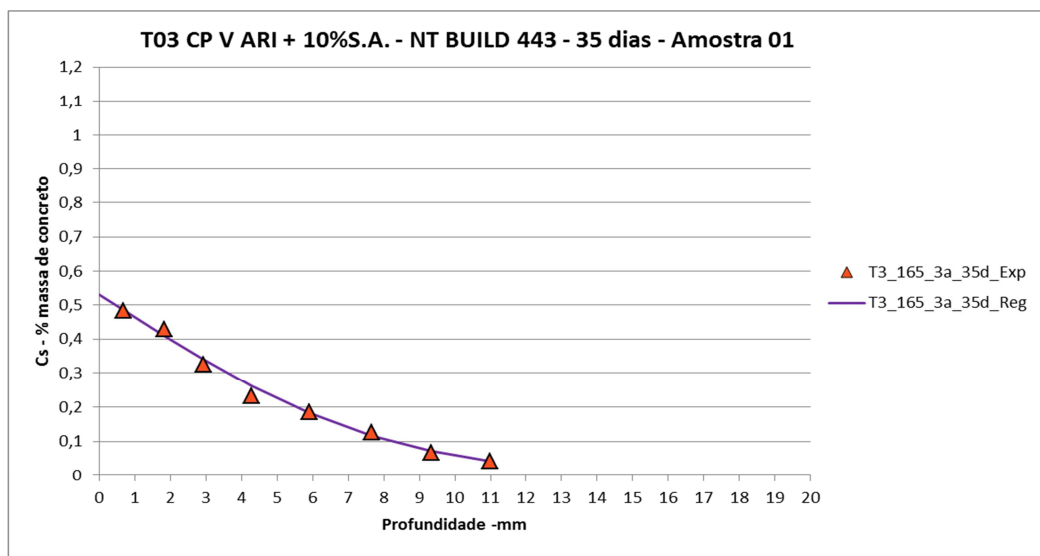


Figura 4.20 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 165g/dm³-35 dias.

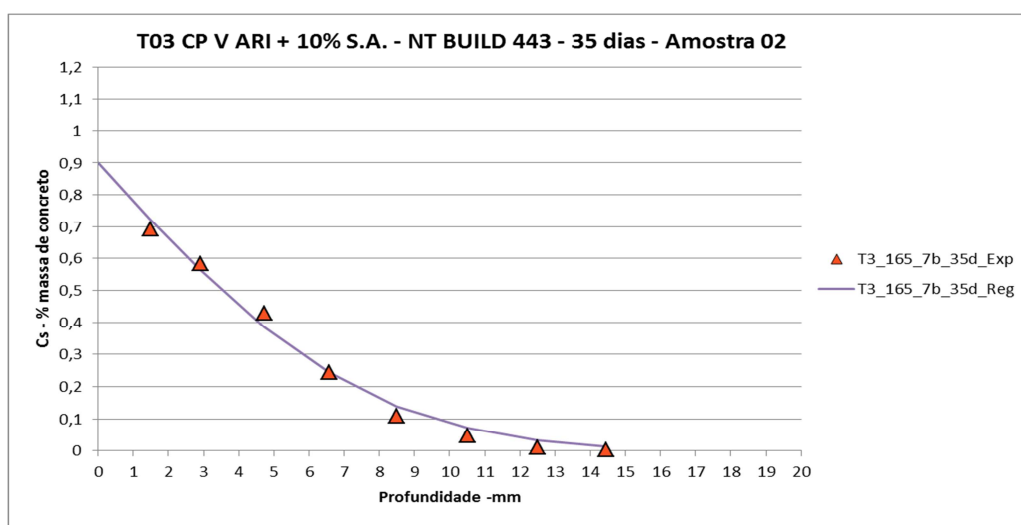


Figura 4.21 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 165g/dm³-35 dias.

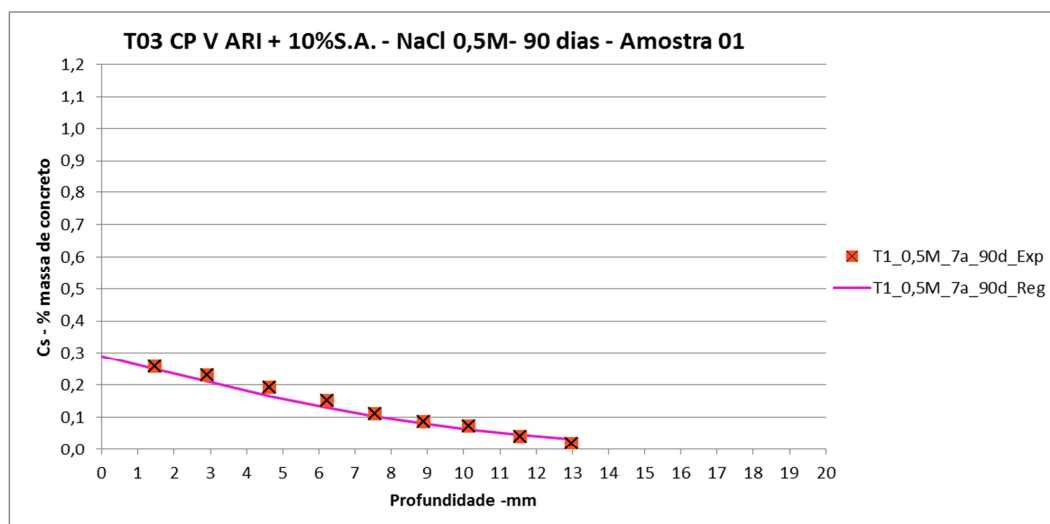


Figura 4.22 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T3–NaCl 0,5M-90 dias.

Os valores obtidos para a concentração superficial de cloretos (C_s) e o coeficiente de difusão íons cloreto (D) para amostras do traço *T03 CP V ARI + 10 S.A.*, tendo como base os perfis ilustrados anteriormente, são apresentados na Tabela 4.2, a qual faz referência, também, aos valores médios desses parâmetros.

Tabela 4.2 – Resultados do C_s e D para o traço $T03 CP VARI +10\%S.A.$

Método de Ensaio	Testemunho	Tempo de contaminação [dias]	C_s [% massa de concreto]	C_s méd [% massa de concreto]	D [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]	D méd [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]
NT BUILD 443 (1995)	T3_165_7b_35d	35	0,90	0,72	5,90	6,19
	T3_165_3a_35d	35	0,53		6,48	
250g/dm ³	T3_250_4d_7d	7	0,54	0,71	5,18	5,95
	T3_250_7d_7d	7	0,88		6,71	
	T3_250_2b_14d	14	0,87	0,81	6,57	5,80
	T3_250_3b_14d	14	0,74		5,02	
	T3_250_3d_21d	21	0,90	0,89	5,10	4,98
	T3_250_6a_21d	21	0,88		4,85	
	T3_250_1b_35d	35	0,86	0,92	4,14	4,28
	T3_250_7b_35d	35	0,97		4,41	
	0,5M	T3_0,5M_7a_90d	90	0,29	4,32	4,32

Com relação aos perfis de penetração de cloretos, os quais abordam o traço de concreto dosado com cimento pozolânico ($T07 CP IV$), as amostras foram submetidas a quatro métodos de ensaios distintos. Desse modo, foram analisadas amostras com idade de contaminação de 7, 14, 21 e 35 dias para os métodos de ensaio *Acelerado Modificado – NaCl 250 g/dm³* e Guimarães Helene (2007). Ainda, utilizou-se a metodologia de contaminação referente ao ensaio normatizado *NT BUILD 443 – NaCl 165g/dm³* e ao ensaio tradicional *NaCl 0,5M*, sonde que, para esses métodos, as idades de contaminação analisadas foram, respectivamente, de 35 e 90 dias. Assim sendo, são apresentados a seguir os perfis de penetração de cloretos no concreto, de forma que nas Figuras 4.23 a 4.30 podem ser observados os perfis obtidos através do ensaio *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³*, já nas Figuras 4.31 a 4.38 são apresentados os perfis advindos do método Guimarães Helene (2007). As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam os perfis para o método normatizado *NT BUILD 443 – NaCl 165 g/dm³* e a Figura 4.41 o perfil obtido pelo método tradicional *NaCl 0,5M*.

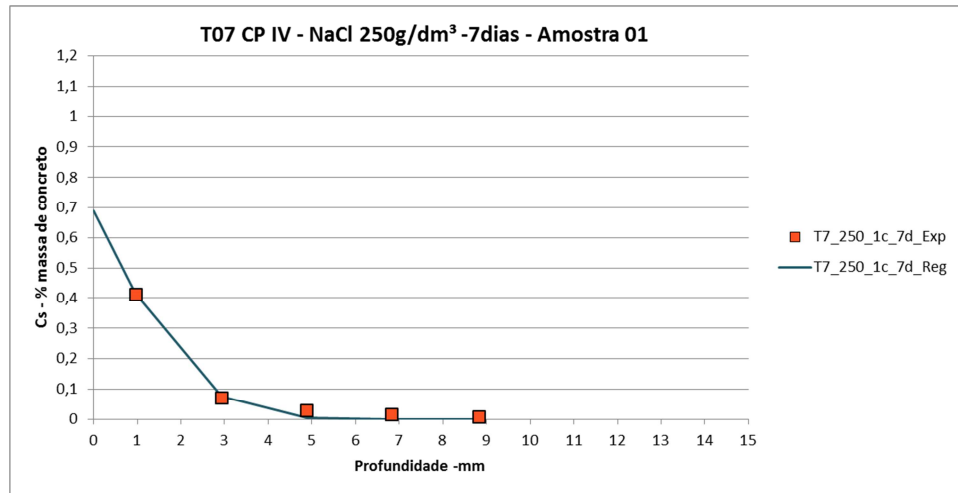


Figura 4.23 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm³ - 7 dias.

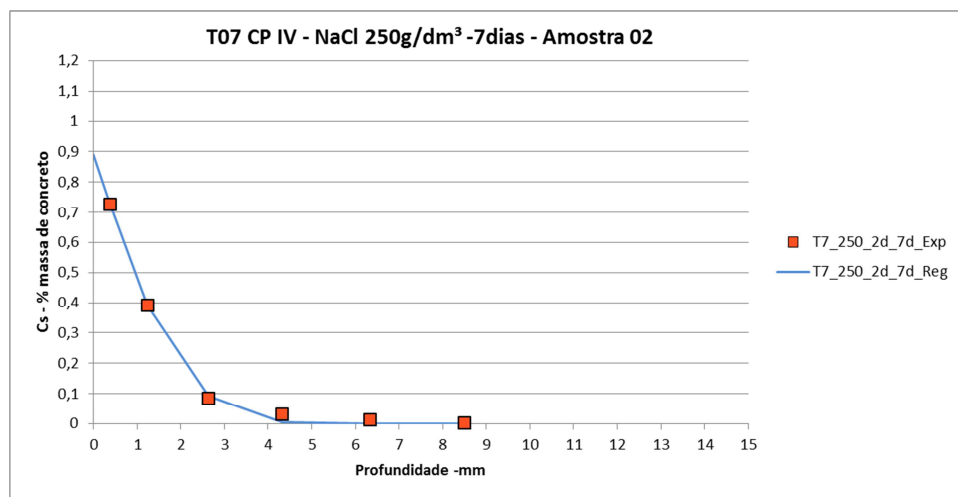


Figura 4.24 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm³ - 7 dias.

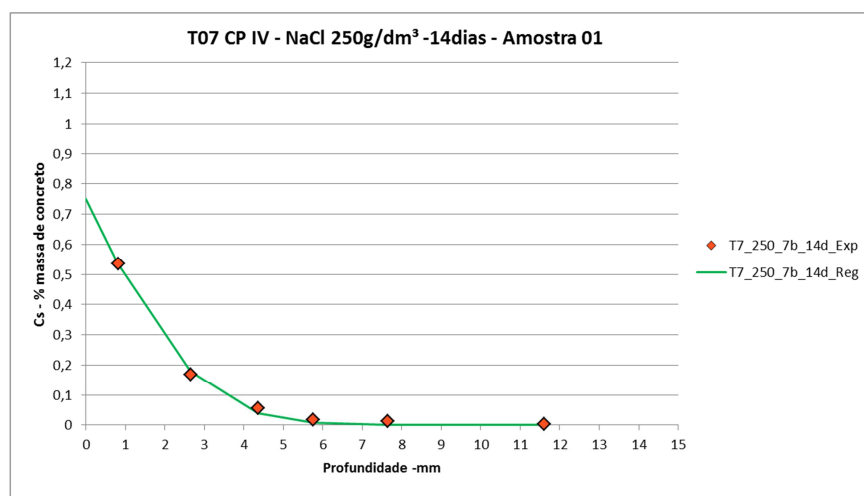


Figura 4.25 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 250g/dm³ - 14 dias.

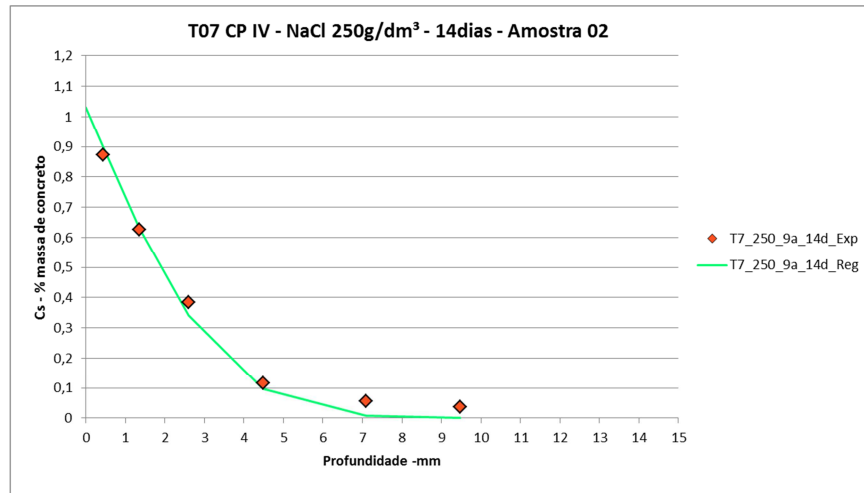


Figura 4.26 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7- NaCl 250g/dm³-14 dias.

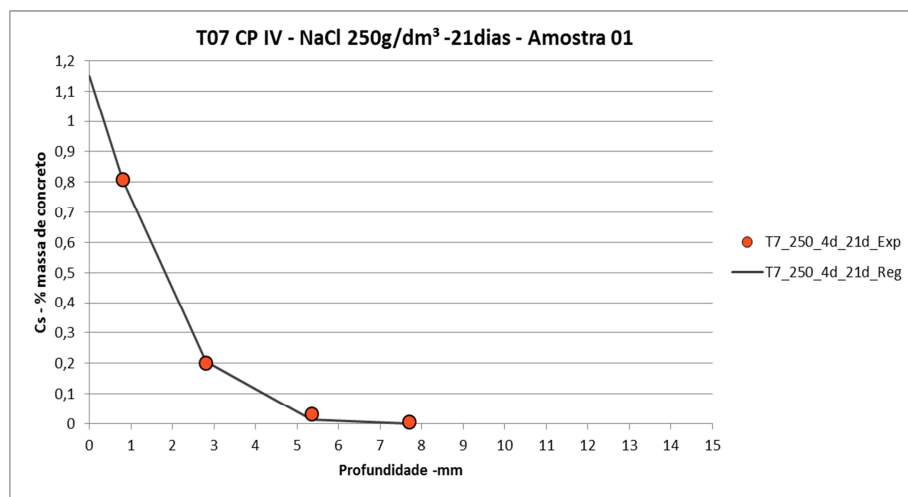


Figura 4.27 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7- NaCl 250g/dm³-21 dias.

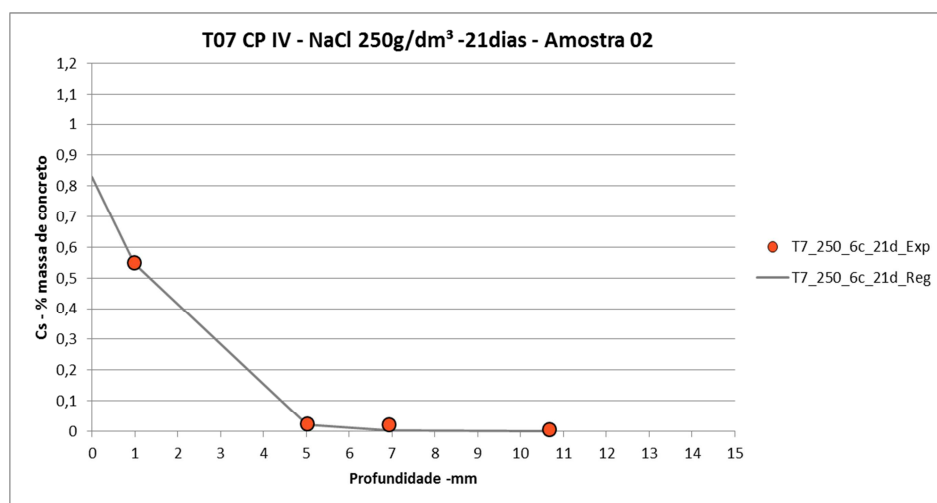


Figura 4.28 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7- NaCl 250g/dm³-21 dias.

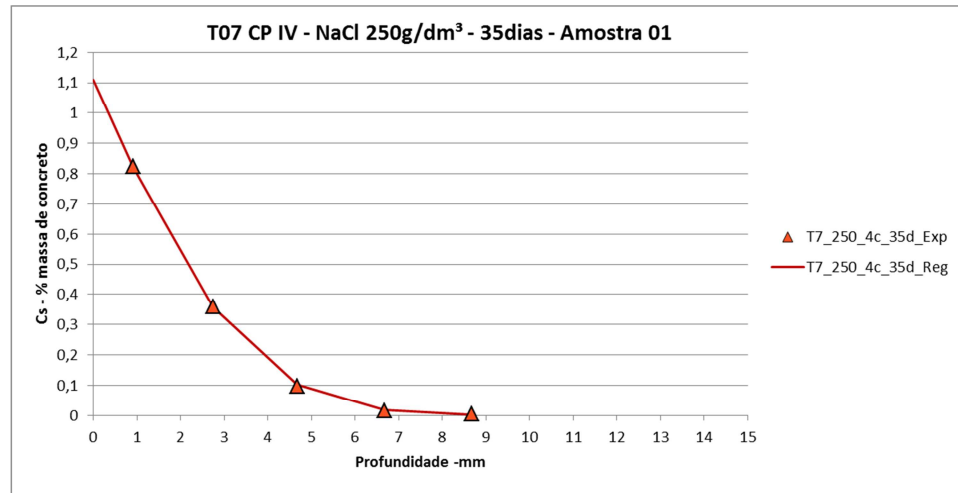


Figura 4.29 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7-*NaCl* 250g/dm³-35 dias.

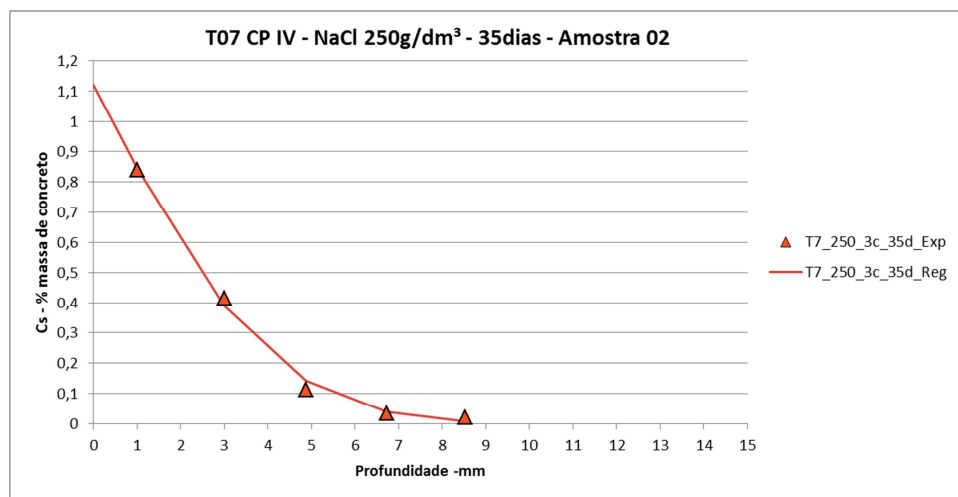


Figura 4.30 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7-*NaCl* 250g/dm³-35 dias.

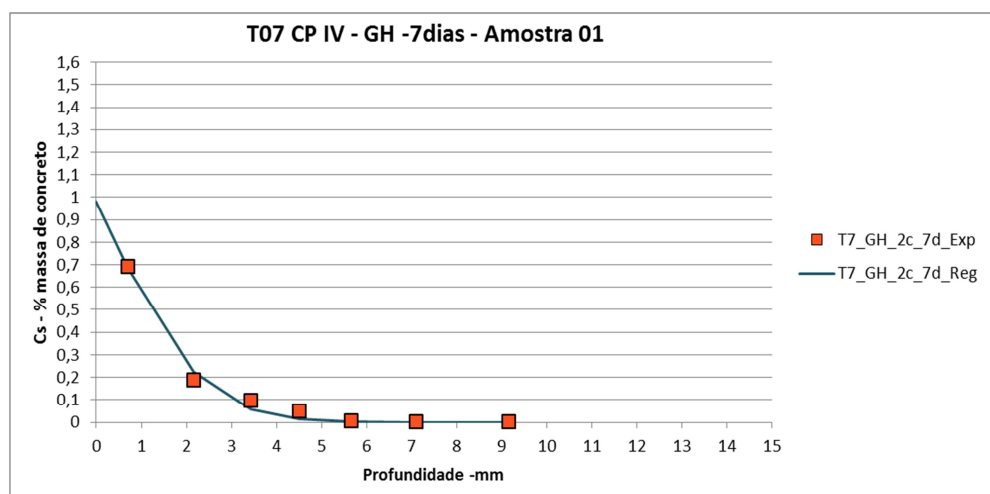


Figura 4.31 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 - GH- 7 dias.

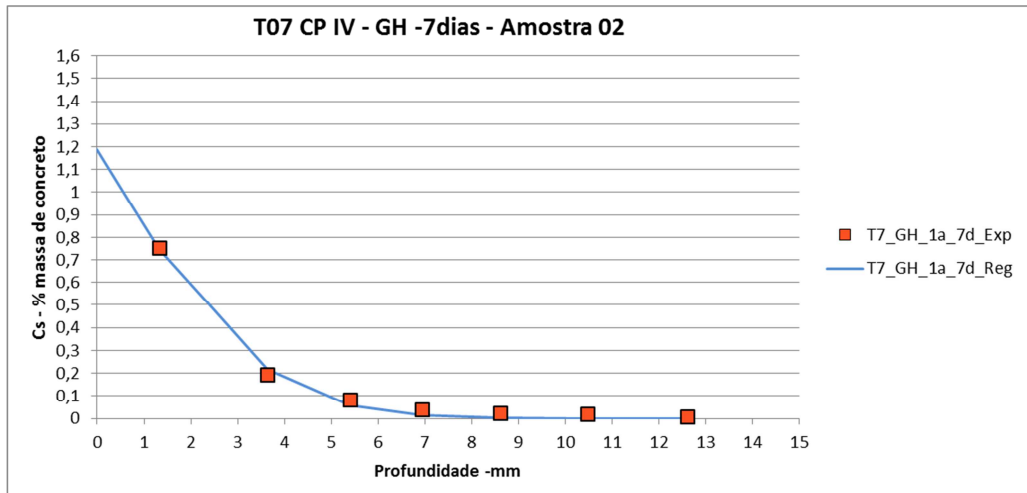


Figura 4.32 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 7 dias.

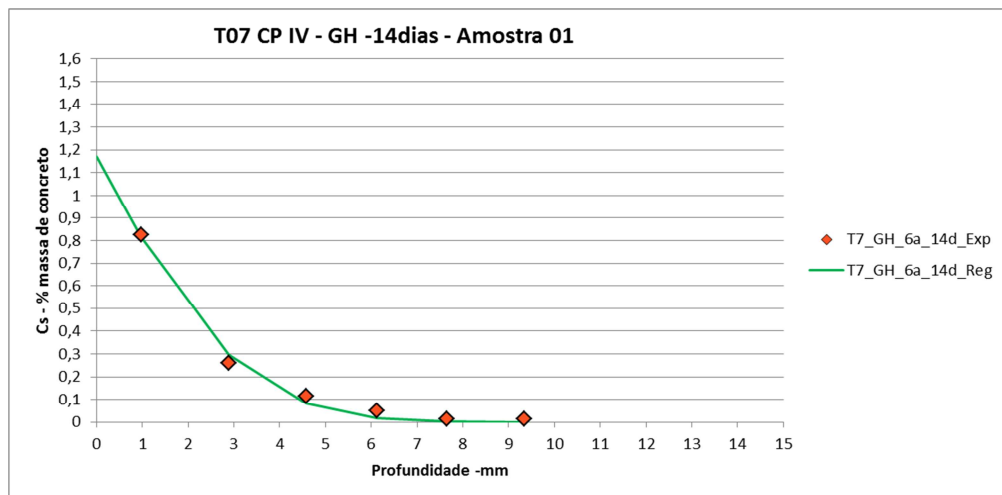


Figura 4.33 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 14 dias.

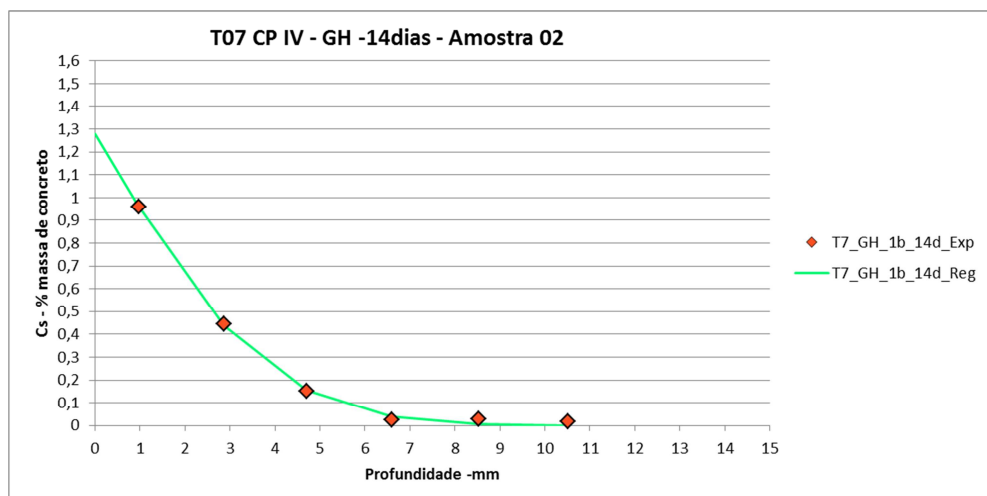


Figura 4.34 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 14 dias.

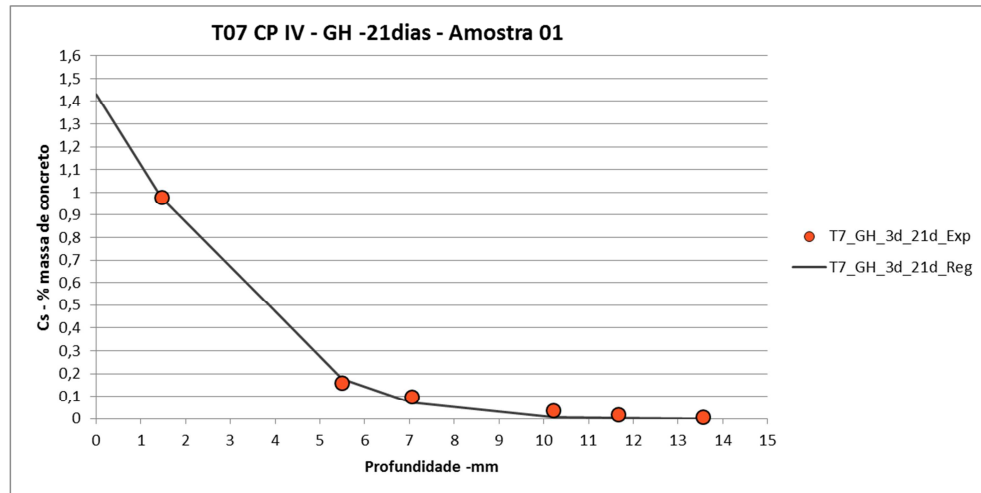


Figura 4.35 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 21 dias.

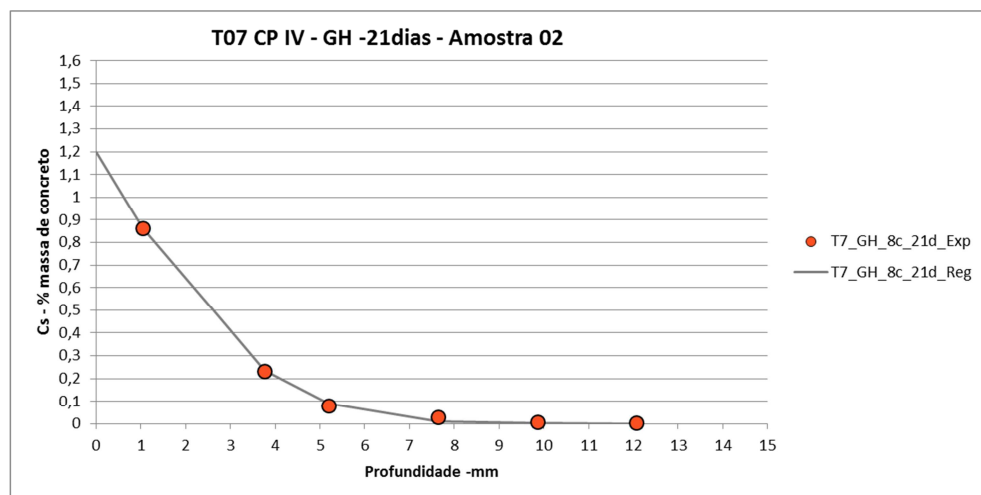


Figura 4.36 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 21 dias.

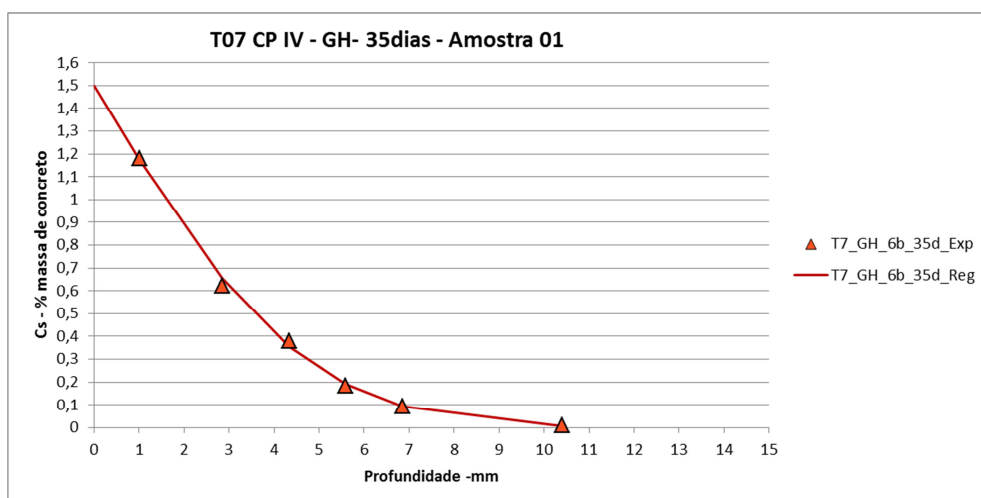


Figura 4.37 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 35 dias.

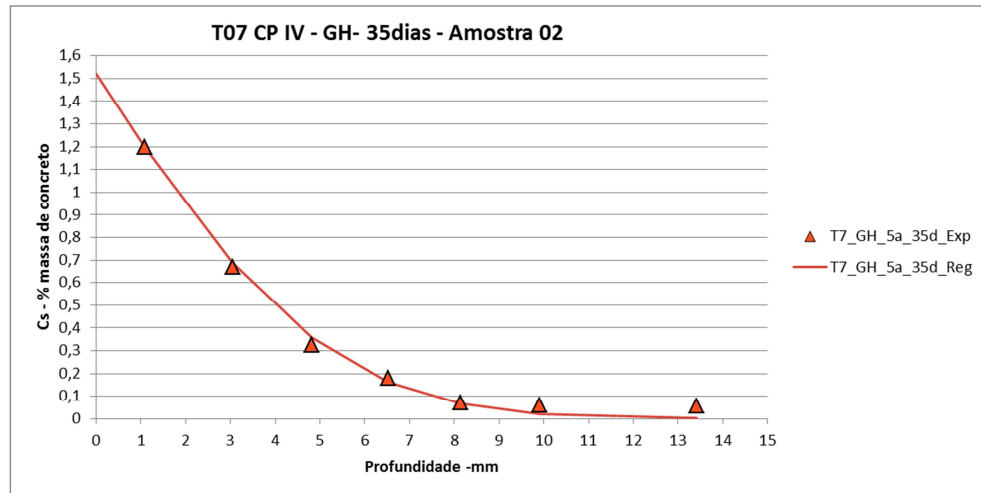


Figura 4.38 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – GH- 35 dias.

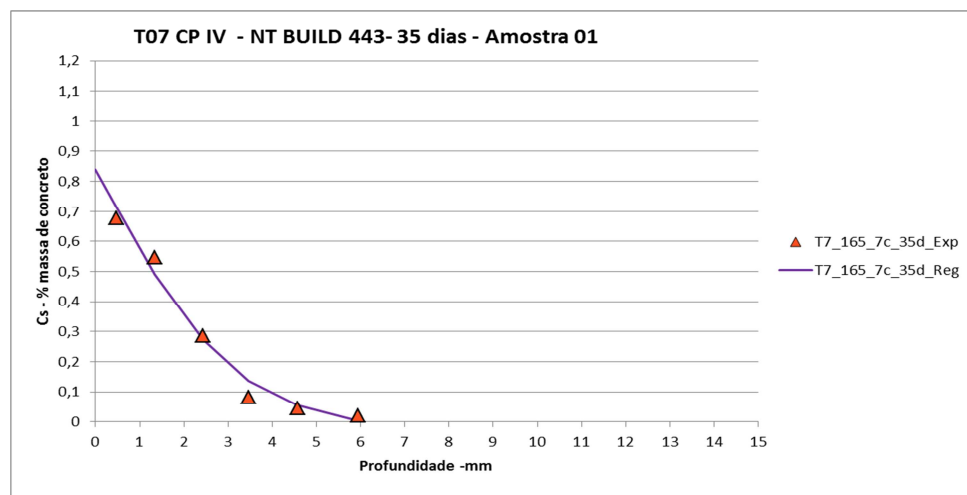


Figura 4.39 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 165g/dm³-35 dias.

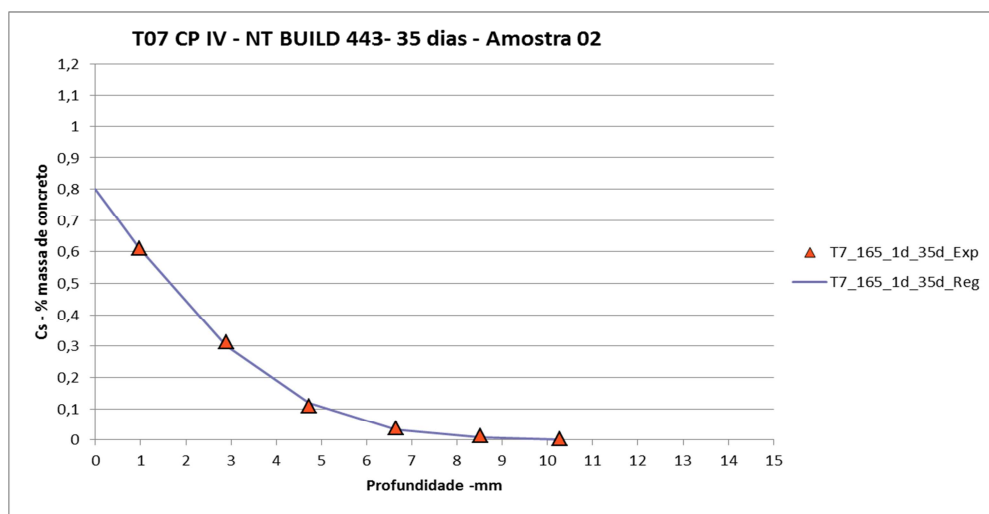


Figura 4.40 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7–NaCl 165g/dm³-35 dias.

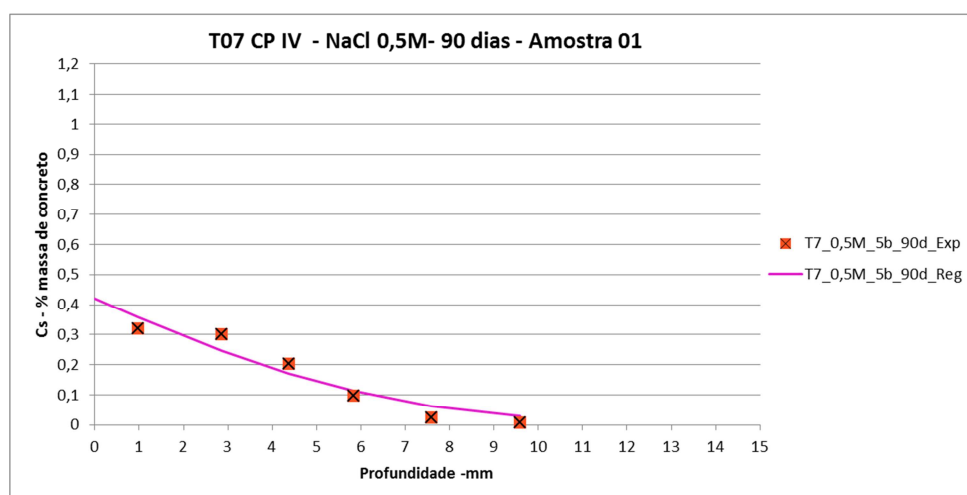


Figura 4.41 – Regressão dos perfis de penetração de cloretos/T7 – NaCl 0,5M - 90 dias.

Os resultados obtidos para o coeficiente de difusão íons cloreto (D) e a concentração superficial de cloretos (C_s), advindos dos perfis de penetração de cloretos para o T07 CP IV, são apresentados na Tabela 4.3, a qual traz, também, os valores médios do C_s e D para cada método de ensaio e idade de contaminação.

No entanto, como pode ser observado na Tabela 4.3 para o método de Guimarães Helene (2007), a amostra T7_GH_1a_7d, apresentou um valor para o D destoante, quando comparado aos demais valores obtidos para os coeficientes de difusão para esse traço de concreto. Tal adversidade no resultando obtido, provavelmente, advém de uma falha na execução no ensaio em questão, desta forma, para as análises futuras a serem realizadas neste trabalho, optou-se pelo descarte dos dados do C_s e D para a amostra em questão, sendo então, o método de Guimarães Helene (2007) para a idade de 7 dias analisado somente por uma amostra, chamada de T7_GH_2c_7d.

Tabela 4.3 – Resultados do Cs e D para o traço T07 CP IV

Método de Ensaio	Testemunho	Tempo de contaminação [dias]	Cs [% massa de concreto]	Cs méd [% massa de concreto]	D [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]	D méd [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]
NT BUILD 443 (1995)	T7_165_1d_35d	35	0,80	0,82	1,78	1,40
	T7_165_7c_35d	35	0,84		1,01	
NaCl 250g/dm ³	T7_250_1c_7d	7	0,69	0,79	2,75	2,45
	T7_250_2d_7d	7	0,89		2,15	
	T7_250_9a_14d	14	1,03	0,89	2,75	2,35
	T7_250_7b_14d	14	0,75		1,95	
	T7_250_4d_21d	21	1,15	0,99	1,20	1,29
	T7_250_6c_21d	21	0,83		1,37	
	T7_250_3c_35d	35	1,12	1,12	1,68	1,48
	T7_250_4c_35d	35	1,11		1,27	
NaCl 0,5M	T7_0,5M_5b_90d	90	0,42	0,42	1,75	1,75
GH (2007)	T7_GH_1a_7d	7	1,19	0,98	6,16	2,70
	T7_GH_2c_7d	7	0,98		2,70	
	T7_GH_1b_14d	14	1,28	1,23	3,77	3,20
	T7_GH_6a_14d	14	1,17		2,63	
	T7_GH_3d_21d	21	1,43	1,32	3,53	2,94
	T7_GH_8c_21d	21	1,20		2,34	
	T7_GH_5a_35d	35	1,52	1,51	2,71	2,46
	T7_GH_6b_35d	35	1,50		2,21	

Tendo em mãos tais resultados, a próxima etapa dessa pesquisa visa realizar a comparação dos coeficientes de difusão encontrados a partir dos ensaios propostos com os valores obtidos para esse parâmetro através da aplicação dos ensaios *NT BUILD 443 (1995)* – *NaCl 165g/dm³* e *NaCl 0,5M*.. Cabe salientar que tais constatações serão evidenciadas no próximo subtítulo.

4.2 Análise Comparativa dos Coeficientes de Difusão de Íons Cloreto

No intuito de atingir um dos objetivos desta pesquisa, o qual visa analisar se os valores dos coeficientes de difusão de íons cloreto obtidos a partir de ensaios que envolvam uma maior concentração de cloretos e um período de contaminação inferior ao previsto no ensaio normatizado, se aproximam dos valores advindos da aplicação do método prescrito pela *NT BUILD 443 (1995)*, realizou-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos.

Assim sendo, primeiramente plotou-se gráficos que apresentam a relação entre os valores máximos, médios e mínimos do D para os métodos de ensaios propostos nas diferentes idades de contaminação, relacionando tais resultados com os obtidos pelo método normalizado e com o método tradicional, conforme poderá ser visualizado a seguir. Após, a partir da aplicação do teste estatístico foi realizada a constatação de uma diferença significativa ou não dos valores médios do D para os ensaios propostos quando comparados com o normalizado.

Então, dentro desse contexto, é apresentada a Figura 4.42, na qual são observados os valores de D obtidos para o traço *T01 CP V ARI* e a partir da análise dessa figura é possível observar que os valores encontrados para o coeficiente de difusão (D) com a aplicação do método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³* para o traço *T01 CP V ARI* apresentou valores muito próximos nas idades de contaminação de 7, 21 e 35 dias quando comparado com o ensaio normalizado *NT BUILD 443 (1995) – NaCl 165g/dm³* na idade de contaminação de 35 dias, havendo uma sobreposição significativa ao considerar-se as barras da variações dos valores obtidos.

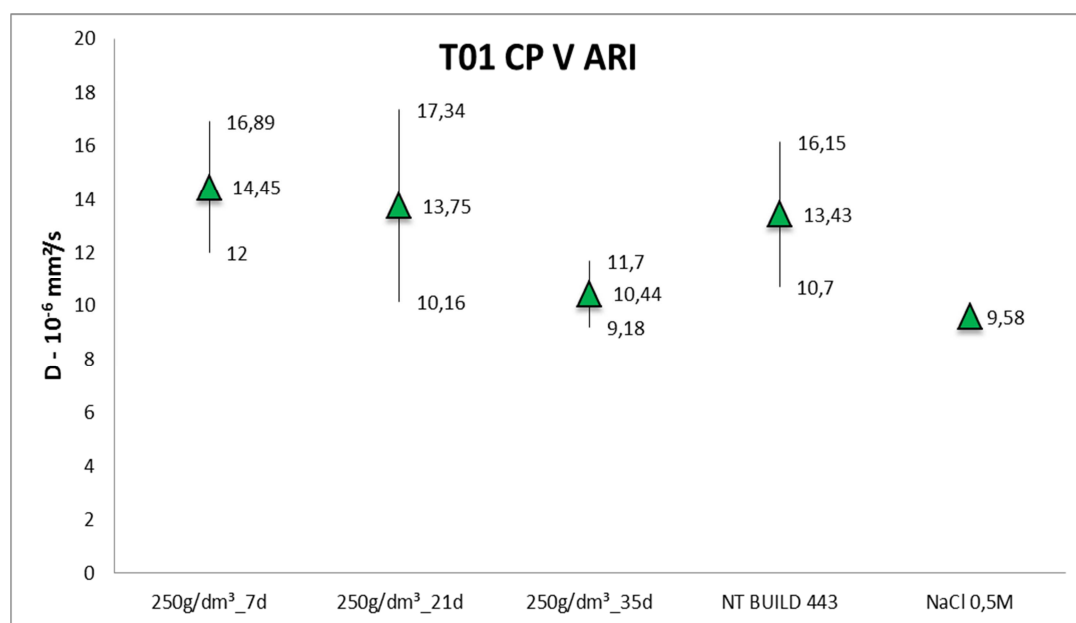


Figura 4.42 – Valores máximos, mínimos e médios do coeficiente de difusão íons cloreto para o T01 CP V ARI.

É válido expor que as constatações feitas, no que diz respeito à equidade nos valores dos coeficientes de difusão, evidenciadas anteriormente, foram reforçadas a partir da aplicação de um teste estatístico não paramétrico, comparando os resultados do coeficiente de difusão de íons cloreto encontrados pelo método *Acelerado Modificado NaCl 250g/dm³* em cada idade de

contaminação com os resultados obtidos através da aplicação do ensaio normatizado *NT BUILD 443 (1995) - NaCl 165g/dm³*. Assim sendo, utilizou-se a metodologia proposta em 3.8 e foi possível então constatar que a hipótese inicial, a qual representa a igualdade das medianas entre os testes comparados, não pode ser rejeitada, visto que os valores encontrados através do software para a “Significância Sig. (bilateral)” apresenta valores superiores ao nível de significância (α). Confirmando que os coeficientes de difusão de íons cloreto, para o *T01 CP VARI*, obtidos pelos distintos ensaios e idades de contaminação não diferem entre si significativamente. No Apêndice 02 desta pesquisa, são encontrados os resultados obtidos através do software *SPSS Statistic* para o *T01 CP VARI*.

Além disso, torna-se interessante salientar que valor resultante para o coeficiente de difusão, no traço de concreto em questão, a partir da aplicação do método tradicional *NaCl 0,5M*, equivale a $9,58 \times 10^{-6}$ mm²/s, valor esse que se aproxima dos valores de *D* mínimos encontrados para os demais métodos aplicados e, ainda, conforme pode ser analisado no Apêndice 02 desta pesquisa, quando aplicada a metodologia estatística de comparação entre o seu valor de *D* e o obtido pelos demais ensaios, obtém-se o resultado de que não se pode rejeitar a hipótese nula, ou seja, é válida a hipótese que considera que as medianas analisadas não diferem significativamente entre si.

No que diz respeito aos resultados obtidos para os coeficientes de difusão de íons cloreto para o traço *T03 CP VARI +10%S.A.*, é apresentada a Figura 4.43, onde através de sua análise visual pode-se constatar que os valores encontrados a partir da aplicação do método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* nas idades de contaminação de 7, 14, 21 e 35 dias se aproximam muito do resultado obtido para o método normatizado *NT BUILD 443 (1995) - NaCl 165g/dm³*.

Ainda dentro desse contexto, é válido salientar que o exposto anteriormente para os resultados advindos para o *T03 CP VARI +10%S.A* foi comprovado pela aplicação do teste estatístico não paramétrico Mann Whitney, de forma que os resultados obtidos constataram que as medianas dos resultados obtidos pelo método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* não diferem significativamente da mediana obtida pelo ensaio normatizado *NT BUILD 443 (1995) - NaCl 165g/dm³*. Desta forma, são apresentados no Apêndice 03 desta pesquisa os resultados obtidos pelo software *SPSS Statistic* para o traço em questão.

No que se refere ao resultado para o *D* encontrado a partir do método *NaCl 0,5M*, pode-se constatar que o tal valor equivale a $4,32 \times 10^{-6}$ mm²/s, se aproximando aos valores mínimos encontrados para o método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* nas idades de contaminação de 14 e 21 dias e, ainda, sendo, praticamente igual ao valor médio encontrado para o método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* na idade de contaminação de 35 dias.

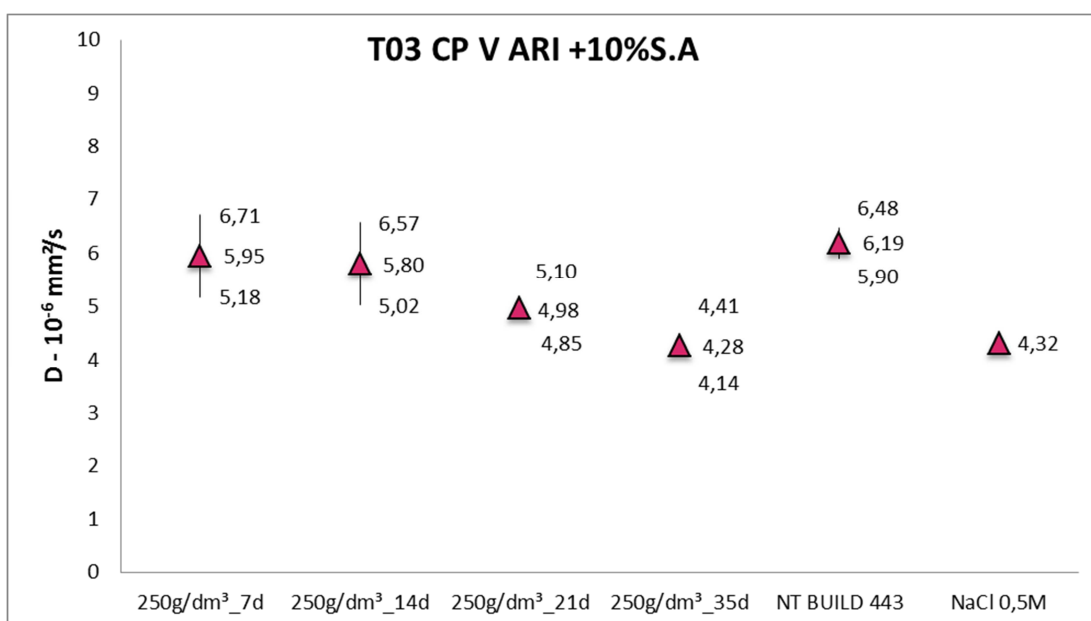


Figura 4.43 – Valores máximos, mínimos e médios do coeficiente de difusão íons cloreto para o T03 CP V ARI +10%S.A.

Visando expor os resultados obtidos para o traço *T07 CP IV* são apresentadas a seguir as Figuras 4.44 e 4.45.

Assim, na Figura 4.44 são apresentados os resultados obtidos para os coeficientes de difusão íons cloretos (D) advindos da aplicação do método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³* e os resultantes do método normatizado *NT BUILD 443 (1995) – NaCl 165g/dm³* e *NaCl 0,5M*. Assim sendo, a partir de sua análise, pode-se observar uma determinada constância entre os resultados obtidos para o método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³* nas idades de contaminação de 7, 14, 21 e 35 dias quando comparado ao resultante pelo ensaio normatizado. Fato esse que é comprovado pela análise estatística exposta no Apêndice 04, onde se constatou que as medianas dos valores analisados para o método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³* não diferem significativamente da mediana encontrada pelo ensaio normatizado *NT BUILD 443 (1995) – NaCl 165g/dm³*.

Já a Figura 4.45 traz consigo a comparação entre os resultados obtidos para o D a partir do método criado por Guimarães Helene (2007) com o ensaio normatizado e o tradicional. Embora, a partir de uma análise visual, os valores obtidos para o D pelo ensaio de Guimarães Helene (2007) aparentem ser significativamente maiores dos resultantes pelo ensaio normatizado, a análise estatística provou que não há variação significativa entre esses valores, visto que, de acordo com os resultados obtidos no teste de Mann Whitney, a hipótese nula não poderia ser rejeitada. Além disso, evidencia-se que os valores obtidos para

as idades de contaminação de 7 e 14 dias no ensaio Acelerado Moficado – NaCl 250g/dm³, apresentam uma sobreposição das barras de variação quando comparados pelos obtidos pelo método Guimarães Helene (2007) nas idades de 7, 14, 21 e 35 dias de contaminação.

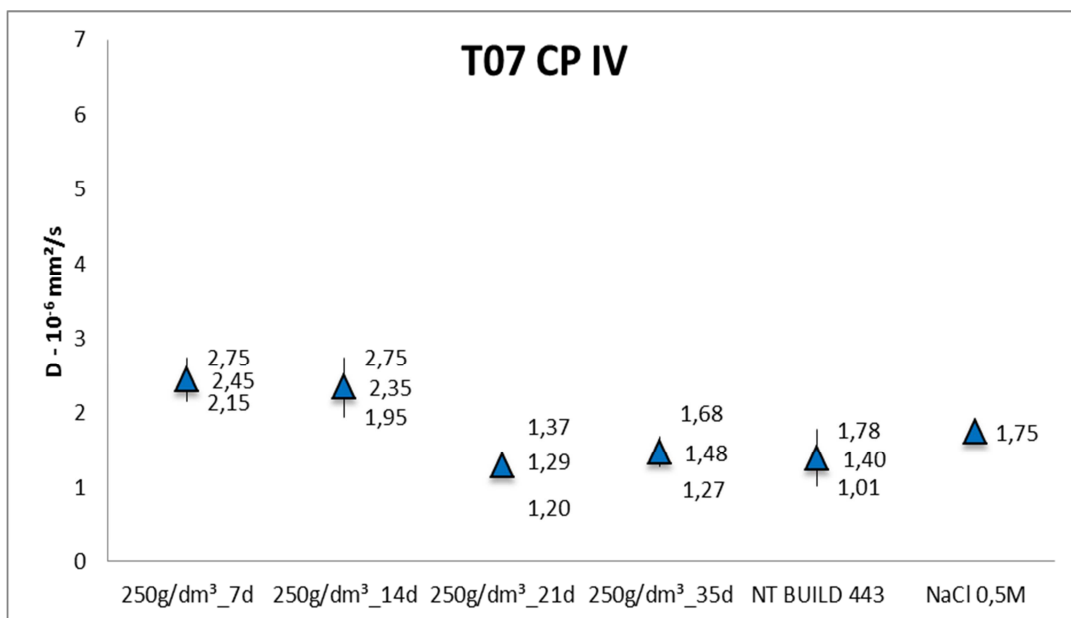


Figura 4.44 – Valores máximos, mínimos e médios do coeficiente de difusão íons cloreto para o T07 CP IV método NaCl – 250g/dm³, NT BUILD 443 e NaCl 0,5M.

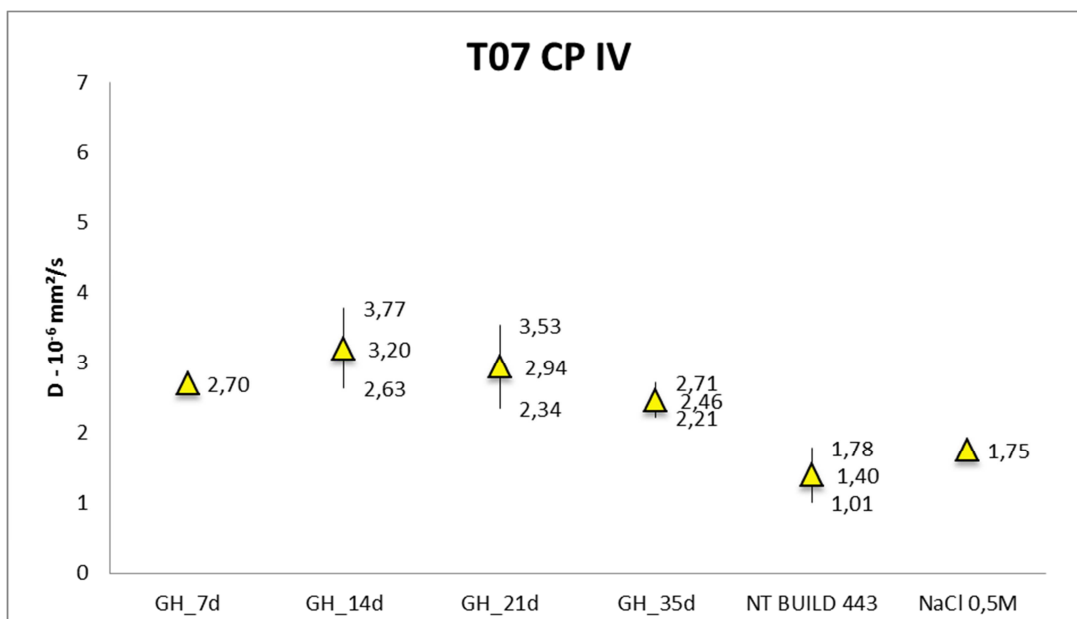


Figura 4.45 – Valores máximos, mínimos e médios do coeficiente de difusão íons cloreto para o T07 CP IV método GH (2007), NT BUILD 443 e NaCl 0,5M.

Ainda, é interessante comentar que o valor de D , encontrado através da aplicação do ensaio tradicional, que utiliza em sua solução contaminante uma quantidade de cloretos semelhantes a da água do mar $NaCl\ 0,5M$, para o *T07 CP IV* foi equivalente a $1,75 \times 10^{-6}\text{ mm}^2/\text{s}$, valor esse que se aproxima muito dos resultados obtidos para os métodos propostos e citados anteriormente.

Desta forma, tendo em vista o apresentado até aqui, é possível constatar que os resultados obtidos para o coeficiente de difusão de íons cloretos resultante de ensaios propostos que utilizam um menor tempo de contaminação foram satisfatórios quando comparados com os resultados obtidos com o ensaio normatizado *NT BUILD 443 (1995)*, haja vista que a partir do teste estatístico comprovou-se que os resultados obtidos em 7 dias de contaminação nos ensaios *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³* e Guimarães Helene (2007), apresentaram resultados muito parecidos aos encontrados com a aplicação do método normatizado *NT BUILD 443 (1995)* e tradicional $NaCl\ 0,5M$. Além disso, destaca-se que essas constatações condizem com o já observado por Guimarães *et al* (2011), no qual o autor conclui que os valores do coeficiente de difusão não foram significativamente diferentes quando foram utilizados ensaios de imersão com diferentes concentrações de cloreto, no caso, uma concentração semelhante a da água do mar e a outra em torno de cinco vezes maior. Ainda, o autor obteve resultados semelhantes de coeficiente de difusão para idades de 7 e 35 dias de contaminação utilizando da solução contaminante prescrita pela *NT BUILD 443 (1995) – NaCl 165g/dm³*.

Assim, para uma melhor visualização do exposto aqui, é apresentada a Figura 4.46 que traz consigo os valores do $D_{\text{médio}}$ obtidos para todos os métodos de ensaio e idades de contaminação em relação aos três traços de concreto analisados, onde a partir da qual é possível verificar a proximidade dos valores encontrados por meio da aplicação dos distintos métodos de ensaio.

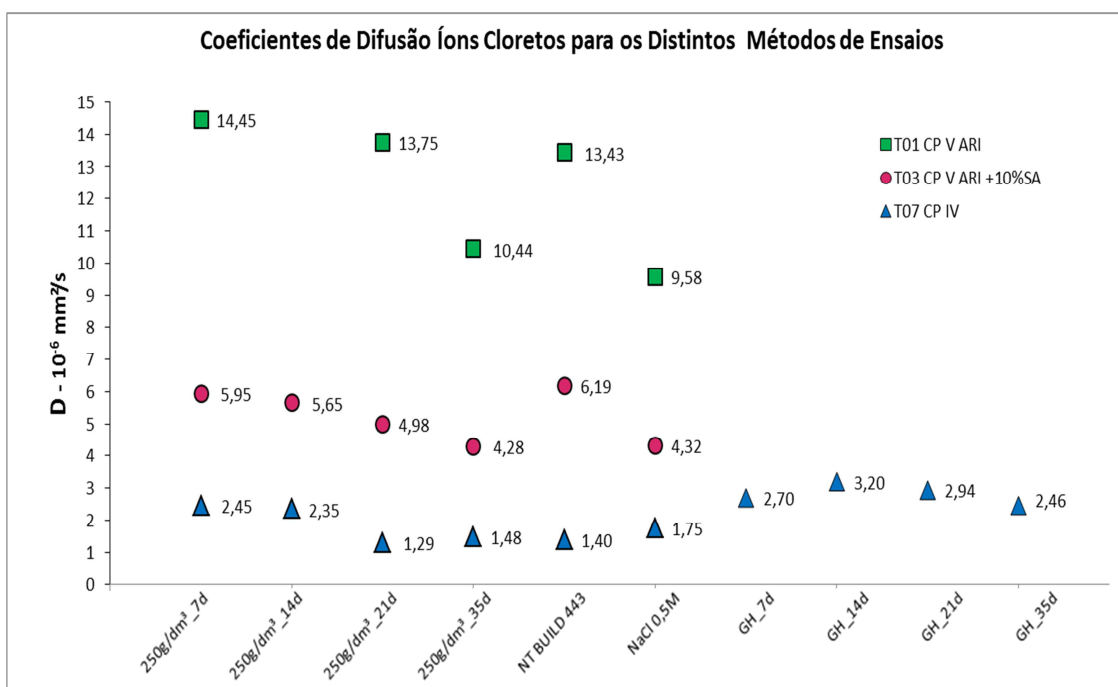


Figura 4.46 – Valores médios do coeficiente de difusão íons cloreto para os três traços estudados nas distintas idades de contaminação e métodos de ensaio.

Por fim, levando em consideração o trabalho realizado por Bender (2016), o qual analisou o comportamento do D a partir da aplicação de um ensaio em solução contaminante saturada com $NaCl$, será apresentado na próxima subseção uma comparação entre os resultados encontrados pelo autor com os obtidos nessa pesquisa.

4.2.1 Comparação dos resultados dos coeficientes de difusão íons cloreto com os obtidos pela pesquisa de Bender (2016)

Conforme mencionado anteriormente, em seu estudo, Bender (2016) analisou o comportamento do coeficiente de difusão íons cloreto a partir da aplicação de um ensaio de imersão, semelhante ao proposto pela *NT BUILD 443 (1995)*, porém, utilizando uma solução contaminante com 400g de $NaCl$ para 1dm³ de água destilada. O autor analisou o comportamento de dois traços de concreto, os quais coincidem com os traços *T03 CP V ARI + 10% S.A* e *T07 CP IV* utilizados nessa pesquisa. Desta forma, os resultados obtidos por Bender (2016) para o concreto *T03 CP V ARI + 10% S.A.*, o qual foi analisado a partir da aplicação do seu ensaio que envolve uma solução contaminante saturada de $NaCl$ nas idades de contaminação de 7 e 14 dias, são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados do C_s e D obtidos pro Bender (2016) a partir da contaminação em solução saturada de $NaCl$ para o traço $T03 CP VARI+10\%S.A.$

Método de Ensaio	Tempo de contaminação [dias]	C_s [% massa de concreto]	C_s méd [% massa de concreto]	D [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]	D méd [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]
400g/dm ³	7	0,68	0,78	7,90	8,45
	7	0,87		8,99	
	14	1,1	1,14	5,12	5,95
	14	1,18		6,77	

Além disso, tendo em vista apresentar os resultados obtidos pelo autor para o traço $T07 CP IV$, é apresentada a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados do C_s e D obtidos pro Bender (2016) a partir da contaminação em solução saturada de $NaCl$ para o traço $T07 CP IV$

Método de Ensaio	Tempo de contaminação [dias]	C_s [% massa de concreto]	C_s méd [% massa de concreto]	D [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]	D méd [$\cdot 10^{-6}$ mm ² /s]
400g/dm ³	7	0,97	0,97	1,53	1,53
	14	0,94	1,18	2,16	2,30
	14	1,42		2,43	
	35	1,29	1,29	1,86	1,86

Desta forma, tendo o intuito de apresentar os resultados por Bender (2016) obtidos para os traços $T03 CP VARI + 10\% S.A$ e $T07 CP IV$ e relacionar com os obtidos nessa pesquisa são apresentadas as Fig. 4.47 e 4.48.

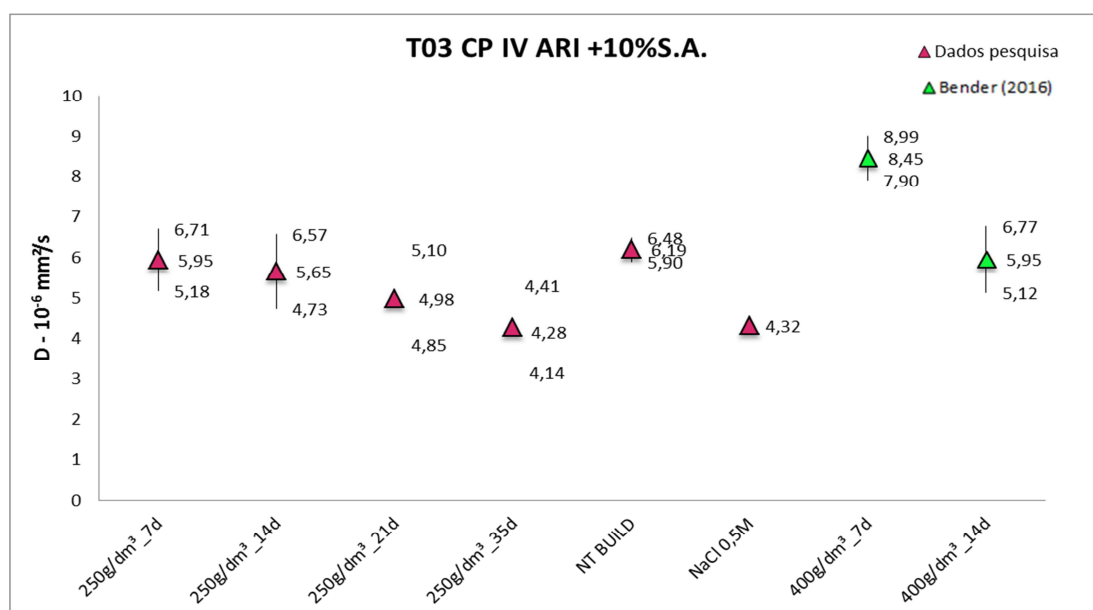


Figura 4.47 – Comparação do D com Bender (2016) $T03 CP VARI + 10\%S.A.$

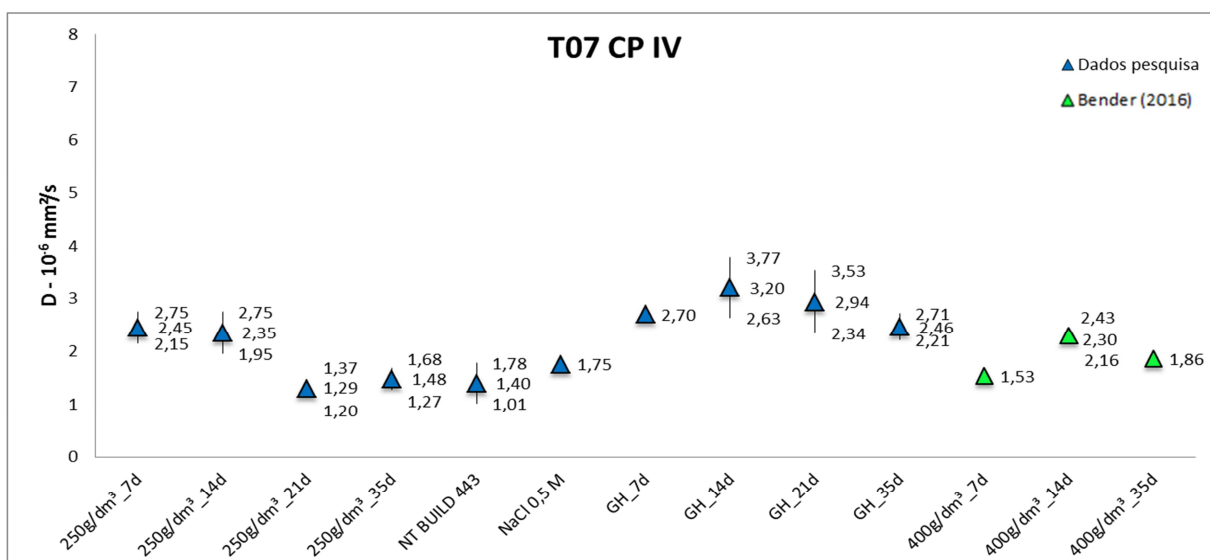


Figura 4.48 – Comparação do D com Bender (2016) T07 CP IV.

Assim sendo, a partir da análise da Figura 4.47, é possível notar que os valores de D obtidos nessa pesquisa para o traço de concreto dosado com cimento de alta resistência inicial com adição de 10% de microssílica se aproximam do encontrado pelo método proposto por Bender (2016) na idade de contaminação de 14 dias, havendo uma sobreposição significativa das barras de variação de tais valores com os demais encontrados nesta pesquisa para o método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* nas idades de 7 e 14 dias, sendo o valor para a idade de 7 dias de contaminação no método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* idêntico ao obtido por Bender (2016) para a idade de 14 dias de contaminação.

Já no que se refere aos valores do D obtidos por Bender (2016) para traço de concreto dosado com cimento do tipo pozolânico, pode-se observar na Figura 4.48 que os resultados para as idades de contaminação de 7, 14 e 35 dias, também, se aproximam dos analisados nessa pesquisa. Sendo que o valor obtido pelo autor na idade de contaminação de 7 e 35 dias se aproximam muito com os obtidos pelo ensaio normatizado *NT BUILD 443 (1995)*, tradicional *NaCl 0,5M* e com o método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* nas idades de 21 e 35 dias. Já o resultado obtido por Bender (2016) na idade de contaminação de 14 dias possui sobreposição significativa com os obtidos pelo o método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* nas idades de 7 e 14 dias de contaminação.

Assim, finalizada a análise referente aos coeficientes de difusão de íons cloreto, o próximo capítulo abordará o comportamento da concentração superficial de cloretos em relação ao tempo para os ensaios realizados através do método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* e Guimarães Helene (2007).

4.3 Análise do Comportamento da Concentração Superficial de Cloretos ao longo do tempo

Conforme mencionado anteriormente, tal seção possui o intuito de verificar qual é o comportamento da concentração superficial de cloretos (C_s) ao longo do tempo nos diferentes traços de concreto estudados, haja vista que os ensaios adotados nessa pesquisa e chamados de *Acelerado Modificado* – $\text{NaCl } 250\text{g/dm}^3$ e Guimarães Helene (2007) foram aplicados para idades que variam de 7 a 35 dias de contaminação, o que possibilita, assim, a realização de tal verificação.

Assim, será realizada inicialmente uma análise para o traço *T01 CP V ARI*, sendo apresentados na Figura 4.49 seus perfis médios teóricos de penetração de cloretos para o método *Acelerado Modificado* - $\text{NaCl } 250\text{g/dm}^3$, nas idades de contaminação de 7, 21 e 35. No entanto, é válido salientar que tais perfis foram obtidos realizando-se a média dos perfis teóricos advindos da aplicação da resolução da segunda lei de Fick apresentada por Crank (1975).

Então, a partir da análise da Figura 4.49, apresentada a seguir, pode-se notar que os valores médios da concentração superficial de cloretos (C_s), os quais se remetem a profundidade 0mm, partem de um ponto inicial muito próximo.

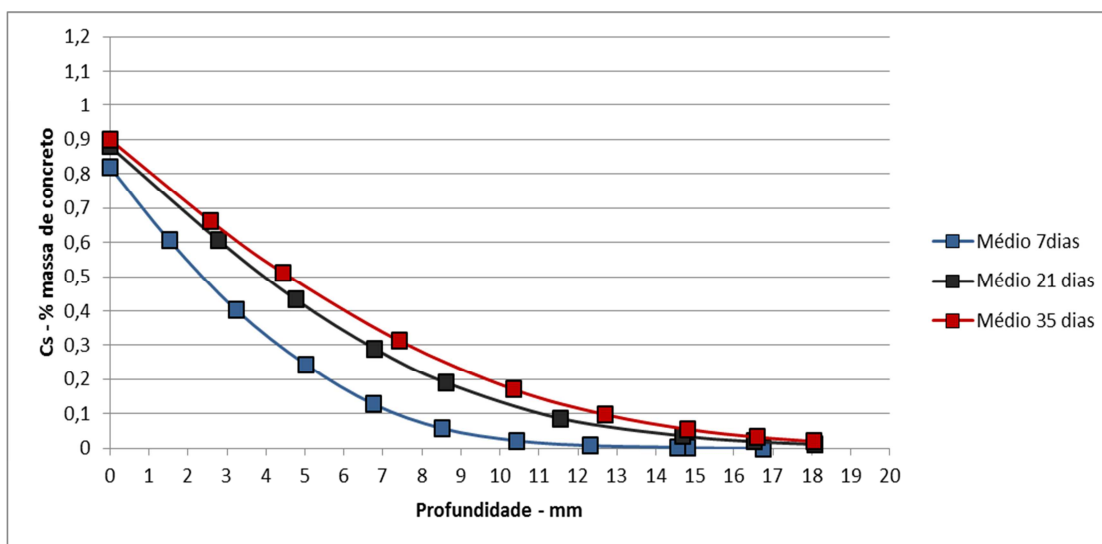


Figura 4.49 – Perfis médios *T01 CP V ARI* obtidos pela regressão mínimos quadrados através do ensaio acelerado modificado $\text{NaCl } 250\text{g/dm}^3$.

Assim sendo, tendo em vista tornar mais claro o exposto anteriormente é apresentada a Figura 4.50, a qual relaciona os valores máximos, médios e mínimos para a concentração superficial de cloretos do traço em questão.

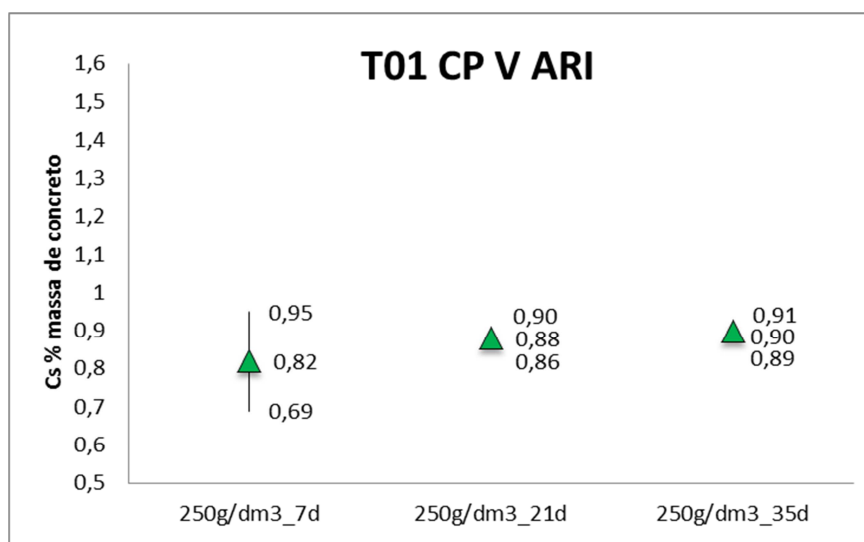


Figura 4.50 – Valores máximos, mínimos e médios para o C_s - *T01 CP V ARI*.

Então, é possível constatar com base nas Figuras 4.49 e 4.50 que há uma uniformidade dos valores médios encontrados para o C_s no traço *T01 CP V ARI* para as idades de contaminação de 7, 21 e 35 dias.

Já no que diz respeito aos resultados encontrados para o *T03 CP V ARI +10% S.A.*, é apresentada a Figura 4.51 onde podem ser observados os perfis teóricos médios para o método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³* nas idades de 7, 14, 21 e 35 dias de contaminação. Ainda, no intuito de melhor representar os valores obtidos para o C_s apresenta-se também a Figura 4.52 que exibe os valores máximos, mínimos e médios para concentração superficial de cloretos do *T03CP V ARI +10%S.A.*

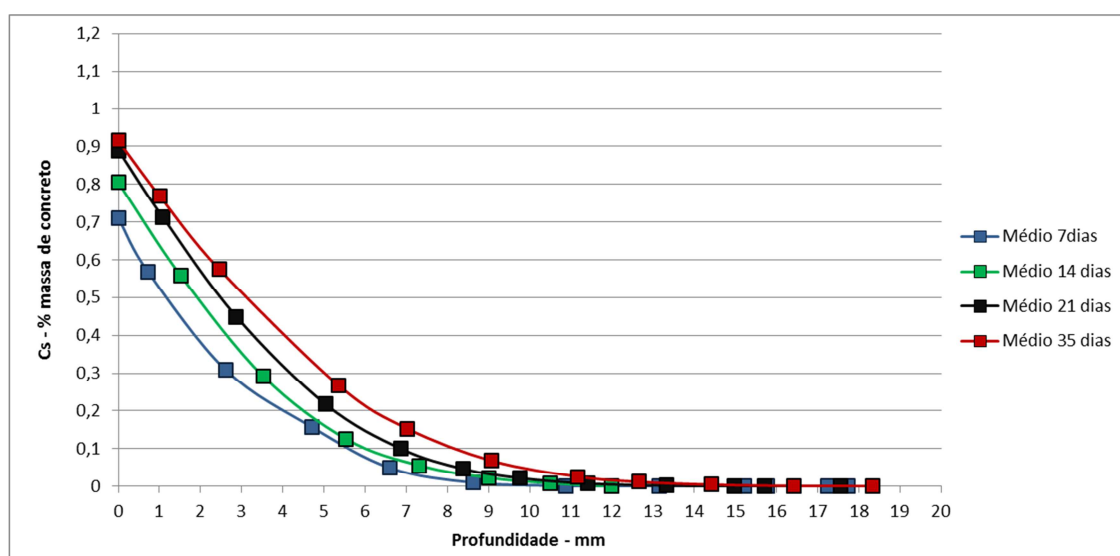


Figura 4.51 – Perfis médios *T03 CP V ARI +10% S.A.* obtidos pela regressão mínimos quadrados através do ensaio acelerado modificado *NaCl 250g/dm³*.

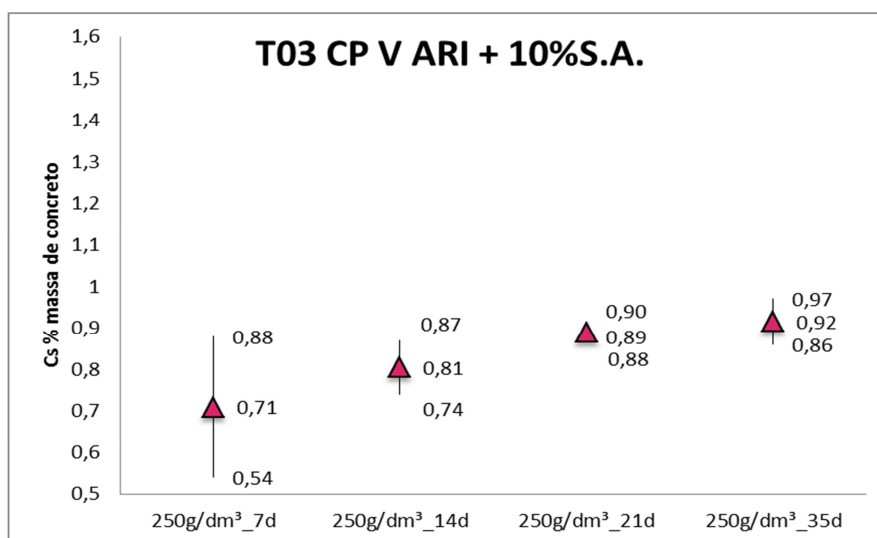


Figura 4.52 – Valores máximos, mínimos e médios para o C_s - *T03 CP V ARI + 10% S.A.*

Assim sendo, a partir da análise das Figuras 4.51 e 4.52 pode-se constatar uma leve variação do C_s ao longo do tempo para o traço *T03 CP V ARI + 10% S.A.*, sendo tal variação mais significativa entre as idades de contaminação de 7 e 14 dias.

Além disso, apresentam-se também os resultados obtidos para o traço *T07 CP IV*, assim sendo, as Figuras 4.53 e 4.54 mostram, respectivamente, os perfis médios de penetração de cloretos e os valores máximos, mínimos e médios para a concentração superficial de cloretos para esse traço a partir da aplicação do método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³*. Já as Figuras 4.55 e 4.56 também apresentam, respectivamente, os perfis médios de penetração de cloretos e os valores máximos, mínimos e médios para o C_s , porém esses resultados obtidos através da aplicação do ensaio de Guimarães Helene (2007).

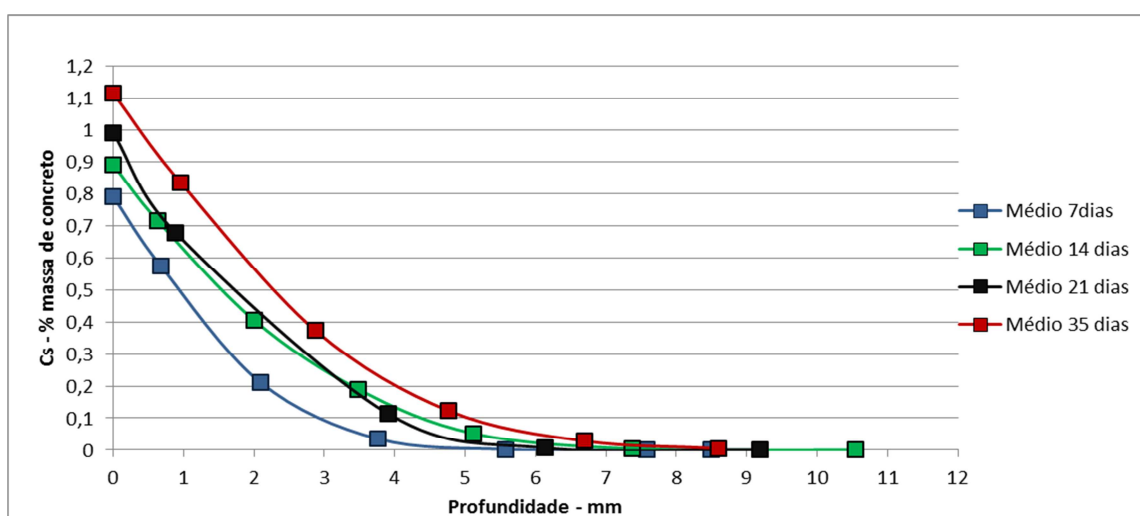


Figura 4.53 – Perfis médios *T07 CP IV* obtidos pela regressão mínimos quadrados através do ensaio acelerado modificado *NaCl 250g/dm³*.

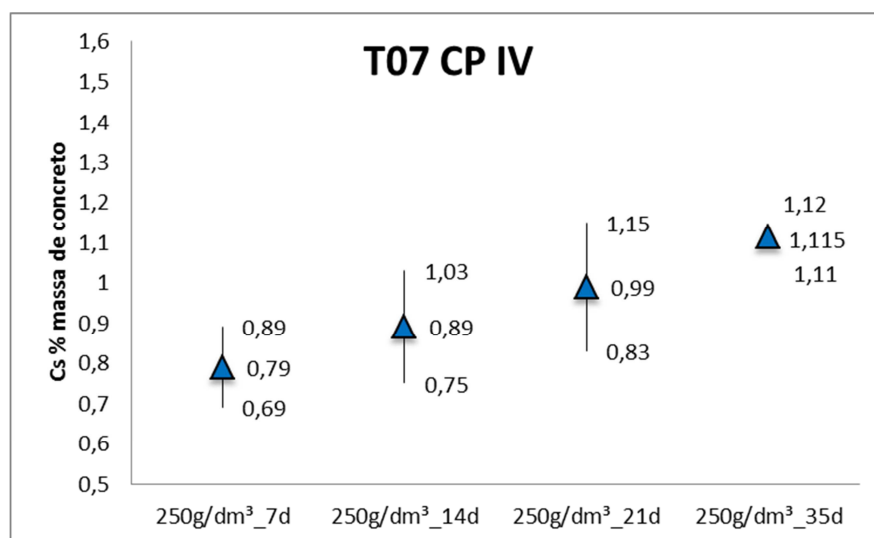


Figura 4.54 – Valores máximos, mínimos e médios para o C_s - *T07 CP IV*, método acelerado modificado $NaCl$ $250g/dm^3$.

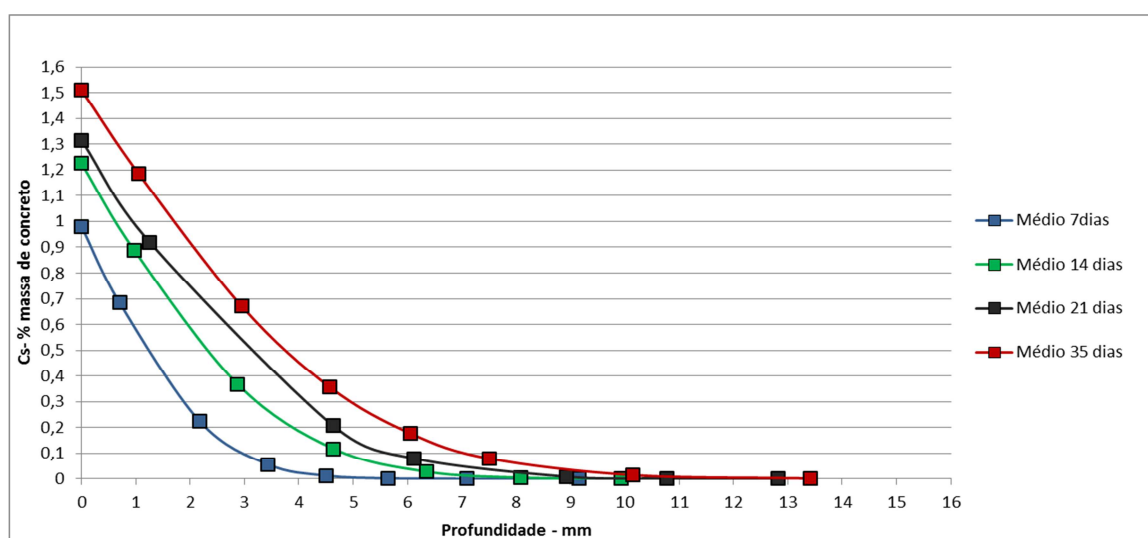


Figura 4.55 – Perfis médios *T07 CP IV* obtidos pela regressão mínimos quadrados através do método Guimarães Helene (2007).

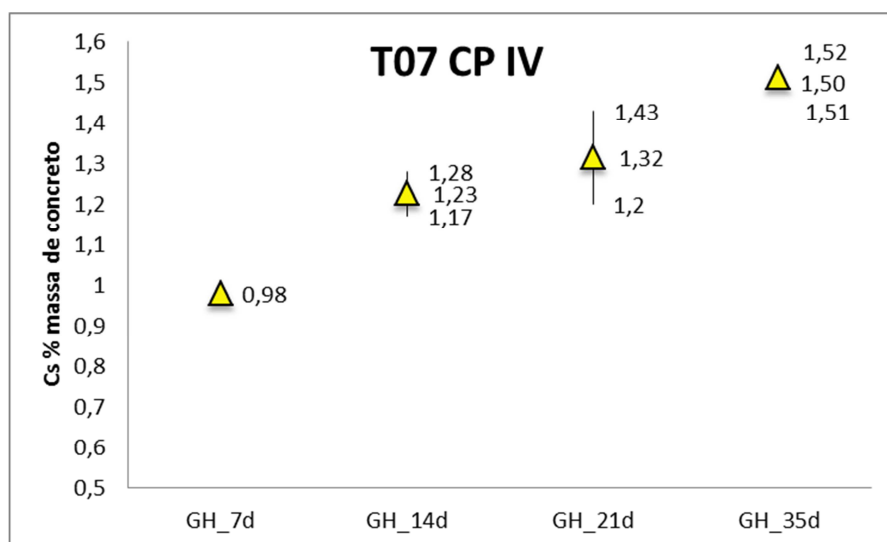


Figura 4.56 – Valores máximos, mínimos e médios para o C_s - *T07 CP IV*, método Guimarães Helene (2007).

Então, analisando as figuras apresentadas anteriormente, pode-se notar que, para ambos os métodos de ensaios aplicados, foi apresentada uma variação no C_s superior a dos dois traços de concretos analisados até então, sendo que, para o método Guimarães Helene (2007), a variação apresentou uma maior magnitude quando comparada ao ensaio Acelerado Modificado – $NaCl\ 250g/dm^3$.

Assim sendo, visando analisar o quão significativo é a variação da concentração superficial de cloretos nos resultados obtidos para o coeficiente de difusão de íons cloreto, haja vista que a solução da segunda lei de Fick apresentada por Crank (1975), que é amplamente utilizada na previsão da vida útil das estruturas no que tange ataque por cloretos, considera o C_s sendo constante ao longo do tempo, será apresentado o subtítulo a seguir, o qual a partir dos resultados obtidos nessa pesquisa e da aplicação de uma constatação realizada por Guimarães *et al* (2011), dimensiona o efeito da variação do C_s ao longo do tempo nos resultados do D obtidos, considerando tal parâmetro constante.

4.3.1 Influência da variação da concentração superficial de cloretos nos resultados obtidos para o coeficiente de difusão

O presente subtítulo é apresentado no intuito de quantificar a influência da variação da concentração superficial de íons cloreto nos resultados obtidos para o coeficiente de difusão, visto que a solução adotada para a segunda Lei de Fick nessa pesquisa considera a simplificação de que o C_s e o D são constantes ao longo do tempo.

Assim sendo, nas equações a seguir será apresentada uma observação realizada por Guimarães *et al* (2011). Primeiramente, as Equações 4.1 e 4.2 apresentam as soluções

expostas por Crank (1975) da segunda lei de Fick, considerando o C_s constante ao longo do tempo.

$$\frac{C_x - C_o}{C_{sconst} - C_o} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{Csconst} \cdot t}}\right) \quad (4.1)$$

Onde:

C_x = Concentração de cloretos na profundidade x ;

C_o = Concentração inicial de cloretos;

C_{sconst} = Concentração superficial de cloretos, considerada constante no tempo;

x = Profundidade;

$D_{Csconst}$ = Coeficiente de difusão considerando C_s constante no tempo;

t = Tempo.

$$M_t = 2 \cdot C_{sconst} \left(\frac{D_{Csconst} \cdot t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Onde:

M_t = Massa total de cloretos difundidos no tempo t .

Após, os autores apresentam a Equação 4.3 que representa a variação na C_s de forma linear no tempo e as Equações 4.4 e 4.5, as quais fazem referência à solução da segunda Lei de Fick, também exposta por Crank (1975), porém nesse caso, considerando que a variação na C_s ao longo do tempo é linear.

$$C_{x=0} = C_{svar} = k \cdot t \quad (4.3)$$

Onde:

C_{svar} = Concentração superficial de cloretos, considerando-a dependente do tempo;

k = Constante de proporcionalidade.

$$C_x = k \cdot t \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2 \cdot D_{Csvar} \cdot t} \right) \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{Csvar} \cdot t}} - \frac{x}{\sqrt{\pi \cdot D_{Csvar} \cdot t}} \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{4 \cdot D_{Csvar} \cdot t} \right) \right\} = 4k \cdot t \cdot i^2 \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{Csvar} \cdot t}} \quad (4.4)$$

Onde:

D_{Csvar} = Coeficiente de difusão considerando Cs variável no tempo.

$i^2 \operatorname{erf} (w)$ = Função cujo valor é dependente de uma determinada variável “w” ‘sendo o seu valor tabelado e apresentado por Crank (1975).

$$M_t = \frac{4}{3} \cdot k \cdot t \left(\frac{D_{Csvar} \cdot t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

Onde:

M_t = Massa total de cloreto difundido no tempo t.

Em seguida, é exposto por Guimarães *et al* (2011), a Equação 4.6, a qual representa a variação do Cs em função da raiz quadrada do tempo, já as Equações 4.7 e 4.8 representam a solução da segunda Lei de Fick considerando tal variação para o Cs.

$$C_{x=0} = C_{Svar} = k \cdot t^{1/2} \quad (4.6)$$

$$C_x = k \cdot t^{1/2} \left[\exp \left(-\frac{x^2}{4 \cdot D_{Csvar} \cdot t} \right) - \frac{x \cdot \pi^2}{2 \cdot \sqrt{D_{Csvar} \cdot t}} \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{Csvar} \cdot t}} \right] \\ = k \cdot (\pi \cdot t)^2 \cdot i \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{Csvar} \cdot t}} \quad (4.7)$$

$$M_t = \frac{1}{2} \cdot k \cdot t (\pi \cdot D_{Csvar})^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

Assim sendo, a partir da correlação das equações 4.2 e 4.5, os autores obtiveram a equação 4.9, a qual representa a relação do coeficiente de difusão obtido quando o C_s é considerado constante ao longo do tempo com o coeficiente de difusão obtido quando o C_s varia linearmente com o tempo.

$$D_{Csvar} = 2,25D_{Csconst} \quad (4.9)$$

Além disso, a partir da correlação das Equações 4.2 e 4.8, Guimarães *et al* (2011) obteve a relação entre o coeficiente de difusão considerando o C_s constante ao longo do tempo com o coeficiente de difusão levando em conta a variação do C_s na raiz do tempo sendo ela apresentada na Equação 4.10.

$$D_{Csvar} = 1,62D_{Csconst} \quad (4.10)$$

Desta forma, os autores escrevem as Equações 4.9 e 4.10 na forma apresentada na Eq. 4.11.

$$D_{Csvar} = Y \cdot D_{Csconst} \quad (4.10)$$

Onde:

Y – Coeficiente de proporcionalidade

Ainda, em sua pesquisa, os autores, correlacionando os resultados obtidos com o C_s sendo uma função de kt^n , observaram que para C_s constante no tempo tem-se $n = 0$ e a constante de proporcionalidade $Y = 1$, para C_s variando com a raiz quadrada do tempo $n = 0,5$ e $Y = 1,62$ e para C_s variando linearmente no tempo $n = 1$ e $Y = 2,25$. Assim sendo, Guimarães *et al* (2011) apresenta a Figura 4.57 e constata que a constante de proporcionalidade “ Y ” varia linearmente com o expoente n da função exponencial C_s no tempo, sendo a função que representa tal relação apresentada na Eq. 4.11.

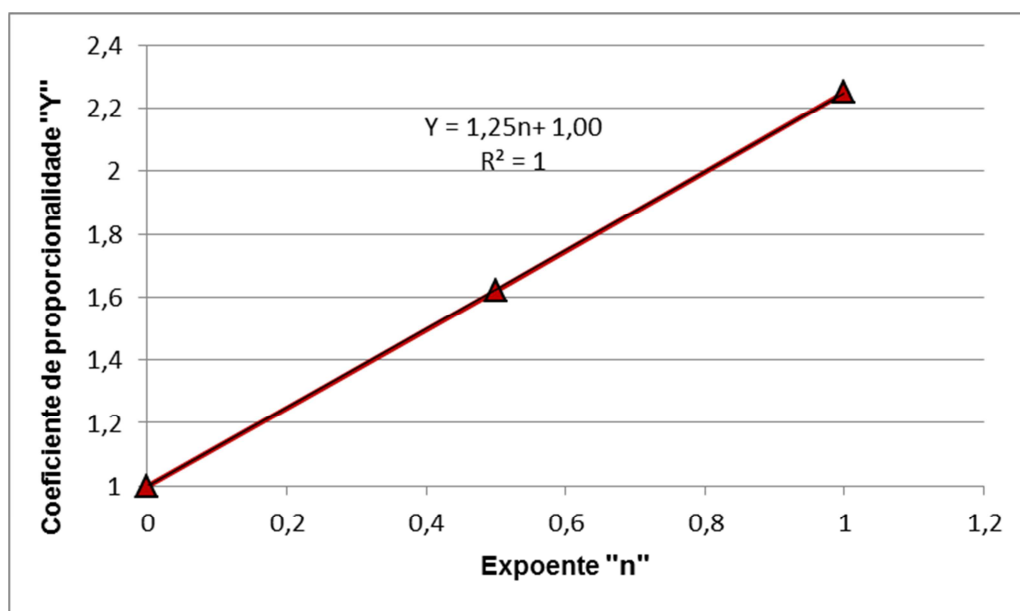


Figura 4.57- Coeficiente de proporcionalidade “Y” em função do expoente “n”.

$$Y = 1,25n + 1 \quad (4.11)$$

Então, pode ser observado, a partir da Figura 4.57 e da Equação 4.11, que quanto maior o valor de do expoente “n” no tempo, maior será a diferença entre os coeficientes de difusão, considerando C_s constante ao longo do tempo e C_s variando no tempo.

Desta forma, visando aplicar o constatado por Guimarães *et al* (2011), plotou-se gráficos que relacionam os valores médios do C_s no tempo, para os três traços de concreto ensaiados a partir do método *Acelerado Modificado* – $\text{NaCl } 250\text{g/dm}^3$ e, também, para o método de Guimarães Helene (2007), o qual foi aplicado no traço *T07 CP IV*. Assim, através de um ajuste de curva potencial, foi possível relacionar a variação do C_s no tempo como uma função potência, determinando-se assim o valor de “n”. Desta forma, a Figura 4.58 apresenta o mencionado anteriormente para os valores obtidos nessa pesquisa para o traço *T01 CP V ARI*. Já na Figura 4.59 são apresentados os valores da variação do C_s no tempo para o traço *T03 CP V ARI +10% S.A.* Por fim, nas Figuras 4.60 e 4.61 são apresentados os valores encontrados para o traço *T07 CP IV* para o método *Acelerado Modificado* - $\text{NaCl } 250\text{g/dm}^3$ e Guimarães Helene (2001), respectivamente.

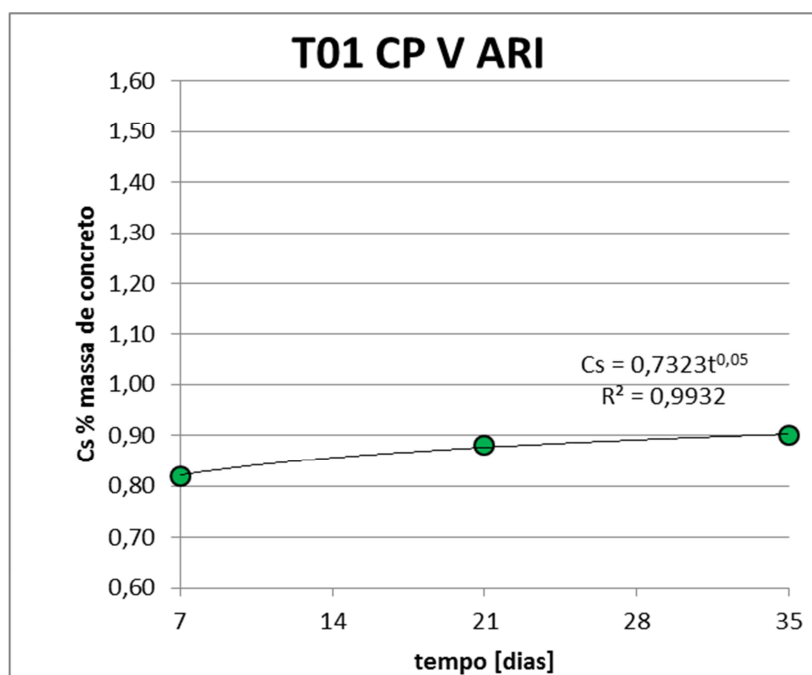


Figura 4.58 – Variação do C_s no tempo *T01 CP V ARI* para o método acelerado modificado - $NaCl$ $250g/dm^3$ e determinação do valor “ n ” a partir de um ajuste potencial da curva.

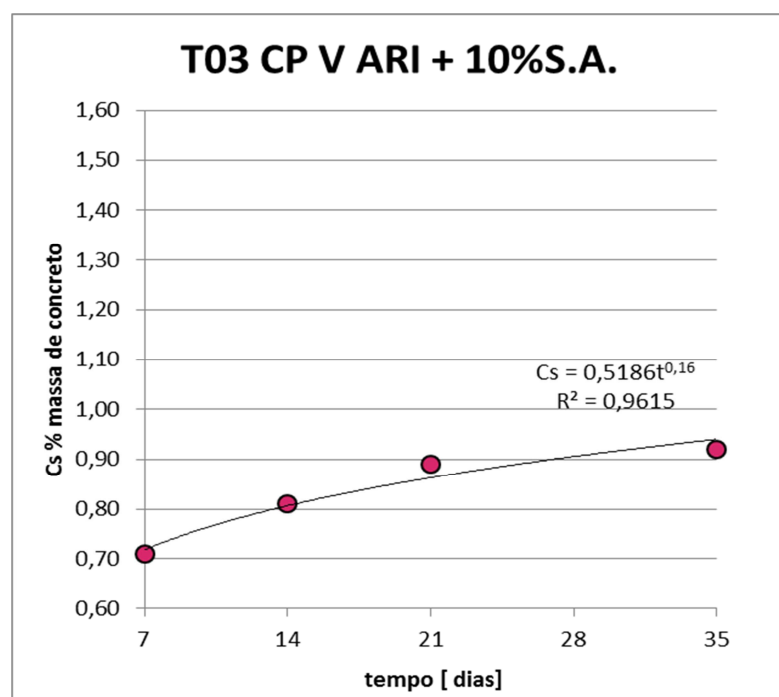


Figura 4.59 – Variação do C_s no tempo *T03 CP V ARI + 10%S.A.* para o método acelerado modificado - $NaCl$ $250g/dm^3$ e determinação do valor “ n ” a partir de um ajuste potencial da curva.

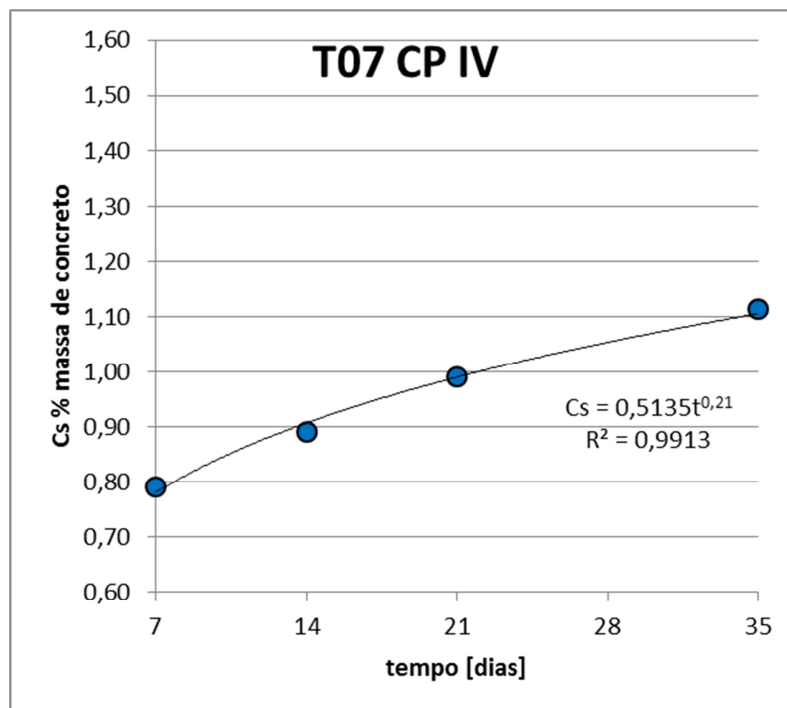


Figura 4.60 – Variação do C_s no tempo *T07 CP IV* para o método acelerado modificado - $NaCl$ $250g/dm^3$ e determinação do valor “ n ” a partir de um ajuste potencial da curva.

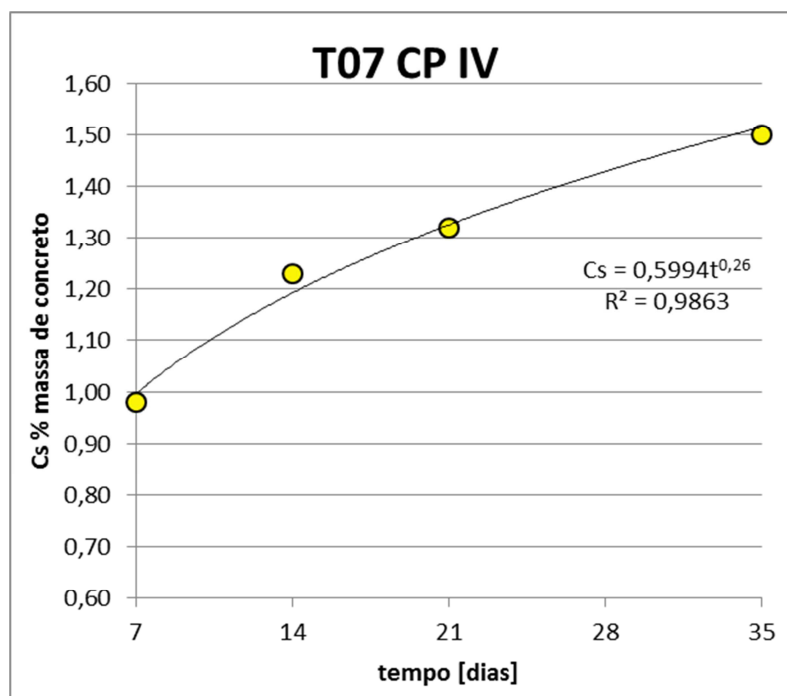


Figura 4.61 – Variação do C_s no tempo *T07 CP IV* para o método Guimarães Helene (2007) e determinação do valor “ n ” a partir de um ajuste potencial da curva.

Assim sendo, a partir da análise da Figura 4.58 é possível observar que para o traço *T01 CP VARI* o valor de “*n*” corresponde a 0,05, o que a partir da aplicação da equação 4.11 resulta em um valor de 1,06 para a constante de proporcionalidade “*Y*”, causando, assim, um acréscimo de 6% no valor do *D* encontrado, considerando o *Cs* constante ao longo do tempo.

Já no que diz respeito ao traço *T03 CP VARI+ 10%S.A.*, pode-se observar na Figura 4.59 que o valor de “*n*” equivale a 0,16, assim, o valor de “*Y*” encontrado a partir da Equação 4.11 é igual a 1,20, aumentando, então, em 20% o valor do *D* calculado a partir da simplificação de que o *Cs* é constante ao longo do tempo.

Com relação ao valor de “*n*” obtido para o traço *T07 CP IV* a partir da aplicação do método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³*, na Figura 4.60 observa-se que o mesmo corresponde a 0,21, o qual faz com que se tenha um valor de 1,26 para a constante de proporcionalidade “*Y*”, causando, então, um acréscimo de 26% no valor do *D*, considerando *Cs* constante ao longo do tempo. Já para a aplicação do método de Guimarães Helene (2007), no traço *T07 CP IV*, o valor de “*n*” foi de 0,26, causando o maior acréscimo no valor de *D*, considerando *Cs* constante ao longo do tempo, sendo que, tal aumento, equivale a um total de 32% no seu valor.

Portanto, pode-se perceber que a variação do *Cs* para o traço *T01 CP VARI* causou uma variação insignificante considerando *Cs* variável ou não ao longo do tempo. Coincidindo, assim, com o obtido por Guimarães *et al* (2011), o qual realizou um estudo sobre um concreto dosado com cimento (*Cem I 42. R*) possuindo uma relação a/c de 0,5, variando as idades de contaminação em 7, 21 e 35 dias em uma solução contaminante equivalente a do ensaio prescrito pela *NT BUILD 443 (1995) – NaCl 165gdm³*. O estudo em questão conclui que o concreto estudado apresentou uma variação muito pequena do *Cs* ao longo do tempo para um coeficiente de difusão relativamente alto na ordem de $10,38 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$. Além disso, nessa pesquisa, analisou-se no traço de concreto em questão seu comportamento para o ensaio normatizado *NT BUILD 443 (1995)* nas idades de 7 e 35 dias, onde verificou-se que a concentração superficial de cloretos também não varia significativamente nessas idades, conforme pode ser observado na Figura 4.62.

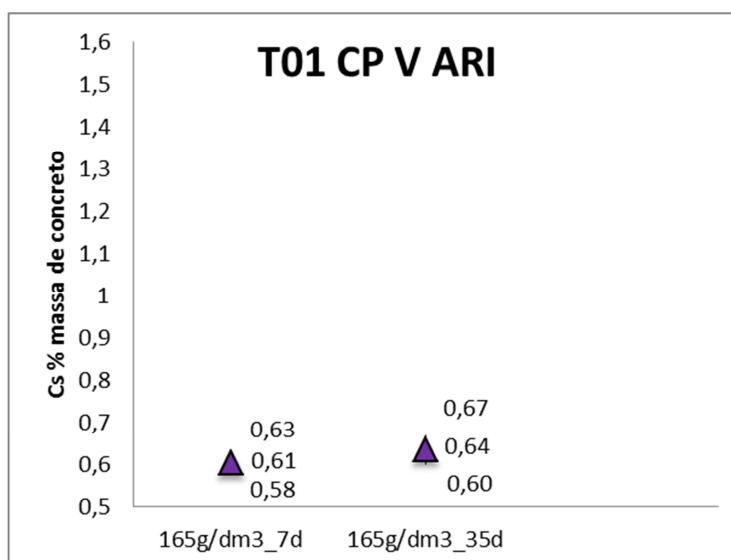


Figura 4.62 – Valores máximos, mínimos e médios para o C_s T01 CP V ARI, método NT BUILD 443 (1995).

Porém, no que diz respeito à variação da concentração superficial de cloretos para o traço T03 CP V ARI +10% S.A, obteve-se uma variação significativa no seu valor, no entanto, tal variação não foi superior às encontradas para o traço T07 CP IV, visto que para o concreto dosado com cimento pozolânico a variação do C_s obteve maiores acréscimos no valor do D quando tal parâmetro é calculando com o C_s sendo constante ao longo do tempo. Além disso, é válido observar que a variação do C_s no tempo foi mais intensa nos concretos que apresentaram menor valor de D , ou seja, para os concretos que apresentaram um melhor comportamento no que se refere ao ataque por cloretos. Dessa forma, em um primeiro instante, pode-se dizer que o fato do C_s vir a variar ou não ao longo do tempo pode estar relacionado com a interligação da rede de poros do concreto.

Todavia, torna-se interessante expor que tais variações nos valores do C_s não devem vir a afetar a comparação dos coeficientes de difusão encontrados pelos métodos propostos com o obtidos a partir do ensaio normatizado NT BUILD 443 (1995) NaCl – 165g/dm³, haja vista que uma variação semelhante a encontrada no C_s para os ensaios propostos deverá vir a ocorrer com a aplicação do ensaio normatizado NT BUILD 443. Sendo assim, sugere-se na realização de pesquisas futuras uma análise do comportamento do C_s no tempo a partir da aplicação do ensaio normatizado para concretos que possuam um bom comportamento frente ao ataque por cloretos.

Ainda, salienta-se que na subseção a seguir será realizada uma análise do comportamento do C_s no tempo para os resultados obtidos por Bender (2016).

4.3.2 Análise do comportamento da concentração superficial de íons cloreto no tempo nos resultados obtidos por Bender (2016)

A partir do ensaio realizado por Bender (2016), o qual envolve uma solução contaminante saturada com *NaCl*, o autor, no que diz respeito ao comportamento do *Cs* para o concreto dosado com cimento de alta resistência inicial com adição de 10% de sílica ativa, chamado nessa pesquisa de *T03 CP V ARI + 10% S.A.*, considera que não há variação significativa do *Cs* ao longo do tempo, no entanto, tendo em vista os valores encontrados por Bender (2016) para o traço de concreto em questão, os quais foram apresentados na Tabela 4.4, pode-se constatar que a variação da concentração superficial de cloretos no tempo não pode ser descartada. Assim sendo, a Figura 4.63 apresenta os valores máximos, mínimos e médios dos *Cs* encontrados pelo autor para o traço de concreto em questão, evidenciando uma variação significativa entre os valores médios do *Cs* para as idades analisadas. Porém, é válido salientar que como o autor só analisou duas idades muito próximas de contaminação, 7 e 14 dias, a aplicação da metodologia de Guimarães *et al* (2011) torna-se imprecisa para dimensionar sua influência no valor do coeficiente de difusão.

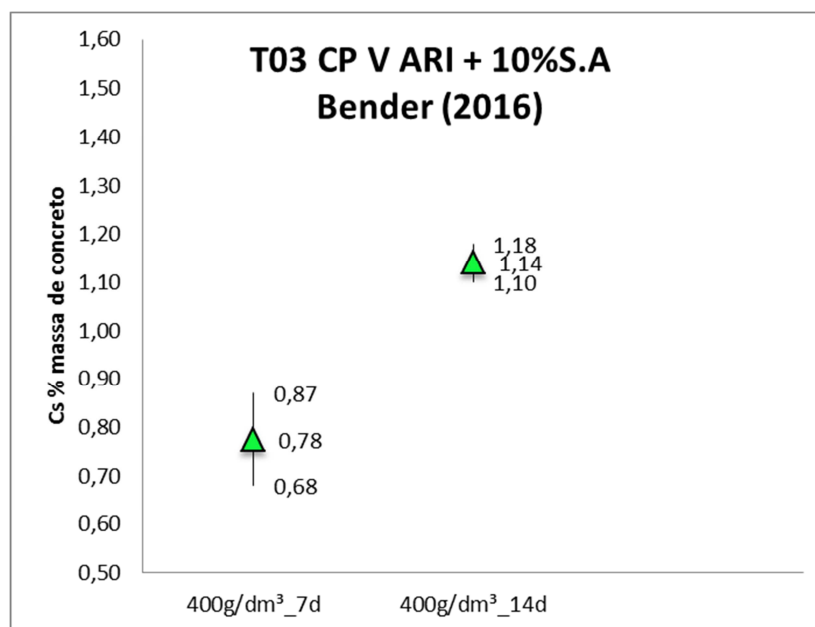


Figura 4.63 – Valores máximos, mínimos e médios para o *Cs* T03 CP V ARI + 10% S.A., método NaCl 400g/dm³, BENDER(2016).

Já no que se refere ao comportamento da concentração superficial de cloretos para o concreto dosado com cimento pozolânico *T07 CP IV*, Bender (2016), também, conclui que o C_s é constante ao longo do tempo. Porém, em sua análise estatística do coeficiente de difusão, através de cálculos que envolvem o coeficiente de variação (CV) das amostras, o autor descarta algumas amostras ensaiadas, validando somente os valores de D , no ensaio em solução saturada de $NaCl$, apresentados na Tabela 4.5. No entanto, em sua conclusão perante a concentração superficial de cloretos, o autor considera os valores C_s que correspondem aos valores do D que foram desconsiderados da sua pesquisa. Tendo isso em vista, realizou-se nessa pesquisa uma análise do C_s no tempo somente para os valores correspondentes às amostras validadas por Bender (2016). Assim sendo, é apresentada a Figura 4.64, na qual são observados os valores do C_s encontrados pelo autor e validados por sua análise estatística. Ainda, a partir disso, é realizada uma análise com o emprego da constatação realizada por Guimarães *et al* (2011), a qual possui o intuito de verificar quão significativa é a variação do C_s e quanto a mesma pode vir a impactar no valor do D calculado, considerando o C_s constante ao longo do tempo. Assim, a partir de um ajuste de curva potencial, foi possível relacionar a variação do C_s no tempo com uma função potência, de acordo com a Figura 4.65, então, a partir disso, determinou-se o valor de “ n ” e da constante de proporcionalidade “ Y ”.

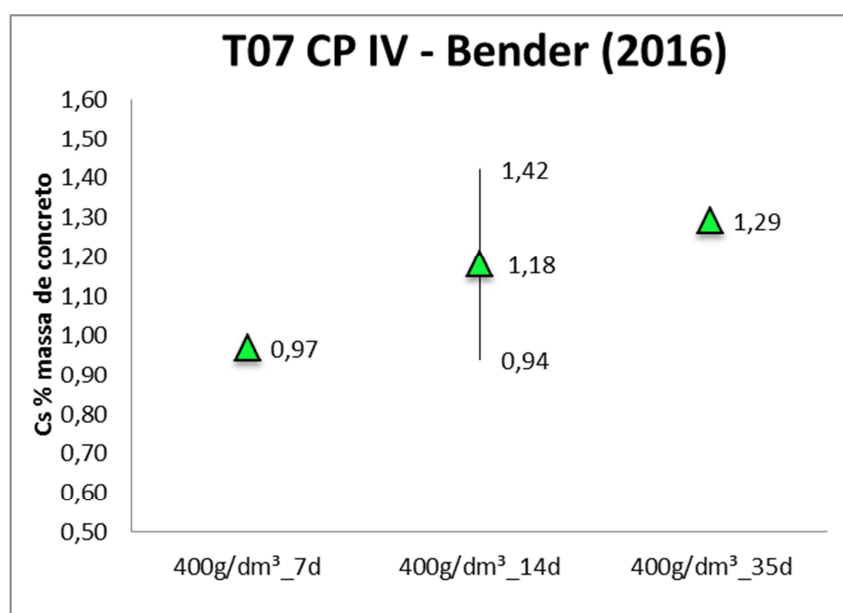


Figura 4.64 – Valores para o C_s - *T07 CP IV* método $NaCl$ 400g/dm³, BENDER(2016).

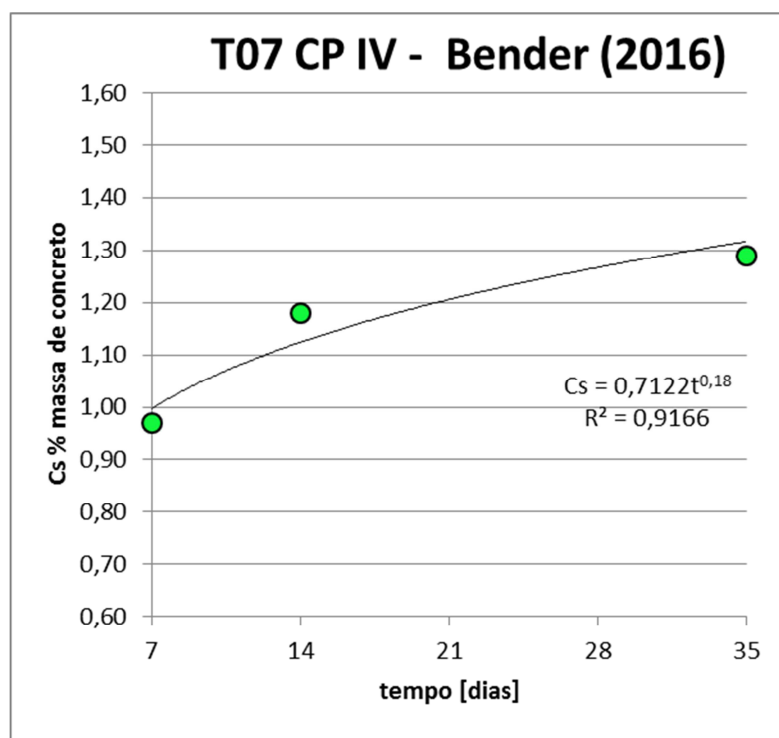


Figura 4.65 – Variação do C_s no tempo *T07 CP IV* para o método $NaCl\ 400g/dm^3$ e determinação do valor “ n ” a partir de um ajuste potencial da curva.

Desta forma, a partir da análise da Figura 4.65 torna-se possível observar que o valor de “ n ” corresponde a 0,18, o que implica em um valor de 1,23 para a constante de proporcionalidade “ Y ” e causa então um aumento de 23% no valor de D , considerando o C_s constante ao longo do tempo. Assim sendo, constata-se uma variação significativa do C_s ao longo do tempo, para os valores encontrados na pesquisa de Bender (2016) no que se refere ao concreto dosado com cimento pozolânico, sendo tal variação inferior à constatada pela aplicação dos métodos *Acelerado Modificado – $NaCl\ 250g/dm^3$* e Guimarães Helene (2007) para o mesmo traço de concreto.

Por fim, visando finalizar a análise dos resultados, é exposta no próximo subtítulo uma breve análise do comportamento do coeficiente de difusão em relação à idade das amostras estudadas.

4.4 Análise do Comportamento do Coeficiente de Difusão de Íons Cloretos em Relação à Idade das Amostras Ensaçadas

Tendo o intuito de verificar o comportamento do D em relação à idade das amostras ensaiadas é apresentado esse subtítulo. No entanto, é válido deixar claro desde já que a análise em questão será aplicada somente para os traços *T01 CP V ARI* e *T07 CP IV*, haja

vista que os ensaios para o traço *T03 CP V ARI +10%S.A.* foram realizados em conjunto com Bender (2016) e não se teve acesso às informações necessárias para aplicação da metodologia aqui proposta, tornando, assim, inviável a análise do *D* versus idade dessas amostras. Assim sendo, a Tabela 4.6 faz referência à data de confecção das amostras, data de extração na sua forma pulverulenta, idade das amostras e aos valores encontrados para o *D* no traço de concreto *T01 CP V ARI*.

Tabela 4.6 – Relação entre idade da amostra e coeficiente de difusão *T01 CP V ARI*

TRAÇO - MÉTODO DE ENSAIO	NOME DO CP	Idade de contaminação [dias]	DATA DE PRODUÇÃO	DATA DA EXTRAÇÃO	IDADE [dias]	$D \cdot 10^{-6}$ mm ² /s]
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_2a	7	17/08/15	05/02/16	172	12,00
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_9d	7	17/08/15	10/08/16	359	16,89
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_1d	21	17/08/15	18/02/16	185	10,16
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_3c	21	17/08/15	11/03/16	207	17,34
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_3a	35	17/08/15	04/03/16	200	9,18
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_6b	35	17/08/15	02/03/16	198	11,70
T1- 165g/dm ³	ARI_165_T1_1b	7	17/08/15	19/01/16	155	16,89
T1- 165g/dm ³	ARI_165_T1_2c	7	17/08/15	20/01/16	156	10,38
T1- 165g/dm ³	ARI_165_T1_8c	35	17/08/15	17/02/16	184	10,70
T1- 165g/dm ³	ARI_165_T1_6a	35	17/08/15	23/03/16	219	16,15
T1-0,5M	ARI_0,5M_T1_9a	90	18/08/15	11/05/16	267	9,58

Analisando os valores da Tabela 4.6, pode-se constatar que a variação dos valores do *D* não tem relação com a idade das amostras, uma vez que o valor do coeficiente de difusão de íons cloreto encontrado para a amostra mais jovem se aproxima muito dos valores encontrados para as amostras com maior idade e, ainda, o maior e o menor valor do *D* calculados para o traço *T01 CP V ARI* foi obtido para as amostras com uma diferença de idade de apenas 7 dias.

Assim sendo, torna-se interessante ressaltar o fato de que a amostra com idade de 155 dias apresentou um valor para o *D* de $16,89 \times 10^{-6}$ mm²/s, o qual é idêntico ao obtido para a amostra de 359 dias de idade, sendo que tais amostras apresentam a menor e a maior idade de vida, respectivamente. Além disso, as amostras com 200 e 207 dias de idade apresentam, respectivamente, o menor e o maior valor calculados para o coeficiente de difusão de íons cloreto. Outro fato interessante é de que as amostras com idade de 155 e 156 dias,

apresentam, respectivamente, o segundo valor mais alto para o D e o terceiro mais baixo. Nesse contexto, para melhor visualizar essas constatações, é apresentada a Figura 4.66, a qual relaciona os valores do D com as idades das amostras, sendo destacado em vermelho o fato da amostra de menor idade apresentar valores de D muito semelhantes às amostras de maior idade, além disso, é destacado na cor verde o fato das amostras com pouca diferença de idade apresentar valores de D que se enquadram entre os máximos e os mínimos obtidos.

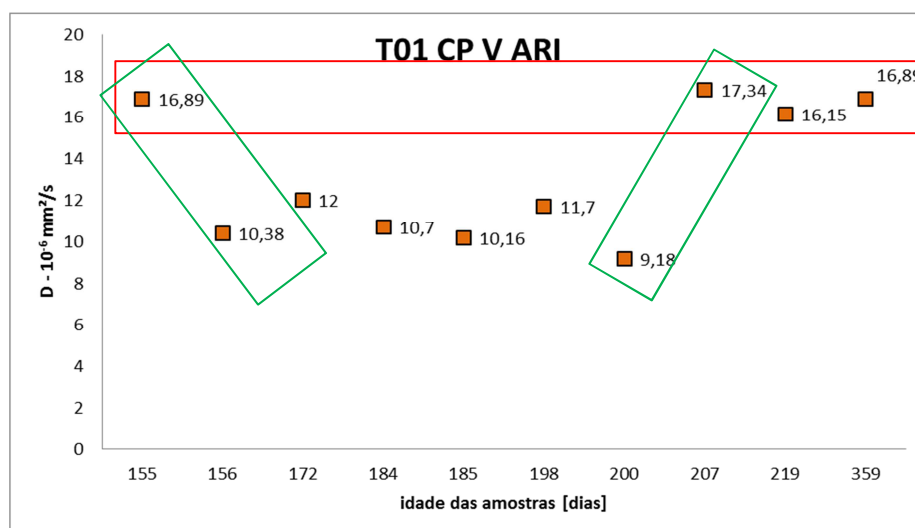


Figura 4.66 – Relação da idade das amostras com o D para *T01 CP V ARI*.

Ainda, a partir de uma análise de correlação entre os parâmetros analisados verificou-se através do valor de R^2 , o qual é apresentado na Figura 4.67, que para o traço *T01 CP V ARI* somente 8% da variação dos valores do D é explicada por sua relação com a idade das amostras, deste modo, tal constatação evidencia o já apresentado anteriormente, visto que 8% de representatividade é um valor muito baixo.

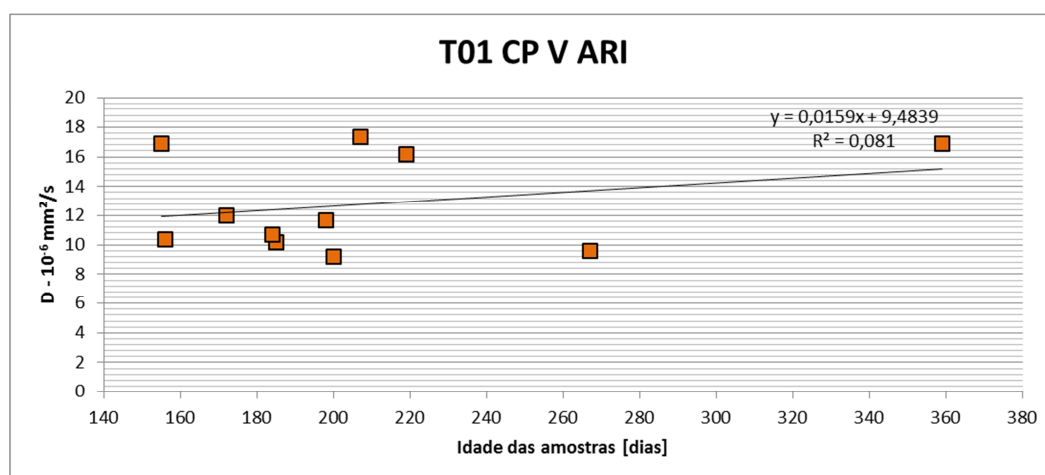


Figura 4.67 – Correlação entre D e a idade das amostras para *T01 CP V ARI*.

Além disso, realizando uma análise dos valores encontrados para o D no *T07 CP IV* e relacionando seus valores com a idade das amostras, verificou-se a partir da Tabela 4.7 que da mesma forma com o ocorrido para o traço *T01 CP VARI*, o valor do D apresentou valores próximos nas idades mais jovens quando comparado às idades mais avançadas. Cita-se, então, o fato de que o valor do D para a amostra de maior idade, com 446 dias, o qual é $2,75 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$, ser muito semelhante ao encontrado para as amostras com menor idade, sendo a idade das mesmas equivalentes a 190, 202 e 209 dias, as quais apresentaram valores para o D de $2,63 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$, $2,70 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ e $2,71 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$, respectivamente. Ainda, dentro dessa análise, ressalta-se a constatação de um valor idêntico ao D encontrado para a amostra de maior idade, 446 dias, na amostra com a idade de 251 dias. Outro fato que também se assemelha ao observado no traço *T01 CP VARI*, é o de que as amostras para o traço *T07 CP IV* com baixa diferença de idade apresentaram valores de D que se enquadram entre os máximos e mínimos obtidos. Citam-se então as com idade de 223 e 230 dias nas quais os valores de D equivalem, respectivamente, a $3,53 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ e $1,20 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$.

Tabela 4.7 – Relação entre idade da amostra e coeficiente de difusão *T07 CP IV*.

TRAÇO - MÉTODO DE ENSAIO	NOME DO CP	Idade de contaminação [dias]	DATA DE PRODUÇÃO	DATA DA EXTRAÇÃO	IDADE [dias]	$D \cdot 10^{-6}$ mm^2/s
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_1c	7	10/09/15	18/05/16	251	2,75
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_2d	7	10/09/15	15/06/16	279	2,15
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_7b	14	10/09/15	02/06/16	266	1,95
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_9a	14	10/09/15	29/11/16	446	2,75
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_4d	21	10/09/15	27/04/16	230	1,20
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_6c	21	10/09/15	29/04/16	232	1,37
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_3c	35	10/09/15	13/05/16	246	1,68
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_4c	35	10/09/15	20/05/16	253	1,27
T7- GH	POZ_GH_T7_2c	7	10/09/15	30/03/16	202	2,70
T7- GH	POZ_GH_T7_1b	14	10/09/15	16/03/16	188	3,77
T7- GH	POZ_GH_T7_6a	14	10/09/15	18/03/16	190	2,63
T7- GH	POZ_GH_T7_3d	21	10/09/15	20/04/16	223	3,53
T7- GH	POZ_GH_T7_8c	21	10/09/15	03/06/16	267	2,34
T7- GH	POZ_GH_T7_5a	35	10/09/15	06/04/16	209	2,71
T7- GH	POZ_GH_T7_6b	35	10/09/15	08/04/16	211	2,21
T7-165g/dm ³	POZ_165_T7_1d	35	10/09/15	06/05/16	239	1,78
T7-165g/dm ³	POZ_165_T7_7c	35	10/09/15	08/07/16	302	1,01
0,5M	POZ_0,5M_T7_5b	90	10/09/15	08/06/16	272	1,75

Desse modo, a partir da observação das Figuras 4.68 e 4.69, ratifica-se a constatação de que não existe, para esse estudo, uma relação entre a idade das amostras e os valores dos coeficientes de difusão calculados, uma vez que de acordo com valor de R^2 obtido para a correlação no traço T07 CP IV verificou-se que menos de 3% da variação dos valores do D é explicada por sua relação com a idade das amostras. Assim sendo, com base no que foi apresentado pode-se validar o período de cura adotado nessa pesquisa, haja vista que caso as reações de hidratação não estivessem estabilizadas, os menores valores de D seriam encontrados nas amostras com maior idade.

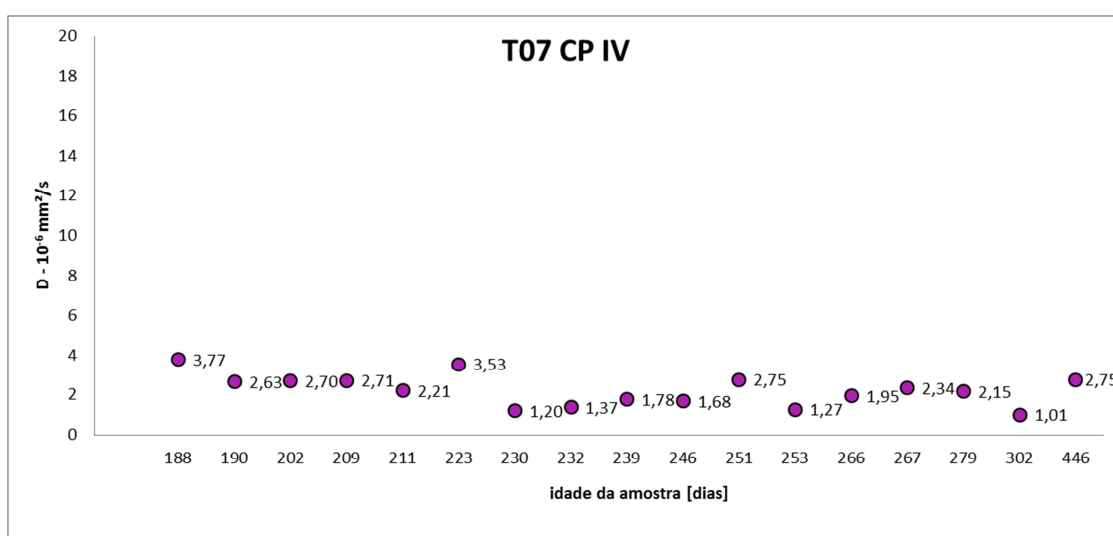


Figura 4.68 – Relação da idade das amostras com o D para *T07 CP IV*.

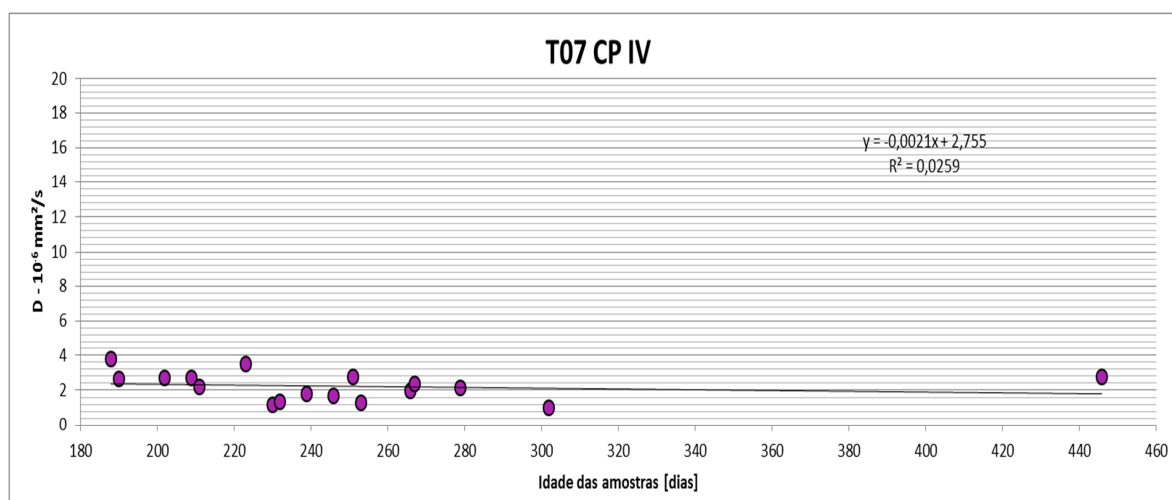


Figura 4.69 – Correlação entre D e a idade das amostras para *T07 CP IV*

Então, pode-se constatar que a diferença nos resultados D apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7 advém da própria realização do ensaio, uma vez que, de acordo com a norma europeia *prEN 12390-11:2014*, é recomendada a utilização de pelo menos duas amostras para a determinação do coeficiente de difusão, utilizando-se a média dos resultados, visto que o D , apresenta um elevado valor do coeficiente de variação, o qual varia, geralmente, no em torno de 15% a 30%. Assim, tendo como base tal constatação, foi calculado o coeficiente de variação dos coeficientes de difusão de íons cloreto obtidos para os traços *T01 CP VARI* e *T07 CP IV*, em cada ensaio e idade de contaminação, conforme apresentado nas Tabelas 4.8 e 4.9. No entanto, tendo em vista que para o método *NaCl 0,5M* e para o método Guimarães Helene (2007), na idade de 7 dias, considerou-se apenas uma amostra, a análise do coeficiente de variação não englobará tais amostras.

Tabela 4.8 – Coeficiente de variação dos valores de D para os distintos métodos de ensaios e idades de contaminação *T01 CP VARI*.

TRAÇO - MÉTODO DE ENSAIO	NOME DO CP	Idade de contaminação [dias]	DATA DE PRODUÇÃO	DATA DA EXTRAÇÃO	IDADE [dias]	$D \cdot 10^{-6}$ mm^2/s	Coeficiente de variação
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_2a	7	17/08/15	05/02/16	172	12,00	24%
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_9d	7	17/08/15	10/08/16	359	16,89	
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_1d	21	17/08/15	18/02/16	185	10,16	37%
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_3c	21	17/08/15	11/03/16	207	17,34	
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_3a	35	17/08/15	04/03/16	200	9,18	17%
T1- 250g/dm ³	ARI_250_T1_6b	35	17/08/15	02/03/16	198	11,70	
T1- 165g/dm ³	ARI_165_T1_1b	7	17/08/15	19/01/16	155	16,89	34%
T1- 165g/dm ³	ARI_165_T1_2c	7	17/08/15	20/01/16	156	10,38	
T1- 165g/dm ³	ARI_165_T1_8c	35	17/08/15	17/02/16	184	10,70	29%
T1- 165g/dm ³	ARI_165_T1_6a	35	17/08/15	23/03/16	219	16,15	
T1-0,5M	ARI_0,5M_T1_9a	90	18/08/15	11/05/16	267	9,58	-

Tabela 4.8 – Coeficiente de variação dos valores de D para os distintos métodos de ensaios e idades de contaminação *T07 CP IV*.

TRAÇO - MÉTODO DE ENSAIO	NOME DO CP	Idade de contaminação [dias]	DATA DE PRODUÇÃO	DATA DA EXTRAÇÃO	IDADE [dias]	$D[.10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}]$	Coeficiente de variação
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_1c	7	10/09/15	18/05/16	251	2,75	17%
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_2d	7	10/09/15	15/06/16	279	2,15	
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_7b	14	10/09/15	02/06/16	266	1,95	24%
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_9a	14	10/09/15	29/11/16	446	2,75	
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_4d	21	10/09/15	27/04/16	230	1,20	9%
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_6c	21	10/09/15	29/04/16	232	1,37	
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_3c	35	10/09/15	13/05/16	246	1,68	20%
T7- 250g/dm ³	POZ_250_T7_4c	35	10/09/15	20/05/16	253	1,27	
T7- GH	POZ_GH_T7_2c	7	10/09/15	30/03/16	202	2,70	-
T7- GH	POZ_GH_T7_1b	14	10/09/15	16/03/16	188	3,77	25%
T7- GH	POZ_GH_T7_6a	14	10/09/15	18/03/16	190	2,63	
T7- GH	POZ_GH_T7_3d	21	10/09/15	20/04/16	223	3,53	29%
T7- GH	POZ_GH_T7_8c	21	10/09/15	03/06/16	267	2,34	
T7- GH	POZ_GH_T7_5a	35	10/09/15	06/04/16	209	2,71	14%
T7- GH	POZ_GH_T7_6b	35	10/09/15	08/04/16	211	2,21	
T7-165g/dm ³	POZ_165_T7_1d	35	10/09/15	06/05/16	239	1,78	39%
T7-165g/dm ³	POZ_165_T7_7c	35	10/09/15	08/07/16	302	1,01	
0,5M	POZ_0,5M_T7_5b	90	10/09/15	08/06/16	272	1,75	-

Desta forma, a partir da análise das Tabelas 4.8 e 4.9 é possível constatar que a maioria dos coeficientes de variação (CV) ficaram dentro da faixa de variação comumente encontrada segundo a *prEN 12390-11:2014*, exceto para os ensaios *NaCl – 250g/dm³* idade de contaminação de 21 dias, *NaCl 165g/dm³* idade de contaminação de 7 dias para o traço *T01 CP V ARI* e ensaio normatizado NT BUILD 443 (1995) - *NaCl – 165g/dm³* idade de contaminação de 35 dias para o *T07 CP IV*, os quais apresentaram valores do coeficiente de variação superior a 30%. Além disso, é importante salientar que para ambos os traços de concreto analisados, o coeficiente de variação do D foi menor para o ensaio *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³* a idade de contaminação de 7 do que os encontrados pelo ensaio normatizado *NT BUILD 443 (1995)* na idade de contaminação de 35 dias.

Assim sendo, encerra-se a apresentação e análise dos resultados dessa pesquisa, sendo que será apresentada a seguir a proposta final da metodologia de ensaio e, no próximo capítulo, as conclusões advindas desse estudo.

4.5 Proposta final da metodologia do ensaio *Acelerado Modificado* – *NaCl* 250g/dm³

Visando expor de modo mais claro a metodologia final proposta para o ensaio *Acelerado Modificado* – *NaCl* 250g/dm³ é apresentado esse subtítulo. Assim sendo, a seguir serão elencados os procedimentos adotados desde a confecção do concreto até a obtenção dos perfis de penetração de cloretos.

- I) Confecção de corpos de prova de concreto em formato cilíndrico nas dimensões de 10cm de diâmetro por 20cm de altura. Sugere-se seguir o exposto na *NBR 5738:2015* durante no processo de moldagem dos *CPs*.
- II) Realização da cura úmida por período necessário para que as reações de hidratação se realizem quase que por completo. Sugere-se o tempo mínimo de 90 dias para concretos dosados com cimentos do tipo *CP I* e *CP V ARI*. Já para os concretos dosados com cimentos do tipo *CP II*, *CP III* e *CP IV* ou que possuam adição em seu traço de microssílica, pozolanas e escória de alto forno o período mínimo de cura sugerido é de 180 dias.
- III) Execução do processo de fatiamento dos corpos de prova em 4 partes, resultando em amostras com aproximadamente 4cm de altura, recomenda-se o descarte de 1cm em cada extremidade da amostra.
- IV) Realização da saturação das amostras por ebulição de acordo com o exposto no item 6.2 da *NBR 9778:1987*, no entanto, expõe-se que poderá ser realizado o processo de saturação a vácuo.
- V) Execução do revestimento com resina epóxi deixando apenas uma das faces planas da amostra livre do revestimento, desta forma, recomenda-se seguir as instruções do fabricante no processo de aplicação e cura da resina epóxi. Ainda, é importante ressaltar que após a cura as amostras deverão ser imersas em água destilada saturada com hidróxido de cálcio até que duas pesagens espaçadas de 24h apresentem uma diferença igual ou inferior a 0,5%.
- VI) Realização da contaminação das amostras, para isso, prepara-se primeiramente em um recipiente com vedação uma solução de água destilada com cloreto de sódio, de forma que para esse ensaio as proporções são equivalentes a 1dm³ de água destilada para 250 +/-1g de *NaCl*. No entanto, é interessante expor que a relação entre o volume contido no recipiente e a área da superfície não revestida da

amostra deve ser igual ou superior a 12,5 ml/cm². Feito isso, agitasse a solução a fim de dissolver todo o *NaCl* e então insere-se a amostra de concreto.

- VII) Passado o tempo de contaminação, o qual é equivalente a 7 dias, deve-se retirar a amostra e executar a limpeza da superfície de ataque, com lixamento e jato de ar comprimido a fim de remover qualquer excedente do contaminante depositado superficialmente.
- VIII) Extração das amostras, a qual consiste na pulverização da amostra em camadas com profundidades controladas. Assim sendo, sugere-se a extração em 11 camadas sendo a primeira e a segunda camada com 1mm de profundidade e as demais com 2mm. O controle da profundidade das camadas é realizado por paquímetro em três pontos ao longo do diâmetro da amostra, tomando-se a profundidade média. Cada camada pulverizada deverá ser acondicionada em sacos plásticos hermeticamente fechados e identificados. Além disso, ressalta-se o fato de que deverá ser realizada uma limpeza com jato de ar comprimido em cada camada extraída a fim de que os resíduos permanentes na amostra não venham afetar os resultados das camadas subsequentes.
- IX) Realizar a determinação do teor de cloretos em cada camada extraída da amostra e gerar um perfil real de penetração de cloretos, relacionando o teor de *Cl* com a sua profundidade de penetração.
- X) A partir da aplicação da solução da segunda lei de Fick, apresentada por Crank (1975), realizar a determinação da concentração superficial de cloreto e do coeficiente de difusão de íons cloreto.

5 CONCLUSÃO

Partindo do exposto anteriormente, pode-se concluir que, para cada traço de concreto submetido à contaminação por *NaCl* a diferentes concentrações, os valores dos coeficientes de difusão de íons cloretos das amostras de cada traço (*T01 CP VARI*, *T03 CP VARI +10% S.A.* e *T07 CP IV*) foram semelhantes entre si. Sendo que os valores do *D* encontrados, através da solução apresentada por Crank (1975) da Segunda lei de Fick, para o método *Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³* e Guimarães Helene (2007), foram muito próximos para as idades de contaminação 7, 14, 21 e 35 dias quando comparados aos valores encontrados pelo método normatizado *NT BUILD 443 (1995) – NaCl 165g/dm³* já no que diz respeito à comparação pelo método tradicional *NaCl 0,5M*, no qual analisou-se apenas uma amostra, os valores obtidos pelos ensaios proposto se aproximaram, no geral, dos valores mínimos encontrados para esse método de ensaio. Além disso, na análise comparativa dos valores encontrados nessa pesquisa com os obtidos por Bender (2016), em sua proposta de ensaio, a qual envolve uma solução contaminante saturada de *NaCl*, observou-se que, para o traço de concreto dosado com cimento de alta resistência inicial com adição de sílica ativa, os valores do *D* encontrados pelo autor na idade de 14 dias aproximaram-se muito dos obtidos pelos ensaios aqui propostos. Além disso, no que se refere aos valores encontrados para o traço de concreto dosado com cimento pozolânico, os quais foram obtidos a partir da aplicação do ensaio de Bender (2016), pode-se afirmar que eles foram muito próximos aos encontrados nessa pesquisa para as idades de contaminação de 7, 14 e 35 dias.

Já no que diz respeito à concentração superficial de cloretos, observou-se que ela manteve-se constante com o passar do tempo no traço de concreto dosado com cimento alta resistência inicial (*T01 CP VARI*), o qual apresentou um coeficiente de difusão significativamente maior quando comparado ao traço de concreto dosado com cimento de alta resistência inicial com adição de 10% de sílica ativa (*T03 CP VARI + 10% S.A*) e ao traço dosado com cimento do tipo pozolânico (*T07 CP IV*). Coincidindo, assim, com o observado por Guimarães *et al* (2011), pois, em sua pesquisa, os autores constataram que a concentração superficial de cloretos não variou para as idades de contaminação de 7, 21 e 35 dias, utilizando-se uma solução contaminante com teores de íons cloreto idêntica a do ensaio normatizado *NT BUILD 443 (1995) – NaCl 165g/dm³*. Contudo, diferentemente do constatado por Guimarães *et al* (2011), a concentração superficial de cloretos para os traços *T03 CP VARI +10% S.A.* e *T07 CP IV* apresentou uma variação com tendência crescente ao passar do tempo, no entanto, é válido salientar que a variação do *Cs* foi mais significativa para o concreto dosado com cimento

pozolânico, o qual apresenta um melhor comportamento ao ataque de cloretos quando comparado aos outros traços analisados nessa pesquisa e o concreto estudado por Guimarães *et al* (2011), visto que seu coeficiente de difusão é menor.

Desta forma, o fato do C_s vir a variar ou não ao longo do tempo pode estar relacionado com o comportamento do material quando ele é exposto a ambientes com presença de cloretos, de modo que, em concretos que apresentem uma rede de poros mais interligada, ou seja, os que apresentam menos resistência ao ataque de cloretos, o C_s venha a estabilizar de maneira mais rápida quando comparado a um concreto que apresenta um melhor comportamento frente ao ataque desse agente agressivo, causando, assim, uma variação do C_s ao longo do tempo.

Além disso, pode-se observar também que a solução apresentada por Crank (1975) da segunda Lei de Fick, a qual considera que a concentração superficial de cloretos e que o coeficiente de difusão se mantêm constante ao longo do tempo, é muito bem aplicável aos concretos que apresentaram um maior valor para D , ou seja, aqueles que possuem uma rede de poros mais interligada. No entanto, para concretos que apresentam uma melhor resistência ao ataque íons cloreto, constatou-se, a partir das equações desenvolvidas por Guimarães *et al* (2011), que a variação do C_s afeta significativamente nos valores do coeficiente de difusão calculados a partir da solução da segunda lei de Fick apresentada por Crank (1975), tendo nessa pesquisa um acréscimo para o traço *T03 CP V ARI +10%S.A*, com a aplicação do método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³*, de 20%. Para o traço *T07 CP IV*, tal constatação, no que se refere ao método *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³*, apresentou um acréscimo de 26% no valor de D , enquanto que para o método Guimarães Helene (2007), tal acréscimo foi mais significativo, sendo equivalente a 32%.

Ainda, dentro desse contexto, ressalta-se que na análise dos valores encontrados por Bender (2016) em sua pesquisa para o traço *T07 CP IV*, observou-se que o valor de D , a partir da aplicação do seu ensaio, apresentou um acréscimo de 23% no seu valor, quando tal parâmetro é calculado com o C_s sendo constante ao longo do tempo. Assim, evidencia-se que talvez a utilização de uma solução contaminante com elevada concentração de cloretos, conforme a proposta por Bender (2016), para a determinação do coeficiente de difusão em concretos que apresentam um bom desempenho frente ao ataque de cloretos, seja a mais eficaz, uma vez que tal ensaio foi o que menos apresentou variação do C_s para o traço *T07 CP IV*.

Ainda, na análise que envolveu a idade das amostras e os valores obtidos para o D , foi possível verificar que não há uma relação entre os parâmetros avaliados, haja vista que a correlação entre os valores do D e a idade das amostras foi a de que apenas 8% da variação dos valores do D é explicada por sua relação com a idade das amostras para o traço *T01 CP V ARI*,

sendo tal relação inferior a 3% para o traço *T07 CP IV*, assim sendo, conclui-se que a variação dos valores do *D* advêm da própria realização dos ensaios. Desse modo, observou-se, também, que na idade de contaminação de 7 dias para o método proposto *Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³*, o coeficiente de variação dos valores do *D* encontrados foi menor do que pelos obtidos pelo método normatizado *NT BUILD 443 – NaCl 165g/dm³* para os traços submetidos a tal análise (*T01 CP VARI e T07 CP IV*). Além disso, constatou-se que o período de cura adotado nessa pesquisa para os traços foi plausível, visto que o *D* não apresentou tendência de diminuição de seu valor com o passar o tempo.

Por fim, encerram-se as conclusões alertando para o fato que a utilização da metodologia de ensaio proposta aqui para a idade de contaminação de 7 dias necessita da limpeza da superfície de contaminação, visto que, conforme comprovado por Bender (2016), esse processo permite a obtenção de perfis mais superficiais em baixas idades de contaminação com uma melhor conformidade. Além disso, deixa-se como sugestão para pesquisas futuras que sejam analisadas um número maior de amostras para idades de contaminação de 7, 14, 21 e 35 dias, a partir dos métodos propostos nessa pesquisa e do método proposto por Bender (2016), a fim de se realizar uma análise estatística mais aprofundada dos resultados encontrados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5733 **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR5736 **Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR5738 **Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR5739 **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR6118 **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR7215 **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR9778 **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 11579 **Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ m (nº 200)**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 12655 **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR NM 23 **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 43 **Cimento Portland– Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 52 **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 53 **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção d'água**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 65 **Cimento Portland – Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 67 **Concreto – Determinação da consistência de abatimento tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR NM 248 **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

- AITCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1ed. São Paulo: PINI, 2000. 667p.
- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**. v. 30. p. 1047 -1055, 2000.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORT OFFICIALS – ASSHTO. Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. **AASHTO T 259**. Washington, USA, 1980.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222. **Corrosion of metals in concrete**. ACI Journal. V. 82, 1985, 32p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 201.2R **Guide to Durable Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, 2001, 41p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration – C 1202-09**. Annual Book of ASTM Standard, v04.02., p589-598, 2009.
- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análises das manifestações patológicas nas estruturas no Estado de Pernambuco**. Porto Alegre: UFRGS, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. 148p.
- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão das armaduras: iniciação por cloretos**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 278p.
- ANDRADE, C. Ultimos avances en el calculo de la vida útil del hormigon estructural. In: **XXIX Jornadas sudaamericanas de ingenieria estructural**. 2000, Punta del Este, Uruguai. 31 p.
- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.
- ANDRADE, C. Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**. v.23, 1993, p. 724-742.
- ANDRADE, T. Tópicos sobre Durabilidade do Concreto. In:_____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2005. cap 25, p. 753-792.
- ANDRADE, J. J. O. Vida útil das Estruturas de Concreto. In:_____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2005. cap 31, p. 923-951.
- ANTÓN, C. G. **Influencia del contenido de humedad del hormigón sobre la difusividade del íon cloruro**. Tese (Doutorado). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2009.

- BENDER, J. A. M. **Desenvolvimento de ensaio de difusão acelerado em condição saturada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2016. 112p.
- BERTOLINI, L., ELSENER B., PEDEFERRI, P., REDAELLI, E., POLDER, R. B. **Corrosion of steel in Concrete, Prevention, Diagnosis, Repair**. Second, completely revised and enlarged edition. Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- BASHEER, P. M. A., GILLECE, P. R. V., LONG, A. E, Mc CARTER, W. J. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement & Concret Composites, USA**: Elsevier Science, 2002. p. 437-449.
- BIRNIN-YAURI, U. A., GLASSER, F. P. Friedel's salt, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl},\text{OH}).2\text{H}_2\text{O}$: Its solid solutions and their role in chloride binding. **Cement and Concrete Research**. v.28, 1998, p. 1713-17123.
- BRE. **The durability of steel in concret: part1; mechanism of protection and corrosion**. Garston, Building Research Establishment Digest, Digest 263, Jul. 1982, 7 p.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION **Structural use of concrete. Part 1: Code of Practice for Design in the Construction**. London, BS 8110, 1985.
- CABRAL, A. E. B. **Avaliação de sistemas de reparo utilizados em estruturas atacadas por cloretos, através da resistência de polarização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. 161 p.
- CALÇADA, L.M.L. **Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo estacionário de cloretos em concreto**. Tese (Doutorado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.
- CARCAÑO, R. S; MORENO, E. Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. **Revista de la Facultad de Ingenieria de la U.C.V**, Vol 21, N° 3, pp. 57-68, 2006.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**. 2. Ed. Goiânia: PINI e UFG, 1997. 237 p.
- CASCUDO, O. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Corrosão de Armaduras. In:_____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2005. cap 35, p. 1071-1108.
- CASCUDO, O. CARASEK, H. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In:_____. **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. cap 03, p. 42-112.

- CASTELLOTE, M. ANDRADE, C. ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**. n 31, 2001, p. 1411-1420.
- CLIMENT, M. A., VIQUEIRA, A., VERA, G., LÓPEZ-ATALAYA, M.M. Analysis of acid-soluble chloride in cement, mortar, and concrete by potentiometric titration without filtration steps. **Cement and Concrete Research**. n 29, 1999, p. 893-898.
- CLIMENT, M. A., VIQUEIRA, A., VERA, G., LÓPEZ-ATALAYA, M.M. Generalization of the possibility of eliminating the filtration step in the determination of acid soluble chloride content in cement and concrete by potentiometric titration. **Cement and Concrete Research**. n 34, 2004, p. 2291-2295.
- COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M.R. Estudo da influencia de cimentos na fluência em concretos para a construção civil. **Cerâmica**, n. 52, p 98-104, 2006.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1975. 414p.
- FEDUMENTI, M. B.; **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade com ênfase no transporte de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do vale dos Sinos. São Leopoldo, 2013. 136 p.
- FEREIRA, R. M., **Avaliação dos Ensaios de Durabilidade do Betão**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia do Minho, Guimarães, Portugal, 2000.
- FIELD, A. **Descobrendo a estatística usando SPSS**. Tradução Lorí Viali – 2. ed. – Porto Alegre: Artmed, 2009. 688p.
- FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: _____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2005. cap 27, p. 829-855.
- FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. R. **Corrosión de estructuras de hormigón**. Boletín Técnico ALCONPAT Internacional, Mérida: México, 2013. p.30.
- FRANCINETE JR.; FIGUEIREDO, E. J. P. **Estudo da difusão do oxigênio no concreto**. Boletim Técnico da EPUSP, BT/PCC/238, 1999.
- FREUND, J. E. **Estatística aplicada: economia, administração e contabilidade**. Tradução Claus Ivo Doering. – 11.ed. – Porto Alegre: Bookman, 2006. 536p.
- FUJIWARA, M.; MINOSAKU, K.; ONISHI, S. Repair methods for concrete bridges deteriorated by chloride ions. **Conference organized by the institution of civil engineers in cooperation with U.S. Strategic highway research program**. October 1990, Tara Hotel Kensington, London. p. 99-108.

- GASTALDINI, A. L. G; ISAIA, G. C. Efeitos de misturas compostas de pozolanas e escória na permeabilidade a cloreto. **Encontro Nacional em Tecnologia do Ambiente Construído**, 27. Salvador, 2000. Anais v.2, p. 1026-1033.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- GONZALEZ, J. A.; FELIÚ, S.; RODRIGUEZ, P.; RAMIREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part 1: when, how and much steel corrodes. **Materials and Structures**, v. 29, p 40-46, 1996.
- GUIMARÃES, A. T.; HELENE, P. **Influência do teor de umidade sobre a difusidade de cloretos na pasta de cimento**. Relatórios FAPESP processo 99/10909-7. São Paulo, 2001.
- GUIMARÃES, A.T.C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. São Paulo, 2000. Tese (Livre Docência). Universidade de São Paulo.
- GUIMARÃES, A. T.; HELENE, P. Models of variation of chloride ion diffusion as a function of changes in the saturation degree (sd) of concrete mixes prepared with a pozzolanic cement. **International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures**. 5-6 November, 2007, Guimarães, Portugal.
- GUIMARÃES, A. T. C.; ANTÓN, C. G.; 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. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 1. Ed, São Paulo: Pini, 1986. 47 p.
- HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: USP, 1993. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993. 271 p.
- HELENE, P. Vida útil das estruturas de concreto. **IV Congresso Iberoamericano de Patologias da Construção e VI Congresso de Controle de Qualidade**. Anais, v. 1. Porto Alegre, 1997. p 1-30.
- HELENE, P. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 4. ed. São Paulo: PINI, 1999. 47 p.
- HELENE, P. Corrosão das armaduras. In:_____. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. cap 01, p. 01-12.
- HOFFMANN, A.T.; DAL MOLIN, D. Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos na vida útil de concretos. **Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural**. Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2002. 30p.

- HOFFMANN, A.T.; **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos.** Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. 143 p.
- HUSNI, R.; BENITEZ, A.; MANZELLI, A. Acciones sobre las estructuras de hormigón. In ____: **Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón: preparación, refuerzo, y protección.** Cyted – Rehabilitar. Editores: Paulo Helene y Fernanda Pereira, 2003.
- ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. 280 p.
- JAERGMANN, C. Effect of water-cement ratio curing on chloride penetration into Mediterranean sea climate. **ACI Materials Journal.** v.87, n.4, 1990. p. 333-339.
- LIMA, M. G. **Influência dos componentes do concreto na corrosão das armaduras.** Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1990. 133 p.
- MAROCO, J. **Análise estatística – Com Utilização do SPSS.** 3. ed. Lisboa, 2007
- MEDEIROS, M. H. F., BORBA, A. Y., FILHO, J. H., HELENE, P. R. L. Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas. **Revista Escola de Minas,** Ouro Preto, v. 65, n.4, p.475-481, 2012.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 3.ed. São Paulo: PINI, 2008. 674 p.
- MEIRA, G.R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado.** Tese (Doutorado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004. p. 346.
- MENDES, M. V. A. S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa contendo adições minerais.** Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2009. p. 201.
- MINEO, N. J. , JÁUREGUI, N. Prevención de las patologías de las estructuras de hormigón armado em ambiente marino. **Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural.** Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2002.
- MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras.** Tese (Doutorado), EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 211 p.

- MONTEMOR, M. F.; SIMÕES, A. M. P.; SALTA, M. M. Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS. **Cement and Concret Composites**. v. 22. P. 175-185, 2000.
- MOREIRA, H. P. **Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2001. 16p.
- NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros em estructuras de hormigon armado danadas por corrosion de armaduras, estudio mediante la técnica de resistência de polarizacion**. Tesis (Doctoral) – Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 1992. 371 p.
- NEPOMUCENO, A. A. Mecanismos de transporte de fluídos no concreto. In: _____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2005. cap 26, p. 793-827.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.
- NT BUILD 443, **Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration**, NORDTEST, Espoo, Finland, November 1995.
- PAGE, C. L.; LAMBERT, P.; VASSIE, P. R. W. Investigation of reinforcement corrosion-electrochemical monitoring of steel in chloride contaminated concrete. **Materials and Structures**, v. 24, p. 351 – 358, 1991.
- PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 138p.
- POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. Monografia (Especialização em Avaliação e Perícia) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006. p. 191
- prEN 12390-11:2014 (European standard), **Testing hardened concrete – Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion**, April 2014.
- RIBEIRO, D.V. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: _____. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. cap 03, p. 38-50.
- RIBEIRO, D.V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: _____. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. cap 06, p. 87-118.

- RIBEIRO, D.V. Estrutura de poros e mecanismos de transporte no concreto. In:_____. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014b. cap 05, p. 75-85.
- RINCÓN, O. T. ; CARRUYO, A. R.; ANDRADE, C.; HELENE, P.; DÍAZ, I. **Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion em estructuras de hormigon armado**. DURAR – Red Tematica XV. B – Durabilidad de la armadura, 1998.
- RODRIGUES, F.T.; **Medição do grau de saturação e a difusão de íons cloreto em concretos executados com cimento de alta resistência inicial**. Dissertação (Mestrado Engenharia Oceânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009. 143 p.
- SALTA, M. M. **Resistência dos concretos à penetração dos cloretos. Previsão do tempo de iniciação da corrosão nas estruturas**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1999. 12p. (Boletim Técnico, COM 33.)
- SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em Estruturas), Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006. 161 p.
- SILVA FILHO, L.C.P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- SOUSA, C. A. C. Princípios da corrosão eletroquímica. In:_____. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. cap 02, p. 13-35.
- SOUZA, V.C.M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.
- TONG, L. GJORV, O.E. Chloride diffusivity based on migration testing. **Cement and Concrete Research**. n 31, 2001, p. 973-982.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- WEE T. H., SURYAVANSHI, A. K., TIN, S.S.. Influence of aggregate fraction in the mix on reliability of the rapid chloride permeability test. **Cement & Concrete Composites**, USA: Elsevier Science, v. 21, n1, 1999. P. 59-72
- WHITING, D. Rapid Measurement of the chloride permeability of concrete. **Final Report Portland Cement Association, Skokie, IL. Construction Technology Labs**. 1981.

ANEXO 01 – FICHA TÉCNICA RESINA EPÓXI

COMPOUND ADESIVO

Produto

COMPOUND ADESIVO é um adesivo estrutural de base epóxi que apresenta altas resistências em baixas idades, média fluidez, possibilitando grande facilidade para manuseio. Proporciona alto rendimento e excelente aderência a vários tipos de substratos, sendo indicado para colagem, mesmo entre si, de concreto, ferro, madeira, pedra etc. Oferece ótima resistência a água, óleo, graxa e meio agressivo. Pode ser aplicado em superfícies úmidas, embora não encharcadas. COMPOUND ADESIVO apresenta resistência inicial em 24 horas e resistência máxima final 7 dias depois da aplicação.

Características do componente A

Densidade: + B : 1,80 g/cm³

Aparência: Branco(a)

Composição básica: Resina epóxi.

Validade: 12 meses

Características do componente B

Aparência: Preto(a)

Composição básica: Poliamina.

Validade

12 meses

Campos de aplicação

- colagem de concreto, ferro, madeira, azulejo, cerâmica, pedra, fibrocimento, vidro e plásticos;
- reparos em concreto;

COMPOUND ADESIVO

- ancoragens;
- chumbamentos.

Preparo do substrato

As superfícies a serem coladas ou reparadas devem estar limpas, porosas, isentas de pó, oleosidade e partículas soltas. Para aplicação em vidros e plásticos, a superfície deve ser previamente lixada. No caso de ancoragens e chumbamentos, executar os furos de acordo com o projeto. Em seguida, fazer a limpeza com jato de ar ou água, eliminando qualquer partícula solta. Geralmente o diâmetro do furo deve ser 1 diâmetro-padrão acima do diâmetro da barra. Exemplo: uma barra de aço CA-50 de 8 mm a ser ancorada deve ter um furo de 10 mm.

Preparo do produto

Executar uma pré-mistura dos componentes A e B separadamente, em suas respectivas embalagens. Adicionar então o componente B na embalagem do componente A e misturar perfeitamente os 2 componentes, utilizando uma espátula ou misturador mecânico, até a obtenção de uma massa homogênea de cor cinza e sem grumos. Utilizar o produto em, no máximo, 50 minutos, à temperatura de 25 °C, depois de realizada a mistura. Caso não seja utilizado todo o conjunto de uma só vez, misturar os componentes na proporção 1:1 (componente A:componente B), em peso.

Aplicação

COMPOUND ADESIVO é aplicado como pintura, com pincel, trincha ou espátula, preenchendo todas as superfícies a serem coladas ou reparadas, respeitando o consumo. Os materiais que serão colados ou reparados devem ser colocados em contato o mais rápido possível, respeitando o prazo máximo de até 50 minutos após a mistura do COMPOUND ADESIVO. Para as ancoragens e chumbamentos o COMPOUND ADESIVO deve ser vertido no furo em sua totalidade. As peças a serem ancoradas ou

COMPOUND ADESIVO

chumbadas devem ser colocadas sob pressão e com leves movimentos de rotação, até atingir a profundidade determinada em projeto. Deixar as peças de ancoragens ou chumbamentos imóveis, até a secagem completa do produto que pode variar de acordo com a temperatura ambiente.

Consumo aproximado

-Colagens e reparos: mínimo 1,8 kg/m²/mm

-Ancoragens e chumbamentos: varia conforme diâmetros do furo, diâmetro da barra e profundidade de ancoragem, vide fórmulas e tabela.

Fórmula 1 - $VF = (Df - Db) \times L$

Fórmula 2 - $Cp = VF \times Dp$

VF - Volume do furo (cm³);

Df - Diâmetro do furo (cm);

Db - Diâmetro da barra (cm);

L - Profundidade de ancoragem (nota: geralmente, considera-se 10 vezes o diâmetro da barra) (cm);

Cp - Consumo aproximado (g);

DP - Densidade do produto (g/cm³).

Rendimento

Lata de 1 kg (A+B) - 0,55 m²/mm

Armazenamento

Estocar o produto em local coberto, fresco, seco e ventilado, fora do alcance de crianças, animais e longe de fontes de calor.

Atenção

Aplicar com tempo estável. O tempo de secagem varia de acordo com a temperatura

COMPOUND ADESIVO

ambiente. Recomenda-se cobrir objetos a fim de evitar danos com respingos. Limpar as ferramentas imediatamente após o uso com solvente, como o SOLVENTE EPOXY. Quando for necessário um adesivo que não escorra, utilizar COMPOUND ADESIVO TIX e, se for necessário um adesivo de grande fluidez, utilizar COMPOUND ADESIVO GEL. Manutenção: esse produto, segundo a ABNT NBR 15575 - Edificações habitacionais - Desempenho, é considerado não manutenível. ADVERTÊNCIA A não utilização da proporção correta dos componentes A e B pode acarretar perda de desempenho.

Meio ambiente

Contatar o órgão ambiental local, no caso de vazamento ou contaminação de águas superficiais, mananciais ou solos.

Descartar os resíduos em instalação autorizada, de acordo com a legislação ambiental vigente.

Descartar os resíduos em instalação autorizada, de acordo com a legislação ambiental vigente.

Evitar que o produto atinja bueiros e cursos de água.

EPI (Equipamento de proteção individual)

Óculos de segurança

Máscara semifacial com filtro adequado para vapores orgânicos

Luvas de PVC.

Avental de PVC.

Primeiros socorros componente A

Contato com os olhos: lavar com bastante água corrente, durante pelo menos 15 minutos. Procurar um médico.

Contato com a pele: remover o produto com pano limpo e lavar com bastante água corrente e sabão neutro.

COMPOUND ADESIVO

Inalação: remover para ambiente fresco e ventilado.

Ingestão: não provocar vômito. Procurar um médico.

Primeiros socorros componente B

Contato com os olhos: lavar com bastante água corrente, durante pelo menos 15 minutos. Procurar um médico.

Contato com a pele: remover o produto com pano limpo e lavar com bastante água corrente e sabão neutro.

Inalação: remover para ambiente fresco e ventilado.

Ingestão: não provocar vômito. Procurar um médico.

Informações técnicas

Ponto de fulgor maior que 200 °C

Embalagens

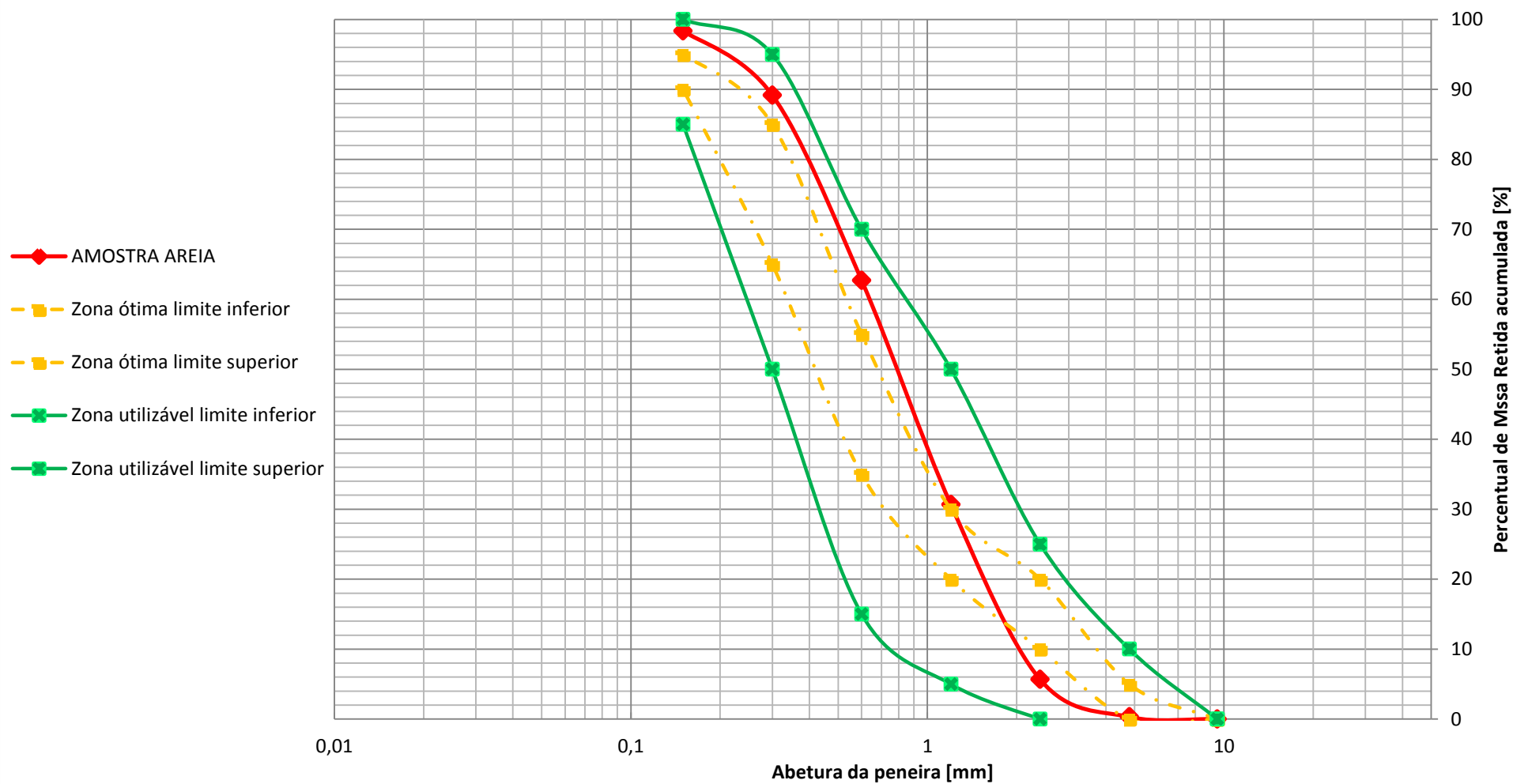
COMPOUND ADESIVO



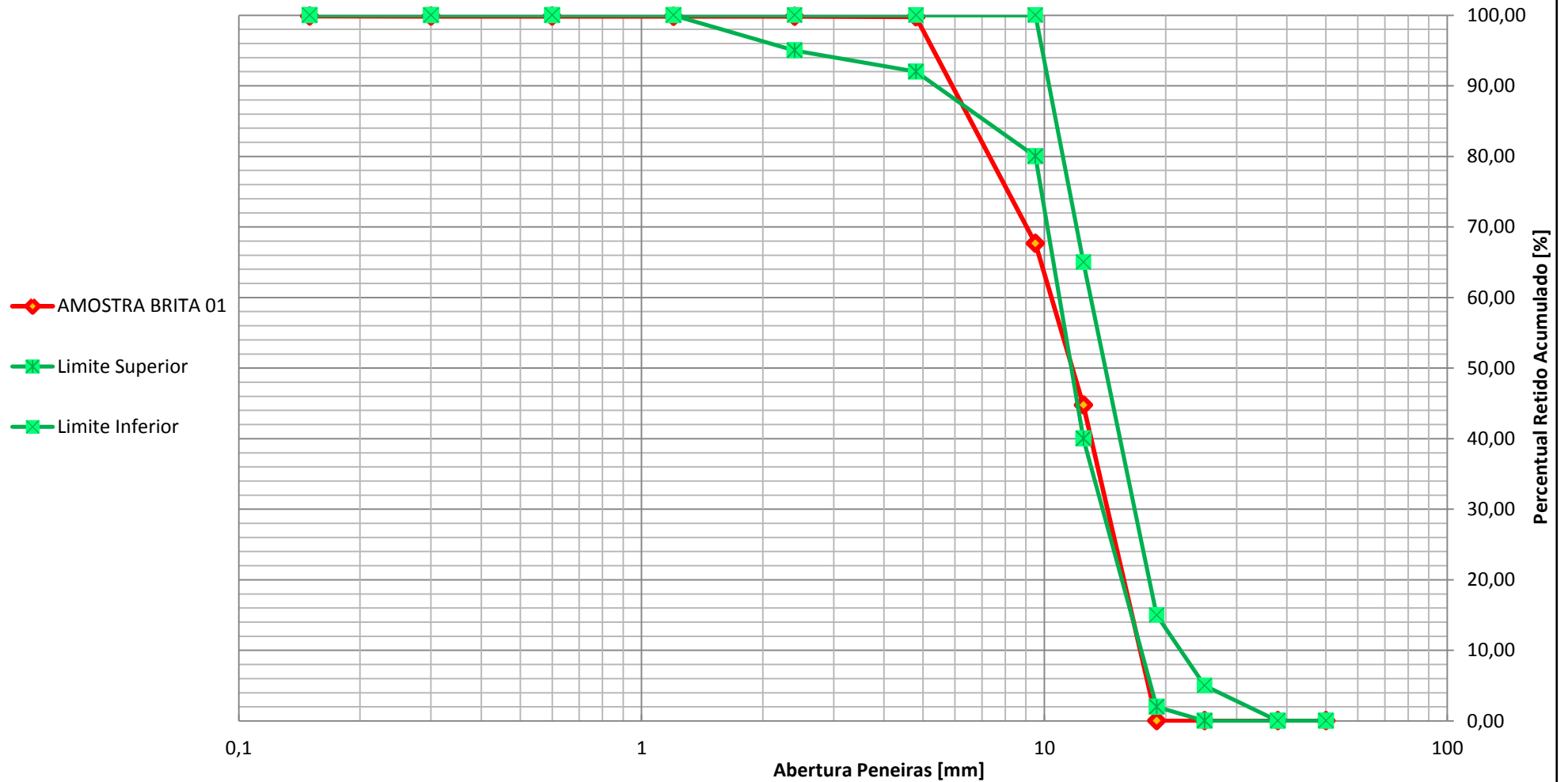
Lata de 1 kg (A+B)
dimensões: 11 X 20 X 11 cm

APÊNDICE 01–CURVAS GRANULOMÉTRICAS AGREGADOS

AGREGADO MIÚDO



AGREGADO GRAÚDO



APÊNDICE 02 – RESULTADOS SPSS STATISTIC T01 CP V ARI

Teste Mann-Whitney T01 CP V ARI - NaCl 250g/dm³ - 7 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	2,00	4,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 7dias	2	3,00	6,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	1,000
Wilcoxon W	4,000
Z	-,775
Significância Sig. (bilateral)	,439
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,667 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney T01 CP V ARI - NaCl 250g/dm³ - 21 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	2,50	5,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 21dias	2	2,50	5,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	2,000
Wilcoxon W	5,000
Z	,000
Significância Sig. (bilateral)	1,000
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	1,000 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney T01 CP V ARI - NaCl 250g/dm³ - 35 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	3,00	6,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 35dias	2	2,00	4,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	1,000
Wilcoxon W	4,000
Z	-,775
Significância Sig. (bilateral)	,439
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,667 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney T01 CP V ARI - NaCl 0,5 M - 90 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm³ - 35 dias	2	2,50	5,00
	NaCl 0,5M - 90 dias	1	1,00	1,00
	Total	3		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	1,000
Z	-1,225
Significância Sig. (bilateral)	,221
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,667 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney T01 CP V ARI - NaCl 0,5 M - 90 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³ - 7dias	2	2,50	5,00
	NaCl 0,5M - 90 dias	1	1,00	1,00
	Total	3		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	1,000
Z	-1,225
Significância Sig. (bilateral)	,221
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,667 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney T01 CP V ARI - NaCl 0,5 M - 90 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 21dias	2	2,50	5,00
	NaCl 0,5M - 90 dias	1	1,00	1,00
	Total	3		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	1,000
Z	-1,225
Significância Sig. (bilateral)	,221
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,667 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney T01 CP V ARI - NaCl 0,5 M - 90 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 35dias	2	2,00	4,00
	NaCl 0,5M - 90 dias	1	2,00	2,00
	Total	3		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	1,000
Wilcoxon W	4,000
Z	,000
Significância Sig. (bilateral)	1,000
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	1,000 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

**APÊNDICE 03 – RESULTADOS SPSS STATISTIC T01 CP V
ARI+10% S.A.**

Teste Mann-Whitney - T03 CP V ARI +10% S.A. - NaCl 250g/dm³ - 7 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	2,50	5,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 7dias	2	2,50	5,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	2,000
Wilcoxon W	5,000
Z	,000
Significância Sig. (bilateral)	1,000
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	1,000 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney T03 CP V ARI +10% S.A. - NaCl 250g/dm³ - 14 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	2,50	5,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 14dias	2	2,50	5,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	2,000
Wilcoxon W	5,000
Z	,000
Significância Sig. (bilateral)	1,000
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	1,000 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney T03 CP V ARI +10% S.A. - NaCl 250g/dm³ - 21 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	3,50	7,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 21dias	2	1,50	3,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	3,000
Z	-1,549
Significância Sig. (bilateral)	,121
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,333 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney T03 CP V ARI +10% S.A. - NaCl 250g/dm³ - 35

dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	3,50	7,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 35dias	2	1,50	3,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	3,000
Z	-1,549
Significância Sig. (bilateral)	,121
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,333 ^b

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

APÊNDICE 04 – RESULTADOS SPSS STATISTIC T07 CP IV

Teste Mann-Whitney TRAÇO T07 CP IV - NaCl 250g/dm³ - 7 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	1,50	3,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 7dias	2	3,50	7,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	3,000
Z	-1,549
Significância Sig. (bilateral)	,121
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,333 ^b
Sig exata (bilateral)	,333
Sig exata (unilateral)	,167
Probabilidade de ponto	,167

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney TRAÇO T07 CP IV - NaCl 250g/dm³ - 14 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	1,50	3,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 14dias	2	3,50	7,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	3,000
Z	-1,549
Significância Sig. (bilateral)	,121
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,333 ^b
Sig exata (bilateral)	,333
Sig exata (unilateral)	,167
Probabilidade de ponto	,167

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney TRAÇO T07 CP IV - NaCl 250g/dm³ - 21 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	2,50	5,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 21dias	2	2,50	5,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	2,000
Wilcoxon W	5,000
Z	,000
Significância Sig. (bilateral)	1,000
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	1,000 ^b
Sig exata (bilateral)	1,000
Sig exata (unilateral)	,667
Probabilidade de ponto	,333

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney TRAÇO T07 CP IV - NaCl 250g/dm³ - 35 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	2,50	5,00
	Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm ³ - 35dias	2	2,50	5,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	2,000
Wilcoxon W	5,000
Z	,000
Significância Sig. (bilateral)	1,000
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	1,000 ^b
Sig exata (bilateral)	1,000
Sig exata (unilateral)	,667
Probabilidade de ponto	,333

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney TRAÇO T07 CP IV - GH - 7 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	1,50	3,00
	GH - 7 dias	1	3,00	3,00
	Total	3		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	3,000
Z	-1,225
Significância Sig. (bilateral)	,221
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,667 ^b
Sig exata (bilateral)	,667
Sig exata (unilateral)	,333
Probabilidade de ponto	,333

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney TRAÇO T07 CP IV - GH - 14 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	1,50	3,00
	GH - 14 dias	2	3,50	7,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	3,000
Z	-1,549
Significância Sig. (bilateral)	,121
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,333 ^b
Sig exata (bilateral)	,333
Sig exata (unilateral)	,167
Probabilidade de ponto	,167

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney TRAÇO T07 CP IV - GH - 21 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	1,50	3,00
	GH - 21 dias	2	3,50	7,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	3,000
Z	-1,549
Significância Sig. (bilateral)	,121
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,333 ^b
Sig exata (bilateral)	,333
Sig exata (unilateral)	,167
Probabilidade de ponto	,167

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.

Teste Mann-Whitney TRAÇO T07 CP IV - GH - 35 dias

Postos

	Ensaio	N	Posto Médio	Soma de Classificações
Coef_Difusao	NT BUILD 443 - NaCl 165g/dm ³ - 35 dias	2	1,50	3,00
	GH - 35 dias	2	3,50	7,00
	Total	4		

Estatísticas de teste^a

	Coef_Difusao
U de Mann-Whitney	,000
Wilcoxon W	3,000
Z	-1,549
Significância Sig. (bilateral)	,121
Sig exata [2*(Sig. de 1 extremidade)]	,333 ^b
Sig exata (bilateral)	,333
Sig exata (unilateral)	,167
Probabilidade de ponto	,167

a. Variável de Agrupamento: Ensaio

b. Não corrigido para vínculos.