

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

ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DURABILIDADE
DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO COM BASE NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE
DE DIFUSÃO DE CLORETOS

por

Félix Krolow Sell Junior

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, Março, 2020

ANÁLISE DOS PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DURABILIDADE
DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO COM BASE NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE
DE DIFUSÃO DE CLORETOS

Por

Félix Krolow Sell Junior
Engenheiro Civil

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

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães

EE/FURG

Prof. Dr. Cesar Antonio Oropesa Avellaneda

PPGCEM/UFPEL

Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 19 de Março de 2020

**“CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO COM BASE EM INDICADORES
DE DURABILIDADE: MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO”**

FÉLIX KROLOW SELL JUNIOR

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de:

MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Tendo sido aprovada em sua forma final pela Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica



Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do PPGeo/FURG

Banca Examinadora:



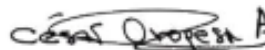
Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães
Orientador – PPGeo/FURG



Prof. Dr. Mauro Vasconcellos Real
Membro Interno – PPGeo/FURG



Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães
Membro Interno – EE/FURG



Prof. Dr. César Antonio Oropesa Avellaneda
Membro Externo – UFPel

Ficha Catalográfica

S467a Sell Junior, Félix Krolow.

Análise dos procedimentos de avaliação do potencial de durabilidade das estruturas de concreto com base na determinação do coeficiente de difusão de cloretos / Félix Krolow Sell Junior. – 2020.

144 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2020.

Orientador: Dr. Fábio Costa Magalhães.

1. Concreto em Ambiente Marinho 2. Íons Cloreto 3. Durabilidade
4. Difusão I. Magalhães, Fábio Costa II. Título.

CDU 693.5

Catologação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me abençoar todos os dias e me dar forças para encarar os desafios;

Aos meus pais, Félix Krolow Sell e Andreia Teixeira Sell, por todo apoio, ajuda e incentivo destinados a mim;

Aos meus amigos e familiares que sempre estiveram ao meu lado;

Ao meu orientador Fábio Costa Magalhães, por me ajudar da melhor forma, sempre se dedicando e passando o seu conhecimento de maneira brilhante;

Ao Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães, pela colaboração na realização deste trabalho e auxílio na realização de ensaios;

Ao colega e amigo que o mestrado me proporcionou Gustavo Bosel Wally, com quem dividi o laboratório durante a realização dos ensaios realizados neste estudo;

Ao meu tio e laboratorista do IFRS Fernando Ritiéle Teixeira, por todo apoio, incentivo e auxiliar na realização de caracterização de materiais utilizados na pesquisa, produção dos concretos e execução dos ensaios;

Aos bolsistas Matheus L. Moraes e Angelina R. de Mattos do IFRS pelo auxílio na realização dos ensaios;

Aos laboratoristas da FURG Luciano L. da Silva e Júlio Cezar P. de Oliveira, pelo auxílio no preparo de amostras de concreto e realização de ensaios;

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC), do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Rio Grande, onde foi desenvolvido o programa experimental apresentado nesta pesquisa;

Ao Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), pelo auxílio prestado em etapas da execução do programa experimental desta pesquisa;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO), por me proporcionar a oportunidade de fazer parte do programa de mestrado;

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica pelos conhecimentos transmitidos;

À Universidade Federal do Rio Grande;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O concreto é o material mais largamente utilizado na construção civil, sendo também o material de construção mais utilizado na construção de estruturas costeiras e marinhas. No entanto, esse material pode apresentar diversos problemas relacionados ao seu desempenho, principalmente relacionados à sua durabilidade. A durabilidade de estruturas de concreto armado pode ser afetada por vários processos de deterioração, sendo a ação dos íons cloreto presentes na água do mar considerada a maior ameaça à durabilidade de estruturas de concreto armado. A ação dos íons cloreto em estruturas de concreto armado é responsável pela despassivação das armaduras, desencadeando o processo corrosivo do aço, causando uma ação expansiva e, conseqüentemente, vindo a deteriorar o concreto. O processo de difusão de cloretos é considerado o principal mecanismo que rege a penetração de íons cloreto em uma estrutura de concreto armado. Neste sentido o presente trabalho tem como objetivo avaliar os procedimentos de ensaios e os resultados de três diferentes metodologias de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto. Os concretos analisados foram produzidos com diferentes relações água/aglomerante (0,45; 0,55; 0,65) e substituição parcial do cimento por sílica ativa nas porcentagens de 5, 10 e 20 %. Foram também realizados ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade. As metodologias utilizadas para determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto foram da ASTM C1556 (2016), NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012). Com relação à determinação do coeficiente de difusão por meio das três diferentes metodologias, os métodos da UNE 83987 (2012) e NT Build 492 (1999) apresentaram a menor média de resultados para o coeficiente de difusão. Já a média de resultado do coeficiente de difusão de cloretos obtido pelo método da ASTM C1556 (2016) apresenta resultados mais elevados. Nos resultados obtidos para o coeficiente de difusão para as três metodologias de determinação do coeficiente de difusão de cloretos, os concretos com menor relação água/aglomerante e com substituição parcial de cimento por sílica ativa apresentaram resultados mais próximos, sendo que a medida em que aumentou a relação água/aglomerante os resultados para o coeficiente de difusão apresentaram maior diferença. Em geral os métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto realizados neste estudo apresentaram boa relação e correlação, sendo constatada excelente correlação do rápido método da NT Build 492 (1999) com os resultados da consolidada metodologia do método da ASTM C1556 (2016).

Palavras-chaves: concreto em ambiente marinho, íons cloreto, durabilidade, difusão.

ABSTRACT

Concrete is the most widely used material in civil construction, and it is also the most widely used construction material in the construction of coastal and marine structures. However, this material can present several problems related to its performance, mainly related to its durability. The durability of reinforced concrete structures can be affected by various deterioration processes, with the action of chloride ions present in seawater being considered the greatest threat to the durability of reinforced concrete structures. The action of chloride ions in reinforced concrete structures is responsible for the depassivation of the reinforcement, triggering the corrosive process of the steel, causing an expansive action and, consequently, deteriorating the concrete. The chloride diffusion process is considered the main mechanism that governs the penetration of chloride ions into a reinforced concrete structure. In this sense, the present work aims to evaluate the test procedures and the results of three different methodologies for determining the chloride diffusion coefficient in concrete. The analyzed concretes were produced with different water/binder ratios (0.45; 0.55; 0.65) and partial replacement of cement by silica fume in the percentages of 5, 10 and 20%. Compressive strength and capillary water absorption tests were also carried out. The methodologies used to determine the diffusion coefficient of chlorides in concrete were from ASTM C1556 (2016), NT Build 492 (1999) and UNE 83987 (2012). Regarding the determination of the diffusion coefficient using the three different methodologies, the methods of UNE 83987 (2012) and NT Build 492 (1999) showed the lowest average results for the diffusion coefficient. The average result of the chloride diffusion coefficient obtained by the method of ASTM C1556 (2016) shows higher results. In the results obtained for the diffusion coefficient for the three methodologies for determining the diffusion coefficient of chlorides, concretes with a lower water/binder ratio and with partial replacement of cement by silica fume showed closer results, and the extent to which it increased the water/binder ratio, the results for the diffusion coefficient showed a greater difference. In general, the methods for determining the diffusion coefficient of chlorides in the concrete carried out in this study showed a good relationship and correlation, with an excellent correlation between the fast method of the NT Build 492 (1999) and the results of the consolidated methodology of the method of the ASTM C1556 (2016).

Keywords: concrete in marine environment, chloride ions, durability, diffusion.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	22
1.1. Considerações iniciais.....	22
1.2. Motivação.....	23
1.3. Justificativa	24
1.4. Objetivos	24
1.4.1. Objetivo geral.....	24
1.4.2. Objetivos específicos	25
1.5. Limitação da pesquisa	25
1.6. Delimitação da pesquisa.....	25
1.7. Estrutura do trabalho	26
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. Processos de deterioração do concreto em ambiente marinho.....	27
2.2. Mecanismos de transporte de cloretos	31
2.2.1. Absorção capilar.....	32
2.2.2. Difusão	33
2.2.3. Migração	35
2.2.4. Permeabilidade.....	36
2.2.5. Considerações gerais referente aos mecanismos de transporte de cloretos	38
2.3. Conceitos de vida útil.....	39
2.4. Ação dos íons cloreto	43
2.4.1. Fontes de cloretos para o concreto	43
2.4.2. Tipos de cloretos no concreto.....	44
2.4.3. Teor crítico de cloretos.....	45
2.4.4. Fatores que influenciam o ingresso de cloretos no concreto	46
Relação água/aglomerante.....	46
Aglomerantes e adições.....	47
Cobrimento do concreto	50
Temperatura.....	51
Umidade relativa	52
Cura	52
Zona de exposição	53
Grau de saturação	54

2.5. Indicadores de durabilidade	55
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	62
3.1. Variáveis estudadas	62
3.2. Propriedades estudadas	63
3.3. Delineamento da pesquisa.....	63
3.4. Fluxograma do programa experimental	65
3.5. Caracterização dos materiais.....	66
3.5.1. Cimento.....	66
3.5.2. Sílica ativa.....	66
3.5.3. Agregado graúdo.....	67
3.5.4. Agregado miúdo.....	68
3.5.5. Aditivo químico.....	71
3.5.6. Água.....	71
3.5.7. Cloreto de sódio	72
3.5.8. Hidróxido de cálcio.....	72
3.5.9. Hidróxido de sódio.....	72
3.6. Dosagem.....	72
3.7. Preparação das amostras	73
3.7.1. Produção dos concretos.....	73
3.7.2. Moldagem e cura dos corpos de prova.....	74
3.7.3. Preparação dos corpos de prova para ensaios de durabilidade	74
3.7.4. Seleção das amostras.....	77
3.8. Ensaios	78
3.8.1. Resistência à compressão.....	78
3.8.2. Absorção de água por capilaridade	79
3.8.3. Ensaio de coeficiente de difusão aparente de cloretos - ASTM C1556.....	81
Ensaio de potenciometria	83
3.8.4. Ensaio de migração de cloretos - NT Build 492	85
3.8.5. Ensaio acelerado de migração de cloretos - UNE 83987.....	90
3.8.6. Classificação dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão quanto a penetração de cloretos	94
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	96
4.1. Resistência à compressão.....	96
4.2. Absorção de água por capilaridade	98

4.3. Ensaio de coeficiente de difusão aparente de cloretos - ASTM C1556	101
4.4. Ensaio de migração de cloretos - NT Build 492	103
4.5. Ensaio acelerado de migração de cloretos - UNE 83987	105
4.6. Comparativo dos diferentes métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto	108
4.7. Relação entre ensaios de determinação do coeficiente de difusão, ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade.....	111
4.8. Correlação entre os ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos	114
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	116
5.1. Principais conclusões	116
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	118
REFERÊNCIAS	120
APÊNDICE A	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema dos fatores relevantes na qualidade do concreto e de sua espessura de cobrimento (Fonte: ALEXANDER, 2018).	29
Figura 2.2 - Processos de transporte de massa no concreto (Fonte: HELENE, 1993).....	31
Figura 2.3 - Representação esquemática do modelo do modelo de vida útil proposto por Tuutti (Fonte: Adaptado de Tuutti, 1982).	42
Figura 2.4 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras (Fonte: Adaptado de Helene, 1993).	43
Figura 3.1 – Delineamento da pesquisa.	64
Figura 3.2 – Fluxograma do programa experimental.....	65
Figura 3.3 - Composição granulométrica brita, conforme a NBR NM 248(2003).	68
Figura 3.4 - Distribuição granulométrica da areia fina, conforme a NBR NM 248 (2003).	70
Figura 3.5 – Distribuição granulométrica da areia média, conforme a NBR NM 248 (2003).	71
Figura 3.6 – Realização corte em corpos de prova.	75
Figura 3.7 – Corpos de prova impermeabilizados com pintura epóxi.	75
Figura 3.8 – Detalhe de como foi o realizado corte dos corpos de prova para ASTM C1556 (2016).	76
Figura 3.9 – Detalhe de como foi realizado corte dos corpos de prova para NT Build 492 (1999). ..	76
Figura 3.10 – Detalhe de como foi realizado corte dos corpos de prova para UNE 83987 (2012). ..	77
Figura 3.11 – Esquema seleção das amostras para realização dos ensaios de penetração de cloretos.	78
Figura 3.12 – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos.	79
Figura 3.13 – Realização ensaio de absorção de água por capilaridade.	80
Figura 3.14 – Imersão dos corpos de prova para realização ensaio ASTM C1556.	81
Figura 3.15 – Furadeira vertical utilizada para extração de amostras de pó, ensaio ASTM C1556. ..	82
Figura 3.16 – Processo de fervura das amostras em preparação para ensaio de potenciometria.	84
Figura 3.17 – Realização do ensaio de potenciometria.....	85
Figura 3.18 – Conjunto com corpo de prova para realização do ensaio da NT Build 492.	86
Figura 3.19 – Disposição da instalação do ensaio da NT Build 492 (Fonte: Adaptado de NT Build 492, 1999).	87
Figura 3.20 – Realização ensaio NT Build 492.	88
Figura 3.21 – Amostra após pulverização de solução de nitrato de prata.	89
Figura 3.22 – Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos (Fonte: Adaptado de NT Build 492, 1999).	89
Figura 3.23 – Ilustração aparato utilizado no ensaio UNE 83987 (Fonte: Adaptado de UNE 83987, 2012).	91
Figura 3.24 – Realização ensaio UNE 83987.	92
Figura 3.25 – Esquema determinação do <i>time lag</i> (τ), e período dos regimes estacionário e não estacionário (Fonte: Adaptado de Ribeiro, 2018).	92
Figura 4.1 – Resultados resistência à compressão média.	97
Figura 4.2 – Alterações resistência à compressão em relação ao concreto REF 45.	98
Figura 4.3 – Resultado absorção de água por capilaridade média.	99
Figura 4.4 – Alteração absorção de água por capilaridade em relação concreto REF 45 ao final do ensaio.	100
Figura 4.5 – Coeficiente de difusão aparente de cloretos – ASTM C1556.....	102
Figura 4.6 – Alteração Coeficiente aparente de cloretos (Da) em relação ao concreto REF 45.	102
Figura 4.7 – Coeficiente de difusão por migração de cloretos – NT Build 492.	104
Figura 4.8 – Alteração coeficiente de difusão de cloretos (Dnssm) em relação ao concreto REF 45.	104

Figura 4.9 – Coeficiente de difusão por migração – UNE 83987.....	107
Figura 4.10 – Alteração coeficiente de difusão de cloretos no regime não estacionário (Dns) em relação ao concreto REF 45.	107
Figura 4.11 – Resultado ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos.....	109
Figura 4.12 – Alterações coeficiente de difusão de cloretos em concretos dos métodos estudados em relação ao concreto REF 45.	110
Figura 4.13 – Relação entre ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos e relação água/cimento.	112
Figura 4.14 - Relação entre ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos e substituição parcial do cimento por sílica ativa.	113
Figura 4.15 – Relação entre ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto e ensaio de resistência à compressão.....	114
Figura 4.16 – Correlação entre resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto.	115
Figura A. 1 – Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço REF 45.	136
Figura A. 2 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço SA 5.	137
Figura A. 3 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço SA 10.	137
Figura A. 4 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço SA 20.	138
Figura A. 5 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço REF 55.....	138
Figura A. 6 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço REF 65.....	139
Figura A. 7 – Gráfico concentração de cloretos <i>versus</i> tempo, UNE 83987, traço REF 45.....	140
Figura A. 8 - Gráfico concentração de cloretos <i>versus</i> tempo, UNE 83987, traço SA 5.	141
Figura A. 9 - Gráfico concentração de cloretos <i>versus</i> tempo, UNE 83987, traço SA 10.	141
Figura A. 10 - Gráfico concentração de cloretos <i>versus</i> tempo, UNE 83987, traço REF 55.....	142
Figura A. 11 - Gráfico concentração de cloretos <i>versus</i> tempo, UNE 83987, traço REF 65.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto.....	45
Tabela 2.2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.	51
Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II Z 40.	66
Tabela 3.2- Características físicas e químicas.	67
Tabela 3.3 – Composição química sílica ativa.	67
Tabela 3.4 – Caracterização agregado graúdo.	68
Tabela 3.5 – Caracterização areia fina.	69
Tabela 3.6 – Características areia média	70
Tabela 3.7 – Características aditivo plastificante.	71
Tabela 3.8 – Resultado do ajuste de dosagem experimental.	73
Tabela 3.9 – Traços unitários utilizados na moldagem dos corpos de prova.	73
Tabela 3.10- Dimensões corpos de prova por ensaio de durabilidade.	75
Tabela 3.11 – Voltagem e duração do ensaio NT Build 492.	88
Tabela 3.12 – Classificação coeficiente de difusão quanto a penetração de íons cloreto.	95
Tabela 4.1 – Resistência à compressão média.	96
Tabela 4.2 – Absorção de água por capilaridade média.	99
Tabela 4.3 – Coeficiente de difusão aparente de cloretos – ASTM C1556.....	101
Tabela 4.4 – Coeficiente de difusão por migração de cloretos – NT Build 492.	103
Tabela 4.5 – Migração acelerada de cloretos – UNE 83987.	106
Tabela 4.6 – Resultado ensaio de determinação do coeficiente de difusão de cloretos.	108
Tabela 4.7 – Resultado ensaios de resistência a compressão, absorção de água por capilaridade e penetração de cloretos.	112
Tabela 4.8 – Percentuais de alteração dos concretos estudados em relação ao concreto REF 45. ..	113
Tabela A. 1 – Resultados obtidos ensaio de absorção de água por capilaridade.....	134
Tabela A. 2 – Concentração de cloretos em massa para os concretos estudados em relação a profundidade analisada.	136
Tabela A. 3 – Dados obtidos na realização do ensaio da NT Build 492 (1999).	139
Tabela A. 4 – Concentração de cloretos <i>versus</i> tempo.	140
Tabela A. 5 – Dados utilizados para determinação do coeficiente de difusão no estado estacionário. (Ds).....	143
Tabela A. 6 – Dados utilizados para determinar o Fluxo de íons (J_{ci}) para coeficiente de difusão no estado estacionário (Ds).	143
Tabela A. 7 – Dados utilizados para determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário (Dns).	144

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Limites de norma para o teor total de cloretos.....	46
Quadro 2.2 – Comparativo das normas de ensaios de durabilidade.	60
Quadro 3.1 – Resumo dos ensaios realizados e métodos empregados.	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos Maiúsculos

A	Termo constante que pode ser obtido a partir dos resultados experimentais
A	Seção do meio poroso (m^2)
C	Concentração
C_{cl}	Concentração de íons cloreto na célula catódica
$C_i(x)$	Concentração da espécie iônica
C_s	Concentração superficial da substância em difusão
$C(x, t)$	Concentração da substância a uma distância x
D	Coeficiente de difusão
D_i	Coeficiente de difusão
D_a	Coeficiente de difusão aparente de cloretos
D_{ns}	Coeficiente de difusão em regime não estacionario
D_{nssm}	Coeficiente de migração no estado não estacionário
D_s	Coeficiente de difusão em regime estacionario
D_{wff}	Coeficiente de difusão efetivo
$D(\theta)$	Difusividade hidráulica
$E(x)$	Potencial elétrico aplicado em função da profundidade
F	Constante de Faraday
H	Altura da coluna d'água (m)
J	Fluxo dos íons cloreto
J_{cl}	Fluxo de íons cloreto
J_i	Fluxo da espécie iônica
K	Constante de Boltzmann
L	Comprimento da amostra (m)
K_h	Permeabilidade hidráulica (m/s)

R	Constante universal dos gases
S	Absortividade do material
T	Temperatura
V	Volume da célula catódica contendo cloretos
$V_i(x)$	Velocidade de convecção de i
V_f	Velocidade de escoamento fluido (m/s)

Símbolos Romanos Minúsculos

dc/dt	Inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos versus tempo
e	Carga elétron
erf	Função complementar do erro de gauss
h	Altura de ascensão capilar
l	Espessura da amostra de concreto analisada
i	Volume acumulado de água absorvida por unidade de área
$k(\theta)$	Condutividade hidráulica
q	Volume de água transportado
q_m	Fluxo de massa
r	Raio do poro
t	Tempo
x	Profundidade
z	Valência dos íons
z_i	Valência da espécie iônica

Símbolos Gregos

ψ	Potencial capilar
θ	Teor de umidade do concreto
γ	Tensão superficial
ρ	Densidade do liquido

ΔE	Diferença de potencial aplicada
μm	Micrómetro
α	teor de argamassa seca ideal
σ	Desvio padrão
γ	Coefficiente de atividade da solução da célula catódica
$\Delta\Phi$	Tensão média que efetivamente atravessa o corpo de prova
τ	<i>Time lag</i>

Fórmulas químicas

$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaCl}_2.10\text{H}_2\text{O}$	Sal de Friedel
$3\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{CaCl}_2.10\text{H}_2\text{O}$	Cloroferratos de cálcio hidratado
AgNO_3	Nitrato de prata
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
Ca^{2+}	Cálcio
CaCl_2	Cloreto de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CL^-	Cloreto
CL	Cloro
CO_2	Dióxido de carbono
Cu_2O	Óxido de cobre
Fe_2O_3	Óxido de ferro
H_2O	Água
HNO_3	Ácido nítrico
K^+	Potássio
K_2O	Óxido de potássio

MnO Óxido de manganês

Na⁺ Sódio

NaCl Cloreto de sódio

NaOH Hidróxido de sódio

OH Hidroxila

Rb₂O Óxido de rubídio

SiO₂ Dióxido de Silício

SrO Óxido de estrôncio

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Instituto Americano de Concreto
ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
BS	Norma da Inglaterra
C	Absorção de água por capilaridade
cal/mol.K	Caloria por mol e Kelvin
cal/volt	Caloria por volt
CEM I	Cimento de alto desempenho
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
cm ² /g	Centímetro quadrado por grama
CV	Coeficiente de variação
D	Coeficiente de difusão dos íons cloreto
CP	Cimento Portland
EDX	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
Eq.	Equação
ENV	Norma europeia
FC	Resistência à compressão
FIP-CEB	Comité Euro-International du Béton
g	Grama
g/cm ²	Grama por centímetro quadrado
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
g/L	Grama por litro

h	Hora
ISO	International Organization for Standardization
JCSE	Norma Japão
K	Kelvin
kg	Quilograma
Kg/m ³	Quilograma por metro cubico
l	Espessura do corpo de prova
M	Mol
m	Metro
mA	Miliampère
m ² /Kg	Metro quadrado por quilograma
ml	mililitro
mim	Minutos
mm	Milímetro
mm ² /a	Milímetro quadrado por ano
mol/cm ²	Mol por centímetro quadrado
mol/cm ³	Mol por centímetro cubico
mol/s.cm ²	Mol por segundo e centímetro quadrado
MPa	Megapascal
m _s	Massa do corpo de prova seco
m _{sat}	Massa saturada do corpo de prova
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NBR NM	Norma Brasileira Regulamentadora de Nível nacional
NT	Nord Test
pH	Potencial Hidrogeniônico
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
PVC	Policloreto de vinila

RS	Resistente a sulfatos
S	Área da seção transversal do corpo de prova
UNE	Norma Espanhola
V	Volt
ym	yottametro
° C	Grau Celcius
μm	Micrómetro

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

O concreto é um material muito utilizado na construção civil, sendo considerado um material durável quando bem dosado e executado, sendo a realização do controle tecnológico de grande importância. Porém quando o concreto for utilizado em ambientes com alta agressividade ambiental este deve receber maior atenção, afim de garantir a durabilidade e vida útil desejada. Em ambientes agressivos alguns processos de deterioração podem impedir que as estrutura de concreto armado alcancem o período de vida útil inicialmente estipulado, causando sérios problemas de segurança (FEDUMENTI, 2013; PINTO *et al.*, 2018).

Dentre os vários processos de deterioração que podem afetar a durabilidade e desempenho de estruturas de concreto em ambiente de severa agressividade, Gjorv (2015) destaca que alguns processos como as reações álcali-agregados, gelo e degelo, assim como ataques químicos representam um grande potencial de ameaça a estruturas de concreto. Porém, a mais grave ameaça à durabilidade e ao desempenho de muitas estruturas de concreto armado em ambientes marinhos é a corrosão das armaduras induzidas por cloretos.

Os íons cloreto são os principais agentes de degradação de estruturas de concreto armado. O comportamento das estruturas situadas em ambiente marítimo tem mostrado que a principal causa da sua deterioração é a corrosão de armaduras por ação de íons cloreto, que provoca redução da seção transversal das armaduras, causando uma ação expansiva no aço e, conseqüentemente, vindo a deteriorar o concreto. A precoce corrosão de armaduras causada pela ação deste agente agressivo é um problema de escala mundial, com grande repercussão devido ao volume de casos registrados, da precocidade com que ocorrem e devido ao montante de recursos envolvidos (COMITÊ 222 ACI, 1991; COSTA e APPLETON, 2007; MEDEIROS *et al.*, 2010; PINTO, 2016; MEIRA, 2017).

Os íons cloreto presentes no concreto podem ser oriundos de diversas fontes. No estado fresco, por exemplo, podem ser provenientes da utilização da água marinha na mistura, de agregados contaminados ou do uso de aditivos aceleradores de pega que contém cloreto de cálcio (amplamente utilizados até meados de 1970). No concreto endurecido, por exemplo, os cloretos podem penetrar na estrutura pelo contato direto com a água do mar, pela presença de maresia, pelos sais de degelo ou ainda em estruturas que armazenem sal, como tanques de aquários ou salmoura (BROOMFIELD, 2003).

Uma vez que a penetração de íons cloreto influencia diretamente na durabilidade e vida útil de estruturas de concreto armado, entender como estes íons se difundem no interior do concreto

possibilita uma escolha mais adequada em relação à dosagem e materiais a serem empregados no concreto.

O coeficiente de difusão de cloretos é o mecanismo de penetração de cloretos avaliado em ensaios para aferir a durabilidade do concreto, pois este mecanismo controla a penetração de íons cloreto (LOPES, 1999; MEDEIROS e HELENE, 2009).

Nesse contexto, compreender e aprimorar os diferentes métodos de avaliação da difusividade dos íons cloreto no concreto são de extrema importância para garantir a durabilidade e a vida útil de projeto das estruturas localizadas em ambiente marítimo.

1.2. Motivação

Até poucos anos atrás, o principal enfoque de projetistas de estruturas de concreto armado em relação ao controle da qualidade do concreto estava relacionado com a resistência à compressão. Todavia, nos últimos anos, devido aos inúmeros acidentes estruturais e manifestações patológicas precoces nas estruturas de concreto armado, evidenciou-se que o controle estatístico da resistência à compressão não é suficiente para garantir a vida útil de projeto. Sendo assim, a compreensão de que a durabilidade do concreto é um parâmetro tão importante quanto a resistência à compressão começou a se difundir entre os pesquisadores.

Desta forma, realizar estudos na área da durabilidade do concreto com a finalidade de aumentar a sua vida útil, se mostra um grande desafio, a fim de se obter estruturas mais duráveis e seguras. Considerando a extensa costa brasileira, a construção de estruturas de concreto armado em proximidade ou mesmo junto à costa marinha ainda representam um desafio no que diz respeito à durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.

Mesmo com a necessidade e importância de se obter estruturas duráveis, o Brasil não possui normas regulamentadoras específicas para a durabilidade das estruturas de concreto. A NBR 6118 (ABNT, 2014) apenas especifica parâmetros prescritivos (relação água/cimento máxima, consumo mínimo de cimento e cobrimento mínimo), não sendo essa uma norma específica referente à durabilidade de estruturas de concreto armado. Ainda se constata no país a falta de normas relacionadas a procedimentos experimentais referentes à durabilidade de estruturas de concreto.

A falta de normatização nacional referente à durabilidade do concreto demonstra que este tema ainda necessita maior atenção no país, sendo assim a realização de pesquisas nesta área é de grande importância, para obtenção de resultados que possam dar subsídios para futuras normas.

1.3. Justificativa

O concreto é o material com grande utilização em construções de estruturas marinhas e costeiras. Porém esse pode sofrer ação deletéria causada pela ação de íons cloreto, estes íons penetram no concreto e quando atingem as armaduras causam a corrosão do aço.

A corrosão das armaduras devido à penetração de cloretos é o processo de degradação com maior ocorrência nas estruturas de concreto armado expostas em ambiente marinho. Mesmo construções situadas distantes da linha da costa, mas situadas na chamada zona de atmosfera marinha, continuam a receber a ação de cloretos, o que é mais importante ao longo das primeiras centenas de metros além da costa (MEIRA, 2004). Neste contexto, estudos voltados à durabilidade do concreto armado frente ao ataque cloreto são importantes em locais com urbanização intensa na região costeira, como é o caso de muitos locais no Brasil.

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado devido à ação de íons cloreto representa, na atualidade, um sério problema econômico. Em obras públicas, a recuperação dos danos causados pela ação dos íons cloreto gira em torno 800 milhões de reais por ano no Brasil (DOTTO, 2012)

No território nacional o problema relacionado à deterioração de estruturas de concreto armado, devido à corrosão de armaduras desencadeada pela ação de cloretos, se estende por todo o país. Em zonas costeiras este problema desperta maior preocupação (MEIRA, 2017).

Segundo Cunha (2005) a Zona Costeira do Brasil é uma unidade territorial que se estende em sua porção terrestre por cerca de 8.500 quilômetros, abrangendo 17 estados e mais de quatrocentos municípios. Inclui ainda uma faixa marítima formada pelo mar territorial, com largura de 12 milhas náuticas a partir da linha de costa.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo geral

Este trabalho visa avaliar, através de resultados obtidos experimentalmente, três diferentes metodologias de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto.

1.4.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Determinar o coeficiente de difusão do concreto por meio dos métodos: ASTM C1556 (2016), NT Build 492(1999), UNE 83987(2012);
- Realizar ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos e determinar a absorção de água por capilaridade dos concretos;
- Avaliar a influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa nos resultados obtidos pelas metodologias adotadas;
- Relacionar e correlacionar os resultados obtidos no ensaio de penetração de cloretos, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade;
- Analisar a correlação entre os resultados experimentais de coeficiente de difusão obtidos pelas três metodologias.

1.5. Limitação da pesquisa

Devido ao prazo relativamente curto para realização da pesquisa foi possível apenas realizar ensaios em laboratório de forma acelerada, não sendo possível realizar ensaio natural de penetração de íons cloreto.

1.6. Delimitação da pesquisa

Existem diversos fatores que podem interferir no desempenho do concreto, como tipo de cimento, relação água/aglomerante, uso de aditivos, tipo e forma dos agregados graúdo e miúdo, condições de preparo, cura e ensaios, entre outros. Desta forma, foi necessário determinar os limites que direcionam o programa experimental, com os seguintes itens em destaque:

- Foi utilizado apenas um tipo de cimento;
- Foram utilizadas relações água/aglomerante de 0,45; 0,55 e 0,65;
- Utilizado um tipo de adição minerais em substituição ao cimento em massa nas quantidades de 5, 10 e 20 %;

1.7. Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em sete capítulos, além do apêndice. No capítulo um está a introdução, considerações iniciais, motivação, justificativa, objetivos, limitação e delimitação da pesquisa.

No capítulo dois está contemplada a revisão bibliográfica, que consistiu na realização de uma pesquisa exploratória a partir de uma revisão bibliográfica aprofundada sobre o tema. São apresentados conceitos fundamentais e resultados de pesquisas realizadas, que foram utilizados como norteadores para o desenvolvimento deste estudo

O capítulo três contempla o programa experimental, onde é feita uma descrição da metodologia utilizada para a obtenção dos resultados, bem como do conjunto de materiais, técnicas e procedimentos utilizados na pesquisa.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos e análise obtida da pesquisa

O capítulo cinco traz as conclusões da pesquisa, assim como sugestões para trabalhos futuros.

Após o capítulo cinco são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para realização deste trabalho.

Por fim, no apêndice A, são apresentadas são apresentadas tabelas e figuras de dados obtidos no desenvolvimento da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são apresentados assuntos pertinentes ao tema da pesquisa, como os processos de deterioração do concreto em ambiente costeiro e marinho, mecanismos de transporte de cloretos, indicadores de durabilidade do concreto, conceitos de vida útil de estruturas e ação dos íons cloreto frente a estruturas de concreto.

2.1. Processos de deterioração do concreto em ambiente marinho

O concreto é material de construção muito utilizado na construção civil, porém constata-se um grande número de estruturas de concreto armado com falhas precoces, devido a uma variedade de razões, sem atingir a vida útil projetada. Algumas destas razões são decorrentes da não conformidade da resistência característica de projeto, mudança desfavorável da carga de serviço, porém o mais comum são patologias relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto, principalmente em estruturas de concreto em áreas costeiras e marinha. O contato da estrutura com estes ambientes causa a corrosão das armaduras presentes no concreto armado, danificando a estrutura precocemente, assim levando à perda de estabilidade em decorrência de uma durabilidade inadequada (JINPING e XUESONG, 2010).

Problemas na construção, como baixa qualidade do concreto e espessura insuficiente da camada de cobrimento das armaduras, são fatores importantes na deterioração da estrutura, provocando a despassivação das armaduras. Ademais, a manutenção preventiva da estrutura não pode ser negligenciada durante o uso da estrutura, pois a mesma evita o desgaste e a degradação das estruturas de concreto armado, a ausência de manutenção preventiva desfavorece a estrutura de atingir a vida útil de projeto (JINPING e XUESONG, 2010). Elfmarkova *et al.* (2015) consideram que os principais requisitos de desempenho para o projeto, construção e manutenção de estruturas de concreto estão relacionados à segurança, facilidade de manutenção e durabilidade.

Os pesquisadores destacam que o ataque de íons cloreto é a principal razão para a deterioração prematura das estruturas de concreto armado em ambientes agressivos, como os ambientes costeiro e marinho (FARAHANI *et al.*, 2015).

Gjørsv (2015) destaca que existem diferentes processos de deterioração de estruturas de concreto armado que podem causar problemas à durabilidade e ao desempenho em ambiente de severa agressividade. O ingresso de íons cloreto e a consequente corrosão prematura das armaduras despontam como um grande problema na durabilidade das estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.

O principal fator de deterioração de estruturas de concreto armado é a interação do meio ambiente com o concreto (NEPOMUCENO, 1992). Esta interação ocorre por meio da penetração de agentes agressivos pelos poros do concreto. Segundo Neville (2013), os fluidos estão presentes em todos os processos de deterioração de estruturas, sendo a porosidade um fator importante neste processo, mas este não é o fator determinante da permeabilidade, fatores como a forma, distribuição, tortuosidade e continuidade dos poros também exercem influência direta.

A penetração de substâncias agressivas no concreto é governada pela estrutura dos poros da pasta de cimento do concreto, ou seja, de sua estrutura porosa (distribuição e tamanho dos poros). O concreto é um material com porosidade aberta e, por esse motivo, existe a possibilidade de transporte através do sistema de poros. A quantidade relativa de poros capilares e o grau de interconexão desempenham um papel crucial no transporte de tais substâncias através do concreto. (RIBEIRO *et al.*, 2011; HASHOLT e JENSEN, 2015).

Os poros do concreto formam uma rede conectada ao exterior, que permite a penetração de gás, água e substâncias agressivas dissolvidas no concreto. A degradação do concreto e a corrosão das armaduras dependem dessa estrutura porosa, que governa os mecanismos de degradação (RIBEIRO *et al.*, 2011).

Quando o concreto é utilizado em um ambiente com risco de ataque por agentes químicos, a melhor forma de reduzir a velocidade de ingresso de agentes agressivos é por meio da redução da porosidade e da permeabilidade do concreto (AITCIN, 2000).

Em estruturas de concreto armado situadas em ambientes com alto teor de cloretos, se constata que a existência de quantidades prejudiciais de cloretos em contato com as armaduras é apenas uma questão de tempo, mesmo em estruturas com cobrimento de armaduras adequado e concreto de alta qualidade. A alta dispersão e variabilidade da qualidade da execução podem ser um desafio para durabilidade e o desempenho de estruturas de concreto, bem como, falhas durante a execução das estruturas podem induzir a deficiências e fraquezas que logo serão reveladas (GJØRV, 2015).

A corrosão das armaduras é uma das patologias mais frequentes nas estruturas de concreto armado e sua evolução tende a comprometer significativamente a segurança estrutural de uma determinada obra.

A corrosão é iniciada por uma alteração na solução dos poros em torno do aço, devido tanto à acidificação por carbonatação, quanto devida à entrada de íons cloreto a partir da brisa marinha num ambiente junto à costa marinha. A armadura é protegida do meio ambiente por uma camada de cobrimento de concreto. A durabilidade é controlada pela qualidade do concreto, que é suscetível às influências de deterioração de uma cura insuficiente, secagem em idade precoce, compactação inadequada, e a penetração de agentes ambientais agressivos. O problema da durabilidade em

estruturas de concreto depende em grande parte da qualidade do concreto e da espessura da sua camada de cobrimento. A Figura 2.1 apresenta um esquema da camada de cobrimento do concreto, ilustrando os seus elementos mais importantes (ALEXANDER, 2018).

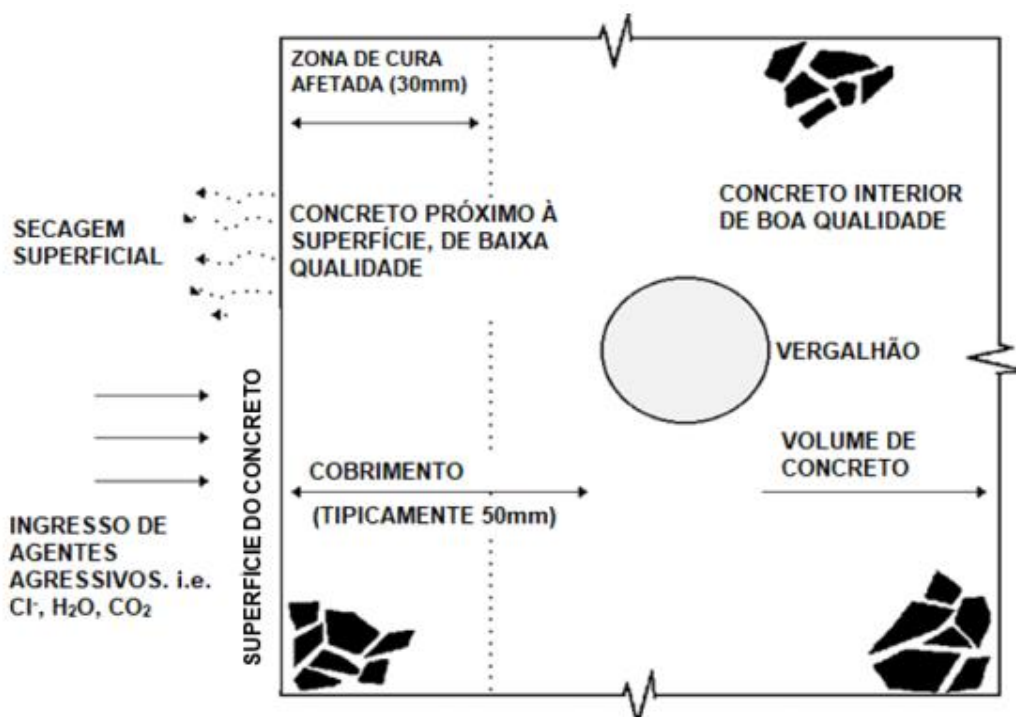


Figura 2.1 – Esquema dos fatores relevantes na qualidade do concreto e de sua espessura de cobrimento (Fonte: ALEXANDER, 2018).

Consequentemente, as estratégias de durabilidade que provavelmente proporcionarão os maiores benefícios devem abordar diretamente a qualidade e a espessura de cobrimento das armaduras. A qualidade refere-se, principalmente, à capacidade de resistir à penetração de fluidos/gases agressivos a partir do ambiente externo, que é uma função do tipo de aglomerante e da relação água/aglomerante e supondo que a cura é efetivamente realizada. O sistema aglomerante é importante porque sua composição química governa a interação e a imobilização de íons agressivos, como os cloretos (ALEXANDER, 2018).

Segundo Figueiredo e Meira (2013), o processo de corrosão do aço em estruturas de concreto armado envolve uma fase inicial, em que os agentes agressivos alteram algumas condições do concreto no entorno da barra, assim despassivando a armadura, seguindo da formação de células de corrosão que é responsável pela propagação da corrosão.

Segundo Gjrv (2015), o concreto possui uma elevada capacidade de proteger armaduras contra a corrosão, o que se deve principalmente à passivação eletroquímica das armaduras na solução

altamente alcalina presente nos poros do concreto. Porém, a corrosão pode iniciar no momento em que a passivação é rompida parcial ou completamente, seja devido à carbonatação ou à ação de cloretos. Quando há corrosão, o potencial eletroquímico da armadura se torna mais negativo, e acaba formando áreas anódicas, enquanto que outras partes do aço, aonde o potencial passivo está intacto, atuarão como áreas de captação de oxigênio e formarão áreas catódicas. Se a resistência iônica do concreto estiver suficientemente baixa, o sistema de atividade das células de corrosão do tipo galvânico desenvolve-se ao longo da armadura. Nas células galvânicas ocorre um fluxo de corrente, em que a intensidade determina a taxa de corrosão. O tamanho e geometria das áreas anódica e catódica nas células galvanizadas são fatores importantes, a taxa de corrosão é controlada principalmente pela resistividade iônica do concreto e pela disponibilidade de oxigênio para o processo catódico.

A corrosão de armaduras na presença de íons agressivos dentro da massa de concreto é basicamente regida pelas mesmas reações anódica e catódica que ocorrem em meio alcalino na presença de oxigênio e água. O efeito da presença de íons agressivos no interior do concreto é de baixar o pH em pontos discretos da película passivadora, destruindo-a totalmente. Nestes pontos, formam-se zonas anódicas de pequenas dimensões, e o restante da armadura constitui uma enorme zona catódica, ocorrendo então uma intensa corrosão nesses pontos anódicos (FUSCO, 2008).

A proteção conhecida como passivação é um fenômeno proveniente da natureza fortemente alcalina do hidróxido de cálcio, que possui pH em torno de 13, que previne a corrosão da armadura pela formação de uma fina camada protetora na superfície do metal. Porém, caso o concreto seja permeável de modo que a carbonatação atinja o concreto em contato com o aço ou que soluções com cloretos possam penetrar até a armadura, caso exista água e oxigênio terá início o processo de corrosão da armadura. A camada passivadora de óxido de ferro é destruída quando o pH cai abaixo de 11, o processo da carbonatação diminui o pH para cerca de 9. A formação de compostos ferrosos expansivos resulta em um aumento de volume em relação ao aço original, de forma que estas expansões causam fissuração e lascamento do concreto (NEVILLE, 2013).

A corrosão do aço ocorre devido à ação eletroquímica, que ocorre quando dois metais diferentes estão em contato elétrico, na presença de umidade e oxigênio (NEVILLE, 2013). Sendo assim, a corrosão eletroquímica implica na formação e movimentação das partículas com carga elétrica e na presença de um eletrólito condutor. A corrosão eletroquímica pressupõe a formação de uma pilha eletroquímica de corrosão, aonde há a formação do ânodo em que ocorre a passagem do material do estado metálico para o estado iônico que é a oxidação (FIGUEIREDO E MEIRA, 2013).

Sendo assim é possível concluir que a maior ameaça ao concreto armado é a corrosão da armadura, levando a fissuras, manchas e destacamento do revestimento de concreto. Isso pode

comprometer a funcionalidade das estruturas, comprometer a segurança, a estabilidade e a estética. Tais estruturas se tornam um passivo indesejável para seus proprietários ou gestores, resultando em perdas econômicas substanciais, além de serem insustentáveis por desperdiçar recursos naturais valiosos (ALEXANDER, 2018).

A ação do cloreto de sódio frente a estruturas de concreto apenas se torna um problema em casos de concreto armado, quando o concreto não possui armaduras em seu interior a ação dos cloretos não representa uma ameaça a durabilidade e vida útil da estrutura do concreto. Os íons cloreto provocam a corrosão das armaduras no interior do concreto, mas não prejudicam o concreto, os íons cloreto podem se depositar nos poros do concreto sem afetar a estrutura.

2.2. Mecanismos de transporte de cloretos

Diferentes mecanismos podem ocorrer no transporte de massa por um meio poroso como o concreto, tais como absorção por sucção capilar, permeabilidade, migração e difusão, como demonstrado na Figura 2.2.

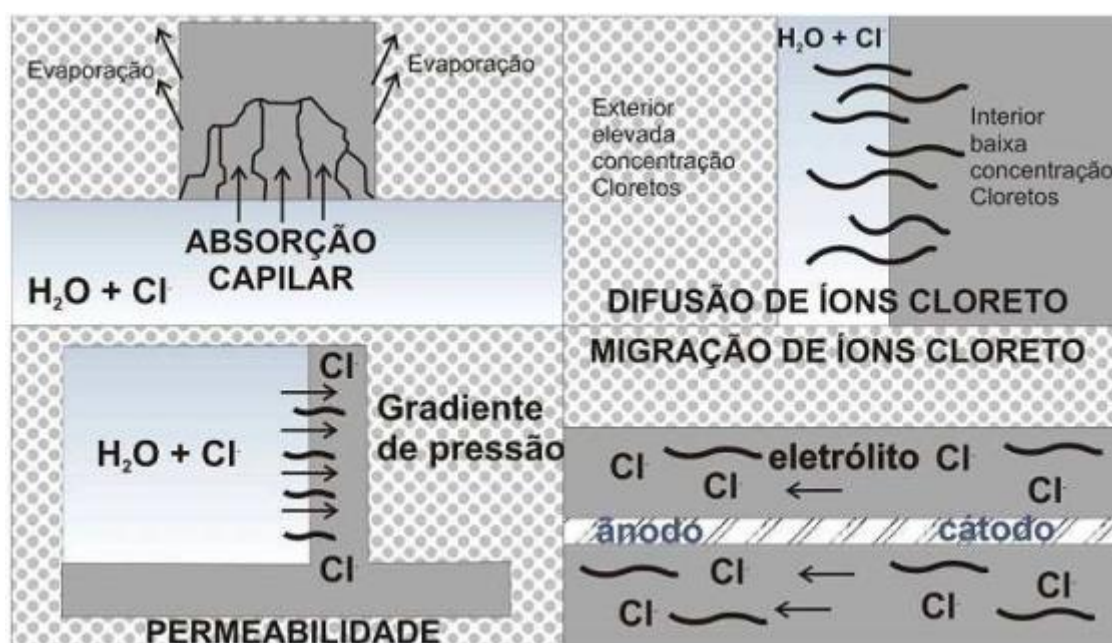


Figura 2.2 - Processos de transporte de massa no concreto (Fonte: HELENE, 1993).

Os mecanismos de transporte tratados a seguir são os principais responsáveis pela penetração de agentes agressivos nas estruturas de concreto armado.

2.2.1. Absorção capilar

A absorção capilar é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de umidade. Outra definição que pode ser adotada para este mecanismo é que o transporte de líquidos ocorre devido a tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto (RIBEIRO, 2018).

No processo de absorção capilar o mecanismo inicial parece ser uma sucção, especialmente quando a superfície é seca e a água salgada é rapidamente absorvida pelo concreto seco. Em seguida, o movimento capilar da água salgada através dos poros é seguido por uma difusão mais substancial (MEDEIROS e HELENE, 2009).

O mecanismo de absorção não acontece em concretos saturados, pois o concreto deve estar com os poros secos ou parcialmente secos para que seja possível a absorção de água por capilaridade (HELENE, 1993). Quando ocorre o processo de absorção capilar o fluxo irá depender do diâmetro dos poros, da tensão superficial do líquido, de sua densidade e de sua viscosidade (MEIRA, 2004).

A absorção da água no concreto é mais difícil de ser controlada, pois os diâmetros dos poros capilares são muito variáveis no tempo e ainda dependem de diversos fatores físicos e químicos, tais como a composição química, grau de saturação do concreto, uso de adições e aditivos e relação água/aglomerante do concreto. A absorção ocorre através da rede de poros interligados do concreto, assim sendo, na grande maioria dos casos, concretos com menores relações água/aglomerante tendem a apresentar poros menos interligados e acabam por dificultarem o mecanismo de absorção capilar. No entanto, com poros menores estes concretos podem ter uma maior absorção capilar, desde que estes poros sejam interconectados (RIBEIRO, 2018).

De acordo com Hall (1989), a teoria mais adequada ao fenômeno de absorção capilar em materiais de construção é a teoria do fluxo em solos não saturados expressa pela lei de Darcy ampliada, conforme exposto nas Eq. (2.1) e Eq. (2.2).

$$q = -D(\theta) \frac{d\theta}{dx} \quad (2.1)$$

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{d\psi}{d\theta} \quad (2.2)$$

Onde q é o volume de água transportado, $D(\theta)$ é a difusividade hidráulica, $k(\theta)$ é a condutividade hidráulica, ψ é o potencial capilar que depende do teor de umidade do concreto (θ) e x

é a profundidade em relação à superfície do concreto. O potencial capilar tem origem nas forças capilares geradas pela tensão existente entre a superfície do líquido e a parede dos poros.

De acordo com Helene (1993), a medida da absorção capilar pode ser feita, por meio de uma simplificação, utilizando-se a lei de Jurin que correlaciona a altura de ascensão capilar (h), à tensão superficial (γ), à densidade do líquido (ρ) e ao raio do poro (r), como pode ser visualizado na Eq. (2.3).

$$h = \frac{2 \cdot \gamma}{\rho \cdot r} \quad (2.3)$$

Hall (1989), propôs a utilização do parâmetro por ele denominado absorptividade para descrever o comportamento da absorção de água livre em materiais porosos. Por meio de simplificações na equação modificada de Darcy para fluxo de água em meio não saturado, a absorptividade pode ser obtida a partir da Eq. (2.4), onde S é a absorptividade do material, A é um termo constante que pode ser obtido a partir dos resultados experimentais, i é o volume acumulado de água absorvida por unidade de área, e t é o tempo.

$$i = A + St^{1/2} \quad (2.4)$$

Em termos práticos, a absorptividade é obtida experimentalmente utilizando-se a declividade da parte reta da curva de i (volume acumulado de água absorvida por unidade de área) versus a raiz quadrada do tempo, obtida no ensaio de absorção de água por sucção capilar (SANTOS, 2006).

O transporte de íons cloreto por meio de absorção capilar é mais significativo no caso de estruturas expostas a ciclos de umedecimento e secagem. Nestes casos, durante o ciclo de umedecimento os íons cloreto dissolvidos penetram com a água nos poros do concreto. Sendo que a absorção capilar não ocorre em ambientes saturados, quando o concreto atinge esta condição o transporte dos íons para o interior do concreto não ocorrerá por meio deste mecanismo, assim o processo passa a ser regido por meio de difusão (SANTOS, 2006).

2.2.2. Difusão

A difusão de cloretos consiste no transporte de íons por diferença de potencial químico e concentração em regiões distintas, em substâncias presentes em meio líquido ou gasoso, onde há um fluxo de íons da região de alta concentração para a de baixa, não havendo dependência da

movimentação da água, mas sim da existência de um eletrólito e de um gradiente de concentração. De forma que o íon cloreto, principal agente agressivo que compromete a durabilidade de estruturas de concreto armado, tem sua penetração controlada por esse fenômeno (RIBEIRO *et al.*, 2011; MEDEIROS *et al.*, 2014; RIBEIRO, 2018).

O fluxo por difusão é definido em dois estágios distintos, o estágio não estacionário, onde o fluxo é dependente do tempo e da profundidade de penetração, que representa o período em que o transporte de íons ocorre através do concreto de forma combinada com a sua fixação às fases do cimento, e o estágio estacionário, caracterizado pelo fluxo constante das substâncias em difusão, que se refere ao período em que a fixação não ocorre mais e o fluxo dos íons se dá a uma taxa constante. Esses estágios podem ser representados pela segunda e primeira lei de Fick, respectivamente (RIBEIRO, 2018).

A primeira lei de Fick considera apenas fluxo unidirecional e assume que a concentração é constante, independentemente do tempo e da posição, sendo que esse fenômeno pode ser expresso de maneira geral pela Eq. (2.5).

$$q_m = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.5)$$

Onde q_m representa o fluxo de massa, x é a profundidade onde se mede a quantidade de massa que penetrou, C é a concentração e D é o coeficiente de difusão.

Já na segunda lei de Fick é adotado balanço de massa de uma forma mais geral e considera-se que a concentração varia em função do tempo e da posição no interior do material, sendo assim esse fenômeno pode ser representado pela Eq. (2.6).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

Uma solução para a Eq. (2.6), considerando-se material sólido, semi-finito, com concentração superficial constante na solução externa, é expressa pela Eq. (2.7).

$$C(x, t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (2.7)$$

Sendo que $C(x, t)$ é a concentração da substância a uma distância x , em um tempo t , C_s é a concentração superficial da substância em difusão e coeficiente de difusão (D) considerado constante.

A difusividade de líquidos e gases no concreto depende da concentração desta substância na superfície do concreto, da variação da temperatura, da microestrutura do concreto e das interações desta substância com os constituintes do cimento e os produtos da hidratação. Neste sentido, são parâmetros importantes a composição química e a porosidade da pasta de cimento endurecida. O coeficiente de difusão é função de muitas variáveis, como a porosidade, relação água/aglomerante, teor de cimento, composição química do cimento, umidade relativa e da temperatura (HELENE, 1993).

Em concretos, o coeficiente de difusão no estado não estacionário é o principal coeficiente ligado à vida útil mediante a entrada de íons cloreto na estrutura, pois é nesse estado que o concreto ainda possui resistência à entrada destes íons, devido à reserva de aluminatos (C_3A e C_4AF) que se combinam quimicamente com o cloro, formando sal de Friedel ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) (GJØRV, 2015).

2.2.3. Migração

Nas estruturas de concreto, o fenômeno da migração iônica pode ocorrer em estruturas que utilizam corrente elétrica, em estruturas de concreto com proteção catódica por corrente impressa ou em estruturas submetidas à extração de cloretos e à realcalinização pela aplicação de uma diferença de potencial (NEPOMUCENO, 2005).

O mecanismo de transporte é utilizando frequentemente em ensaios acelerados para avaliar a resistência à penetração dos íons cloreto no concreto conforme o método da ASTM C1202 (2017) ou em uma metodologia semelhante proposta por Andrade (1993) para calcular o coeficiente de difusão, parâmetro que pode caracterizar o concreto e prever sua resistência a difusão iônica.

As leis de Fick não são apropriadas para modelar o fenômeno da migração. Andrade (1993) propôs a utilização da equação de Nernst-Planck, que é utilizada no mecanismo de transporte em eletrólitos, como pode ser analisado na Eq. (2.8).

$$-J_i(x) = D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} D_j C_j \frac{\partial E(x)}{\partial (x)} + C_i V(x) \quad (2.8)$$

Onde, J_i é o fluxo da espécie iônica, D_i é o coeficiente de difusão, $C_i(x)$ é a concentração da espécie iônica (i) em função da profundidade (x), z_i é a valência da espécie iônica, F é a constante de Faraday, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura, $E(x)$ é o potencial elétrico aplicado em função da profundidade e $V_i(x)$ é a velocidade de convecção de i.

Conceitualmente, a Eq. (2.8) pode ser escrita de acordo com a Eq. (2.9) (ANDRADE, 1993).

$$Fluxo = difusão + migração elétrica + convecção \quad (2.9)$$

Assumindo-se a situação onde não há convecção, isto é, não existem gradientes de pressão ou umidade, e que a parcela da difusão pura é desprezível em comparação ao efeito de migração, o que é razoável para diferenças de potencial suficiente altas, entre 10 e 15 volts, a Eq. (2.8), pode ser reduzida conforme a Eq. (2.10) (ANDRADE, 1993).

$$J = -\frac{zF}{RT} D_{wff} C_{cl} \frac{\Delta E}{l} \quad (2.10)$$

Onde, J é o fluxo dos íons cloreto, D_{wff} é o coeficiente de difusão efetivo ou coeficiente de difusão no estado estacionário, C_{cl} é a atividade dos íons cloreto, ΔE é a diferença de potencial aplicada e l é a espessura da amostra de concreto analisada.

Quando se utiliza a equação (2.10), o coeficiente de difusão efetivo ou estacionário, pode ser calculado por meio de ensaios de migração.

Os ensaios de migração podem servir de base para o cálculo do coeficiente de difusão aparente ou não estacionário, quando utilizado o conceito de *time lag* (fator de ratardo) em uma solução analítica que relaciona os resultados obtidos em ensaios de difusão natural com os ensaios acelerados de migração. O *time lag* caracteriza o período de tempo em que a difusão se mantém no regime não estacionário, e no caso de transporte dos cloretos, é definido como o tempo em que os íons levam para estabelecer um fluxo constante através do concreto em ensaios de migração ou difusão (RIBEIRO, 2018).

2.2.4. Permeabilidade

A permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que o fluido pode escoar através de um sólido, sob um gradiente de pressão externo, sendo influenciado pela porosidade do concreto e a continuidade e tamanho destes poros na estrutura do sólido, sendo está uma propriedade dos materiais saturados. O ingresso de cloretos, quando dissolvidos em água, pode se dar por esse processo. Sendo a permeabilidade diretamente relacionada à estrutura dos poros, os fatores que determinam a compacidade e qualidade do concreto influenciam nestas duas propriedades (MEHTA

e MONTEIRO, 1994). Segundo Helene (1993), existe uma faixa de dimensões dos poros que facilitam a permeabilidade do concreto, esta faixa se encontra entre 0,1 μm e 1000 μm .

A permeabilidade pode ainda ser definida como sendo a facilidade com a qual líquidos ou gases podem se movimentar através do concreto. A interconectividade dos poros é o principal fator que contribui para a permeabilidade da pasta de cimento, que decresce com a evolução de sua hidratação, devido ao refinamento dos poros. Em geral, o volume dos poros de uma pasta de cimento varia de 30 a 40 % do seu volume total. Essa propriedade é importante com relação a estanqueidade de estruturas destinadas a contenção de líquidos e proteção das estruturas frente à ataques químicos. (NEVILLE, 2013; RIBEIRO, 2018).

A utilização de agregados na pasta de cimento contribui para o aumento da permeabilidade da argamassa e do concreto, isso ocorre devido à presença de zonas de transição e às microfissuras do concreto. A permeabilidade do concreto de cobrimento para misturas preparadas com agregados densos (salvo a existência de fissuras) é fortemente influenciada pela permeabilidade da pasta de cimento. Por sua vez, a permeabilidade da pasta de cimento depende da relação água/aglomerante e do grau de hidratação dele (RIBEIRO, 2018).

O coeficiente de permeabilidade é obtido aplicando a lei de Darcy para um fluxo laminar, estacionário, através de um meio poroso de acordo com a Eq. (2.11).

$$V_f = \frac{K_h \cdot A \cdot H}{L} \quad (2.11)$$

Onde V_f é a velocidade de escoamento fluido, coeficiente K_h é a permeabilidade hidráulica, A é a seção do meio poroso, H é a altura da coluna d'água, e L é o comprimento da amostra.

A permeabilidade do concreto está diretamente relacionada à sua porosidade, e devido a este fato, é influenciada pelos fatores que alteram o volume e a conectividade dos poros capilares do concreto. Assim, fatores como a relação água/aglomerante, consumo de cimento, teor de agregados, emprego de adições minerais e o grau de hidratação influenciam diretamente a permeabilidade de estruturas de concreto (SANTOS, 2006).

De acordo com Stanish *et al.* (2000), se há um gradiente de pressão na superfície do concreto e os cloretos estão presentes estes podem penetrar no concreto por permeabilidade. No entanto, é raro que a diferença de pressão necessária para que isso ocorra seja exercida sobre a estrutura. Espera-se que o ingresso de cloretos por permeabilidade ocorra de forma indireta por meio da penetração da água na qual estão dissolvidos.

A permeabilidade é apontada por diversos autores como uma das propriedades de maior importância na durabilidade dos concretos. A permeabilidade influencia o ingresso e a movimentação de substâncias agressivas no interior do concreto. É através do ataque químico, pela penetração de agentes agressivos como íons cloreto, sulfatos, dióxido de carbono, que ocorrem grande parte dos problemas de deterioração nas estruturas de concreto (NEVILLE, 2013).

2.2.5. Considerações gerais referente aos mecanismos de transporte de cloretos

Na prática, esses mecanismos podem ocorrer de maneira individual ou em conjunto. Quando atuam em conjunto, é comum adotar-se um mecanismo como o que prevalece sobre os outros, de modo a simplificar o entendimento do processo de transporte e intervir no mesmo para aumentar a durabilidade do material (MEDEIROS, 2008).

Os mecanismos de transporte no concreto dependem de características físicas, químicas, da concentração superficial das substâncias que penetram no material, das condições ambientais, condições de exposição, do grau de umidade do concreto, temperatura e a dimensão e continuidade da estrutura porosa, que determinam a importância relativa de cada um dos mecanismos de transporte (NEPOMUCENO, 1992; COSTA e APPLETON, 2007).

O transporte de cloretos para o interior do concreto é um processo que ocorre apenas em meio líquido, isto é, se os poros não contiverem água não existe penetração. É através da estrutura porosa do concreto que se processa a penetração, nomeadamente através da rede contínua de poros capilares da pasta de cimento e das fendas e microfendas existentes (COSTA e APPLETON, 2007).

Desta forma, a penetração de íons cloreto só é possível quando há água nos poros do concreto. Se a água ficar estagnada, o deslocamento dos íons ocorre por meio de processo de difusão. Quando o concreto sofre ciclos de molhagem e secagem, a penetração dos íons passa a ser por força capilar da água em que estão presentes os íons (GUIMARÃES, 2000). A profundidade de penetração dos íons dependerá da duração dos períodos de umedecimento e secagem, assim como da estrutura porosa do concreto (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Helene (1993), os cloretos do ambiente podem penetrar em estruturas por meio de mecanismos clássicos de penetração de água contaminada e difusão de cloretos. Desta maneira, para que ocorra contaminação do concreto armado por cloretos, os íons precisam estar dissolvidos em água. Como cristal sólido, o cloreto não oferece risco elevado para as estruturas, pois não penetra nos poros do concreto que tem dimensões mais reduzidas que a dos cristais. Apesar disso, no estado sólido, o íon cloreto pode depositar-se por impactação na superfície do concreto permanecendo até

que a chuva o dissolva e transporte para o interior da estrutura através de mecanismos como a absorção capilar ou difusão.

Ossorio e Lorenzo (2014) consideram que os mecanismos de entrada de cloretos no concreto que comumente exercem maior influência na penetração de íons são a absorção capilar e a difusão. As sucções que aparecem na superfície do concreto insaturado propiciam a entrada de água da superfície do elemento de concreto e consequentemente o cloreto que está contido. Esse fenômeno é conhecido como absorção capilar e geralmente ocorre em aproximadamente um centímetro de profundidade, sendo interrompido pela interrupção da rede de poros. A difusão é o transporte de íons estimulados pela diferença de concentração da substância em questão. O efeito combinado desses dois fenômenos causa a entrada de íons cloreto na massa de concreto. Os perfis de cloretos obtidos em muitos elementos expostos ao aerossol marinho de maneira natural, refletem que o mecanismo inicial de penetração é a absorção e, posteriormente, o mecanismo de difusão ganha força.

Em geral, a sucção capilar pode dominar a penetração através de uma camada superficial do concreto que é muito porosa e apenas parcialmente saturada de água. No entanto, se a porosidade é muito baixa ou o concreto é muito úmido, um mecanismo de difusão pode dominar a penetração de íons cloreto (ZHANG e GJØRV, 1994). A difusividade do cloreto é muitas vezes considerada um parâmetro material que reflete a resistência do concreto contra a penetração de cloretos (ZHANG e GJØRV, 2005).

Em estruturas de concreto insaturada sem contato com uma solução salina, o concreto absorverá esta solução por absorção capilar. A ação simultânea de difusão e sucção capilar causa assim um modo de transporte misto, que está presente na maioria das condições às quais estruturas de concreto armado estão expostas (MEDEIROS e HELENE, 2009; RIBEIRO *et al.*, 2011).

A penetração de cloretos devida aos vários mecanismos de transporte obedece a diferentes leis, no entanto aplicam-se em geral as leis da difusão para quantificar a penetração devido aos múltiplos processos de transporte (COSTA e APPLETON, 2007).

De acordo com Medeiros (2008), de uma forma geral, considerando uma mesma estrutura, a maior penetração de cloretos ocorre em regiões aonde vários mecanismos de penetração atuam simultaneamente.

2.3. Conceitos de vida útil

A NBR 6118 (ABNT, 2014) utiliza o conceito de vida útil de projeto para definir o período de tempo durante o qual se mantem as características das estruturas de concreto, desde que atendidos

os requisitos de uso e manutenção previstos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

Para se obter a garantia de uma estrutura o período de vida útil estabelecido, ou seja, o 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 passivadora que se forma sobre o aço envolvido pelo concreto. (SOUSA, 2018).

Para Helene (1993) a vida útil de uma estrutura de concreto armado está diretamente relacionada ao período de tempo necessário para que os agentes agressivos penetrem em sua rede de poros ou fissuras do concreto, atingindo a armadura e provocando a corrosão. Desta forma, admite-se que um material atingiu o fim de sua vida útil quando as propriedades sob dadas condições de uso deterioram a um determinado ponto em que as condições do material são consideradas como inseguras ou antieconômicas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A utilização de métodos de previsão da vida útil de estruturas de concreto armado representa grande importância por auxiliar na previsão do comportamento do concreto em longo prazo, assim sendo possível prevenir manifestações patológicas precoces nas estruturas. Este conhecimento é fundamental para reduzir riscos de fissuras, corrosão, expansões e outros problemas estruturais. A utilização destes métodos pode ainda contribuir para a economia, sustentabilidade e durabilidade das estruturas (MEDEIROS *et al.*, 2011).

O avanço no conhecimento sobre os mecanismos de transporte de líquidos e de gases agressivos nos meios porosos como o concreto tem proporcionado uma evolução nos estudos referente a durabilidade das estruturas de concreto armado, possibilitando assim associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos. Consequentemente, passou a ser viável a avaliação da vida útil expressa em número de anos e não mais em critérios apenas qualitativos de adequação da estrutura a certo grau de exposição (MEDEIROS *et al.*, 2011).

Os métodos tradicionais empregados para o dimensionamento de estruturas de concreto armado não quantificam o período de vida útil da estrutura de forma precisa. A maior parte das normativas de dimensionamento deste tipo de estruturas se ocupa da vida útil mediante a prescrição da composição do concreto e as espessuras mínimas de cobrimento. (SOUSA *et al.*, 2018).

Sendo assim, 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 (FANTON, 2017).

Vários modelos de previsão de vida útil têm amadurecido o suficiente no que diz respeito ao conhecimento dos mecanismos de transporte de agentes agressivos para o interior do concreto, e utilizam parâmetros que podem ser obtidos na maioria dos laboratórios, portanto, é viável a aplicação modelos matemáticos para estimar a vida útil das estruturas de concreto (SOUSA *et al.*, 2018).

A vida útil é constituída por duas fases distintas: o período de iniciação associado à penetração do teor crítico de cloretos até ao nível das armaduras, e o período de propagação associado à corrosão de armaduras e aos danos por ela causados. No ambiente marítimo é a duração do período de iniciação que, em geral, condiciona a vida útil das estruturas, dado que as velocidades de corrosão são em geral muito elevadas. Para avaliar este período é necessário desenvolver modelos que traduzam de uma forma adequada a penetração de cloretos (COSTA e APPLETON, 2007). Neste sentido numerosos modelos de vida útil foram desenvolvidos com base em um valor limite do conteúdo de cloretos para que o fenômeno da corrosão do aço ocorra como limite da vida útil em serviço das estruturas (OSSORIO e LORENZO, 2014).

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), na 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 (FANTON, 2017).

O modelo de vida útil mais aceito hoje pela comunidade científica é o modelo simplificado proposto por Tuutti (1982). De acordo com esse modelo conceitual, a vida útil de uma estrutura de concreto armado, sob o ponto de vista da corrosão das armaduras é dividido em dois períodos, que são o período de iniciação da corrosão, aonde ocorre a despassivação da armadura, e o período de propagação em que ocorre a corrosão das armaduras em um grau de deterioração que compromete a funcionalidade ou segurança da estrutura, conforme apresentado na Figura 2.3. Desta forma a análise da vida útil das estruturas pode trazer o projeto baseado em critérios de durabilidade e elaborar planos de manutenção e reparo baseados em uma base mais sólida (RIBEIRO e CASCUDO, 2018).

Durante a fase de iniciação, os danos apresentados pela estrutura são geralmente imperceptíveis. Na segunda fase, ocorre a formação de óxidos devido à corrosão das armaduras, a consequente redução da seção dessas armaduras, e em função do grau de corrosão, pode ocorrer o aparecimento de fissuras, o que acaba por acelerar ainda mais o processo de deterioração da estrutura (RIBEIRO e CASCUDO, 2018).

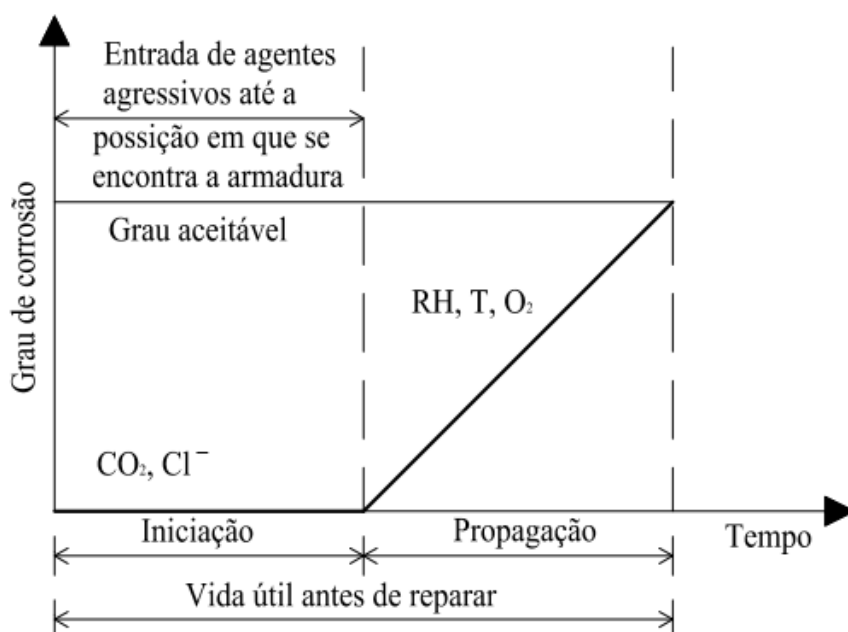


Figura 2.3 - Representação esquemática do modelo de vida útil proposto por Tuutti
(Fonte: Adaptado de Tuutti, 1982).

A partir dos modelos de Tuutti (1982) e Van derToorn (1992), Helene (1993) apresentou uma proposta de conceituação da vida útil que representa melhor o comportamento de estruturas de concreto armado ao longo do tempo, em face das condições de serviço típicas e das manifestações patológicas mais incidentes, como pode ser visualizado na Figura 2.4.

Nesta configuração de vida útil, que expressa a curva global de desempenho de uma estrutura, os tipos de vida útil são apresentados para uma situação mais genérica, visando representar, de forma mais abrangente, os principais estágios de degradação nas estruturas de concreto ao longo do seu período de serviço. Desta forma de acordo com a Figura 2.4, a vida útil global de uma estrutura pode ser subdividida nas seguintes partes como estabelecido por Helene (1997):

a) Vida útil de projeto: Nesta etapa, também conhecida como período de iniciação, os agentes agressivos, tais como cloretos, CO_2 e sulfatos, ainda estão penetrando através da rede de poros do cobrimento, sem causar danos efetivos à estrutura.

b) Vida útil de serviço ou de utilização: Os efeitos dos agentes agressivos começam a se manifestar, como fissuras do concreto por ataque químico ou manchas consequentes da corrosão das armaduras. Essa vida útil é difícil de determinar, pois varia em função de cada caso

c) Vida útil total: corresponde ao período de tempo que vai até à ruptura e ao colapso parcial ou total da estrutura. Nesse momento, a estrutura está condenada ou os custos de reparos são demasiadamente elevados.

d) Vida útil residual: envolve parte das vidas úteis de serviço e total, após a vida útil de projeto, correspondendo ao período de tempo no qual a estrutura será capaz de desenvolver as suas funções, contado após uma inspeção e ou interdição.

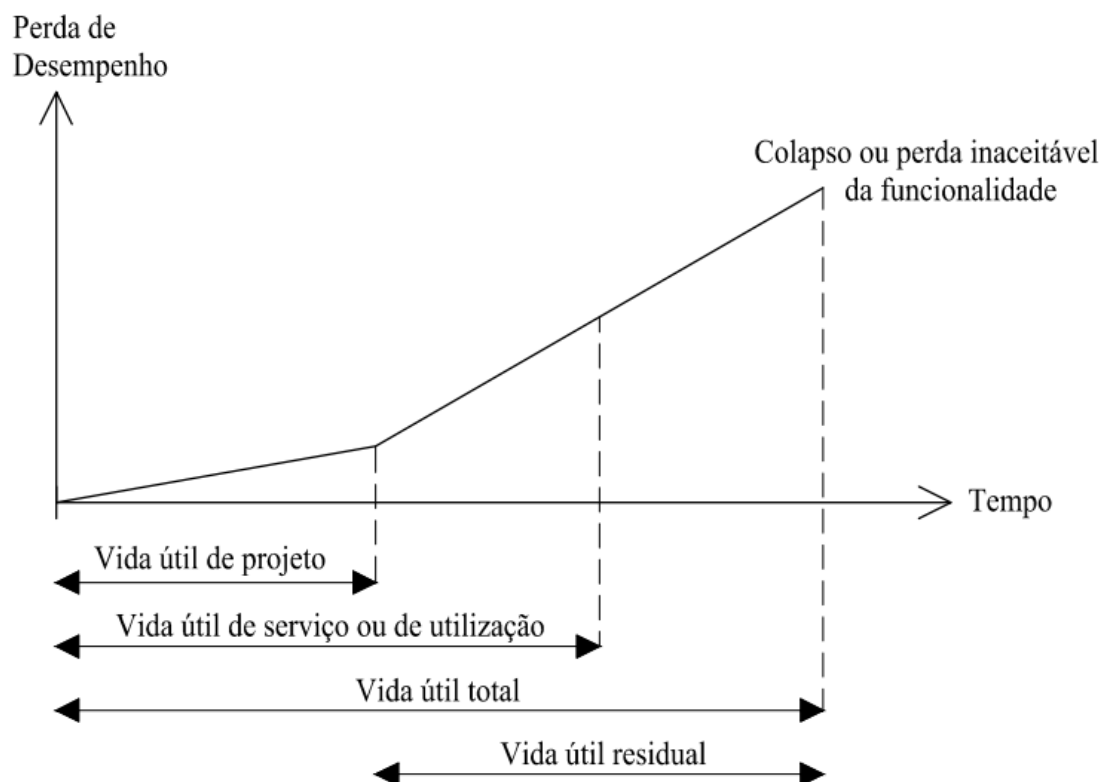


Figura 2.4 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras (Fonte: Adaptado de Helene, 1993).

2.4. Ação dos íons cloreto

Esta seção apresenta questões referentes as fontes de cloretos no concreto, tipos de cloretos e teor críticos destes, assim como fatores que influenciam o ingresso de cloretos no concreto.

2.4.1. Fontes de cloretos para o concreto

Já os íons cloreto presentes no concreto podem ser oriundos de diversas fontes. Os íons podem ser incorporados no concreto já no seu estado fresco pelo emprego de aditivos aceleradores de pega a base de cloretos de cálcio ou pela contaminação da água de amassamento e agregados empregados. No estado endurecido, a contaminação acontece pelo ingresso dos íons cloreto presentes no meio

externo, principalmente em ambientes marinhos, industriais ou pelo uso de sais de degelo no caso dos países com neve (MEDEIROS *et al.*, 2010).

2.4.2. Tipos de cloretos no concreto

Os cloretos presentes no concreto podem ser encontrados fixos aos produtos de hidratação, nos processos de adsorção física ou por combinação química, ou livres, dissolvidos na solução dos poros do concreto. Os íons que efetivamente contribuem para a corrosão, bem como para o transporte de cloretos no concreto, são os íons livres (PEREIRA, 2001).

Os cloretos encontrados na forma de sólido, ou seja, fixos, não representam riscos elevados para as estruturas, pois não podem penetrar na estrutura de poros do concreto, por terem dimensões maiores do que os poros do concreto, sendo as fases dos aluminatos. Porém, estes cristais podem se depositar por impactação na superfície do concreto e permanecer até que a água dissolva os cristais, transformando estes cloretos fixos em livres, podendo então ocorrer o transporte para o interior do concreto (HELENE, 1993).

A formação de sal de Friedel, que é um composto formado da combinação química de íons cloreto com aluminato tricálcico (C_3A), e a adsorção dos mesmos ao C-S-H retardam a difusão de íons cloreto no concreto, além de reduzir a quantidade de cloretos livres, assim contribuindo para a passivação do aço (HELENE, 1993).

Porém não é possível afirmar que o único parâmetro que influencia na capacidade de retenção de cloretos seja o C_3A , pois outros produtos de hidratação parecem ser capazes de fixar um determinado teor de cloretos (PEREIRA, 2001).

Crauss (2010) afirma que os cloretos livres são bastante agressivos, pois diferente do ataque da carbonatação ou mesmo de soluções ácidas, os íons não são consumidos no final do processo de corrosão, ou seja, mantém-se disponíveis para novas reações. Desta forma, baixos teores de cloretos livres no concreto já são considerados perigosos às armaduras presentes no concreto, podendo provocar alta taxa de corrosão.

Desta forma é possível constatar que os íons cloreto por meio de suas reações no concreto participam somente como catalisadores para a formação do óxido expansivo, sendo liberado para futuras reações e progredindo no processo de corrosão das armaduras no concreto.

2.4.3. Teor crítico de cloretos

Para ocorrer o início do processo de corrosão de armaduras no concreto, deve haver uma concentração mínima de íons cloreto no concreto. Existem diversos estudos com relação ao limite de íons cloreto no concreto, porém ainda não existe uma concordância em relação aos valores limites de cloretos para o início do processo de corrosão.

O risco de corrosão induzida por cloretos depende da concentração dos íons nos poros do concreto. Duas são as formas para se expressar o limite de íons cloreto para que ocorra a despassivação: a relação Cl^- (cloreto) / OH^- (hidroxila) da solução contida nos poros do concreto e a quantidade de cloretos por unidade de massa de cimento ou concreto (SILVA, 2006).

É interessante analisar a relação $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$ uma vez que esses íons apresentam comportamentos antagônicos. A elevação da concentração de cloretos leva a sérios riscos de corrosão, enquanto os compostos que geram hidroxilas ao concreto são os hidróxidos de cálcio, sódio e potássio, responsáveis pelo ambiente básico da solução aquosa dos poros do concreto (SILVA, 2006).

A norma brasileira NBR 12655 (2015), estabelece os valores de íons cloreto no concreto em relação à porcentagem de massa de cimento, sendo que no caso de concreto armado em zona marinha e costeira o valor limite é de 0,15 %, como pode ser verificado de acordo com a Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl^-) 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 da estrutura)	0,40

Fonte: ABNT, NBR 12655 (2015).

Page *et al.* (1981), consideram que o teor crítico de cloretos pode oscilar entre 0,1 e 1,0 % da massa de cloreto em relação à massa de cimento, dependendo do país e de alguns parâmetros, como condições ambientais e concentração de cloretos na superfície do concreto, dentre outros.

Al-Khaja (1997) condidera que em geral, há três níveis de concentração de cloretos em relação ao peso de cimento: para baixas concentrações de cloretos, o teor é de até 0,4 %, para concentrações médias, de 0,4 % a 1,0 % e altas quantidade de cloretos são consideradas acima de 1,0 %.

Figueiredo (2005) apresenta alguns limites de teores de cloretos estabelecidos por normas internacionais, que podem ser tomados como referência. Estes valores são apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Limites de norma para o teor total de cloretos.

Norma	País	Ano	Teor limite de cloretos
ACI 318-21	USA	2001	$\leq 0,15$ % em relação a massa de cimento, em ambiente com cloretos
			≤ 1 % em relação a massa de cimento, em ambiente seco
			$\leq 0,06$ % em relação a massa de cimento, para concreto protendido
CEB	Europa	1991	0,04 % em relação a massa de cimento
ENV 206	Portugal	1991	
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE-SP2	Japão	1986	$\leq 0,60$ Kg/m ³ de concreto

Fonte: Figueiredo (2005).

2.4.4. Fatores que influenciam o ingresso de cloretos no concreto

Existem alguns fatores que influenciam na capacidade do concreto de resistir a ação dos íons cloreto. A seguir são abordados alguns destes fatores.

Relação água/aglomerante

O efeito da relação água/aglomerante com relação ao coeficiente de difusão do cloreto é significativo. Alguns estudos realizados concluíram que o aumento da relação água/aglomerante no concreto aumenta o coeficiente de difusão de cloreto. Com a redução da relação água/aglomerante diminui a quantidade de água nos poros capilares do concreto, os produtos de hidratação preenchem os poros capilares, melhorando a durabilidade e a difusividade do concreto (FARAHANI *et al.*, 2015).

A proteção oferecida as armaduras por concretos com baixa relação água/cimento é devido ao menor acesso dos agentes agressivos e oxigênio e também devido à presença, em menor quantidade, de eletrólito nos poros do concreto, o que torna menos provável o início do processo de corrosão (HOFFMANN, 2001).

Com o aumento da relação água/aglomerante, é possível observar uma redução na estimativa da vida útil de estruturas de concreto, no entanto, essa relação não é linear, evidenciando que, à medida que se aumenta esta relação até valores mais elevados, a influência deste parâmetro é diminuída, tendendo a um valor de equilíbrio. Isso ocorre, pois a partir de um determinado valor de porosidade (entre 18 e 20 %), o caminho para a migração dos cloretos encontra-se tão facilitado, que incrementos na porosidade não influenciam significativamente esse parâmetro (RIBEIRO, 2018).

No estudo realizado por Pereira (2001), com relação ao coeficiente de difusão de cloretos em concretos produzidos com dois tipos de cimento Portland (CP II-F e CP IV), foi possível constatar que à medida que a relação água/cimento aumenta, aumenta também o coeficiente de difusão de cloretos.

Para boa avaliação da resistência à penetração de cloretos no concreto, alguns fatores devem ser considerados. Para se obter uma resistência adequada do concreto com base em cimentos Portland puros, a relação água/aglomerante não deve exceder o nível de 0,4; acima deste nível o concreto adquire uma porosidade mais alta. A relação água/cimento é muito importante, porém a escolha do tipo de cimento ou meio aglomerante adequado é tão ou mais importante do que selecionar uma baixa relação água/aglomerante. A adição de alguns meios cimentícios como escória de alto-forno, cinzas volantes ou sílica ativa podem reduzir bastante a difusão de cloretos no concreto (GJØRV, 2015).

Aglomerantes e adições

No Brasil, é comum a utilização de diferentes tipos de cimentos nas construções e, devido à inclusão de adições minerais na própria fabricação, esses cimentos apresentam composições químicas e físicas diferentes, resultando em diferentes propriedades do concreto, inclusive com alterações na resistência mecânica (MEDEIROS JUNIOR, 2014). GjØrv e Vennesland (1979) relatam que experimentos realizados indicam que a resistência à penetração de cloretos é afetada pelo tipo de cimento utilizado no preparo do concreto.

A utilização de adições no cimento, pode apresentar uma influência positiva, dependendo do tipo de adição, pois além de apresentar uma capacidade adicional de fixação de cloretos, por aumentar a quantidade de aluminatos disponíveis, ainda geram um refinamento dos poros e aumentam a resistência à penetração de agentes agressivos (PEREIRA, 2001).

Segundo Helene (1999), citado por Romano (2009, p. 47), quanto a escolha do tipo de cimento para utilização em ambiente agressivo, podemos definir da seguinte forma.

A escolha do cimento mais adequado a resistir à agressividade ambiental é um aspecto que irá influenciar na maior ou menor capacidade de fixação dos cloretos, sendo que para reduzir a penetração desses íons são preferíveis os cimentos com adições tipo CP III (com escória de auto forno) e CP IV (com cinza volante).

A composição do cimento tem efeito significativo no desempenho e durabilidade do concreto contra a corrosão das armaduras, a quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) presente no cimento utilizado em concretos é determinante na velocidade e intensidade da corrosão, uma vez que os íons cloreto reagem com o C_3A , formando o cloroaluminato de cálcio hidratado ou sal de Friedel ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$). Esse tipo de sal é insolúvel e diminui o fluxo de penetração de cloretos, devido à redução da concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto. Em menor proporção, o C_4AF também fixa os cloretos livres, formando os cloroferratos de cálcio hidratado ($3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) (SILVA, 2006; DIAB *et al.*, 2011).

Crauss (2010) realizou um estudo com relação à penetração de cloretos em concretos com cimentos do tipo CP IV, CP II e CP V ARI, os concretos com os diferentes tipos de cimento possuíam a mesma classe de resistência. O concreto com cimento CP IV apresentou a menor penetração de íons de cloreto, devido ao refinamento dos poros, promovido pela adição pozolânica em sua composição.

No estudo realizado por Medeiros Junior (2014), foi realizado ensaio de resistividade elétrica de concretos. Foram utilizados os 4 tipos de cimento (CP IV 32, CP III 40 RS, CP II-F 32 e CP V ARI), sendo constatado os maiores valores de resistividade elétrica para as amostras que utilizaram cimento CP III RS, com alto teor de escória de alto-forno, essa adição contribui para refinar os poros do concreto, reduzindo a condutividade do meio, e proporcionando maiores valores medidos de resistividade elétrica.

Pereira (2001), constatou que a utilização de cimento CP IV possibilitou a obtenção de concreto com coeficiente de difusão de cloretos significativamente inferior com relação aos concretos com cimento CP II-F, sendo que neste estudo foram utilizados apenas estes dois tipos de cimento.

A utilização de pozolanas finas, como sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz, atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição do concreto, assim reduzindo significativamente a penetração de cloretos, ainda aumentando a resistência mecânica do concreto (DAL MOLIN, 1995).

A utilização de adições minerais ao cimento visa aproveitar o efeito positivo das mesmas, principalmente sua influência na redução da difusividade do concreto devido ao refinamento dos poros, especificamente no caso de corrosão induzida por cloretos, e a capacidade de combinação dos cloretos com seus produtos de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A adição de sílica ativa aos materiais cimentícios oferece uma abordagem promissora para aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto em ambientes marítimos adversos. Isso ocorre porque a adição de sílica ativa aos materiais cimentícios no concreto reduz a porosidade. Consequentemente, o concreto de sílica ativa melhora a microestrutura da zona de transição e reduz a difusividade. No entanto, uma quantidade excessiva de sílica ativa pode resultar em secagem excessivamente rápida, o que leva à propagação de microfissuras no concreto (FARAHANI *et al.*, 2015). Neville (2000) sugere o uso de sílica ativa com um teor de materiais cimentícios entre 8 e 10 % em peso na região do Golfo Pérsico. Além disso, Shekarchi *et al.* (2009) propõem um teor ótimo de sílica ativa de 7,5 % para reduzir o coeficiente de difusão no sul do Irã.

Hoffmann (2001), realizou estudo com relação a influência do teor de sílica ativa no coeficiente de difusão de cloretos em concretos executados com cimento CP V-ARI, sendo utilizados teores entre 5 e 20 % de substituição do cimento por sílica ativa. Os resultados demonstraram que o aumento no teor de adição de sílica ativa é significativo na redução da penetração de cloretos.

Com relação à utilização de metacaulim no concreto, sua principal vantagem se deve ao fato de o material possuir alta atividade pozolânica, ou seja, a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio produzido durante o processo de hidratação do cimento Portland, formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Por ser um material muito fino, o metacaulim possui a capacidade de acelerar a reação pozolânica (ARIKAN *et al.*, 2009).

O metacaulim atua no concreto com ação química por meio da fixação de cloretos na forma de sal de Friedel, e também produz um mecanismo físico de proteção, contribuindo para o refinamento dos poros da pasta de cimento endurecida no concreto. Com o refinamento, os poros tornam-se menos interconectados e mais tortuosos, o que dificulta a penetração de cloretos. Isso acaba por proporcionar ganhos consideráveis em relação ao desempenho frente à corrosão das armaduras (OLLIVIER e TORRENTI, 2008).

Por meio de ensaio acelerado de molhagem e secagem em solução contendo cloretos, Figueiredo *et al.* (2014) constataram menor penetração de cloretos em concreto contendo metacaulim.

Assim como a sílica ativa e o metacaulim, a cinza de casca de arroz proporciona melhora na resistência dos concretos à penetração de íons cloreto, este fato se deve ao tamanho dos grãos e da finura do material, pois o material melhora a zona de transição da interface entre os agregados e a pasta de cimento (FEDUMENTI, 2013).

Fedumenti (2013) realizou estudo com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz com relação à penetração de íons cloreto, onde constatou que quanto maior o teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz, maior é a resistência à penetração de cloreto. Os concretos com substituição de cimento por cinza de casca de arroz em teores de 20 % sempre retornaram um coeficiente difusão menor que do que os concretos com 10 % de substituição.

Missau (2004) realizou estudo com substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, com concretos com diferentes relações água/aglomerante, a análise dos resultados obtidos mostrou redução na penetração de cloretos em concretos com a presença de cinza de casca de arroz quando comparado ao concreto de referência e mesmas relações água/aglomerante.

Cobrimento do concreto

O objetivo do cobrimento é proporcionar uma proteção para as armaduras presentes no concreto (NEVILLE, 2013). Desta forma, as estruturas de concreto armado, devem receber uma apropriada espessura de cobrimento a fim de impedir o acesso de cloretos e, assim, fornecer proteção contra a corrosão (DEHGHAN *et al.*, 2017). Quanto maior a camada de cobrimento, maior será a proteção conferida pelo concreto as armaduras, sendo que a camada de cobrimento limitada a sete centímetros. As armaduras inseridas nos componentes estruturais do concreto estão, em princípio, protegidas e passivadas contra corrosão. Essa proteção é proporcionada pela camada de cobrimento do concreto que forma uma barreira física ao ingresso de agentes externos e principalmente por uma proteção química conferida pela alta alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto (HELENE, 1993).

Portanto o papel do cobrimento do concreto é proteger a capa, filme ou película passivadora protetora das armaduras contra os danos físicos e mecânicos, e ao mesmo tempo, manter a estabilidade química da estrutura (HELENE, 1993).

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), propõe que o cobrimento do concreto seja previsto em projeto de acordo com parâmetros mínimos das classes de agressividade ambiental estabelecidas na norma, ou seja, para cada classe de agressividade a norma específica um cobrimento específico mínimo, relacionado aos elementos estruturais principais que são lajes, vigas e pilares. A Tab. 2.2 apresenta estas relações, sendo que para ambientes costeiros e marinhos a classe de agressividade é IV em zona de respingos da maré, sendo assim neste tipo de ambiente é necessário cobrimento mínimo para as lajes de 45 mm e 50 mm para vigas e lajes, no caso de concreto armado.

Tabela 2.2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.

Tipo de Estrutura	Componentes ou elementos	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

Fonte: ABNT, NBR 6118 (ABNT, 2014).

Pereira (2013), realizou um estudo com relação à influência da espessura de cobrimento no concreto frente à corrosão das armaduras, aonde pode concluir que quanto maior a espessura de cobrimento menor a perda de massa das armaduras. Os dados obtidos, demonstram ainda que esta perda de massa das armaduras é pequena para relação água/aglomerante de 0,4 e muito significativa para valores de relação água/aglomerante de 0,5 e 0,6.

Temperatura

Neville (2013), destaca que a temperatura exerce grande influência na durabilidade das estruturas de concreto, pois na grande maioria dos processos de natureza química, a elevação da temperatura aumenta a cinética das reações. Esta poderia ser a razão pela qual estruturas que estão inseridas em regiões quentes se deterioram mais rapidamente do que as que estão localizadas em regiões de clima frio ou temperado.

A temperatura exerce um papel fundamental no processo de penetração de cloretos, Helene (1993) afirma que um aumento de 15° C para 30° C praticamente duplica o coeficiente de difusão.

De acordo com Hussain *et al.* (1996), citado por Missau (2004, p. 23), quanto a influência da temperatura no transporte de cloretos podemos destacar o seguinte.

Estudos sobre a influência do teor de C_3A na quantidade de cloretos livres com a variação da temperatura, destacam que a alta temperatura reduz a concentração de OH^- na solução dos poros, elevando a relação Cl^-/OH^- , e aumentando a concentração de cloretos livres pela decomposição de cloro aluminatos. Soma-se a estes fatores, o estímulo dado pela temperatura na movimentação das moléculas, facilitando o transporte de íons.

AL-KHAJA (1997), constatou que um aumento significativo no ingresso de cloreto no concreto quando a temperatura de exposição aumenta de 20° C para 45° C, particularmente em pequenas profundidades. No entanto, a profundidades superiores a 45 mm, o aumento da temperatura teve um efeito insignificante. O efeito da temperatura na entrada de cloreto é mais significativo em concretos convencionais do que em concretos de alta resistência. O aumento da difusão de cloretos devido à temperatura elevada pode ser considerado como um fator significativo que afeta a durabilidade do concreto, frente à corrosão de armaduras.

É possível observar opiniões variadas a respeito da influência da temperatura do concreto quanto a penetração de cloretos no concreto. Contudo, a maioria dos autores afirmam que o aumento da temperatura aumenta a difusão de cloretos para o interior do concreto (MISSAU, 2004).

Umidade relativa

A umidade relativa ambiental está relacionada diretamente com a quantidade de água no interior dos poros do concreto. Este fato se deve à permanente busca de equilíbrio hidrotérmico que acontece no concreto, perdendo umidade para o meio ou dele retirado de acordo com o gradiente existente (SACILOTO, 2005).

O processo de corrosão será extremamente lento ou não ocorrerá em concretos secos, pois a resistividade elétrica é tão alta que impede a corrosão das armaduras de ocorrer, até mesmo na ausência da camada de passivação das armaduras. Para que ocorra o desenvolvimento do processo de corrosão das armaduras, é necessária a existência de uma certa quantidade mínima de umidade nos poros do concreto. Portanto em princípio, quanto maior grau de saturação dos poros do concreto, menor o valor da resistividade elétrica e maiores as taxas de corrosão (VENTURA *et al.*, 1987).

Neville (2013) destaca que não existe corrosão de armaduras quando o aço se encontrar em uma atmosfera totalmente seca, provavelmente em umidade relativa menor que 40 %, da mesma forma não ocorre corrosão expressiva em concreto totalmente imerso em água. A umidade relativa ótima para a corrosão se encontra entre 70 e 80 %.

Ventura *et al.* (1987), constataram que a umidade relativa para que ocorra corrosão de armaduras na presença de íons cloreto deve estar situada entre 65 e 95 %.

Cura

A idade é um dos principais fatores que influenciam a penetração dos cloretos no concreto, pois está diretamente relacionada à microestrutura da pasta de cimento hidratada. Portanto, com a

evolução da hidratação a porosidade vai diminuindo e os vazios vão sendo preenchidos pelos compostos, que se formam no decorrer do tempo. De uma forma geral, quanto maior a idade de cura menor a penetração de cloretos em concretos (PEREIRA, 2001).

Saciloto (2005) destaca que o prolongamento do período de cura úmida reduz a penetração de cloretos, sendo o percentual de redução tanto maior quanto mais elevada for a relação água/aglomerante.

A falta de uma cura adequada do concreto pode ser um fator crítico para a durabilidade do concreto aos agentes agressivos do meio ambiente, entre eles os íons cloreto (AITCIN, 2000). Um processo de cura deficiente gera um concreto superficialmente mais poroso e menos resistente ao ingresso de cloretos (ROMANO, 2009).

A influência da temperatura no processo de cura deve ser considerada, uma vez que em temperaturas mais elevadas a perda de água na pasta de cimento será maior, alterando a distribuição dos poros e gerando fissuras, favorecendo o ingresso de substâncias nocivas ao concreto (ROMANO, 2009).

Zona de exposição

A mais grave ameaça a durabilidade e vida útil de estruturas de concreto é a ação dos íons cloreto presentes na água do mar, a ação destes íons em relação as estruturas de concreto armado ocorre principalmente em regiões costeiras ou marinhas por meio de contato da água do mar contendo cloretos ou por meio de nevoa salina que pode se deslocar desde o mar até certa distância em direção a costa. O contato das estruturas com a água do mar ou a distância em que as estruturas se encontram em relação à costa marinha é determinante no processo de deterioração das estruturas de concreto armado.

Ventura *et al.* (1987) apresentam os diferentes tipos de exposições que podem ser estabelecidos da seguinte forma:

a) Zona atmosférica, na qual a estrutura recebe ação de cloretos, apesar de não estar em contato com a água. O nível de cloretos depende da distância ao mar e da altura, sem esquecer a velocidade e direção dos ventos e outras condições geográficas.

b) Zona de respingo, na qual ocorre uma ação direta da água do mar, devido às ondas e respingos que resultam de seu impacto em certos obstáculos ou nas próprias construções.

c) Zona de oscilação das marés, que é limitada pelos níveis máximo e mínimo atingidos pelas marés e nos quais o concreto pode ser permanentemente saturado e com um acúmulo crescente de sais.

d) Áreas submersas, ou parte da construção localizada abaixo do nível da maré baixa e, portanto, em regime de imersão permanente.

e) Zona do leito do mar ou parte da estrutura enterrada no fundo do mar.

A penetração de cloretos no ambiente marítimo é fortemente influenciada pela qualidade do concreto e condições de exposição. As maiores velocidades de penetração podem ser verificadas na zona de variação de maré. Na zona de rebentação observaram-se menores ritmos de penetração, enquanto na zona atmosférica a velocidade de penetração é significativamente inferior à verificada nas outras condições de exposição. Este fato mostra que a agressividade do ambiente marítimo varia consideravelmente com o ambiente de exposição e que os requisitos de durabilidade (COSTA e APPLETON, 2007).

De acordo com Helene (1993), o ataque dos cloretos em ambientes marítimo, normalmente, é maior em zona de respingos do que em zona de névoa e é maior na zona de variação de maré do que em zona submersa.

Nas zonas de maré e respingos, o coeficiente de difusão é afetado pela altura do nível do mar, ou seja, pelo grau de contato da estrutura de concreto com a água do mar. À medida que aumenta a altura do nível do mar, aumenta o coeficiente de difusão de íons cloreto no concreto. Em ambientes de névoa salina, o tempo de exposição da estrutura e distância do mar são fatores fundamentais na difusão de cloretos no concreto, porém o coeficiente de difusão em zona de névoa salina pode ser insignificante para ocorrência de corrosão nas armaduras do concreto, em relação as zonas de maré, respingos e submerso (SONG *et al.*, 2008).

Grau de saturação

Em concreto sem a presença de água não ocorre o processo de difusão de cloretos. Em ambientes com umidade relativa alta, os poros da estrutura ficam saturados, proporcionando a condição necessária para que os cloretos consigam se difundir no interior do concreto (ROMANO, 2009).

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

Bandeira (2015) destaca a importância da contribuição do grau de saturação aos mecanismos de transporte de cloretos, como o processo de difusão, que podem levar íons cloreto até a armadura passivadora.

2.5. Indicadores de durabilidade

Apesar da capacidade do concreto de fornecer infraestrutura útil e duradoura, as estruturas de concreto podem enfrentar desafios de durabilidade principalmente devido à deterioração prematura. Esta é uma questão de preocupação global, pois ameaça o crescimento econômico, os recursos naturais e a segurança humana (GJØRV, 2011).

Um projeto bem elaborado deve conceder segurança às estruturas e assegurar-lhes desempenho eficiente em serviço, além de aparência aceitável. Dessa maneira, devem ser observadas as exigências relacionadas à capacidade projetada, bem como às condições em uso habitual e, em especial, as especificações referentes à durabilidade. Nesse sentido, os erros de projeto, em conjunto com a utilização de materiais inapropriados, representam uma parcela relevante das ocorrências relacionadas ao aparecimento de manifestações patológicas. Outro aspecto importante para a durabilidade das estruturas é a avaliação do grau de agressividade do meio ambiente. A fim de que sejam elaboradas especificações adequadas, torna-se essencial entender o comportamento dos materiais que compõem a estrutura quando submetida a diversas condições de exposição (ADAMATTI *et al.*, 2016).

A durabilidade do concreto de cimento Portland pode ser definida como sendo a capacidade do concreto em resistir a ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, assim o concreto durável manterá sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao meio ambiente por um determinado tempo (COMITÊ 201 DO ACI, 1991).

Sendo a durabilidade do concreto uma das propriedades mais importantes, pois é essencial que ele seja capaz de suportar as condições para as quais foi projetando durante a vida da estrutura (NEVILLE, 2013). A boa durabilidade de estruturas de concreto está relacionada ao adequado processo de fabricação e da capacidade de resistir às agressões provenientes do meio externo (FUSCO, 2008).

A falta de durabilidade de uma estrutura de concreto armado pode ser causada por agentes externos advindos do meio ou por agentes internos ao concreto. As causas podem ser classificadas como físicas, mecânicas e químicas. As causas físicas são provindas do congelamento e das diferenças entre propriedades térmicas do agregado e da pasta de cimento, enquanto as causas

mecânicas estão associadas principalmente a abrasão. As causas químicas podem ser provenientes do ataque de sulfatos, ácidos, água do mar e cloretos, que induzem a corrosão eletroquímica da armadura (NEVILLE, 2013).

Um concreto é considerado durável quando desempenha as funções que lhes foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade esperado durante um período de vida previsto. Como qualquer tipo de material, a elevada durabilidade do concreto não implica uma vida indefinida, nem em suportar qualquer tipo de ação, pois, com as interações com o meio ambiente, a microestrutura e as propriedades dos materiais mudam ao longo do tempo (RIBEIRO e CASCUDO, 2018).

Pinto (2016), considera que a durabilidade do concreto é integralmente dependente da sua resistência à penetração de elementos agressivos presentes no ambiente em que o concreto é exposto, tais como cloretos, sulfatos e dióxido de carbono, que reagem quimicamente quando presentes no interior do concreto, degradando as armaduras, e causando danos à estrutura.

Jinping e Xuesong (2010), acreditam que a durabilidade do concreto deve ser considerada tendo em vista quatro fatores principais que são: ambiente, que pode ser classificado como comum, marinho e industrial; materiais; componentes; e estrutura. Para estes autores a durabilidade da estrutura de concreto é definida em função da sua resistência em função do uso sem custos adicionais para manter a sua segurança, funções e aparência do concreto durante a vida útil previamente estipulada.

Já Helene (1993), considera que a durabilidade de estruturas de concreto é diretamente relacionada a fatores como: o traço do concreto (relação água/cimento e tipo de cimento), adensamento efetivo do concreto na estrutura, cura e cobrimento das armaduras, pois estes são os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar de 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 aonde está inserida a estrutura.

O ambiente marinho pode ser descrito como sendo a mais grave ameaça para estruturas de concreto, devido a ação prejudicial dos íons cloreto ao concreto, causando danos as estruturas. A penetração dos íons cloreto leva à corrosão das armaduras, que é a principal causa de redução do desempenho do concreto, diminuindo a vida útil da estrutura (ZHUO *et al.*, 2010).

De acordo com Santos (2006), a proteção química e a barreira física que o concreto confere ao aço não garantem que as estruturas sejam eternamente duráveis. Até mesmo estruturas de concreto com armadura adequadamente protegida por uma camada suficientemente espessa de concreto de baixa permeabilidade, com o passar do tempo, estarão sujeitas ao processo de deterioração provocado pela ação de agentes agressivos presentes no ambiente no qual a estrutura está inserida.

Embora os problemas de durabilidade do concreto sejam complexos e variados, as medidas de mitigação para garantir a durabilidade geralmente estão disponíveis e acessíveis. Dois meios podem garantir concreto durável, ou seja, evitar os mecanismos de deterioração e otimizar as composições e proporções dos materiais. O primeiro se baseia na utilização de medidas de proteção, como o uso de materiais não reativos ou tratamentos de superfície. Já o segundo diz respeito a adoção de abordagens em padrões e especificações de durabilidade. A abordagem atual para lidar com a durabilidade do concreto em padrões e especificações é geralmente a chamada abordagem prescritiva que descreve os requisitos para composições de materiais e proporções, procedimentos e métodos de teste. Esses requisitos têm eficácia limitada e muitas vezes sufocam a inovação (ROSTAM, 2003; KESSY *et al.*, 2015).

Pesquisas recentes se concentraram em abordagens de desempenho, que medem propriedades relevantes do concreto, em particular propriedades relacionadas ao transporte para durabilidade (ALEXANDER *et al.*, 2010). Idealmente, essas abordagens devem ser totalmente baseadas no desempenho, mas, na prática, uma abordagem mista intermediária costuma ser mais útil - denominada abordagem híbrida. Para ser totalmente baseada no desempenho, a abordagem deve ser integrada, vinculando requisitos de durabilidade (incluindo indicadores de durabilidade de métodos de teste relevantes) e design de durabilidade através de modelos de vida útil, a fim de estimar a vida útil da estrutura (KESSY *et al.*, 2015).

Uma abordagem híbrida é uma mistura de requisitos prescritivos e de desempenho, mas com maior ênfase nos critérios de desempenho. O cliente e/ou especificador decidem sobre o nível de desempenho desejado em uma determinada condição de exposição e propõem indicadores de durabilidade relevantes que são usados para preparar especificações. Os indicadores de durabilidade são escolhidos com base em recomendações técnicas sem definir necessariamente ou explicitamente um período de vida útil do projeto. Geralmente, as duas abordagens - baseadas no desempenho e híbridas - visam a alcançar indicadores relevantes de durabilidade que demonstram a adequação do concreto e sua composição em relação às condições de exposição (KESSY *et al.*, 2015).

As abordagens de desempenho estão agora ganhando aceitação na indústria do concreto, pois promovem a inovação, enquanto o desempenho desejado do concreto durante sua vida útil e as propriedades estruturais do concreto podem ser especificadas antes da construção (KESSY *et al.*, 2015).

Neste sentido o conceito de indicadores ou índices para controle da durabilidade, que pretendem descrever e, portanto, controlar uma série de problemas de deterioração e incluem parâmetros físicos, químicos e eletroquímicos. Geralmente descritos com base em propriedades de

transporte ou mecanismos de deterioração e pode ser utilizado para caracterizar o concreto em termos da sua durabilidade potencial (ALEXANDER, 2018).

Desta forma, a realização de ensaios de durabilidade no concreto se torna uma importante ferramenta na estimativa da durabilidade de estruturas de concreto armado. Em casos que envolvem ambiente marinho e costeiro os ensaios de durabilidade são baseados na difusão de cloretos em concreto armado, devido ao mecanismo de difusão ser o mecanismo dominante em relação a penetração de cloretos nas estruturas. Diferentes métodos de ensaio são usados em diferentes partes do mundo para estimar os coeficientes de difusão de cloreto (ALEXANDER, 2018).

Neste sentido, testes de migração têm sido amplamente utilizados como testes acelerados de difusividade do cloreto no concreto. Tanto a migração em estado estacionário como o teste de migração em estado não estacionário, bem como testes de condutividade elétrica, estão sendo usados para avaliação da difusividade do cloreto no concreto (TONG e GJØRV, 2001). Porém, devido à complexidade dos mecanismos de transporte envolvidos, ainda falta uma correlação teórica entre os resultados obtidos a partir de métodos distintos. Na literatura, os dados experimentais para estabelecer essa correlação também são muito limitados (RIBEIRO *et al.*, 2011).

Inicialmente alguns ensaios de migração, utilizados para avaliar a resistência a penetração de cloretos eram realizados por meio da avaliação da carga total passante, conforme a ASTM C1202 (2017), e o coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário. Mais recentemente, alguns autores têm utilizado ensaios de migração para calcular o coeficiente de difusão também no estado não-estacionário (RIBEIRO *et al.*, 2012, A).

Os ensaios de migração têm como princípio a aplicação de uma diferença de potencial entre duas células, sendo uma contendo uma solução de cloretos, célula catódica, e outra sem cloretos, célula anódica, entre as quais é colocada a amostra de concreto a ser analisada. O potencial elétrico externo aplicado força a passagem dos íons cloreto através da amostra de concreto da primeira para a segunda célula. Neste método, o transporte dos íons cloreto através do corpo de prova é induzido pela corrente elétrica gerada devido à diferença de potencial aplicada por uma fonte de corrente contínua por meio dos eletrodos contidos em cada célula (RIBEIRO *et al.*, 2012, A).

. O teste de migração rápida de cloro desenvolvido por Tang, descrito na diretriz NT Build 492(1999), é um dos métodos de teste acelerado em que os cloretos penetram no concreto em altas taxas devido ao campo elétrico aplicado. A saída do teste é o coeficiente de difusão de cloreto. Este método é considerado por alguns investigadores como sendo o mais adequado de todos os testes de cloreto acelerados, com base na sua simplicidade, curta duração e frequentemente é assumido como tendo uma base teórica clara (ELFMARKOVA *et al.*, 2015).

Embora o teste descrito pela ASTM C1202 (2017) seja recomendado e adotado por muitos pesquisadores este ensaio recebe algumas críticas referente a sua teoria. Andrade (1993) considera que este ensaio possui alguns erros que são: contabilização da corrente total e não a correspondente ao fluxo de cloreto; integração da corrente total desde o início do experimento, ensaio não distingue fluxo de cloreto de reação e fluxo simples; alta tensão utilizada no ensaio de 60 V induz calor, que por sua vez altera a velocidade do fluxo. Ainda segundo Andrade (1993), um teste de migração desse tipo não pode informar o transporte de cloretos e muito menos a porosidade ou "permeabilidade" da amostra de concreto. Desta forma Andrade (1993) propõe a utilização de um ensaio semelhante ao proposto pela UNE 83987 (2012), em que se utiliza uma tensão de 12 V, por um período de tempo bastante superior ao período de teste de 6 horas preconizado pela ASTM C 1202 (2017).

Além dos ensaios baseados na migração de cloretos também podem ser utilizados testes de imersão para determinar o coeficiente de difusão de cloretos. Os testes de imersão em massa, descritos, no NT Build 443(1995) ou ASTM C1556 (2016), são testes de difusão nos quais amostras de concreto são expostas a uma solução de cloreto por um período de tempo relativamente longo. No entanto, os métodos a longo prazo não são frequentemente preferidos na prática porque são demorados e trabalhosos (ELFMARKOVA *et al.*, 2015).

No conceito, os métodos da NT BUILD 443 (1995), ASTM C1543 (2010) e ASTM C1556 (2016) são bastante semelhantes, sendo a principal diferença entre estes testes a concentração de solução de cloreto de sódio utilizada para realização da imersão dos corpos de prova e o tempo mínimo de exposição das amostras a solução. A NT Build 443 (1995), ASTM C1543 (2010) e ASTM C1556 (2016) utilizam solução de cloreto de sódio de 16,5%, 15% e 16,5% respectivamente. Estes métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto, utilizam amostras de pó de concreto extraídas dos corpos de prova após período de imersão em solução salina para determinação do teor de cloretos em cada ponto, assim sendo possível montar o perfil de cloretos para determinação do coeficiente de difusão por meio de regressão não linear.

Neste estudo são utilizadas três diferentes metodologias para determinação do coeficiente de difusão de cloretos. Com o objetivo de apresentar diferenças na aplicação destas diferentes metodologias foi criado o Quadro 2.2 que apresenta informações, como o que determinar cada método, tipo de regime de determinação do coeficiente de difusão, duração do ensaio, informações quanto a utilização de corrente elétrica, dimensões das amostras utilizadas para realização do ensaio, concentração da solução de cloreto de sódio e aspectos positivos e negativos quanto a cada método.

Quadro 2.2 – Comparativo das normas de ensaios de durabilidade.

Parâmetros	Normas		
	ASTM C1556	NT BUILD 492	UNE 83987
Nome	Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion	Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments	Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro em el hormigón endurecido. Método multiregimen.
Determina	Coeficiente de difusão aparente de cloreto. Perfil de cloretos	Coeficiente de migração de cloretos	Coeficientes de difusão de cloretos
Regime	Não estacionário	Não Estacionário	Estacionário e não Estacionário
Duração do ensaio	Mínimo 35 dias	Máximo 96 horas	A partir de 25 dias
Quanto a utilização de tensão elétrica	Não utiliza tensão elétrica	Aplicação de tensão inicial de 30 V, sendo realizada correção da tensão de acordo com a norma	Aplicação de tensão contínua de 12 V
Dimensões corpo de prova (Diâmetro x altura)	Mínimo de 75 x 75 mm	100 x 50 mm	Mínimo 75 x 20 a 30 mm
Concentração solução de cloreto de sódio	165 g/L	100 g/L	1 M (58,42 g/L)
Positivo	Utiliza corpo de prova saturado, obtendo o fenômeno Difusão. Ingresso de cloretos apenas por difusão, possibilita comparar com métodos de migração. Baixo custo. Utiliza poucos equipamentos.	Ensaio de curta duração. Baixo custo. Tensão elétrica moderada. Não é necessária determinação do perfil de cloreto.	Utiliza corpo de prova saturado. Determinação do coeficiente de difusão no estado estacionário e não estacionário. Baixa tensão aplicada. Analisa capacidade de fixação de íons cloreto. Eletrodo afastado da amostra.
Negativo	Utiliza a 2ª lei de Fick ajustada para determinação do coeficiente de difusão. Ensaio de longa duração.	Tensão varia em função da corrente medida. Resultado depende da saturação da amostra. Ensaio de migração. Necessita aspersão de nitrato de prata.	Ensaio de longa duração. Resultado depende da saturação da amostra. Ensaio de migração.

O método da ASTM C1556 (2016) é considerado como método que representa diretamente o processo de difusão, pois este método consiste na imersão de corpos de prova em solução com concentração salina por um período mínimo de 35 dias. Já os métodos da NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012) utilizam aplicação de tensão elétrica para acelerar a duração do ensaio, enquanto ASTM C1556 (2016) o ensaio é acelerado devido a solução de exposição dos corpos de prova possuir maior concentração salina em relação aos demais métodos. Desta forma o método da ASTM C1556 (2016) foi utilizado como base em relação aos demais métodos estudados para realizar análise dos resultados obtidos.

Dentre os métodos determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto, o método da NT Build 492 (1999) é o método mais simples para realização do ensaio, sendo este também o método com menor duração de tempo, este ensaio pode ser considerado de curta duração, pois o tempo de realização varia de 6 a 96 horas, com aplicação de tensão elétrica inicial de 30 V, porém com ajuste de tensão pode variar de 10 a 60 V, sendo a determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto determinada de forma direta por equação disponível na norma. O método da UNE 83987 (2012), apresenta forma de realização do ensaio simples, porém este ensaio é mais trabalhoso do que NT Build 492 (1999) devido a necessidade de determinação de condutividade periodicamente, o ensaio possui duração variável que deve ser analisada durante a realização do ensaio com a construção de um gráfico de concentração de cloretos versus tempo analisando se ensaio atingiu os regimes não estacionário e não estacionário, o ensaio é realizado com utilização de tensão elétrica de 12 V, a determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto por este método também é realizada por meio de equações disponíveis na norma para os regimes estacionário e não estacionário, porém este método pode apresentar variações nos resultados pela determinação do *time lag* que é determinado de forma manual de acordo com a inclinação da curva no regime estacionário. Já o método da ASTM C1556 (2016) é realizado sem aplicação de tensão elétrica, este método consiste na imersão das amostras em solução de cloreto de sódio, que é bastante simples, porém este ensaio se torna mais trabalhoso na parte de extração de pó de concreto das amostras e determinação da concentração de cloretos por meio de potenciometria, a determinação do coeficiente de difusão por este método é realizado por meio de regressão não linear em equação disponível na norma.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos neste trabalho foi desenvolvido um programa experimental, estabelecendo-se assim, os fatores de controle, as variáveis analisadas, os materiais e os métodos.

3.1. Variáveis estudadas

De acordo com objetivos propostos para este trabalho foram definidas duas classes de variáveis, que são apresentadas na sequência.

a) Variáveis independentes (relacionadas ao objetivo da pesquisa):

- Tipo de aglomerante;
- Relação água/aglomerante;
- Utilização de aditivos químicos.
- Teor de substituição do cimento por sílica ativa;
- Tempo e condições de cura;
- Concentração de solução salina no ensaio de difusão de cloretos em concreto;
- Método utilizado para determinação do coeficiente de difusão de cloretos em concreto;
- Duração do ensaio de determinação do coeficiente de difusão de cloretos em concreto;
- Idade do concreto para realização dos ensaios.

b) Variáveis dependentes (influenciadas pelas variáveis independentes e intervenientes):

- Coeficientes de difusão;
- Profundidade de penetração de cloretos;
- Resistência à compressão;
- Absorção de água por capilaridade.

3.2. Propriedades estudadas

Para facilitar o entendimento do programa experimental, no Quadro 3.1, são detalhadas as propriedades estudadas nesta pesquisa, assim como a quantidade de amostras ensaiadas e normas utilizadas no procedimento dos ensaios.

Quadro 3.1 – Resumo dos ensaios realizados e métodos empregados.

Ensaio		Detalhe	Metodologia
Mecânico	Resistência à compressão	3 amostras por traço, idade: 120 dias	NBR 5739 (2018)
Físico	Absorção de água por capilaridade	3 amostras por traço, idade: 120 dias	NBR 9779 (2012)
Durabilidade	Coeficiente de difusão aparente de cloreto	3 amostras por traço, idade: 120 dias	ASTM C1556 (2016)
	Coeficiente de migração de cloretos	4 amostras por traço, idade: 120 dias	NT BUILD 492 (1999)
	Coeficientes de difusão de cloretos	4 amostras por traço, idade: 120 dias	UNE 83987 (2012)

3.3. Delineamento da pesquisa

A pesquisa foi dividida em seis fases, conforme apresentado na Figura 3.1: (a) revisão bibliográfica, desenvolvida ao longo de todo o trabalho; (b) dosagem dos concretos; (c) escolha dos traços para substituição parcial do cimento pela sílica ativa; (d) moldagem dos corpos de prova; (e) realização dos ensaios; (f) análise e comparação dos resultados.

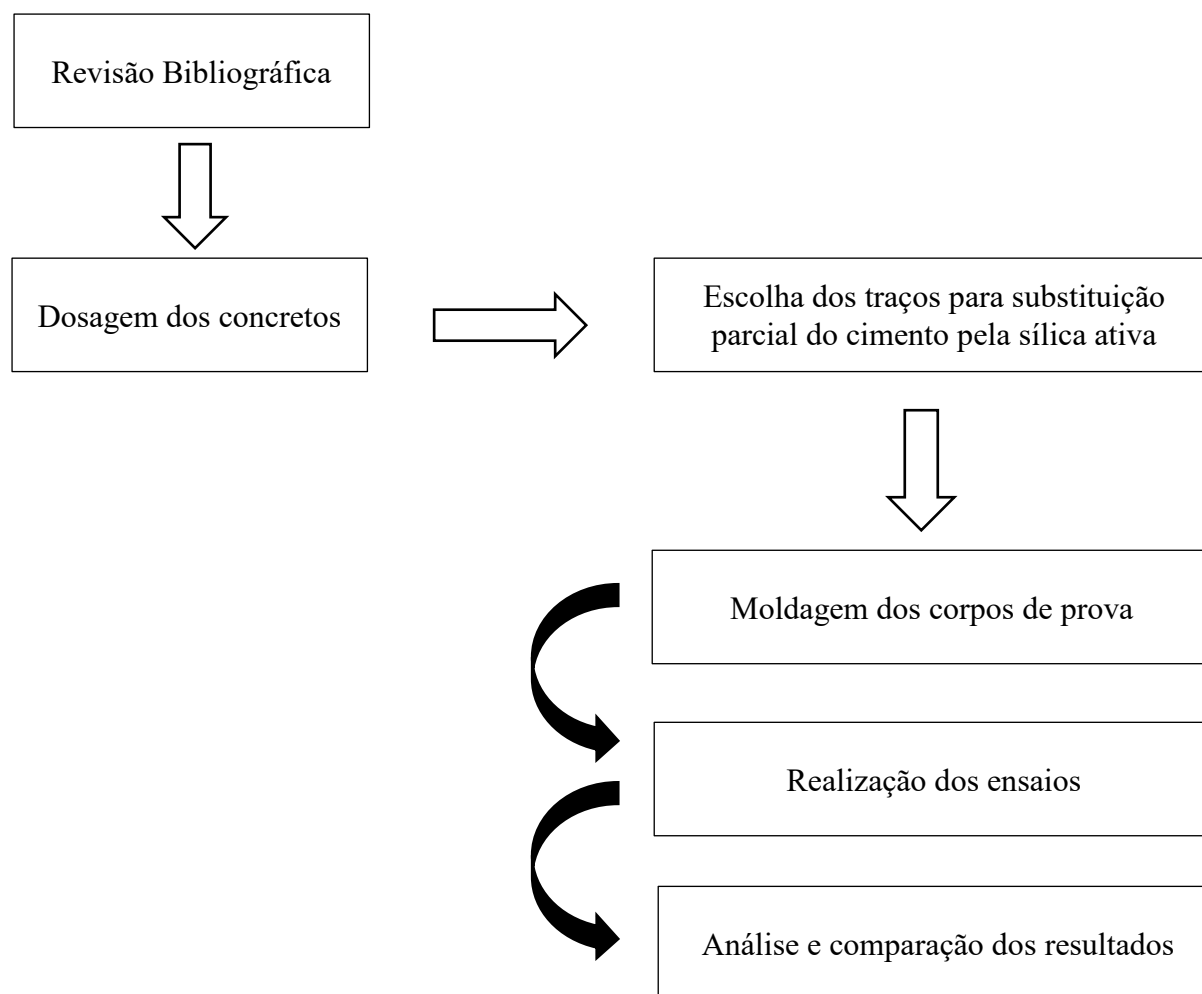


Figura 3.1 – Delineamento da pesquisa.

No que diz respeito à revisão bibliográfica para o aprofundamento do tema proposto, primeira fase do trabalho, buscou-se subsídios em literaturas técnicas na área de concretos produzidos com sílica ativa, e ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto.

Na dosagem dos concretos, segunda fase do trabalho, foi definido o método de dosagem dos concretos. Para a dosagem dos concretos utilizou-se a metodologia IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992).

Na terceira fase do trabalho foi definido o traço de referência para substituição parcial do cimento pela sílica ativa, bem como os teores de substituição, os teores de substituição foram definidos com base em artigos utilizados na revisão bibliográfica.

Na moldagem dos corpos de prova, quarta fase do trabalho, os concretos foram moldados e curados segundo preconização da NBR 5738 (2016).

Na realização dos ensaios, que se refere a quinta fase, os ensaios de durabilidade, físico e mecânico foram realizados conforme versa nas respectivas normas.

Na sexta e última fase da pesquisa, os resultados dos ensaios foram analisados, foi determinada a influência da substituição parcial do cimento pela sílica ativa nas propriedades estudadas, bem como o comportamento do coeficiente de difusão frente às três metodologias empregadas.

3.4. Fluxograma do programa experimental

As etapas do programa experimental foram realizadas conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.2.

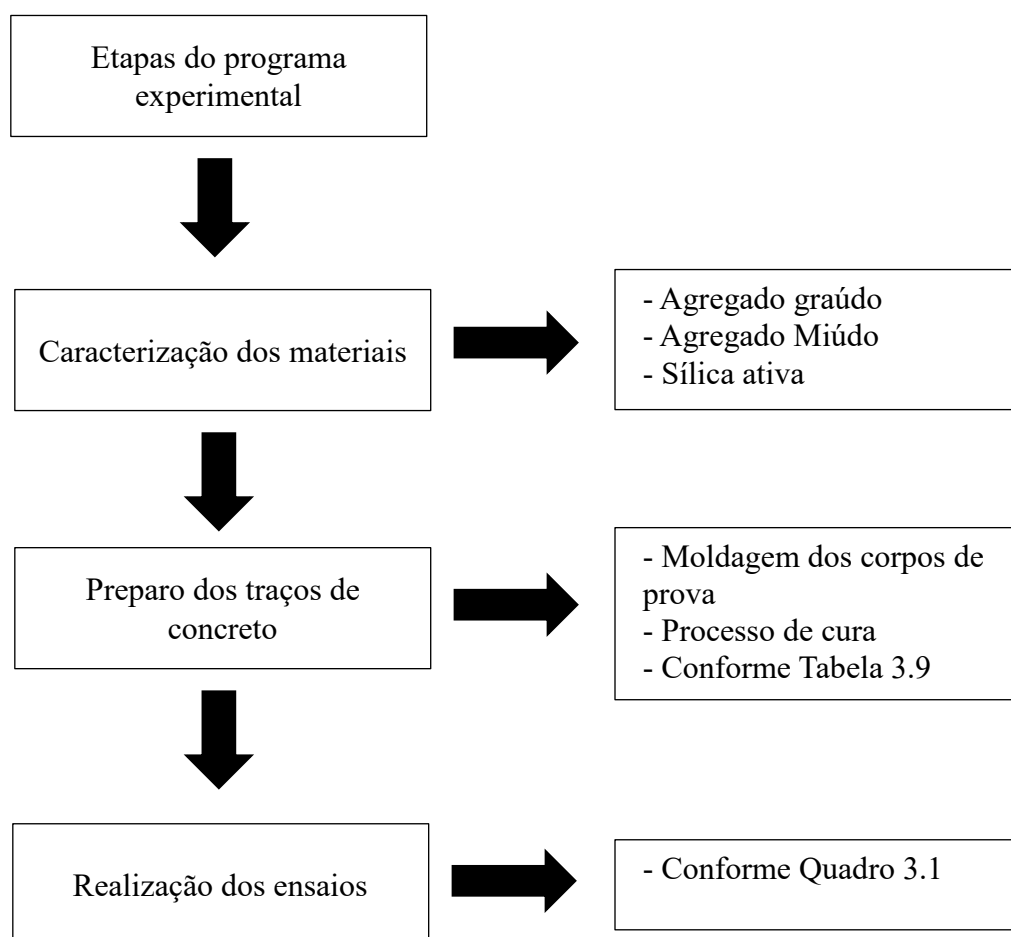


Figura 3.2 – Fluxograma do programa experimental.

3.5. Caracterização dos materiais

3.5.1. Cimento

As características físicas e mecânicas do cimento CP II Z 40, que foi o tipo de cimento utilizado se encontram na Tabela.3.1. O cimento foi fornecido em sacos de 50 kg, provenientes do mesmo lote.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II Z 40.

Expansibilidade a quente (mm)		0
Tempo de pega (min)	Início	198
	Fim	242
Blaine (cm ² /g)		4893
Finura (%)	# 200	0
	# 325	0,6
Massa específica (g/cm ³)		3,00
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	22,40
	3 dias	34,40
	7 dias	39,40
	28 dias	46,90

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.

3.5.2. Sílica ativa

Em alguns traços deste trabalho foi utilizada sílica ativa, que foi doado pelo fabricante para realização da pesquisa em sacos de 20 kg.

As características físicas e químicas do material são apresentadas na Tabela 3.2.

A caracterização química da sílica ativa foi realizada utilizando a técnica de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (EDX), utilizando o equipamento EDX-720, marca Shimadzu, no laboratório do grupo de pesquisas NOVONANO da Universidade Federal de Pelotas. A Tabela 3.3 apresenta os resultados obtidos a partir do EDX.

Tabela 3.2- Características físicas e químicas.

Massa específica	2.220 kg/m ³
Densidade	0,510 g/cm ³
Superfície específica	~ 19.000 m ² /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 μ m
Massa unitária	
Não densificado	< 350 kg/m ³
Densificado	> 350 kg/m ³

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3.3 – Composição química sílica ativa.

Composto	Teor (%)
Dióxido de Silício (SiO ₂)	88,32
Óxido de potássio (K ₂ O)	6,14
Óxido de cálcio (CaO)	4,35
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,68
Óxido de manganês (MnO)	0,39
Óxido de cobre (Cu ₂ O)	0,053
Óxido de rubídio (Rb ₂ O)	0,04
Óxido de estrôncio (SrO)	0,032

3.5.3. Agregado graúdo

Como agregado graúdo utilizou-se brita de origem granítica, sendo classificada como brita 1 de acordo com a NBR 7211 (2009). Este agregado é proveniente do município de Pelotas/RS. O agregado foi lavado para retirar qualquer impureza ou material pulverulento que o mesmo pudesse conter. O processo de secagem ocorreu estufa elétrica até a constância de massa.

Os resultados obtidos da caracterização física do agregado graúdo estão apresentados na Tabela 3.4, assim como a curva granulométrica é apresentada na Figura 3.3.

Analisando os dados da caracterização e curva granulométrica é possível analisar que material não se encontra em uma faixa ideal para classificação como brita 1, porém este material se possui boa classificação para utilização na produção dos concreto utilizados neste estudo.

Tabela 3.4 – Caracterização agregado graúdo.

Composição granulométrica do agregado graúdo			
Peneiras (mm)	Brita 1		Método de ensaio
	% Retido	% Retido acumulado	
19	0	0	NBR NM 248 (2003)
12,5	24,3	24,3	
9,5	50,9	75,2	
6,3	24,2	99,4	
4,8	0	99,4	
<4,8	0	99,4	
Total	0,6	100	
Módulo de finura	6,71		NBR NM 248 (2003)
Dimensão máxima característica (mm)	12,5		NBR NM 248 (2003)
Massa específica (g/cm ³)	1,46		NBR NM 53 (2009)
Massa unitária solta (g/cm ³)	2,65		NBR NM 45 (2006)

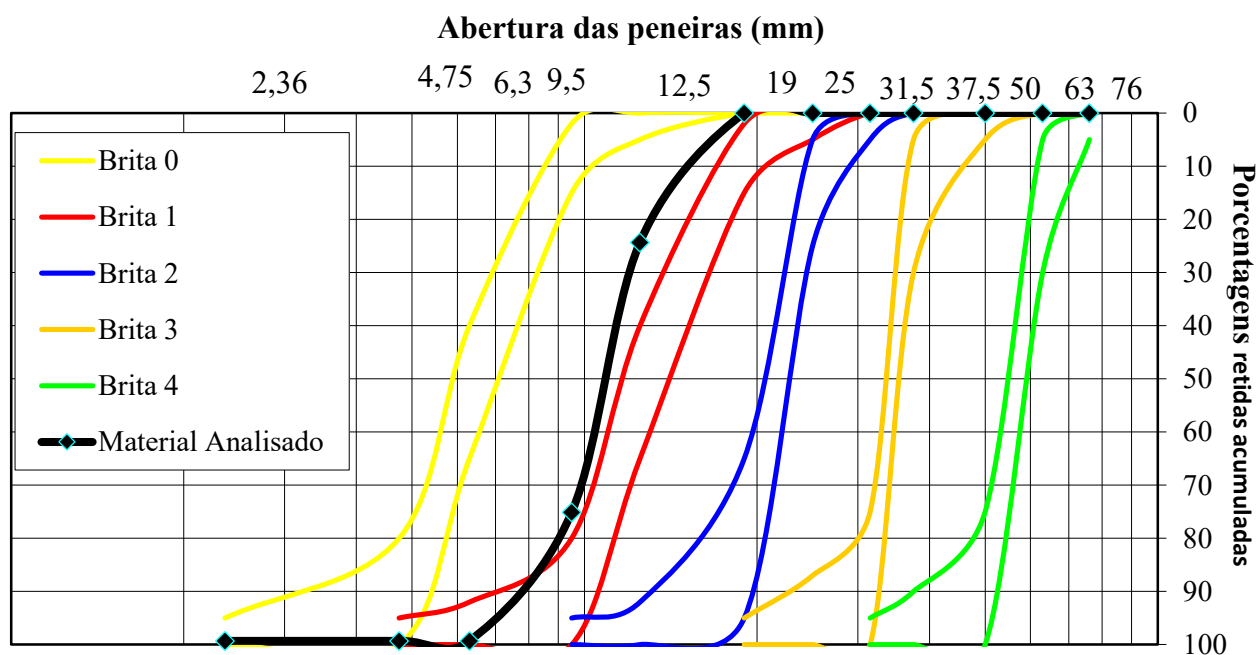


Figura 3.3 - Composição granulométrica brita, conforme a NBR NM 248(2003).

3.5.4. Agregado miúdo

Utilizou-se duas granulometrias de areia natural quartzosa, sendo areia fina e média, provenientes da cidade de Pelotas/RS, enquadradas na zona utilizável da NBR 7211 (2009). Sendo todo o material seco em estufa elétrica até a constância de massa. Antes da utilização das areias, estas

foram peneiradas com o objetivo de remover torrões de argila, britas ou quais quer outros materiais que poderiam estar contidos entre os grãos de areia.

Os resultados obtidos da caracterização física dos agregados miúdos são apresentados nas Tabelas 3.5 e 3.6, assim como as curvas granulométricas são apresentadas na Figura 3.4 e 3.5. Aonde é possível observar que os dois tipos de agregados miúdo estão dentro da zona considerável de utilização.

Tabela 3.5 – Caracterização areia fina.

Composição granulométrica do agregado miúdo (areia fina)					
Peneiras(mm)	Ensaio 1		Ensaio 2		Método de ensaio
	% Retido	% Retido acumulado	% Retido	% Retido acumulado	
4,8	0,1	0,1	0,1	0,1	NBR NM 248 (2003)
2,4	0,5	0,6	0,6	0,7	
1,2	2,0	2,6	1,9	2,6	
0,6	12,7	15,3	12,7	15,1	
0,3	40,7	56	40,7	55,8	
0,15	33,2	89,2	33,3	89,1	
< 0,15	10,8	100	10,9	100	
Total	100	-	100	-	
Módulo de finura	1,64				NBR NM 248 (2003)
Dimensão máxima característica (mm)	2,40				NBR NM 248 (2003)
Massa específica (g/cm ³)	2,67				NBR NM 52 (2009)
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,39				NBR NM 45 (2006)

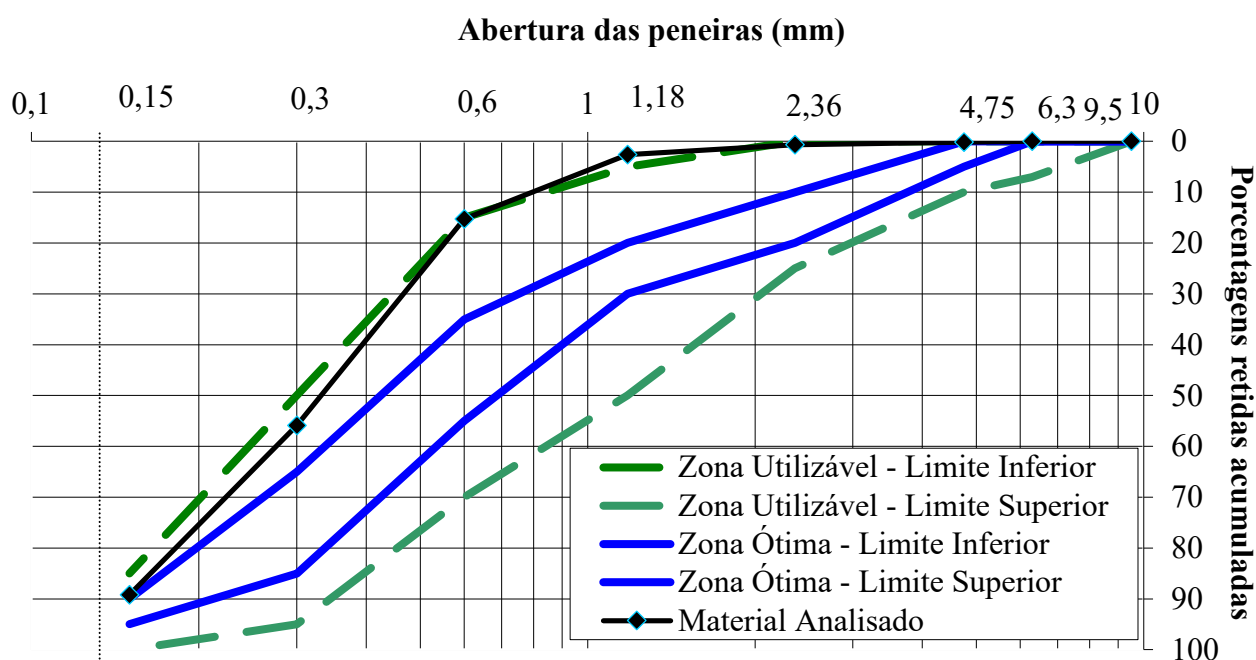


Figura 3.4 - Distribuição granulométrica da areia fina, conforme a NBR NM 248 (2003).

Tabela 3.6 – Características areia média

Composição granulométrica do agregado miúdo (areia média)					
Peneiras(mm)	Ensaio 1		Ensaio 2		Método de ensaio
	% Retido	% Retido acumulado	% Retido	% Retido acumulado	
4,8	0	0	0,2	0,2	NBR NM 248 (2003)
2,4	5,2	5,2	4,2	4,4	
1,2	9,9	15,1	9,2	13,6	
0,6	22,1	37,2	20,4	34	
0,3	51,7	88,9	53,2	87,2	
0,15	10,1	99,0	11,4	98,6	
< 0,15	1,0	99,4	1,4	100	
Total	100	-	100	-	
Módulo de finura	2,42				NBR NM 248 (2003)
Dimensão máxima característica (mm)	2,40				NBR NM 248 (2003)
Massa específica (g/cm ³)	2,65				NBR NM 52 (2009)
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,53				NBR NM 45 (2006)

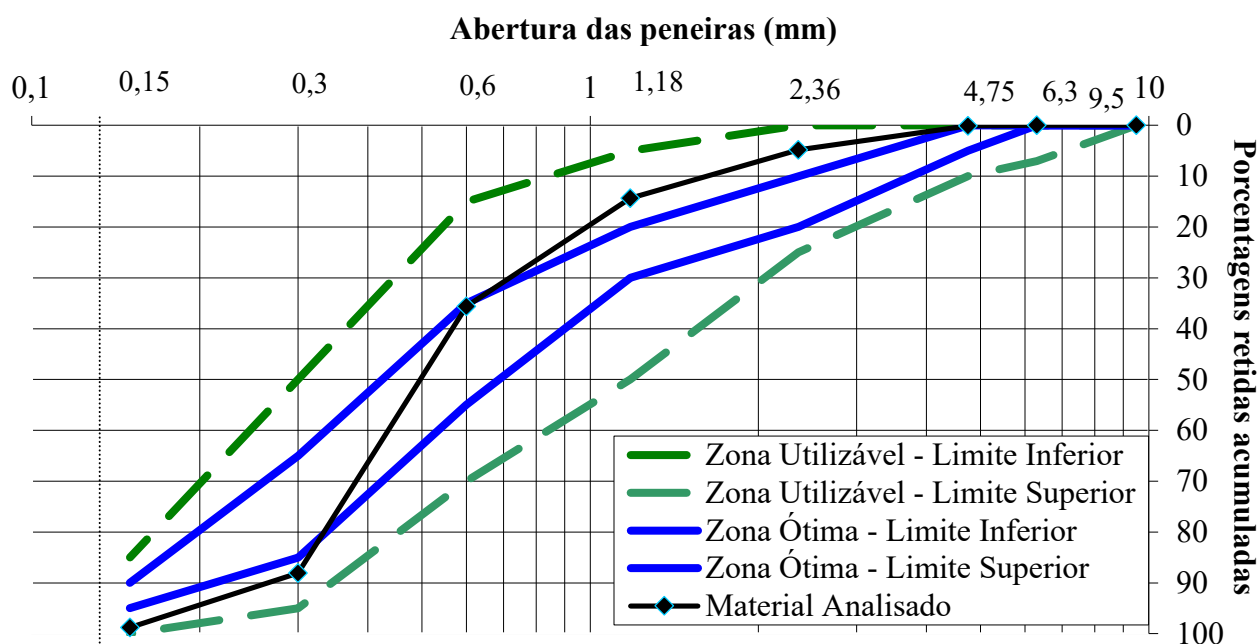


Figura 3.5 – Distribuição granulométrica da areia média, conforme a NBR NM 248 (2003).

3.5.5. Aditivo químico

O aditivo plastificante utilizado foi do tipo polifuncional, de pega normal, da marca GCP, livre de cloretos e a base de policarboxilatos, com teor de cloretos < 0,1 %.

A quantidade de aditivo foi a necessária para a obtenção do abatimento do tronco de cone em 100 ± 20 mm, sendo esse o abatimento utilizado em obras convencionais.

As características do aditivo plastificante utilizado são apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Características aditivo plastificante.

Descrição do produto	Aspecto/cor	Dosagem recomendada (% plastificante em relação a massa de cimento)	Massa específica (g/cm ³) - NBR 10908
Elevada redução da relação água/aglomerante e aumentos dos tempos de pega.	Líquido Marrom escuro	0,5 a 1,0 %	1,140 - 1,200

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.

3.5.6. Água

Para realizar o preparo dos diferentes tipos de concreto foi utilizada água potável proveniente

da rede municipal de abastecimento.

3.5.7. Cloreto de sódio

O cloreto de sódio foi utilizado na forma de cloreto de sódio Pa (NaCl), solução em pó, para preparação da solução salina que foi utilizada nos ensaios.

3.5.8. Hidróxido de cálcio

O hidróxido de cálcio foi utilizado na forma de cal hidratado, sendo adquirido em sacos de 20 kg, para preparação da solução de saturação dos corpos de prova.

3.5.9. Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio foi utilizado na forma de hidróxido de sódio (NaOH), solução em pó, adquirido em potes de 1 kg, para preparação da solução do ânodo no ensaio da NT Build 492.

3.6. Dosagem

Para a dosagem dos concretos utilizados neste estudo foi utilizado o método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). A adoção deste método se deve pelo fato de este ser um dos mais utilizados e difundidos no Brasil.

Através do procedimento experimental foi possível definir o teor de argamassa seca ideal em 52 % ($\alpha = 0,52$) e a quantidade necessária de água para obtenção de um abatimento do tronco de cone de 100 ± 20 mm, de acordo com a NBR NM 67 (1998).

A partir dos ajustes de dosagem dos traços, foi possível obter os valores de relação água/aglomerante e consumo de cimento por metro cúbico para cada traço. Estes parâmetros estão disponíveis na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Resultado do ajuste de dosagem experimental.

Aglomerante	Traço unitário	Relação água/cimento	Consumo de cimento (kg/m³)
CP II F 40	1:1,6:2,4	0,45	440,37
	1:1,6:2,4	0,55	432,43
	1:1,6:2,4	0,65	424,78

A partir do traço REF 45 com relação água/cimento de 0,45 foi adotada substituições do cimento por sílica ativa nas porcentagens de 5, 10 e 20 %, conforme especificado na Tabela 3.9, onde são apresentados os traços unitários utilizados para realização dos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios realizados neste estudo.

Tabela 3.9 – Traços unitários utilizados na moldagem dos corpos de prova.

Traço	Cimento (kg)	Sílica ativa (kg)	Areia fina (kg)	Areia média (kg)	Brita 1 (kg)	Relação água/aglomerante	Quantidade de corpos de prova
REF 45	1,00	0,00	0,32	1,28	2,40	0,45	16
SA 5	0,95	0,05	0,32	1,28	2,40	0,45	16
SA 10	0,90	0,10	0,32	1,28	2,40	0,45	16
SA 20	0,80	0,20	0,32	1,28	2,40	0,45	16
REF 55	1,00	0,00	0,32	1,28	2,40	0,55	16
REF 65	1,00	0,00	0,32	1,28	2,40	0,65	16

3.7. Preparação das amostras

A produção dos concretos utilizados neste estudo atende as normas específicas de cada etapa do processo de preparo, moldagem e cura.

3.7.1. Produção dos concretos

A produção dos concretos foi realizada de acordo com a NBR 12655 (2015), seguindo os traços estabelecidos para este estudo como especificado na Tabela 3.9. A mistura dos materiais ocorreu em betoneira intermitente de eixo inclinado.

O preparo teve início com a pesagem dos materiais em balança de precisão. Após a pesagem dos materiais, estes foram adicionados a betoneira em funcionamento na seguinte ordem:

- Agregado graúdo;

- 50 % da quantidade de água;
- Cimento e nos traços com presença de sílica ativa, esta foi adicionada logo após o cimento;
- Agregado miúdo;
- E por fim outros 50 % da quantidade de água.

Após a preparação de cada traço de concreto estes foram submetidos ao ensaio do abatimento do tronco de cone, conforme a ABNT NBR NM 67 (1998).

3.7.2. Moldagem e cura dos corpos de prova

O processo de moldagem e cura de corpos de prova foi realizado de acordo com o que versa a NBR 5738 (2015). Neste trabalho foram moldados dezesseis corpos de prova por traço, foram utilizados moldes de 10 cm de diâmetros por 20 cm de altura.

Na moldagem dos corpos de prova foi realizado adensamento manual com haste metálica, a moldagem se deu em duas camadas com 12 golpes por camada com a haste, ainda foram realizadas batidas leves na face externa do molde, até o fechamento de eventuais vazios.

Após 24 horas da moldagem dos corpos de prova, estes foram desformados, identificados e submetidos à cura submersa em tanque com água saturada com cal, em local com temperatura controlada.

3.7.3. Preparação dos corpos de prova para ensaios de durabilidade

Após o período de cura os corpos de prova de concreto foram retirados do processo de cura. Os corpos de prova em que foram realizados os ensaios de durabilidade precisaram ser cortados de maneira a atender o que versa suas normas específicas para realização dos ensaios. O corte foi realizado em máquina específica para corte de corpos de prova de concreto conforme ilustra a Figura 3.6. As dimensões de corpos de prova adotadas para realização de cada ensaio de durabilidade podem ser analisadas de acordo com a Tabela 3.10.

Os corpos de prova foram impermeabilizados com pintura epóxi, conforme ilustra a Figura 3.7, para realização dos ensaios da ASTM C1556 (2016), NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012), sendo que para realização do ensaio da ASTM C1556 (2016) os corpos de prova receberam a aplicação de fina camada de massa plástica.

Tabela 3.10- Dimensões corpos de prova por ensaio de durabilidade.

Ensaio	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Ilustração
ASTM C1556 (2016)	100	100	Figura 3.8
NT BUILD 492 (1999)	100	50	Figura 3.9
UNE 83987 (2012)	100	30	Figura 3.10



Figura 3.6 – Realização corte em corpos de prova.



Figura 3.7 – Corpos de prova impermeabilizados com pintura epóxi.

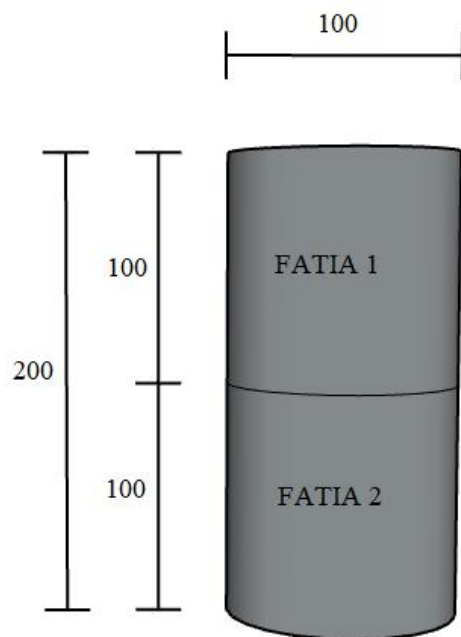


Figura 3.8 – Detalhe de como foi o realizado corte dos corpos de prova para ASTM C1556 (2016).

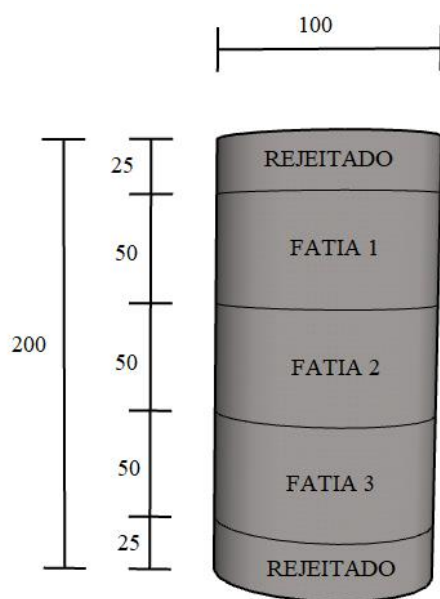


Figura 3.9 – Detalhe de como foi realizado corte dos corpos de prova para NT Build 492 (1999).

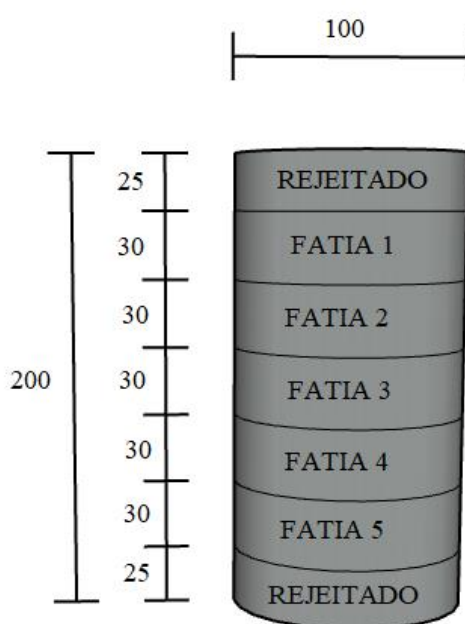


Figura 3.10 – Detalhe de como foi realizado corte dos corpos de prova para UNE 83987 (2012).

3.7.4. Seleção das amostras

Foi determinado o teor de argamassa das amostras utilizadas na realização dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto, por meio de uma adaptação da ASTM E 562 (2011), como proposto por Ribeiro *et al.* (2012, B). Através dessa metodologia é possível estimar relativamente a quantidade de uma determinada fase (agregado graúdo, por exemplo), por meio da sobreposição de uma malha à amostra e quantificando os nós que se apresentam sobre a fase avaliada. Aos nós que sobrepõem zona de transição é atribuído 0,5 ponto, enquanto os nós posicionados sobre a fase analisada recebem 1 ponto. Por fim, o percentual da fase na amostra é obtido pela relação entre o número de pontos e o total de nós da malha utilizada. A Figura 3.11 apresenta esquematicamente essa metodologia.

A Figura 3.11 apresenta um exemplo, em que a malha contém 69 nós e as interseções sobre o agregado graúdo correspondem a 23,5 pontos, sendo 7 em zonas de transição (totalizando 3,5 pontos) e 20 no interior da fase. Assim, estima-se que o teor de agregado graúdo é de 34,06 %.

Dentre as amostras obtidas, foram selecionadas as amostras com composições mais semelhantes para realização de cada ensaio de penetração de cloretos.

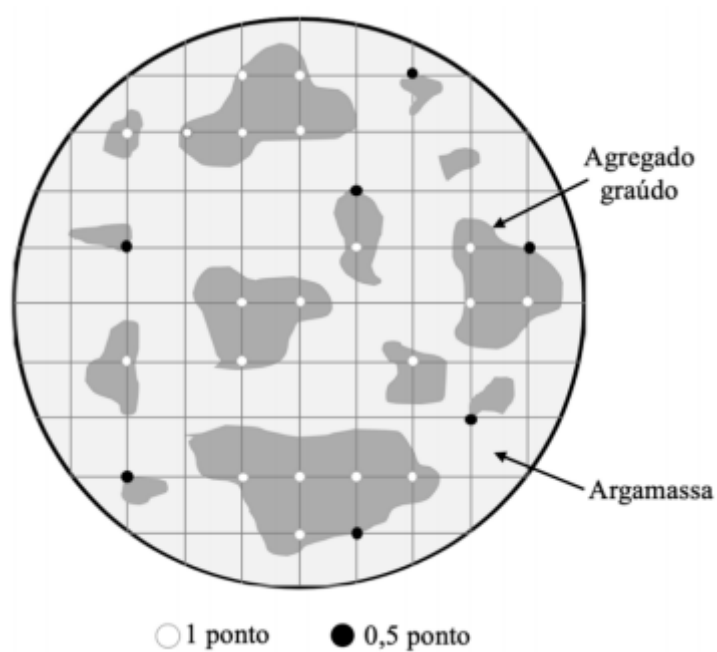


Figura 3.11 – Esquema seleção das amostras para realização dos ensaios de penetração de cloretos.

3.8. Ensaaios

3.8.1. Resistência à compressão

O ensaio foi realizado em três corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10x20 (diâmetro x altura) cm, de acordo com a NBR 5739 (2018), na idade de 120 dias, como ilustra a Figura 3.12. Antes da realização do ensaio foi realizado o processo de retificação dos corpos de prova, de maneira a deixar a superfície regular para realização do ensaio. Para cada traço de concreto ensaiado foram utilizados três corpos de prova.



Figura 3.12 – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos.

3.8.2. Absorção de água por capilaridade

O Ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a NBR 9779 (2012), Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Para este ensaio foram utilizados três corpos de prova de concreto com dimensões de 10x20 (diâmetro x altura) cm, na idade de cura de 120 dias.

Antes da realização do ensaio os corpos de prova permaneceram por um período superior a 24 horas em estufa elétrica há uma temperatura de 100°C até a obtenção da constância de massa do testemunho. Após retirada da estufa, foram determinadas as massas dos corpos de prova em balança de precisão.

O ensaio teve início com a imersão parcial dos corpos de prova em nível constante de água de 5 ± 2 mm acima da face inferior do corpo de prova, sobre suportes, de modo a permitir a ascensão capilar, conforme ilustra a Figura 3.13. Os recipientes aonde ficaram parcialmente imersos os corpos de prova foram instalados em laboratório com temperatura constante de aproximadamente 23° C.

Durante o ensaio, foi determinada a massa dos corpos de prova com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir do início do ensaio. Antes da determinação da massa dos corpos de prova, estes

foram enxugados com um pano úmido, após a determinação da massa, os corpos de prova retornaram imediatamente para o recipiente do ensaio.



Figura 3.13 – Realização ensaio de absorção de água por capilaridade.

A determinação da absorção de água por capilaridade foi realizada por meio da Eq. (3.1).

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (3.1)$$

Onde:

C= absorção de água por capilaridade, expressa em gramas por centímetros quadrado (g/cm²);

m_{sat}= massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante o período de tempo especificado, expressa em gramas (g);

m_s= massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23 ± 2) °C, expressa em gramas (g);

S= área da seção transversal, expressa em centímetros quadrados (cm²).

Os dados obtidos na realização do ensaio são apresentados no Apêndice A, Tabela A.1.

3.8.3. Ensaio de coeficiente de difusão aparente de cloretos - ASTM C1556

Este ensaio foi realizado de acordo com a metodologia da norma da ASTM C1556 (2016), este método de ensaio abrange a determinação laboratorial do coeficiente de difusão aparente de cloreto.

Para a realização deste ensaio foram utilizados três corpos de prova de 10x10 (diâmetro x altura) cm, os corpos de prova com estas dimensões foram obtidos a partir do corte ao meio de corpos de prova de 10x20 (diâmetro x altura) cm. Após o corte os corpos de prova foram impermeabilizados com pintura epóxi e massa plástica na lateral e na face oposta ao corte, ficando apenas uma face exposta. A aplicação de fina camada de massa plástica se mostrou necessária para impermeabilizar pequenos vazios em alguns pontos dos corpos de prova.

Antes da realização do ensaio as amostras foram saturadas em solução de hidróxido cálcio pelo período de 24 horas até a constância de massa.

O ensaio teve início 120 dias após o preparo dos corpos de prova de concreto.

O ensaio foi realizado com a imersão das amostras em solução salina com concentração de 165 g de NaCl por litro. Os corpos de prova permaneceram imersos na solução salina pelo período de 112 dias, com temperatura controlada em $23 \pm 2^\circ \text{C}$, conforme ilustra a Figura 3.14. Após atingir 112 dias de imersão os corpos de prova foram removidos da solução contendo cloreto de sódio e em seguida foram colocados para secagem ao ar, em temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ \text{C}$ durante 24 horas.



Figura 3.14 – Imersão dos corpos de prova para realização ensaio ASTM C1556.

Após a secagem dos corpos de prova foi realizada extração de pó de concreto para realização do ensaio de potenciometria, afim de determinar o perfil de penetração de cloretos nas amostras de concreto submetidas ao ensaio. A extração das amostras de pó foi realizada com a utilização de furadeira vertical, a furadeira possui limitador de perfuração regulável de milímetro em milímetro, desta forma foi possível realizar perfuração precisa nas profundidades estabelecidas para o ensaio, conforme ilustra a Figura 3.15. Para a extração na furadeira foi utilizada broca de 8 mm. Em cada corpo de prova foram realizadas 7 perfurações afim de coletar a quantidade mínima de uma grama de pó em cada profundidade coletada. As profundidades de perfuração adotadas neste ensaio foram de 0 a 2, 2 a 5, 5 a 8, 8 a 11, 11 a 14, 14 a 17 e 17 a 20 mm. Após a realização da extração de amostras em cada profundidade, o pó foi armazenado em sacos plásticos próprios para utilização em laboratório, os sacos plásticos possuíam fecho do tipo *zip-lock*. Foi coletado pó dos três corpos de prova, e estes misturados em um saco plástico para realização do ensaio de potenciometria por média das três amostras por traço.



Figura 3.15 – Furadeira vertical utilizada para extração de amostras de pó, ensaio ASTM C1556.

O ensaio de potenciometria foi realizado com eletrodo de prata/cloreto de prata, com precisão de 0,01 %, no Laboratório de Química dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande,

conforme descrito no item a seguir. Este ensaio determinou o teor de cloretos em cada amostra ensaiada, assim foi possível determinar o perfil de cloretos dos traços de concreto. Os perfis dos concretos estudados são apresentados no Apêndice A, Tabela A.2 e Figuras A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 e A.6. A partir do perfil de cloretos foi possível determinar o coeficiente de difusão como versa a norma, por meio de regressão não linear usando o método dos mínimos quadrados, a partir da segunda lei de Fick como demonstra a Eq. (3.2).

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}}\right) \quad (3.2)$$

Onde:

$C(x, t)$ = concentração de cloretos em uma profundidade x em um tempo t , expresso em porcentagem de massa;

C_s = concentração superficial de cloretos, expressa em porcentagem de massa;

C_i = concentração inicial de cloretos no interior do concreto, expresso em porcentagem de massa;

x = profundidade a partir da superfície do concreto, milímetros (mm);

D_a = coeficiente aparente de difusão de cloreto, metros quadrados por segundo (m^2/s);

t = tempo de exposição do corpo de prova à solução de cloreto de sódio, segundos (s);

erf = função erro complementar de Gauss.

Ensaio de potenciometria

Antes da realização do ensaio de potenciometria foi realizado um processo de preparação de amostras, conforme descrito a seguir:

- Cada amostra de pó de concreto foi colocada em um copo Becker, e seca em estufa a temperatura de 100°C;
- Após retirada da estufa as amostras foram transferidas para recipiente de descanso dessecador;
- Na sequência cada amostra foi adicionada a um novo copo Becker, utilizando aproximadamente uma grama de cada amostra, sendo a pesagem foi realizada em balança de precisão, foram anotadas as massas de cada amostra para determinação do teor de cloretos;
- Amostras foram atacadas com 15 ml de ácido nítrico (HNO_3), na proporção de duas partes de água destilada para uma parte de ácido nítrico;

- Adicionado dentro de cada copo de Becker contendo pó de concreto e solução de ácido nítrico barra magnética lisa;
- As amostras foram fervidas em um agitador magnético, aonde sobre o copo Becker foi adicionada uma tampa de vidro e sobre esta adicionada água destilada, conforme ilustra a Figura 3.16.



Figura 3.16 – Processo de fervura das amostras em preparação para ensaio de potenciometria.

- Após ferver as amostras estas foram resfriadas dentro de um recipiente com lamina de água;
- Retirada da tampa de vidro e lavagem desta e das paredes laterais do Becker com água destilada;
- Adicionada 30 ml de hidróxido de sódio (NaOH) a cada copo Becker contendo a amostras, na proporção de 60 g de NaOH para cada 750 ml de água destilada;
- Verificado o pH de cada solução contida no copo Becker em um medidor de pH de bancada, pH da solução deve ficar entre 2 e 3, caso não se encontrassem nesta faixa de valores, foi realizado ajuste. O ajuste foi realizado utilizado mais soluções, sendo que se pH maior que 3 foi adicionado mais solução de ácido nítrico, já se pH menor do que 2 adicionado mais solução de hidróxido de sódio.

Com pH regulado o processo de preparação das amostras para realização do ensaio de potenciometria está concluído, sendo o ensaio realizado na sequência descrita abaixo:

- Adicionada 1 ml de cloreto de sódio (NaCl) ao Becker contendo a solução de cada amostra, na concentração de 0,01 Mol, observação: esta quantidade de cloreto de sódio foi descontada no cálculo do teor de cloretos;
- Recipiente copo Becker contendo cada amostra é posicionado ao titulador potenciométrico, posicionado o eletrodo de prata e adicionado no equipamento solução de nitrato de prata (AgNO_3) utilizada no ensaio, na concentração de 0,01 Mol. A Figura 3.17 ilustra a realização do ensaio;



Figura 3.17 – Realização do ensaio de potenciometria.

- O ensaio foi realizado com a aplicação de 0,2 ml de nitrato de prata por vez, após cada aplicação de nitrato de para o equipamento registra os valores em milivolt da solução;
- O ensaio é finalizado após se constatar a maior diferença de valores entre duas leituras consecutivas no equipamento, após encontrar a maior diferença foram realizadas mais três leituras a fim de garantir o final do ensaio;
- Com estas informações é possível determinar o teor de cloretos em casa amostra;

3.8.4. Ensaio de migração de cloretos - NT Build 492

O ensaio de migração de cloretos no regime não estacionário é preconizado pela norma NT Build 492 (1999). Para realização deste ensaio foram utilizados quatro corpos de prova de 10x5

(diâmetro x altura) cm, provenientes do corte da parte central de corpos de prova de 10x20 (diâmetro x altura) cm.

Com os corpos de prova cortados foi realizada a impermeabilização destes com pintura epóxi.

Cada amostra foi colocada sobre cano de PVC de 100 mm, sendo envolvidas com uma cinta de borracha e selada com silicone em todo perímetro lateral, tanto na parte superior como na inferior, sendo posteriormente verificada a vedação do sistema, o conjunto foi ainda encaixado com braçadeiras, formando um recipiente sólido, conforme ilustra a Figura 3.18.



Figura 3.18 – Conjunto com corpo de prova para realização do ensaio da NT Build 492.

Antes da realização do ensaio as amostras foram saturadas em um recipiente com água saturada com hidróxido de cálcio.

O ensaio teve início na idade de 120 dias após o preparo dos corpos de prova de concreto.

Os corpos de prova devidamente preparados foram colocados em uma caixa plástica sobre uma base inclinada aonde foram colocadas soluções de cloreto de sódio e hidróxido de sódio. Os itens necessários para realização do ensaio podem ser visualizados de acordo com a Figura 3.19.

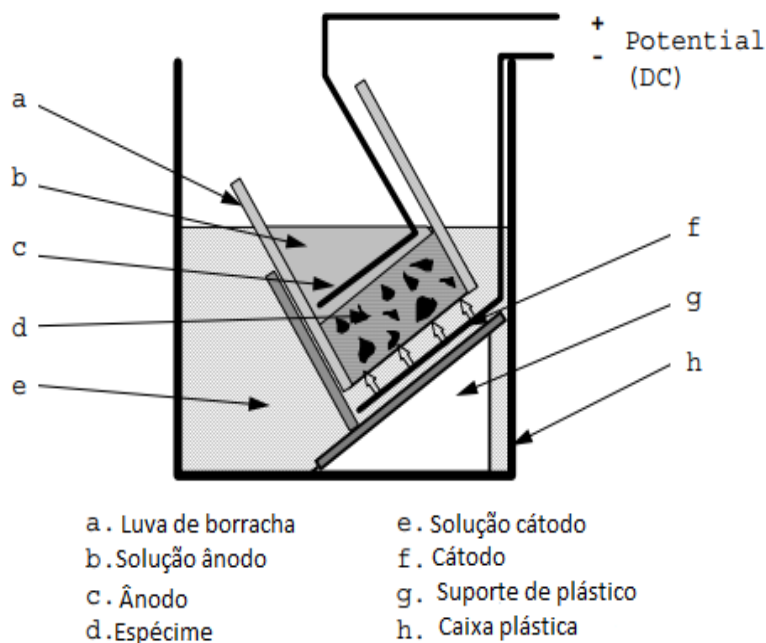


Figura 3.19 – Disposição da instalação do ensaio da NT Build 492 (Fonte: Adaptado de NT Build 492, 1999).

A solução anódica adicionada na parte superior em relação ao corpo de prova, consiste em uma solução de 0,3 N de NaOH (hidróxido de sódio). Já na parte inferior, que corresponde à solução catódica, foi adicionada uma solução de 10 % de NaCl (cloreto de sódio), em massa em relação à água destilada. Finalizando foram posicionados os eletrodos na parte superior (ânodo) e inferior (cátodo).

O teste teve início com a aplicação de uma tensão de 30 V, sendo registrada a corrente inicial de cada espécime. Após o registro, foi realizado o ajuste de corrente quando necessário, conforme especifica a Tabela 3.11. Após o ajuste, foi observado o novo valor de corrente inicial. O período de teste foi definido a partir do valor da nova corrente, de acordo com a Tabela 3.11. Após a definição da duração do teste, foi realizado o registro da temperatura inicial em cada solução do ânodo, com o auxílio de um termômetro. O ensaio foi realizado em ambiente com temperatura controlada entre 20 e 25° C. Antes de finalizar o ensaio foi registrada a corrente e temperatura final. A realização do ensaio pode ser observada de acordo com a Figura 3.20.

Tabela 3.11 – Voltagem e duração do ensaio NT Build 492.

Corrente inicial I_{30V} com 30 V (mA)	Voltagem aplicada U (após ajuste) (V)	Nova corrente inicial Possível I_0 (mA)	Duração do teste t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999).

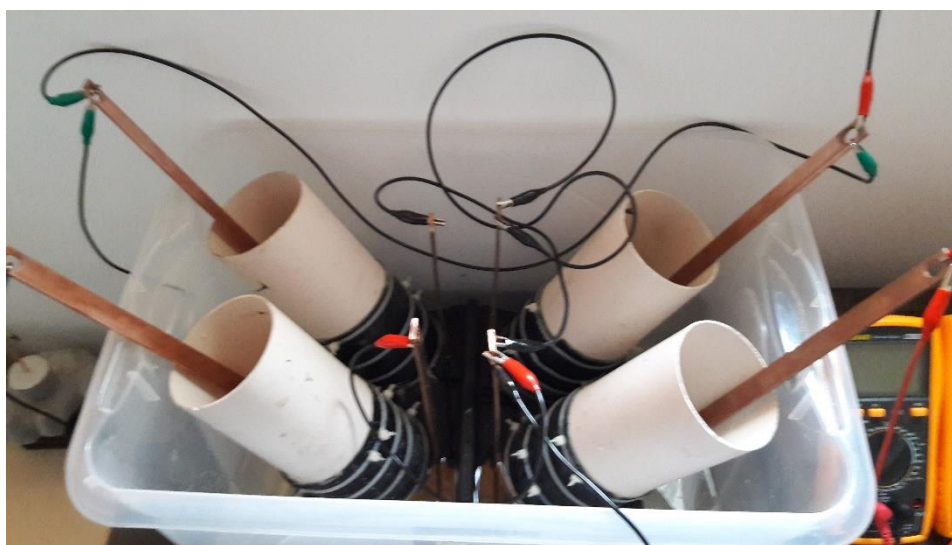


Figura 3.20 – Realização ensaio NT Build 492.

Neste ensaio a ação potencial elétrica aplicada através da amostra força os íons cloreto a migrar para dentro da amostra. Sendo assim ao final do teste os corpos de prova de concreto foram divididos ao meio através do ensaio de compressão diametral, sendo pulverizada em cada face da divisão uma solução de nitrato de prata, que forma uma região incolor em contraponto de uma região marrom decorrente da ausência de cloretos, desta forma foi possível mensurando a profundidade de penetração de cloretos, conforme demostra a Figura 3.21. A mensuração da penetração de cloretos é realizada de acordo com a Figura 3.22, aonde a região incolor é representada pela região clara da

amostra. A partir da informação da penetração de cloretos e de outras informações obtidas no ensaio, é possível calcular o coeficiente de difusão de cloretos de acordo com a Eq. (3.3).



Figura 3.21 – Amostra após pulverização de solução de nitrato de prata.

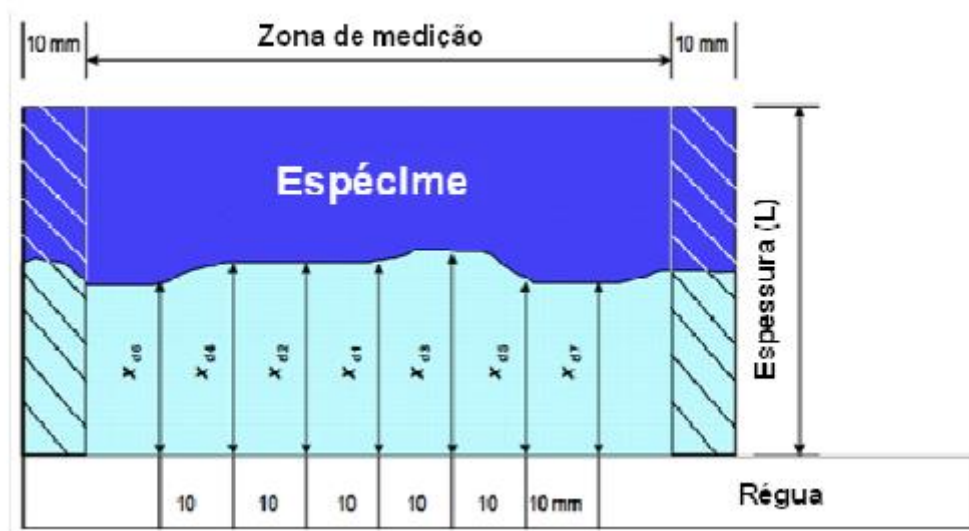


Figura 3.22 – Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos (Fonte: Adaptado de NT Build 492, 1999).

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (3.3)$$

Onde:

D_{nssm} = coeficiente de migração no estado não estacionário, metros quadrados por segundo (m^2/s);

U = valor absoluto da voltagem aplicada, volts (V);

T = temperatura média das temperaturas inicial e final na solução anódica, °C;

X_d = valor médio das profundidades de penetração, milímetros (mm);

t = duração do teste, horas (h);

As informações obtidas na realização do ensaio e utilizados na determinação do coeficiente de migração, são apresentadas no Apêndice A, Tabela A.3.

3.8.5. Ensaio acelerado de migração de cloretos - UNE 83987

A norma espanhola UNE 83987 (2012), estabelece método de ensaio que permite a obtenção do coeficiente de difusão de cloretos no concreto no estado estacionário e não estacionário.

O ensaio foi realizado utilizando corpos de prova de 10x3 (diâmetro x altura) cm, corpos de prova com estas dimensões foram provenientes do corte de corpos de prova de 10x20 (diâmetro x altura) cm, as faces externas dos corpos de prova foram descartadas aproveitando as partes centrais. Após o corte os corpos de prova foram impermeabilizados com pintura epóxi.

Para obtenção do coeficiente de difusão, foi desenvolvido um aparato para que as amostras ficassem de um lado expostas a uma solução contendo cloreto de sódio na concentração de 58,42 g de NaCl por litro (1 mol) de água destilada, e na outra face exposta à água destilada. O aparato consiste na utilização de tubos de PVC com 100 mm de diâmetro, foi ainda utilizado silicone para melhorar a estanqueidade do sistema. Após a preparação do aparato foi realizado teste de estanqueidade. O aparato foi produzido com base nas especificações da norma, como ilustra a Figura 3.23.

Com o aparato pronto para utilização e devidamente testado, antes da realização do ensaio as duas câmaras foram preenchidas com água destilada por 24 horas para garantir a saturação dos corpos de prova. Após o período de saturação, removeu-se a água, e posteriormente foi adicionada em uma câmara solução de cloreto de sódio na concentração de 1 mol e na outra água destilada.

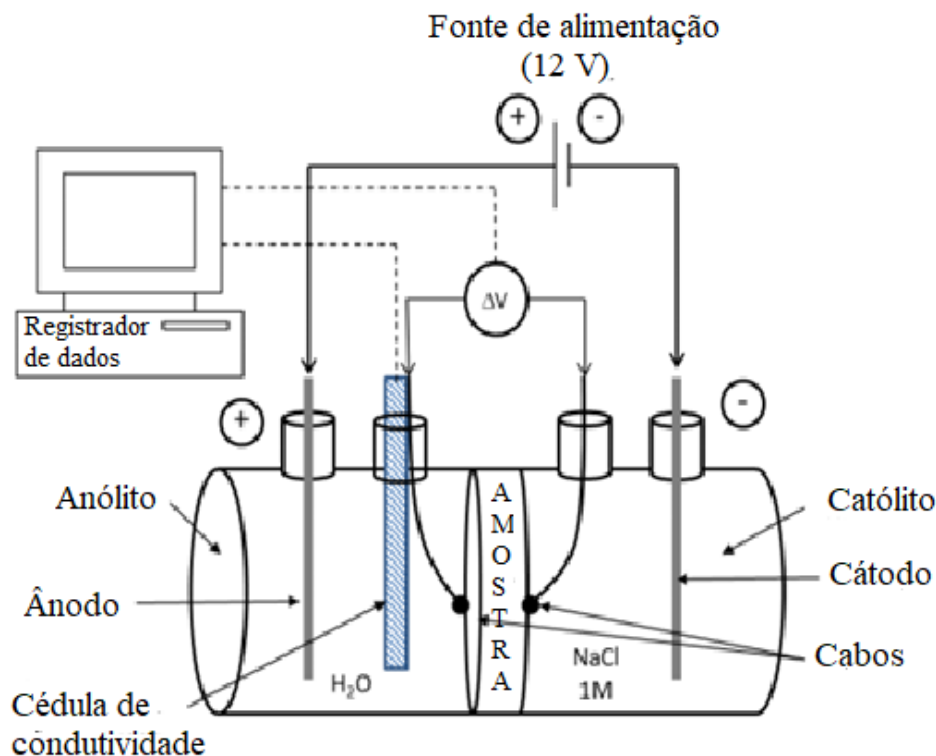


Figura 3.23 – Ilustração aparato utilizado no ensaio UNE 83987 (Fonte: Adaptado de UNE 83987, 2012).

Esse ensaio é considerado acelerado, de forma que os cloretos penetram por migração. Para que ocorra a migração, foi utilizada uma fonte que proporcionou uma tensão de 12 V. Para acelerar a passagem de cloretos, na câmara que possui apenas água destilada foi introduzida uma barra de aço, com carga positiva (ânodo) e na câmara com solução salina foi introduzida uma barra com carga negativa (cátodo), conforme demonstra a Figura 3.24.

Durante a realização do ensaio, foram realizadas leituras periódicas, obtendo a condutividade da câmara com água destilada (essa condutividade foi convertida em concentração de cloretos, em mol). Não foram realizadas leituras com multímetro para determinação da corrente efetiva que passa pela amostra, para realizar a determinação do coeficiente de difusão de cloretos foram adotados valores de corrente efetiva passante pela amostra de 12 V para o regime não estacionário e 6 V para o regime estacionário. O ensaio foi realizado com temperatura controlada de 21 °C.



Figura 3.24 – Realização ensaio UNE 83987.

Durante a realização do ensaio, inicialmente há um período em que a quantidade de cloretos que passa pela célula anódica é insignificante. Esse intervalo corresponde ao chamado *time lag* (τ) e define o tempo necessário para que os íons cloreto atravessem a amostra, saturando-a. Esse valor é importante para determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário. Após este período, o fluxo de íons cloreto através da amostra se torna constante, o que corresponde ao período estacionário de difusão, conforme ilustra a Figura 3.25. O *time lag* (τ) é obtido por meio da interseção entre o prolongamento da reta que caracteriza o regime estacionário e o eixo do tempo, de acordo com o esquema da Figura 3.25 (RIBEIRO, 2018). Os gráficos de concentração de cloretos versus tempo obtidos nos ensaios, utilizados para determinar o *time lag* e determinação dos coeficientes de difusão de cloretos são apresentados no Apêndice A, Tabela A.4 e Figuras A.7, A.8, A.9, A.10, A.11.

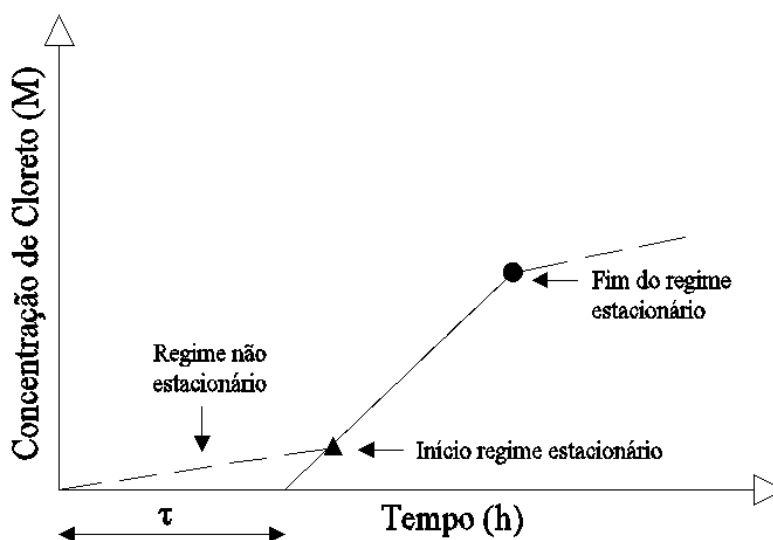


Figura 3.25 – Esquema determinação do *time lag* (τ), e período dos regimes estacionário e não estacionário (Fonte: Adaptado de Ribeiro, 2018).

A determinação do coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s), a partir de ensaio de migração, é efetuado por meio da equação de Nernst-Plank modificada, como apresentado na Eq. (3.4).

$$D_s = \frac{J_{cl}RTl}{zFC_{cl}\gamma\Delta\Phi} \quad (3.4)$$

Onde:

D_s = Coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário, (m^2/s);

J_{cl} = fluxo de íons, ($mol/s.cm^2$),

R = constante universal dos gases, 1,9872 cal/mol.K;

T = temperatura de realização do ensaio, em Kelvin (K);

l = espessura do corpo de prova, centímetros (cm);

z = valência dos íons, para cloretos igual a 1;

F = constante de Faraday, 23063 cal/volt;

C_{cl} = concentração de íons cloreto na célula catódica, (mol/cm^3)

γ = coeficiente de atividade da solução da célula catódica, para cloreto 0,657;

$\Delta\Phi$ = tensão média que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado estacionário, 6 V, como descrito anteriormente.

O fluxo de íons cloreto (J_{cl}) foi calculado utilizando a inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos na célula anódica em função do tempo, obtido a partir do ensaio de migração, como descrito na Eq. (3.5).

$$J_{cl} = \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (3.5)$$

Onde:

V = volume da célula catódica contendo cloretos, centímetros cúbicos (cm^3);

A = área da seção do corpo de prova exposta, centímetros quadrados (cm^2);

dc/dt = inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos versus tempo, (Mol/s);

Para determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário a partir dos ensaios de migração, foi necessário determinar o *time lag* (τ), sendo determinado de acordo com a Eq. (3.6).

$$Dns = \frac{2l^2}{\tau v^2} \cdot \left[v \cdot \coth \frac{v}{2} - 2 \right] \quad (3.6)$$

$$v = \frac{ze\Delta\Phi}{KT} \quad (3.7)$$

Onde:

l = espessura do corpo de prova, centímetros (cm);

τ = *time lag* do ensaio de migração, em segundos (s);

v = conforme Eq. 3.7;

z = valência dos íons, para cloretos igual a 1;

e = carga elétron, $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb;

$\Delta\Phi$ = tensão média que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado não estacionário, 12 V, como descrito anteriormente;

K = constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;

T = temperatura de realização do ensaio, em Kelvin (K).

Os parâmetros obtidos na realização do ensaio e utilizados na determinação dos coeficientes de difusão nos regimes estacionário e não estacionário são apresentados no Apêndice A, Tabelas A.5, A.6 e A.7.

3.8.6. Classificação dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão quanto a penetração de cloretos

Os métodos utilizados para determinação do coeficiente de difusão de cloretos neste estudo da ASTM C1556 (2016), NT Build 492 (1999) e UNE 83987(2012), não especificam classificação quanto aos resultados obtidos nos ensaios de determinação do coeficiente de difusão. Desta forma neste trabalho foi adotada classificação quanto a penetração de cloretos no concreto analisando os resultados obtidos de coeficiente de difusão como proposto por Nilsson, Ngo e Gjörv (1998), de acordo com a Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Classificação coeficiente de difusão quanto a penetração de íons cloreto.

Migração de cloretos ($D \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Penetrabilidade dos íons cloreto
15	Alta
10-15	Moderada
5-10	Baixa
2,5-5	Muito Baixa
<2,5	Desprezível

Fonte: Nilsson, Ngo e Gjrv (1998).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados.

Conforme já citado anteriormente as propriedades analisadas são: resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, penetração de íons cloreto por meio dos métodos propostos pela ASTM C1556, NT Build 492 e UNE 83987.

4.1. Resistência à compressão

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão (f_{cm}) em corpos de prova cilíndricos, assim como desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV). Com base nos resultados é possível constatar um baixo valor de coeficiente de variação para o ensaio realizado, sendo classificado o resultado como excelente de acordo com a NBR 5739 (2018).

Tabela 4.1 – Resistência à compressão média.

Concreto	f_{cm} (MPa)	σ	CV
REF 45	63,22	1,60	2,53 %
SA 5	63,46	0,92	1,45 %
SA 10	70,88	0,36	0,51 %
SA 20	74,51	1,28	1,72 %
REF 55	46,57	0,15	0,31 %
REF 65	40,60	0,71	1,75 %

Notas: f_{cm} – Resistência à compressão (MPa)
 σ – Desvio padrão
 CV – Coeficiente de variação, resultado da divisão do desvio padrão pela média

A partir da Tabela 4.1 construiu-se o gráfico com as médias do resultado de resistência à compressão (f_{cm}) apresentado na Figura 4.1.

Analisando a Tabela 4.1 e a Figura 4.1 é possível observar que o aumento da substituição do cimento por sílica ativa influenciou de maneira benéfica os concretos estudados, proporcionando um aumento na resistência à compressão. O concreto SA 20 com substituição de 20 % do cimento por sílica ativa apresentou o melhor desempenho referente a resistência à compressão, seguido dos concretos SA 10 e SA 5, com 10 % e 5 % de substituição do cimento por sílica ativa respectivamente. O aumento na resistência à compressão devido à utilização de sílica ativa ocorre devido ao maior

refinamento da estrutura de poros devido ao efeito pozolânico, assim como a densificação da pasta devido à extrema finura das partículas através do efeito microfíler proporcionado pela utilização de sílica ativa.

Já a relação água/aglomerante, quando aumentada proporcionou perdas nesta propriedade, o concreto REF 55 e REF 65 apresentaram menor resistência a compressão quando comparados ao concreto REF 45, sendo que o concreto REF 65 com maior relação água/aglomerante apresentou o menor desempenho. A redução na resistência a compressão quando aumentada a relação água/aglomerante se deve ao aumento da porosidade tanto na pasta como na zona de transição pasta-agregado, assim como pela presença de cristais de hidróxido de cálcio mais desenvolvidos e orientados com o aumento da relação água/aglomerante.

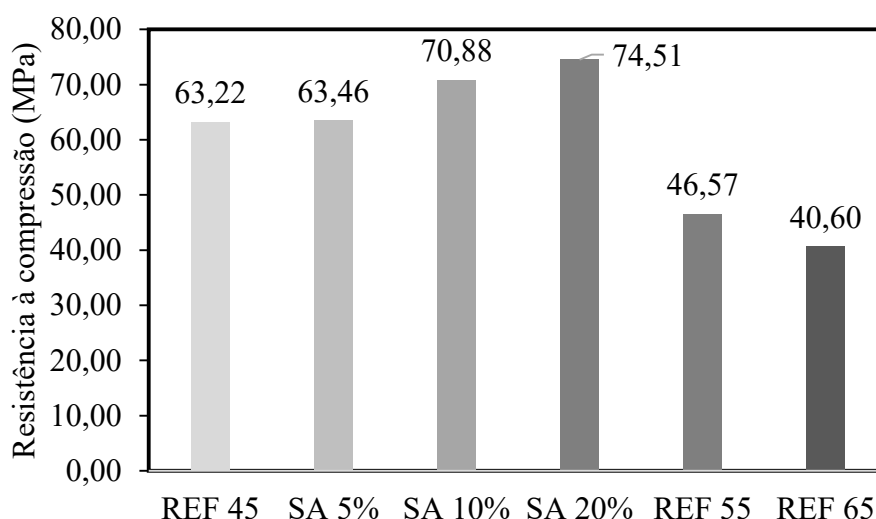


Figura 4.1 – Resultados resistência à compressão média.

De forma a quantificar os benefícios e desvantagens nos concretos produzidos, foi desenvolvida a Figura 4.2, esta apresenta valores percentuais de aumento ou redução da relação água/aglomerante em relação ao concreto REF 45 que foi adotado como referência.

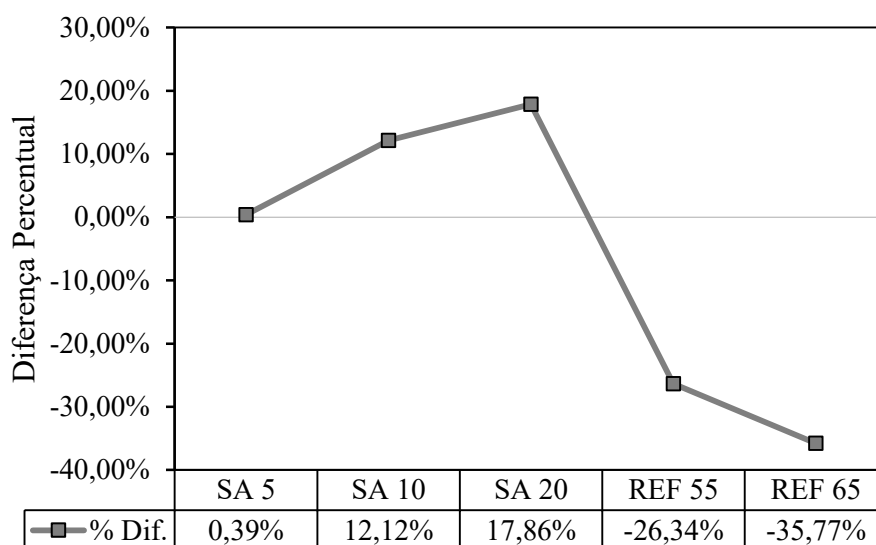


Figura 4.2 – Alterações resistência à compressão em relação ao concreto REF 45.

O concreto SA 20, apresentou maior ganho de resistência a compressão de 17,86 %, seguindo dos concretos SA 10 e SA 5, com aumento de 12,12 % e 0,39 % respectivamente, desta forma todos os concretos com substituição parcial do cimento por sílica ativa apresentaram ganho de resistência à compressão. Já os concretos com aumento da relação água/aglomerante apresentaram perda de resistência à compressão de 26,34 % e 35,77 % para os concretos REF 55 e REF 65 respectivamente.

O aumento na resistência à compressão proporcionado pela substituição de parte do cimento por sílica ativa, foi também constatado em pesquisas diversas como Hoffmann (2001), Possan (2004), Cardoso e Mancio (2016), Pinto (2016), e Medeiros *et al.* (2017). Cardoso e Mancio (2016) em concreto com relação água/aglomerante de 0,50 utilizando cimento CPV, na idade de 63 dias constataram aumento de 20,13 %, na resistência à compressão em concreto com 10 % de substituição do cimento por sílica ativa. Hoffmann (2001) observou um aumento de 14,74 % na resistência à compressão, utilizando cimento CPV, relação água/aglomerante de 0,45 e substituição de 20 % do cimento por sílica ativa. Pinto (2016) em concretos com substituição de 15 % de cimento por sílica ativa na mesma dosagem constatou aumento de 21,5 % na resistência a compressão.

4.2. Absorção de água por capilaridade

Os resultados médios obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade nos períodos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas de ensaio são apresentados na Tabela 4.2 e Figura 4.3. O concreto SA 20 com substituição de 20 % de cimento por sílica ativa apresentou o melhor resultado, seguido dos concretos SA 10, SA 5, REF 45, REF 55 e REF 65.

Tabela 4.2 – Absorção de água por capilaridade média.

Concreto	Absorção por capilaridade (g/cm ²)				
	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
REF 45	0,31	0,43	0,75	1,00	1,15
SA 5	0,25	0,36	0,68	0,89	1,04
SA 10	0,25	0,36	0,67	0,88	1,01
SA 20	0,22	0,31	0,59	0,79	0,91
REF 55	0,36	0,50	0,89	1,19	1,35
REF 65	0,48	0,65	1,17	1,55	1,77

Com base nos resultados obtidos é possível constatar que a substituição parcial de cimento por sílica ativa proporcionou redução na absorção de água por capilaridade. A sílica ativa por ser um material fino proporcionou refinamento dos poros do concreto pelas reações pozolânica, essas reações pozolânica da sílica ativa com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento geram mais C-S-H, reduzindo a porosidade e capilaridade. A redução na porosidade e absorção capilar ocorre também pela densificação da pasta pelo efeito microfíler. Já o aumento da relação água/aglomerante produziu concretos mais porosos, desta forma, os concretos com maior relação água/aglomerante possuíram maior absorção de água por capilaridade.

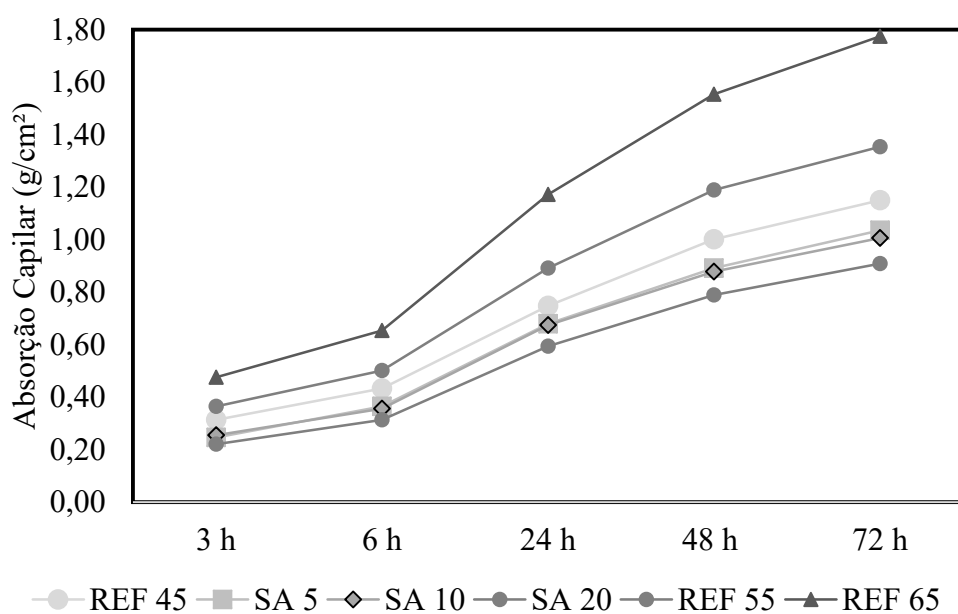


Figura 4.3 – Resultado absorção de água por capilaridade média.

A Figura 4.4 apresenta percentuais de alteração na absorção de água por capilaridade dos concretos estudados em relação ao concreto REF 45 no período de 72 horas, que é o período final do

ensaio, desta forma foi possível quantificar os benefícios ou desvantagens na utilização de sílica ativa em substituição parcial ao cimento e alteração na relação água/aglomerante.

O concreto SA 20 apresentou a maior redução na absorção de água por capilaridade, apresentando redução de 21,03 %, seguido dos concretos SA 10 e SA 5, com redução de 12,55 e 9,96 % respectivamente. Os concretos REF 55 e REF 65 apresentaram aumento na absorção de água por capilaridade de 17,71 e 54,24 % respectivamente, desta forma fica evidente a perda de qualidade nesta propriedade com o aumento da relação água/aglomerante.

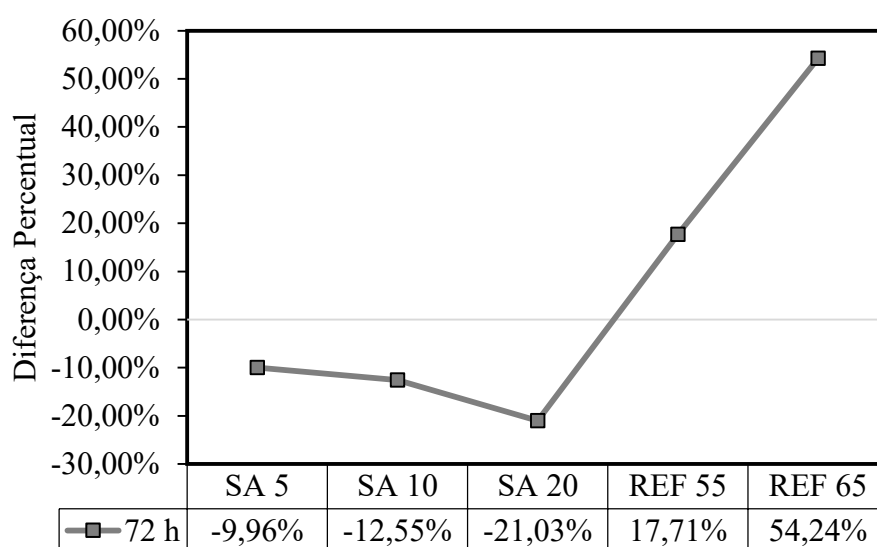


Figura 4.4 – Alteração absorção de água por capilaridade em relação concreto REF 45 ao final do ensaio.

Em trabalhos realizados por Bardella *et al.* (2005), Medeiros *et al.* (2017) e Arruda *et al.* (2018), aonde estes verificaram a influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa frente a absorção de água por capilaridade, constataram que essa substituição parcial é benéfica ao concreto reduzindo significativamente a absorção de água por capilaridade.

Em estudo realizado por Arruda *et al.* (2018), no período de 72 h obteve absorção de água por capilaridade de 1,758 g/cm² para o concreto de referência e 1,132 g/cm² para o concreto com substituição de 10 % do cimento por sílica ativa, observando uma redução de 35,61 % na absorção de água por capilaridade no concreto com utilização de sílica ativa. Sendo que nos concretos estudados foi utilizado cimento CP II Z 32 e relação água/aglomerante de 0,63.

Medeiros *et al.* (2017) constataram redução na absorção de água por capilaridade de 46 % em concreto com 10 % de substituição de cimento por sílica ativa, em concreto com relação água/aglomerante de 0,5, utilizando cimento CPV ARI.

4.3. Ensaio de coeficiente de difusão aparente de cloretos - ASTM C1556

Os resultados obtidos na determinação do coeficiente de difusão aparente de cloretos (D_a) realizado conforme a ASTM C1556 (2016) em estado não estacionário, assim como a classificação quanto ao coeficiente de difusão proposto por Nilsson, Ngo e Gjrv (1998), são apresentados na Tabela 4.3 e Figura 4.5. O concreto SA 20 apresentou o menor coeficiente de difusão de cloretos, seguido dos concretos SA 10, SA 5, REF 45, REF 55 e REF 65. Com relação a classificação dos concretos quanto a penetração de cloretos os concretos SA 20 e SA 10 foram classificados como desprezível, REF 45 e SA 5 muito baixa, REF 55 baixa e REF 65 penetração moderada.

Tabela 4.3 – Coeficiente de difusão aparente de cloretos – ASTM C1556.

Concreto	D_a ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Classificação quanto a penetração de cloretos
REF 45	3,23	Muito Baixa
SA 5	2,85	Muito Baixa
SA 10	1,91	Desprezível
SA 20	1,81	Desprezível
REF 55	7,99	Baixa
REF 65	13,48	Moderada

Analisando a Tabela 4.3 e Figura 4.5  possível observar os benefícios promovidos pela substituição parcial de cimento por sílica ativa nos concretos estudados, a utilização de sílica ativa proporcionou redução no coeficiente de difusão de cloretos. A medida em que aumentou a substituição de cimento por sílica ativa, aumentou a redução do coeficiente de difusão. Porém, a medida em que aumentou a relação água/aglomerante ocorreu o aumento do coeficiente de difusão.

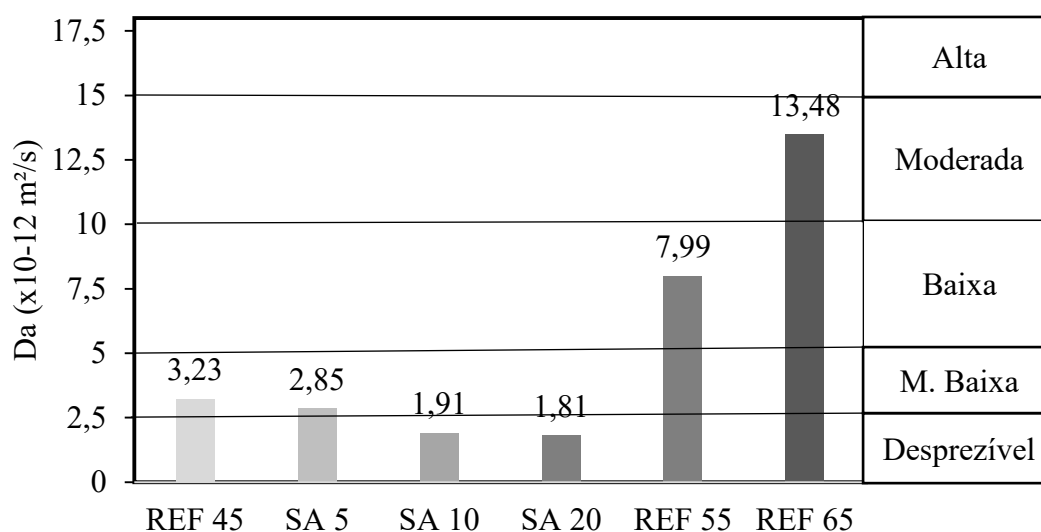


Figura 4.5 – Coeficiente de difusão aparente de cloretos – ASTM C1556.

Na Figura 4.6 é apresentada em porcentagem as alterações no coeficiente de difusão de cloretos dos concretos estudados em relação ao concreto REF 45.

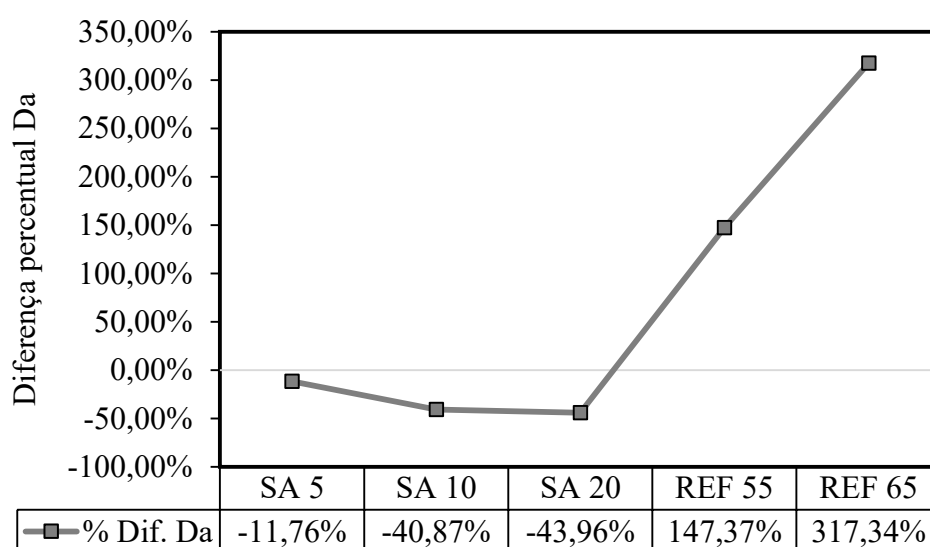


Figura 4.6 – Alteração Coeficiente aparente de cloretos (D_a) em relação ao concreto REF 45.

Neste ensaio o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos estudados apresentaram grande diferença em relação ao concreto REF 45. O concreto SA 20 apresentou a maior redução do coeficiente de difusão de cloretos com 43,96 %, seguido dos concretos SA 10 e SA 5 com 40,87 e 11,76 % respectivamente. Os concretos REF 55 e REF 65 apresentaram aumento no coeficiente de difusão de cloretos em relação ao concreto REF 45, com 147,37 e 317,34 % respectivamente.

Rashetnia *et al.* (2012), Thomas e Bremner (2012) e Valipour *et al.* (2013), realizaram ensaios para determinação do coeficiente de difusão aparente de cloretos por meio do método da ASTM C1556 (2016) em concretos realizando a substituição parcial de cimento por sílica, constatando que esta substituição parcial proporciona redução no coeficiente de difusão de cloretos no concreto, assim como observado neste estudo. Rashetnia *et al.* (2012) obtiveram como resultado para o concreto de referência coeficiente de difusão de $2,66 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, já para o concreto com 12,5 % de substituição de cimento por sílica ativa o coeficiente de difusão foi de $0,47 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, assim resultando em uma redução de 82,33 % no coeficiente de difusão de cloretos no concreto. Já Valipour *et al.* (2013) para concreto utilizando cimento CP II e relação água/aglomerante de 0,40, obteve para o concreto de referência coeficiente de difusão de cloretos de $9,90 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e $3,10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para concreto com substituição de 15 % do cimento por sílica ativa, representando uma redução de 68,69 % no coeficiente de difusão.

4.4. Ensaio de migração de cloretos - NT Build 492

A Tabela 4.4 e Figura 4.7 apresentam os resultados obtidos para o coeficiente de migração no estado não estacionário (Dnssm) por meio do método da NT Build 492 (1999), assim como a classificação dos resultados obtidos quanto a penetração de cloretos como proposto por Nilsson, Ngo e Gjrv (1998). O concreto SA 20 apresentou o menor coeficiente de difusão seguido dos concretos SA 10, SA 5, REF 45, REF 55 e REF 65, assim demonstrando que os concretos com substituição parcial do cimento por sílica ativa apresentaram melhor desempenho frente aos demais concretos sem adição mineral. Ainda é possível observar que o aumento da relação água/aglomerante proporcionou aumento do coeficiente de difusão.

Tabela 4.4 – Coeficiente de difusão por migração de cloretos – NT Build 492.

Concreto	Dnssm ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Classificação quanto a penetração de cloretos
REF 45	2,84	Muito Baixa
SA 5	1,75	Desprezível
SA 10	0,90	Desprezível
SA 20	0,22	Desprezível
REF 55	4,76	Muito Baixa
REF 65	6,02	Baixa

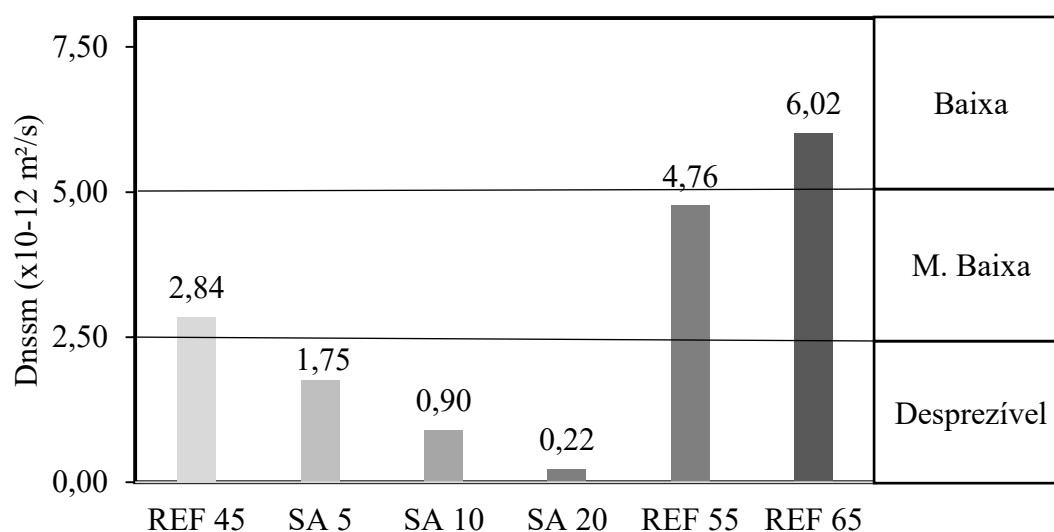


Figura 4.7 – Coeficiente de difusão por migração de cloretos – NT Build 492.

Neste método de ensaio os concretos SA 5, SA 10 e SA 20, em que foi realizada a substituição de parte do cimento por sílica ativa foram classificados quanto a penetração de cloretos como desprezível. Os concretos REF 45 e REF 65 foram classificados com penetração de cloretos muito baixa e o concreto REF 65 classificado como baixa penetração de cloretos.

Afim de demonstrar as variações entre os resultados obtidos neste ensaio foi desenvolvida a Figura 4.8 que apresente os percentuais de alteração do coeficiente de difusão (Dnssm) dos concretos estudados em relação ao concreto REF 45.

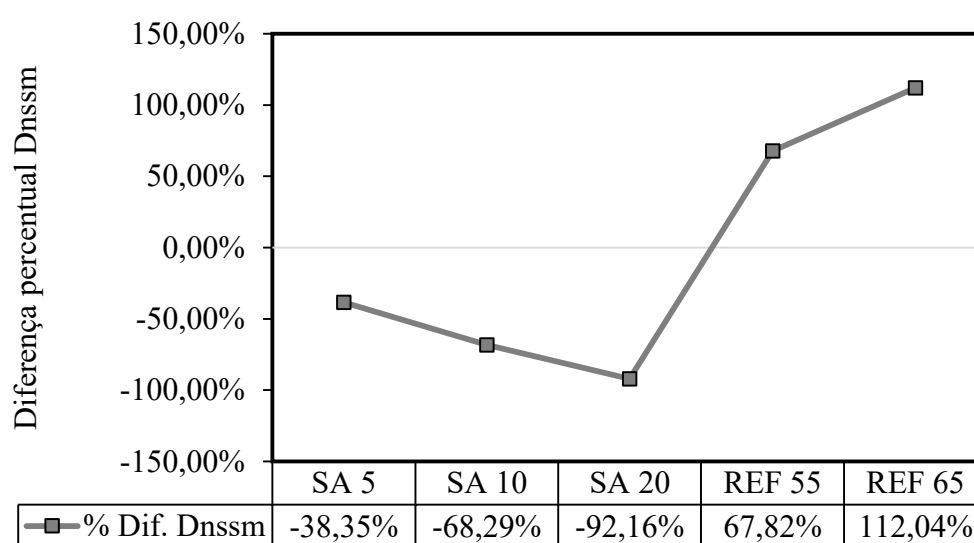


Figura 4.8 – Alteração coeficiente de difusão de cloretos (Dnssm) em relação ao concreto REF 45.

Neste método os percentuais de alteração do coeficiente de difusão foram grandes, apresentando grande diferença dos concretos estudados em relação ao concreto REF 45. O concreto SA 20 representou a maior redução no coeficiente de difusão de cloretos com redução de 92,16 %, seguido dos concretos SA 10 e SA 5 com redução de 68,29 e 38,35 % respectivamente. Desta forma, é possível constatar o grande benefício proporcionado pela utilização de sílica ativa nestes concretos. Já o aumento da relação água/aglomerante representou aumento do coeficiente de difusão de cloretos, os concretos REF 55 e REF 65 representaram aumento de 67,82 e 112,04 % respectivamente, no coeficiente de difusão.

Bagheri *et al.* (2013), Cardoso e Mancio (2016) e Youm *et al.* (2016), constataram em seus estudos que a utilização de sílica ativa no concreto em substituição parcial ao cimento pelo método da NT Build 492 (1999) proporciona diminuição do coeficiente de difusão de cloretos. Desta forma, confirmando a análise realizada neste estudo.

Bagheri *et al.* (2013), realizaram ensaio de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto pelo método da NT Build 492 (1999) encontrando para o concreto de referência coeficiente de difusão de $16,32 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e para o concreto com substituição de 10 % de cimento por sílica ativa $4,15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, considerando concretos com fator água/aglomerante de 0,38 e cimento CPII, sendo ensaio realizado na idade de 90 dias, constatando a uma redução de 74,84 % no coeficiente de difusão com a utilização de sílica ativa. Já Youm *et al.* (2016), em concretos utilizando agregado leve, relação água/aglomerante de 0,25 e cimento CPI, obteve coeficiente de difusão de cloretos para o concreto de referência de $6,70 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e para o concreto com substituição do cimento em 7 % por sílica ativa obteve coeficiente de difusão de $1,10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, assim obtendo uma redução no coeficiente de difusão de cloretos no concreto de 83,58 % com a utilização de sílica ativa.

4.5. Ensaio acelerado de migração de cloretos - UNE 83987

O ensaio de migração de cloretos descrito pela UNE 83987 (2012), determinação o coeficiente o coeficiente de difusão de cloretos no regime estacionário (D_s) e não estacionário (D_{ns}). O coeficiente de difusão de cloretos em regime estacionário (D_s) é um parâmetro que caracteriza o transporte de cloretos no concreto em condições de fluxo constate. O coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário (D_{ns}) baseia-se em um parâmetro que considera simultaneamente o transporte de íons cloreto no concreto, assim como a combinação destes com a fase sólida da matriz cimentícia.

A Tabela 4.5 e a Figura 4.9 apresentam os resultados obtidos para no ensaio da UNE 83987, para *time lag*, fluxo de íons cloreto (J_{cl}), coeficiente de difusão em regime estacionário (D_s) e não estacionário (D_{ns}) e classificação quanto a penetração de íons cloreto como proposto por Nilsson, Ngo e Gjörv (1998), no regime não estacionário (D_{ns}), por este considerar os fatores de transporte e de combinação com as fases sólidas do concreto.

Neste método de determinação do coeficiente de difusão de cloretos não foi determinado o coeficiente de difusão de cloretos para o traço SA 20 devido a problemas na realização do ensaio. Devido a limitação de tempo não foi possível refazer o ensaio para este teste, visto que esse concreto apresentava grande qualidade e a duração do ensaio para este traço seria relativamente longa.

Desta forma o concreto SA 10 apresentou o melhor resultado com menor coeficiente de difusão, seguido dos concretos SA 5, REF 45, REF 55 e REF 65. Quanto a classificação quanto a penetração de cloretos os concretos REF 45, SA 5 e SA 10 foram classificados como penetração de cloretos desprezível, já os concretos REF 55 e REF 65 foram classificados com penetração muito baixa.

Tabela 4.5 – Migração acelerada de cloretos – UNE 83987.

Concreto	<i>Time lag</i> (h)	Fluxo J_{cl} ($\times 10^{-11}$ mol/s.cm ²)	D_s (10^{-12} m ² /s)	D_{ns} (10^{-12} m ² /s)	Classificação quanto a penetração de cloretos (D_{ns})
REF 45	465	2,29	0,83	2,26	Desprezível
SA 5	485	1,74	0,63	2,17	Desprezível
SA 10	585	1,51	0,55	1,80	Desprezível
REF 55	410	3,15	1,15	2,57	M. Baixa
REF 65	315	4,99	1,82	3,34	M. Baixa

Analisando a Tabela 4.5 e Figura 4.9 é possível constatar que o coeficiente de difusão no regime não estacionário (D_{ns}) é superior ao coeficiente de difusão no regime estacionário (D_s), sendo que em média o D_{ns} é 2,7 vezes superior ao D_s para os resultados obtidos. A norma da UNE 83987 (2012), disponibiliza em seus anexos um exemplo de cálculos para determinação do coeficiente de difusão, em que o D_{ns} é 2,91 vezes superior ao D_s . No estudo realizado por Mittri (2016), este encontrou D_{ns} 3,5 vezes superior ao D_s .

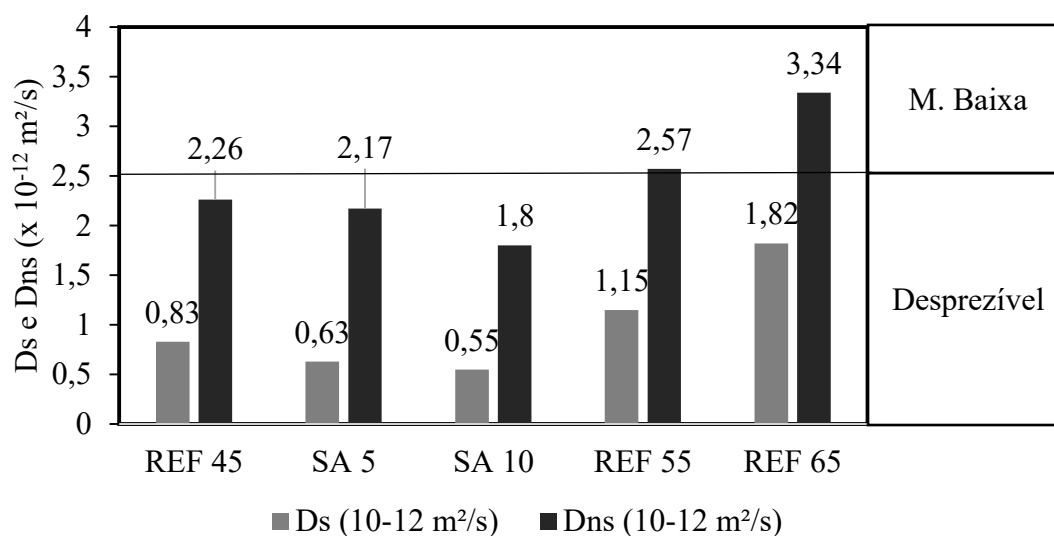


Figura 4.9 – Coeficiente de difusão por migração – UNE 83987.

A Figura 4.10 apresenta os percentuais de variações observados nos resultados obtidos para o coeficiente de difusão de cloretos no regime não estacionário (Dns) para os diferentes traços de concreto em relação ao traço REF 45.

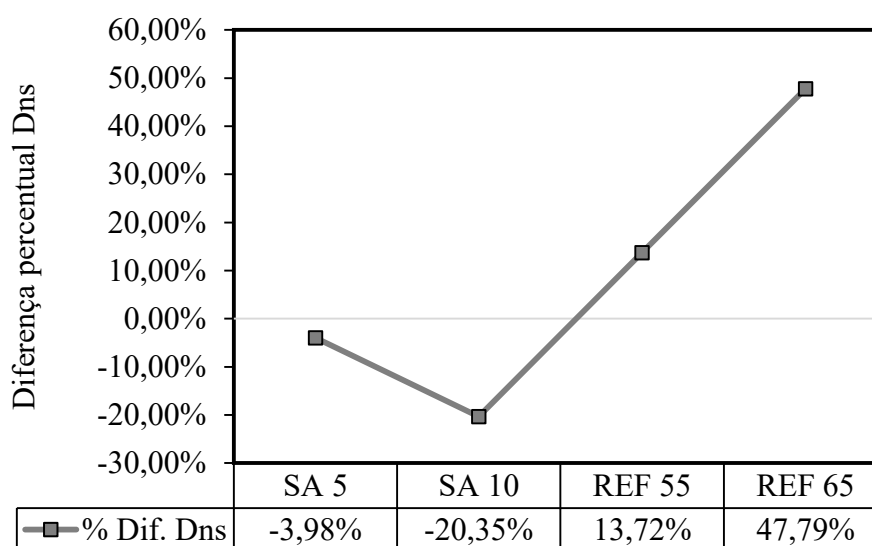


Figura 4.10 – Alteração coeficiente de difusão de cloretos no regime não estacionário (Dns) em relação ao concreto REF 45.

Assim como nos outros métodos de determinação do coeficiente de difusão, no método da UNE 83987 (2012) as porcentagens de alteração dos diferentes traços em relação ao traço REF 45 foram grandes, mas menores que nos outros métodos. O concreto SA 10 apresentou a maior redução

no coeficiente de difusão com redução de 20,35 %, seguido do concreto SA 5 com redução de 3,98 %. Desta forma demonstrando os benefícios da sílica ativa na redução do coeficiente de difusão de cloretos no concreto. Já os concretos REF 55 e REF 65 apresentaram aumento do coeficiente de difusão de 13,72 e 47,79 % respectivamente. Demonstrando que o aumento da relação água/aglomerante proporcionou aumento do coeficiente de difusão de cloretos.

4.6. Comparativo dos diferentes métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto

Nesta seção é apresentada comparação entre o método de determinação do coeficiente de difusão de cloretos da ASTM C1556 (2016) entre os métodos da NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012).

A partir da Tabela 4.6 e da Figura 4.11 é possível observar a diferença nos resultados obtidos para os diferentes métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos propostos neste estudo. Os métodos da NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012) apresentam médias inferiores ao método da ASTM C1556 (2016) para o coeficiente de difusão de cloretos no concreto, sendo que o método da UNE 83987 (2012) apresenta a menor média de resultados. O método da ASTM C1556 (2016) que apresenta maior média de resultados para o coeficiente de difusão de cloretos no concreto, apresenta aumento de 2,84 vezes em relação ao método da NT Build 492 (1999) e aumento de 2,19 vezes em relação ao método da UNE 83987 (2012).

Tabela 4.6 – Resultado ensaio de determinação do coeficiente de difusão de cloretos.

Concreto	ASTM C1556 - D_a ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Classificação	NT Build 492 - D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Classificação	UNE 83987 - D_{ns} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Classificação
REF 45	3,23	Muito Baixa	2,85	Muito Baixa	2,26	Desprezível
SA 5	2,85	Muito Baixa	1,75	Desprezível	2,17	Desprezível
SA 10	1,91	Desprezível	0,90	Desprezível	1,8	Desprezível
SA 20	1,81	Desprezível	0,22	Desprezível	-	-
REF 55	7,99	Baixa	4,76	M. Baixa	2,57	M. Baixa
REF 65	13,48	Moderada	6,02	Baixa	3,34	M. Baixa

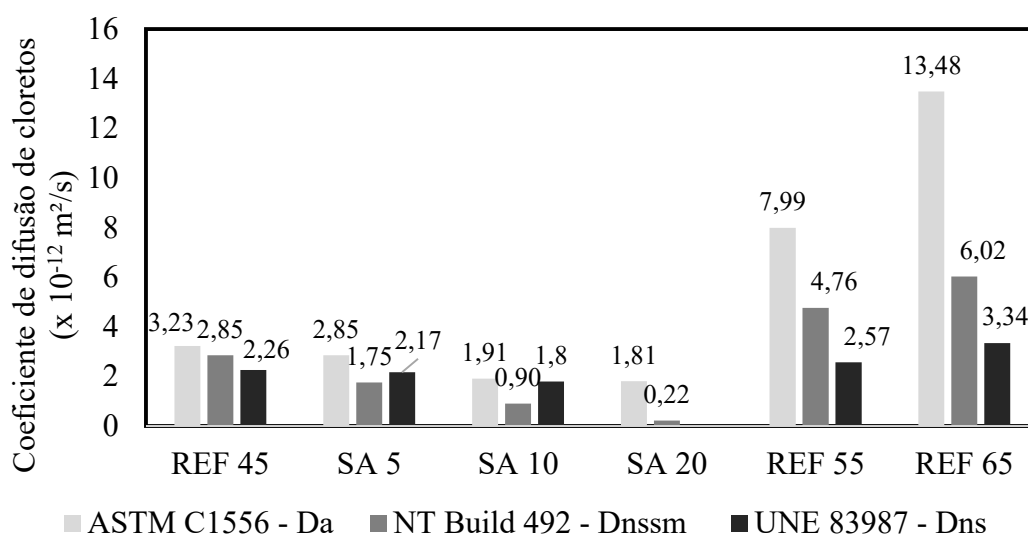


Figura 4.11 – Resultado ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos.

Com relação a classificação quanto a penetração de penetração de cloretos, é possível observar que existe algumas diferenças na classificação em relação aos diferentes métodos de ensaio, analisando as diferenças entre o método da ASTM C1556 (2016) e os métodos da NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012) apenas o traço SA 10 apresenta a mesma classificação entre os métodos, já o traço REF 65 apresenta diferença de classificação entre os três métodos analisados.

Embora os diferentes métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto utilizados neste estudo, utilizem metodologias diferentes, em alguns traços os resultados obtidos foram próximos, já em outros traços foi constatada boa diferença entre os três métodos utilizados. A menor diferença média entre os diferentes concretos para os três métodos foi no traço SA 10, já a maior diferença entre os três métodos se constata no traço REF 65.

Desta forma foi possível constatar uma menor variação nos valores de coeficiente de difusão, entre os métodos estudados, quando os concretos possuem menor valor de coeficiente de difusão. Sendo que a medida em que aumentou o coeficiente de difusão aumentou a variação dos resultados obtidos nos diferentes métodos.

Quando o coeficiente de difusão é extremamente baixo como no caso do concreto SA 20, se obteve a maior diferença de coeficiente de difusão de cloretos entre dois métodos, com aumento de 8,23 vezes do método da ASTM C1556 (2016) para o método da NT Build 492 (1999), porém estes são valores de coeficiente de difusão extremamente baixo, sendo classificados como penetração de cloretos desprezível. Já a menor diferença entre o método da ASTM C1556 (2016) e um dos demais métodos para um traço foi observada com aumento de 1,06 em relação ao método da UNE 83987 (2012), para o concreto SA 10.

A Figura 4.12 apresenta os percentuais de alterações no coeficiente de difusão de cloretos no concreto nos diferentes métodos utilizados neste estudo em relação ao concreto REF 45. Aonde é possível constatar que o método da UNE 83987 (2012) apresenta a menor alteração de coeficiente de difusão de cloretos nos concretos estudados em relação ao concreto REF 45, seguido do método da NT Build 492 (1999). Já o método da ASTM C1556 (2016) apresentou a maior variação de coeficiente de difusão de cloretos em relação ao concreto REF 45.

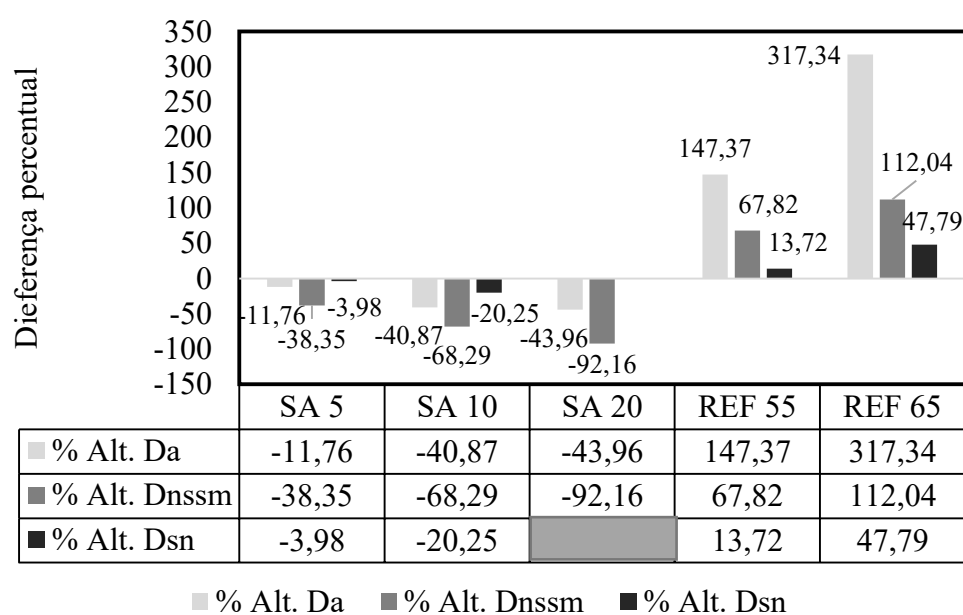


Figura 4.12 – Alterações coeficiente de difusão de cloretos em concretos dos métodos estudados em relação ao concreto REF 45.

Embora os métodos de determinação do coeficiente de difusão apresentem variações quanto a porcentagem de alterações no coeficiente de difusão de cloretos em relação ao concreto REF 45, em todos os métodos a utilização de sílica ativa proporcionou redução no coeficiente de difusão de cloretos, com os métodos da NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012) apresentando a maior diferença de redução do coeficiente de difusão de cloretos com a utilização de sílica ativa. Da mesma forma, o aumento da relação água/cimento proporcionou aumento do coeficiente de difusão de cloretos nos concretos estudados com grande variação de alteração em relação ao concreto REF 45, sendo a maior variação observada entre os métodos da ASTM C1556 (2016) e UNE 83987 (2012).

Guignone *et al.* (2019) realizaram um estudo utilizando concretos com relação água/aglomerante de 0,55, aonde foi produzido concreto de referência e concretos com substituição parcial do cimento por metacaulim nas quantidades de 4, 8 e 12 %, neste estudo foram realizados os ensaios da penetração de cloretos da ASTM C1202 (2017), ASTM C1556 (2016), NT Build 492

(1999) e UNE 83987 (2012). O método da ASTM C1556 (2016) apresentou os menores resultados para o coeficiente de difusão de cloretos no concreto, seguido do NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012). Para o concreto REF, Guignone *et al.* (2019) encontraram valores de coeficiente de difusão de $1,97 \times 10^{-12}$ m²/s para ASTM C1556 (2016), $2,98 \times 10^{-12}$ m²/s para NT Build 492 (1999) e $3,33 \times 10^{-12}$ m²/s para UNE 83987 (2012). Desta forma, chegando a valores de aumento de 1,51 vezes do método da NT Build 492 (1999) para a ASTM C1556 (2016), 1,69 vezes da UNE 83987 (2012) para a ASTM C1556 (2016).

No estudo realizado por Guignone *et al.* (2019) foram obtidos resultados para os métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto diferente dos obtidos no presente estudo, aonde o método da ASTM C1556 (2016) apresentou média de resultados mais elevados para o coeficiente de difusão em relação aos demais métodos estudados, já Guignone *et al.* (2019) encontraram este método como apresentando a menor média de resultados. No presente estudo o método da UNE 83987 (2012) apresenta a menor média de coeficiente de difusão, já Guignone *et al.* (2019) constataram que este método apresenta a maior média de coeficiente de difusão.

4.7. Relação entre ensaios de determinação do coeficiente de difusão, ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade

A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados neste estudo já discutidos anteriormente de maneira individual. Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos nos diferentes ensaios de maneira conjunta.

Observando a Tabela 4.7 é possível constatar nos concretos estudados que a medida em que aumenta a resistência a compressão, diminui a absorção de água por capilaridade e diminui a penetração de cloretos, essa alteração nestas propriedades é ocasionada pela substituição parcial do cimento por sílica ativa, sendo que neste estudo a medida em que ocorreu aumento desta substituição se constatou melhorias nas propriedades estudadas. Já a medida em que aumenta a relação água/aglomerante ocorre diminuição da resistência a compressão, aumento da absorção capilar e aumento da penetração de cloretos. Desta forma evidenciando os benefícios proporcionado pela utilização de sílica ativa e a desvantagem proporcionado pelo aumento da relação água/aglomerante, conforme pode ser observado nas Figuras 4.13 e 4.14.

Tabela 4.7 – Resultado ensaios de resistência a compressão, absorção de água por capilaridade e penetração de cloretos.

Concreto	f_{cm} (MPa)	Absorção por Capilaridade – Período de 72 horas (g/cm ²)	Penetração de cloretos ($\times 10^{-12}$ m ² /s)		
			ASTM C1556 Da	NT Build 492 Dnssm	UNE 83987 Dns
REF 45	63,22	1,15	3,23	2,84	2,26
SA 5	63,46	1,04	2,85	1,75	2,17
SA 10	70,88	1,01	1,91	0,90	1,8
SA 20	74,51	0,91	1,81	0,22	-
REF 55	46,57	1,35	7,99	4,76	2,57
REF 65	40,60	1,77	13,48	6,02	3,34

A Figura 4.13 apresenta um gráfico relacionando os ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto com as diferentes relações água/cimento utilizadas no estudo, neste gráfico é possível observar que o aumento da relação água/aglomerante influenciou significativamente no aumento do coeficiente de difusão de cloretos nos concretos estudados nos três métodos de determinação do coeficiente de difusão analisados neste estudo.

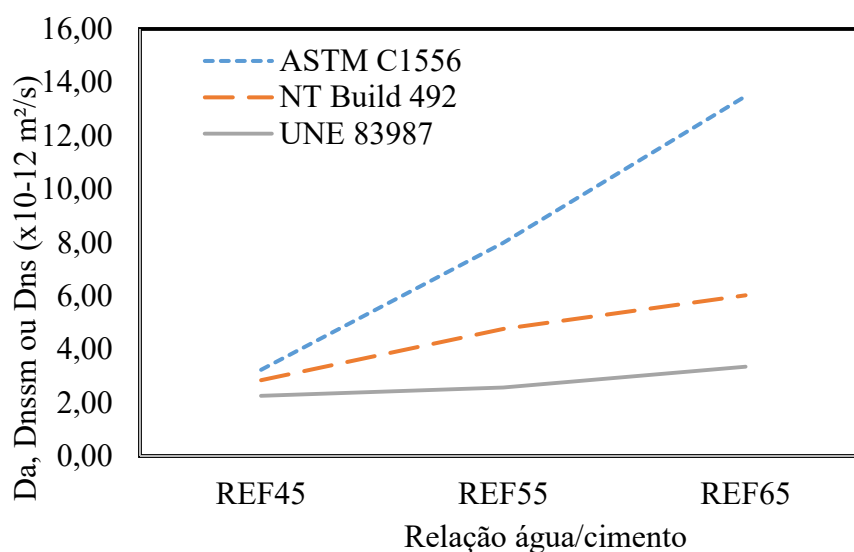


Figura 4.13 – Relação entre ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos e relação água/cimento.

Já na Figura 4.14 é possível observar a influência da substituição parcial de cimento por sílica ativa nas alterações do coeficiente de difusão de cloretos no concreto, aonde o gráfico demonstra que a medida em que ocorre aumento da substituição parcial do cimento por sílica ativa o coeficiente de difusão reduz significativamente.

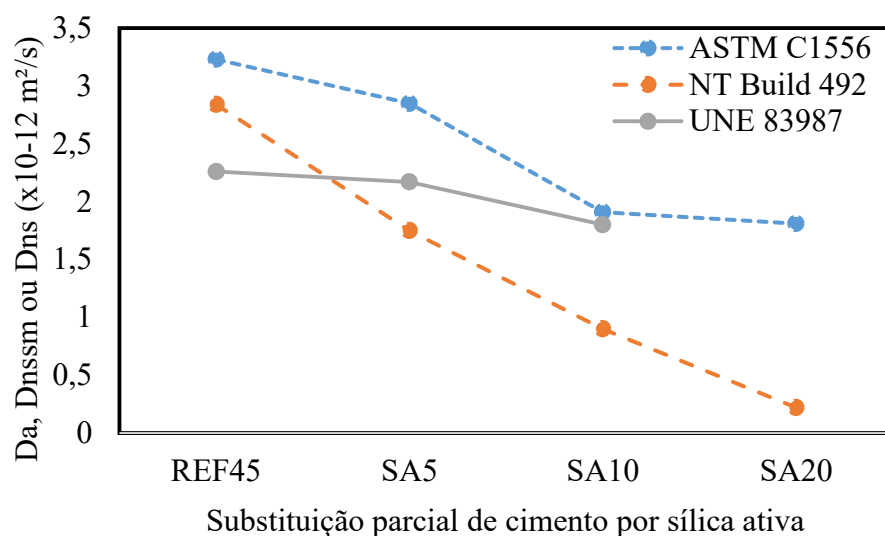


Figura 4.14 - Relação entre ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos e substituição parcial do cimento por sílica ativa.

O concreto SA 20 apresentou melhor desempenho em todos os ensaios, seguido dos concretos SA 10, SA 5, REF 45, REF 55 e REF 65. Como pode ser observado na Tabela 4.8, aonde está apresenta as porcentagens de alterações dos concretos estudados em relação ao concreto REF 45. O concreto SA 20 com melhor desempenho apresentou aumento de 17,86 % de resistência a compressão, diminuição de 21,03 % na absorção de água por capilaridade e maior redução na penetração de cloretos de acordo com o método da NT Build 492 (1999) de 92,16 %. O concreto REF 65 apresentou a menor qualidade, reduzindo a resistência a compressão em 35,88 %, aumentando em 54,74% a absorção de água por capilaridade e aumento em relação a penetração de cloretos de acordo com a NT Build 492 (1999) de 112,04 %.

Tabela 4.8 – Percentuais de alteração dos concretos estudados em relação ao concreto REF 45.

Concreto	f_{cm} (%)	Absorção por Capilaridade – Período de 72 horas (%)	Penetração de cloretos (%)		
			ASTM C1556 Da	NT Build 492 Dnssm	UNE 83987 Dns
SA 5	0,39	-9,96	-11,76	-38,35	-3,98
SA 10	12,12	-12,55	-40,87	-68,29	-20,35
SA 20	17,86	-21,03	-43,96	-92,16	-
REF 55	-26,34	17,71	147,37	67,82	13,72
REF 65	-35,77	54,74	317,34	112,04	47,79

Com base nos resultados obtidos nos diferentes ensaios, foi possível constatar que a utilização de sílica ativa em substituição parcial ao cimento proporcionou melhorias nas propriedades

mecânicas, físicas e durabilidade nos concretos utilizados, já o aumento da relação água/aglomerante proporcionou perda nestas propriedades.

A Figura 4.15 apresenta a relação entre os ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto e resistência à compressão aonde é possível observar que pequenas variações na resistência à compressão do concreto podem influenciar de maneira elevada no coeficiente de difusão de cloretos no concreto.

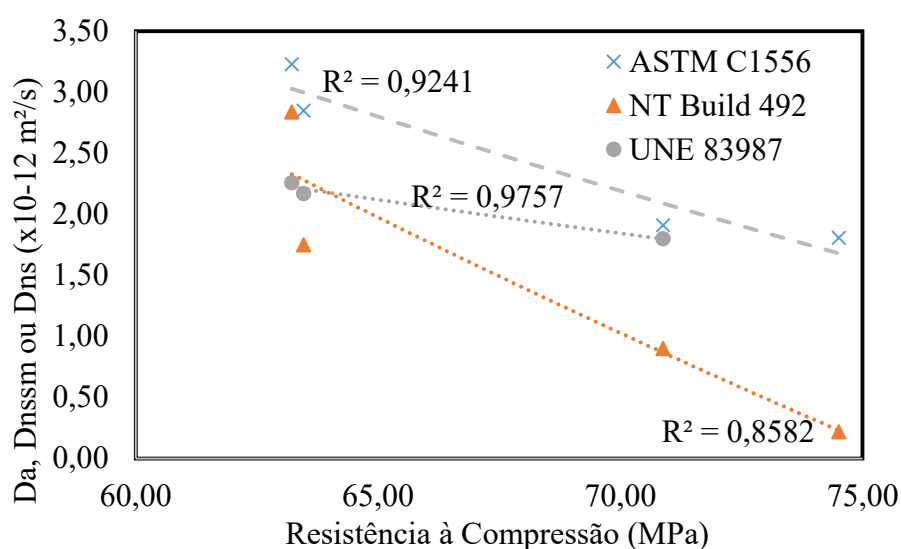


Figura 4.15 – Relação entre ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto e ensaio de resistência à compressão.

4.8. Correlação entre os ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos

Com o objetivo de correlacionar os resultados obtidos para os três diferentes métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos nos concretos estudados, foi criada a Figura 4.16 que apresenta a correlação dos métodos da NT Build 492 (Dnssm) (1999) e UNE 83987 (Dns) (2012) em relação ao método da ASTM C1556 (Da) (2016). O método da ASTM C1556 (2016) foi utilizado como base neste gráfico pois este método é considerado o processo de difusão mais próximo do real, por utilizar aumento da concentração salina para acelerar o tempo de duração do ensaio e não submeter os testemunhos a diferença de potencial elétrico.

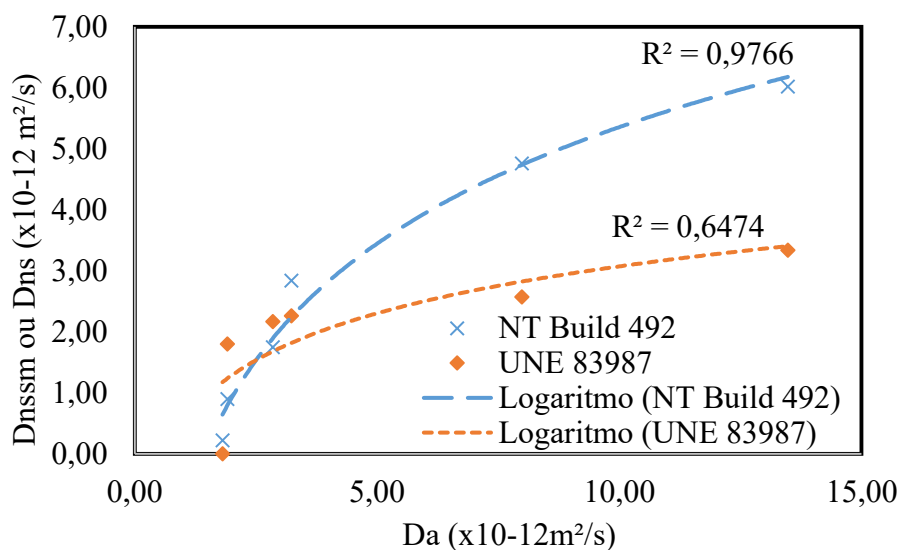


Figura 4.16 – Correlação entre resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto.

Analisando a Figura 4.16 é possível constatar que os métodos estudados apresentaram boa correlação, o método da UNE 83987 (2012) em relação ao método da ASTM C1556 (2016) apresentou correlação de 0,6474 que pode ser considerada uma boa correlação. Já os métodos da ASTM C1556 (2016) e NT Build 492 (1999) obtiveram correlação de 0,9766, sendo essa uma excelente correlação.

Desta forma analisando os ensaios realizados neste estudo os métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto se correlacionaram bem, com o método da ASTM C1556 (2016) e NT Build 492 (1999) obtendo a melhor correlação. O método da NT Build 492 (1999) apresenta a base mais simples para realização do ensaio, sendo que este ensaio é realizado com maior facilidade em relação aos demais, com menor duração de tempo, visto que possui duração variável entre 6 e 96 horas, após este período as amostras são divididas ao meio por compressão diametral e pulverizada solução de nitrato de prata em cada face para verificar profundidade de penetração de cloretos, assim sendo possível a determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto. Já o método da ASTM C1556 (2016) necessita de um período maior para realização do ensaio, com duração do período de imersão em solução salina mínimo de 35 dias, ainda após este o processo de imersão é necessário realizar a extração do pó de concreto, determinação do teor de cloretos em cada ponto por meio de análise química, para obter o perfil de cloretos e assim poder determinar o coeficiente de difusão por meio de regressão não linear.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar os métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos com diferentes relações água/aglomerante (0,45; 0,55 e 0,65), substituição parcial do cimento por sílica ativa (5, 10 e 20 %), a partir de três diferentes metodologias. Com base nestes resultados, pretende-se colaborar com a propagação do conceito de indicadores de durabilidade na avaliação do potencial de durabilidade de elementos estruturais de concreto armado. Desta forma esse trabalho determinou experimentalmente por meio de três diferentes metodologias o coeficiente de difusão de cloretos no concreto, observando as diferenças entre os resultados obtidos e correlacionando os métodos, tendo portanto cumprido suas expectativas iniciais.

5.1. Principais conclusões

Diante dos resultados obtidos nos ensaios de indicadores de durabilidade, resistência mecânica e índices físicos, considerando-se as limitações deste estudo, foi possível constatar as seguintes influências das variáveis estudadas:

- Nas análises realizadas neste estudo a utilização de sílica ativa em concretos apresentou desempenho satisfatório. Este material proporcionou redução no coeficiente de difusão de cloretos no concreto, o que representa material de melhor qualidade, proporcionando maior durabilidade e vida útil. A sílica ativa se apresenta com grande potencial para utilização em estruturas de concreto armado em ambientes agressivos, visto as dificuldades encontradas em relação a durabilidade de estruturas de concretos em ambientes agressivos.
- A utilização de sílica ativa proporcionou melhorias na resistência à compressão, com um aumento de 17,86 % nesta propriedade para o concreto SA 20 em relação ao concreto REF 45. Nos outros concretos com substituição parcial do cimento por sílica ativa também se constatou ganhos nesta propriedade, porém em menor proporção. Já o aumento da relação água/aglomerante proporcionou redução na resistência à compressão dos concretos estudados, o concreto com maior perda de resistência a compressão foi o concreto REF 65 que apresentou uma perda de 35,77 % em relação ao concreto REF 45.
- Com relação à absorção de água por capilaridade, concretos com a utilização de sílica ativa proporcionaram uma melhoria nesta propriedade, reduzindo a absorção capilar, já o aumento da relação água/aglomerante proporcionou desvantagem nesta propriedade, aumenta a absorção de água por capilaridade. O concreto SA 20 apresentou a maior redução na absorção de água por

capilaridade com redução de 21,03 % em relação ao concreto REF 45, já o concreto REF 65 apresentou a maior absorção de água por capilaridade, com aumento de 54,24 % em relação ao concreto REF 45. Porém a substituição parcial do cimento por sílica ativa na quantidade de 20 % é considerada elevada por alguns autores, podendo ocasionar problemas de propagação de microfissuras no concreto, devido esse fato essa quantidade de substituição não é muito utilizada.

- Nos ensaios realizados para determinação do coeficiente de difusão de cloretos, o concreto SA 20 apresentou melhor desempenho nos métodos da ASTM C1556 (2016) e NT Build 492 (1999), não sendo realizado o ensaio pelo método da UNE 83987 (2012) neste traço, na sequência de melhor desempenho seguem os concretos SA 10, SA 5, REF 45, REF 55 e REF 65. Em todos os métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos esta foi a ordem de classificação dos concretos estudados. Porém não apresentaram a mesma classificação quanto a penetração de cloretos, apenas o traço SA 10 apresenta a mesma classificação quanto a penetração de cloretos pelos três métodos, já o traço REF 65 é o único que apresenta discordância quanto a classificação pelos três métodos.
- Embora a ordem de melhor desempenho quanto a penetração de cloretos nos concretos estudados seja a mesma, estes diferiram em relação aos resultados obtidos para os coeficientes de difusão de cloretos. O método da UNE 83987 (2012) apresentou a menor média de resultados de coeficiente de difusão, seguido da NT Build 492 (1999) e a maior média de coeficiente de difusão constatada neste estudo foi pelo método da ASTM C1556 (2016).
- A diferença nos resultados obtidos no coeficiente de difusão de cloretos nos concretos estudados foi dependente da qualidade do concreto. A maior diferença nos resultados obtidos foi constatada a medida em que diminuiu a qualidade do concreto com o aumento da relação água/aglomerante.
- A utilização de sílica ativa nos concretos estudados como substituição parcial ao cimento proporcionou melhorias nas propriedades, com aumento da resistência a compressão, diminuição da absorção de água por capilaridade e redução da penetração de cloretos. O concreto SA 20, que apresentou melhor desempenho em todos os ensaios realizados, obteve aumento de 17,86 % em relação a resistência à compressão, redução de 21,03 % na absorção de água por capilaridade e redução de 92,16 % no coeficiente de difusão pelo método da NT Build 492 (1999) em relação ao concreto REF 45.
- O aumento da relação água/aglomerante nos concretos estudados apresentou desvantagem nas propriedades estudadas, com diminuição da resistência a compressão, aumento da absorção de água por capilaridade e aumento da penetração de cloretos. Sendo que o concreto REF 65, que

apresentou menor desempenho nos ensaios realizados, obteve redução de 35,77 % na resistência à compressão, aumento de 54,74 % na absorção de água por capilaridade e aumento de 317,34 % no coeficiente de difusão de cloretos pelo método da ASTM C1556 (2016) em relação ao concreto REF 45.

- Os métodos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto analisados neste estudo apresentaram boa correlação, com os métodos da ASTM C1556 (2016) e NT Build 492 (1999) apresentando correlação de 0,9766, que é uma excelente correlação.
- Frente os resultados obtidos neste estudo na determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto os métodos analisados obtiveram bons resultados, apresentando boa relação e correlação. Desta forma os métodos de determinação do coeficiente de difusão da ASTM C1556 (2016), NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012) representam bem os mecanismos de degradação em estruturas de concreto armado em ambiente marinho. Com destaque para o método da NT Build 492 (1999) que apresentou melhor correlação em relação ao método da ASTM C1556 (2016), por apresentar a base mais simples de realização e curto período de duração do ensaio.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

No desenvolvimento desta pesquisa surgiram aspectos que podem ser estudados, e que devido às limitações do programa experimental e do tempo disponível, não foi possível abranger. Sendo assim, são apresentadas sugestões para a ampliação e prosseguimento do estudo.

- Determinar a penetração de cloretos em concretos em exposição natural, a fim de relacionar a influência dos resultados obtidos em métodos acelerados de penetração de cloretos na determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto.
- Produzir concretos com diferentes relações água/aglomerante, tipo de cimento e ou adição mineral, afim de obter maior diversidade de traços de concreto e poder verificar o coeficiente de difusão de cloretos em uma maior gama de traços de concreto.
- Utilizar diferentes tipos de adição mineral em substituição parcial ao cimento, como cinza de casca de arroz, cinza volante ou ainda utilizar alguns tipos de resíduos, como resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, resíduo de vidro.
- Realizar ensaios utilizando diferentes metodologias para determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto, como por exemplos os métodos da ISO 1920-11 (2013), NT Build 443 (1995).

- Avaliar a durabilidade do concreto frente a ação de outros agentes deletérios, como por exemplo a carbonatação e ataque por sulfatos.
- Realizar a previsão de vida útil de estruturas de concreto, utilizando os métodos disponíveis para esta previsão utilizando o coeficiente de difusão de cloretos no concreto.
- Ampliar o número de ensaios das metodologias estudadas de modo a avaliar a dispersão dos resultados nos métodos normatizados.

REFERÊNCIAS

- ADAMATTI, D. S; GRAEFFA. G.; ANDRADE, R.; PERONDI, M.; SILVA FILHO, L. C. P. Análise do desempenho de espaçadores no concreto através da corrosão por íons cloreto. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 3, n. 2, p. 3-15, 2016.
- AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1 ed. São Paulo: Pini, 667 p. 2000.
- AL-KHAJA, Waheeb A. Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes. **Construction and Building Materials**, v. 11, n. 1, p. 9-13, 1997.
- ARIKAN, Metin; SOBOLEV, K.; ERTUN T.; YEGINOBALI, A.; TURKER, P. Properties of blended cements with thermally activated kaolin. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 62-70, 2009.
- ARRUDA, F. F.; SILVA, D. L.; BENTO, A. J.; FONSECA, J. M. M. Absorção por capilaridade em concreto produzido com adição de sílica ativa. In: **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, Maceió, Alagoas. 2018.
- ALEXANDER, Mark G.; SANTHANAM, Manu; BALLIM, Yunus. Durability design and specification for concrete structures—the way forward. **International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics**, v. 2, n. 3, p. 95-105, 2010.
- ALEXANDER, Mark Gavin. Service life design and modelling of concrete structures—background, developments, and implementation. **Revista ALCONPAT**, v. 8, n. 3, p. 224-245, 2018.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Committee 222. ACI manual of concrete practice**. Detroit, 1991. V. 1: corrosion of metals in concrete.
- _____. **Guide to durable concrete: reported by ACI Committee 201**. 2R. ACI manual of concrete Practice. Detroide, 1991. Part 1.

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

____ E 562 – **Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count**. West Conshohocken, ASTM International, 2011.

____ C 1202 - **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**, 2017.

____ C1543 - **Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding**. West Conshohocken, Pennsylvania. USA, 2010.

ANDRADE. C. Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. ABNT, Rio de Janeiro, 2016.

____ **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos**. ABNT, Rio de Janeiro, 2018.

____ **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento**. ABNT, Rio de Janeiro, 2014.

____ **NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação**. ABNT, Rio de Janeiro, 2009.

____ **NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. ABNT, Rio de Janeiro, 2017.

____ **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. ABNT, Rio de Janeiro, 2012.

____ **NBR 10908. Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização**. ABNT, Rio de Janeiro, 2008.

____ **NBR 11768. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** ABNT, Rio de Janeiro, 2011.

____ **NBR 12655. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

____ **NBR NM 45. Agregados - Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios.** ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

____ **NBR NM 52. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** ABNT, Rio de Janeiro, 2009.

____ **NBR NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** ABNT, Rio de Janeiro, 1998.

____ **NBR, NM. 248. Agregados-Determinação da composição granulométrica.** ABNT, Rio de Janeiro, 2003.

BANDEIRA, J. L. S. **Desempenho de concreto saturado e não saturado executado com cimento ARI RS 52,5 MPa, com e sem adições, frente ao ataque de cloretos.** Dissertação de mestrado em engenharia oceânica, Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2015.

BAGHERI, A.; ZANGANEH, H.; ALIZADEH, H.; SHAKERINIA, M.; MARIAN, M. A. S. Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash. **Construction and building materials**, v. 47, p. 1402-1408, 2013.

BARDELLA, P. S.; BARBOSA, D. C.; CAMARINI, G. Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alto Forno com Utilização de Sílica Ativa. **1º encontro nacional de pesquisa projeto produção em concreto pré-moldado**, p. 1-12, 2005.

BROOMFIELD, John P. **Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair.** CRC Press, 2003.

BUILD, Nord Test. 443. **Concrete, hardened: accelerated chloride penetration.** 1995.

BUILD, Nord Test. 492. **Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.** 1999.

CARDOSO, B. H.; MANCIO, M. Avaliação da taxa de penetração de íons cloreto em concretos produzidos a partir de cimento cp-iv e cp-v com e sem sílica ativa. **Anais do congresso brasileiro de patologia das construções – CBPAT.** 2016.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON – CEB. **Bulletin D’Information, n. 183: Durable concrete structures.** CEB - FIP model code 1990 design code Lausanne, 1992. 112 p.

COSTA, António; APPLETON, Júlio. Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, v. 46, p. 3-13, 2007.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion.** 2. ed. New York: Oxford University Press, 1975. 414p.

CRAUSS, Camila. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial.** Dissertação de Mestrado em engenharia civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2010.

CUNHA, ICARO. Desenvolvimento sustentável na costa brasileira. **Revista Galega de Economia**, v. 14, n. 1-2, p. 1-14, 2005.

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

DEHGHAN, A.; PETERSON, K.; RIEHM, G.; BROMERCHENKEL, L.H. Application of X-ray microfluorescence for the determination of chloride diffusion coefficients in concrete chloride penetration experiments. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 85-95, 2017.

DIAB, Ahmed M.; ELYAMANY, Hafez E.; ELMOTY, Abd Elmoty M. Abd. Effect of mix proportions, seawater curing medium and applied voltages on corrosion resistance of concrete incorporating mineral admixtures. **Alexandria Engineering Journal**, v. 50, n. 1, p. 65-78, 2011.

DOTTO, M. R. J. **Boletim Técnico Cimento Itambé**. Agosto de 2012.

ELFMARKOVA, V.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Determination of the chloride diffusion coefficient in blended cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 190-199, 2015.

FARAHANI, Atiye; TAGHADDOS, Hosein; SHEKARCHI, Mohammad. Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 10-17, 2015.

FANTON, Tássia. **Proposta de método de ensaio acelerado para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos na condição saturada**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2017.

FEDUMENTI, Mariana Battisti. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto**. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio do Sinos. São Leopoldo, 2013.

FIGUEIREDO, C. P.; SANTOS, F.B.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CACHIM, P.; VELOSA, A. The role of metakaolin in the protection of concrete against the deleterious action of chlorides. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, p. 685-708, 2014.

FIGUEIREDO, Enio Pazini. **Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto**. In: Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações. Geraldo Isaia (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2005.

Figueiredo, Enio Pazini; Meira, Gibson. **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto**. Boletim Técnico 6 – Corrosão das armaduras, ALCONPAT Internacional. Mérida - México, 2013.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. São Paulo, Pini, 2008.

GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. Grau de saturação do concreto: um importante fator na difusão de cloretos. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, No. 2, p.55-64, Maio, 2001.

GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. 267 p. Tese Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 2000.

Gjorv, O. E. Durability of concrete structures. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 36: 151-172, 2011.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo, oficina de textos, 2015.

GJØRV, O. E.; VENNESLAND, Ø. Diffusion of chloride ions from seawater into concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 9, n. 2, p. 229-238, 1979.

GUIGNONE, G. C.; VIEIRA, G. L.; ZULCÃO, R.; MION, G.; BAPTISTA, G. Analysis of the chloride diffusion coefficients by different test methods in concrete mixtures containing metakaolin and high-slag blast-furnace cement. **Matéria** (Rio de Janeiro), vol. 24, no. 4, 2019.

HALL, C. Water sortivity of mortars and concretes: a review. **Magazine of concrete Research**, v. 41, n.147, p. 51-61, 1989.

HASHOLT, Marianne Tange; JENSEN, Ole Mejlhede. Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 290-297, 2015.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Pini, 1992.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese de doutorado em engenharia da construção civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993. 231 p.

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

HELENE, P. R. L.; GUIGONE, G.; VIEIRA, G.; RONCETTI, L.; MORONI, F. Evaluation of the chloride penetration and life cycle of the self-healing concretes activated by crystalline admixture. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 3, 2018.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. In **IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções**. Anais. Porto Alegre, RS, 1997.

HISADA, H.; NAGATAKI, S.; OTSUKI, N. Evaluation os mineral admixture on the viewpoint of chloride íon migration through mortar. **Cement e concrete composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 21, p. 443-448, 1999.

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

International Organization for Standardization, ISO/WD 1920-11 - **Testing of Concrete - part 11: Determination of the Chloride Resistance of Concrete, Unidirectional Diffusion**. 2013.

ISAIA, G. C.; HELENE, P. R. L. Durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas. **Anais Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto**, Porto Alegre, RS, p. 13-33, 1993.

JINPING, Chen; XUESONG, Zhang. The Study on the Durability of the Concrete Structure. In: **2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment**. 2010.

KESSY, J. G.; ALEXANDER, M. G.; BEUSHAUSEN, H. Concrete durability standards: International trends and the South African context. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 57, n. 1, p. 47-58, 2015.

LOPES, AN de M. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa**. Tese de doutorado em engenharia civil, Universidade de Brasília. Brasília, p. 190, 1999.

- MEDEIROS JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista Alconpat**, v. 4, n. 2, p. 116-132, 2014.
- MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1, p. 773-808, 2011.
- MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloreto**. Tese de Doutorado em engenharia civil. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V.; RICHTER, K.; SOUZA, W.B.; KLEIN, N.S. Ensaio de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 8, n. 2, 2014.
- MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; RÉUS, G.C.; HELENE, P.R.L. Influência da altura e posição da edificação na penetração de cloretos: Estudo de caso em obra no Rio de Janeiro-Brasil. **CINPAR, VI congresso internacional sobre patología y recuperación de estructuras**. Córdoba, 2010.
- MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J.A.; HELENE, P.R.L. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 1, 2013.
- MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, Paulo. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. **Construction and building materials**, v. 23, n. 3, p. 1476-1484, 2009.
- MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambient. constr.**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 125-139, Dec. 2017.
- MEHTA, Povindar K. **Concrete in the marine environment**. University of California at Berkeley. USA, 2005.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo JM; CARMONA FILHO, Antônio. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, Pini, 1994.

MEIRA, Gibson Rocha. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. Tese de doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**. João Pessoa: IFBP, 2017.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; VILAR, E.O.; NERY, K.D. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. **Construction and building materials**, v. 55, p. 289,298, 2014.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2004.

MITTRI, S. H. M. **Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2016.

NEPOMUCENO, Antônio Alberto. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatación ya la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras**. Estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion. Universidad Politecnica. Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1992.

NEPOMUCENO, Antônio Alberto. Mecanismos de transporte de fluidos no concreto. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ed. G. C. Isaia. V. 2 p. 793-827, IBRACON. São Paulo, 2005.

NEVILLE, Adam M. Good reinforced concrete in the Arabian Gulf. **Materials and structures**, v. 33, n. 10, p. 655-664, 2000.

NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Bookman Editora, 2013.

NILSSON, L., NGO, M. H., GJØRV, O. E. (1998). High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg. In **Second international conference on concrete under severe conditions: environment and loading** (Vol. 2, pp. 1193-1198).

NORMA ESPANHOLA, **UNE 83987: Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido**. Método multiregimen. Espanha, 2012.

OLLIVIER, Jean-Pierre; TORRENTI, Jean-Michel. **La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert**. La durabilité des bétons, v. 1, 2008.

OSSORIO, Anile; LORENZO, Raydel. Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro. **Revista Facultad de Ingeniería**, n. 72, p. 161-172, 2014.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and concrete research**, v. 11, n. 3, p. 395-406, 1981.

PEREIRA, E.; RESENDE, A.; MEDEIROS, M.H.F.; MENEGHETTI, L.C. Chloride accelerated test: influence of silica fume, water/binder ratio and concrete cover thickness. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 6, n. 4, p. 561-581, 2013.

PEREIRA, Valéria Gomes Álvares. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PINTO, S. D. A. **Correlações entre ensaios de penetração de cloretos e análise da influência do uso de sílica ativa na durabilidade do concreto armado**. Dissertação, Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia. Salvador - BA, 2016.

PINTO, S. A., RIBEIRO, D. V., MACHADO, S.L. Influência do teor de argamassa nos parâmetros de transporte de concretos submetidos ao ensaio de migração de íons cloro. **3º Encontro Luso Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado**. São Paulo, 2018.

POSSAN, Edna, 2004. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RASHETNIA, R.; DOUSTI, A.; AHMADI, B.; KHATAMI, D.; SHEKARCHI, M. Effect of natural zeolite and silica fume as a pozzolanic materials on the chloride diffusion of concrete. In: **Proc., Int. Congress on durability of concrete**, 2012.

REAL, Sofia; BOGAS, José Alexandre. Chloride ingress into structural lightweight aggregate concrete in real marine environment. **Marine Structures**, v. 61, p. 170-187, 2018.

RIBEIRO, Daniel Vêras. **Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto**. In: Ribeiro, D. V. (org.). Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

RIBEIRO, Daniel Vêras; CASCUDO, Oswaldo. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. In: Ribeiro, D. V. (org.). Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

RIBEIRO, Daniel Vêras; LABRINCHA, João Antonio; MORELLI, Márcio Raymundo. Chloride diffusivity in red mud-ordinary Portland cement concrete determined by migration tests. **Materials Research**, v. 14, n. 2, p. 227-234, 2011.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Analysis of chloride diffusivity in concrete containing red mud. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 137-152, 2012.

A

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, 42 (1), p. 124-133, 2012. B

- ROMANO, Fátima Sequeira. **Estudo do Ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul**. Dissertação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2009.
- ROSTAM, S. Reinforced concrete structures—shall concrete remain the dominating means of corrosion prevention?. **Materials and Corrosion**, v. 54, n. 6, p. 369-378, 2003.
- SACIOTO, Adriano Pedroso. **Comportamento Frente à Ação de Cloretos de Concretos Compostos com Adições Minerais Submetidos a Diferentes Períodos de Cura**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 179p. Santa Maria, 2005.
- SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2006.
- SHEKARCHI, Mohammad; RAFIEE, Alireza; LAYSSI, Hamed. Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 769-775, 2009.
- SILVA, Fernanda Giannotti da. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese de Doutorado em ciência dos materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.
- SONG, Ha-Won; LEE, Chang-Hong; ANN, Ki Yong. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 2, p. 113-121, 2008.
- SOUSA, Carlos A. **Princípios da corrosão eletroquímica**. In: Ribeiro, D. V. (org.). Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- SOUSA, F.; CASTRO, P. V.; QUINTANILHA, L.; MONTEL, A.; REINALDO, R. Estudo da vida útil de estruturas de concreto armado utilizando modelo de difusão diante a ação de íons cloreto. **Desafios**, v. 5, n. Especial, p. 161-168, 31 out. 2018.

STANICH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review**. University of Toronto. 2000.

THOMAS, Michael; BREMNER, Theodore. Performance of lightweight aggregate concrete containing slag after 25 years in a harsh marine environment. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 2, p. 358-364, 2012.

TONG, L.; GJØRV, O. E. Chloride diffusivity based on migration testing. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 7, p. 973-982, 2001.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

VAN DER TOORN, A. **The maintenance of civil engineering structures**. Heron, v. 39, n. 4, p.3-34, 1992.

VALIPOUR, M.; PARGAR, F.; SHEKARCHI, M.; KHANI, S. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 879-888, 2013.

VENTURA, B. Perepérez; ORTEGA, E. Barbera; ANDRADE, Carmen. La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón. **Informes de la Construcción**, v. 38, n. 388, p. 17-24, 1987.

WEISHEIT, S.; UNTERBERGER, S. H.; BADER, T.; LACKNER, R. Assessment of test methods for characterizing the hydrophobic nature of surface-treated high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 145-153, 2016.

WU, L.; ZHOU, Y.; KOU, X.; JIANG, M. Reliability-based service life prediction of existing concrete structures under marine environment. **Journal of Central South University**, v. 22, n. 9, p. 3608-3614, 2015.

- YOUM, K.; MOON, J.; CHO, J.; KIM, J. J. Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 517-527, 2016.
- ZHANG, Tiewei; GJØRV, Odd E. An electrochemical method for accelerated testing of chloride diffusivity in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 8, p. 1534-1548, 1994.
- ZHANG, Tiewei; GJØRV, Odd E. Effect of chloride source concentration on chloride diffusivity in concrete. **ACI materials journal**, v. 102, n. 5, p. 295, 2005.
- ZHUO, Zhao; FENG, Xing; DAWANG, Li. Stochastic durability analysis of pre-stressed concrete structure under marine environment. In: **2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering**. IEEE, 2010. p. 765-767.

APÊNDICE A

APÊNDICE A – Tabelas e Figuras de dados obtidos no desenvolvimento da pesquisa.

Tabela A. 1 – Resultados obtidos ensaio de absorção de água por capilaridade.

REF 45												
Amostra	S (área) (cm ²)	ms (g)	msat (g)					Abs. de água por cap. (g/cm ²)				
			3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h
1	78,54	3500	3522	3530	3554	3568	3580	0,28	0,38	0,69	0,87	1,02
2	78,54	3532	3552	3558	3578	3592	3606	0,25	0,33	0,59	0,76	0,94
3	78,54	3538	3558	3564	3582	3596	3606	0,25	0,33	0,56	0,74	0,87
Média								0,26	0,35	0,61	0,79	0,94
SA 5												
Amostra	S (cm ²)	ms (g)	msat (g)					Abs. de água por cap. (g/cm ²)				
			3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h
1	78,54	3542	3558	3564	3586	3600	3610	0,20	0,28	0,56	0,74	0,87
2	78,54	3546	3574	3584	3610	3626	3636	0,36	0,48	0,81	1,02	1,15
3	78,54	3530	3552	3560	3584	3598	3610	0,28	0,38	0,69	0,87	1,02
Média								0,28	0,38	0,69	0,87	1,01
SA 10												
Amostra	S (cm ²)	ms (g)	msat (g)					Abs. de água por cap. (g/cm ²)				
			3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h
1	78,54	3440	3462	3470	3496	3514	3524	0,28	0,38	0,71	0,94	1,07
2	78,54	3492	3512	3522	3556	3576	3588	0,25	0,38	0,81	1,07	1,22
3	78,54	3484	3504	3510	3532	3546	3558	0,25	0,33	0,61	0,79	0,94
Média								0,26	0,36	0,71	0,93	1,08
SA 20												
Amostra	S (cm ²)	ms (g)	msat (g)					Abs. de água por cap. (g/cm ²)				
			3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h
1	78,54	3464	3492	3502	3528	3548	3562	0,36	0,48	0,81	1,07	1,25
2	78,54	3494	3520	3528	3552	3568	3580	0,33	0,43	0,74	0,94	1,09
3	78,54	3480	3500	3506	3522	3532	3544	0,25	0,33	0,53	0,66	0,81
Média								0,31	0,42	0,70	0,89	1,05

Tabela A. 1 - Continuação

REF 55													
Amostra	S (cm ²)	ms (g)	msat: (g)					Abs. de água por cap. (g/cm ²)					
			3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h	
1	78,54	3468	3492	3500	3526	3544	3558	0,31	0,41	0,74	0,97	1,15	
2	78,54	3458	3476	3482	3504	3524	3538	0,23	0,31	0,59	0,84	1,02	
3	78,54	3496	3514	3520	3546	3566	3578	0,23	0,31	0,64	0,89	1,04	
Média								0,25	0,34	0,65	0,90	1,07	
REF 65													
Amostra	S (cm ²)	ms (g)	msat (g)					Abs. de água por cap. (g/cm ²)					
			3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h	
1	78,54	3414	3440	3450	3480	3504	3520	0,33	0,46	0,84	1,15	1,35	
2	78,54	3432	3462	3470	3502	3522	3540	0,38	0,48	0,89	1,15	1,38	
3	78,54	3454	3482	3492	3524	3546	3564	0,36	0,48	0,89	1,17	1,40	
Média								0,36	0,48	0,87	1,15	1,38	

Notas: msat= massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante o período de tempo especificado;

ms= massa do corpo de prova seco;

S= área da seção transversal.

Tabela A. 2 – Concentração de cloretos em massa para os concretos estudados em relação a profundidade analisada.

Ponto	REF 45		SA 5		SA 10	
	Prof. (mm)	Conc. Clor. (% massa)	Prof. (mm)	Conc. Clor. (% massa)	Prof. (mm)	Conc. Clor. (% massa)
P1	1,00	1,270	1,00	1,133	1,00	1,160
P2	4,00	0,850	3,50	1,007	3,50	0,798
P3	8,00	0,340	6,50	0,581	6,50	0,415
P4	12,00	0,240	9,50	0,215	9,50	0,151
P5	16,00	0,130	12,50	0,171	12,50	0,084
P6	20,00	0,090	15,50	0,049	15,50	0,076
P7			18,50	0,018	18,50	0,050

Ponto	SA 20		REF 55		REF 65	
	Prof. (mm)	Conc. Clor. (% massa)	Prof. (mm)	Conc. Clor. (% massa)	Prof. (mm)	Conc. Clor. (% massa)
P1	1,00	1,049	1,00	1,39	1,00	1,632
P2	3,50	0,902	4,00	1,25	3,50	1,347
P3	6,50	0,279	8,00	0,9	6,50	1,262
P4	9,50	0,133	12,00	0,51	9,50	0,931
P5	12,50	0,106	16,00	0,22	12,50	0,654
P6	15,50	0,044			15,50	0,594
P7	18,50	0,037			18,50	0,453

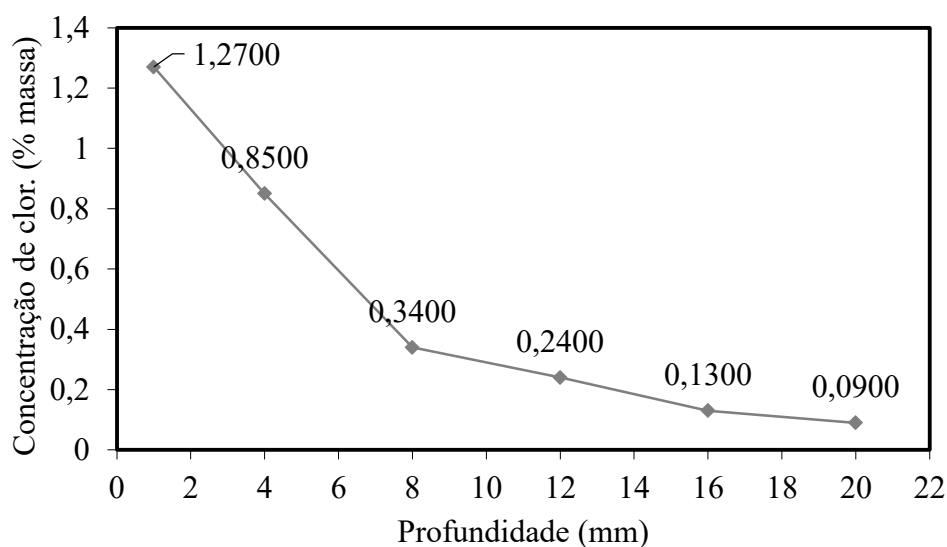


Figura A. 1 – Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço REF 45.

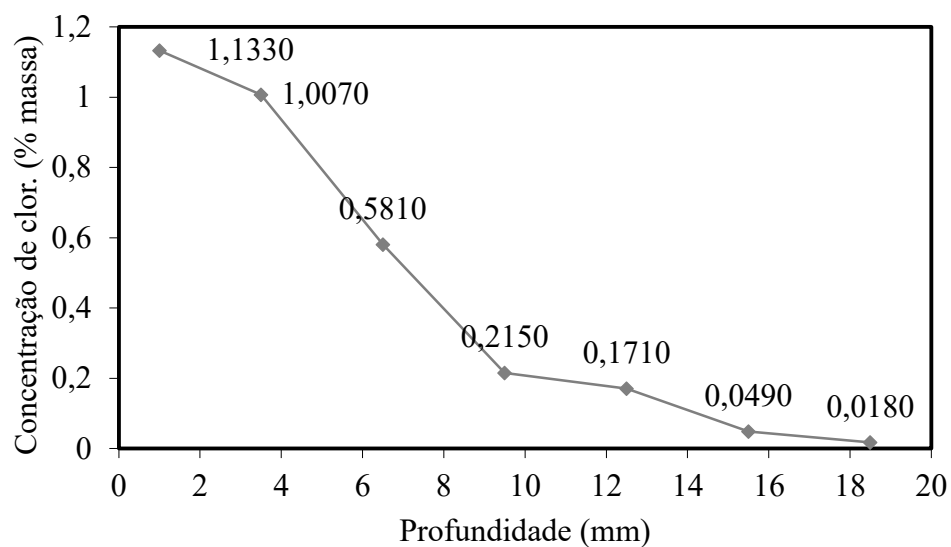


Figura A. 2 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço SA 5.

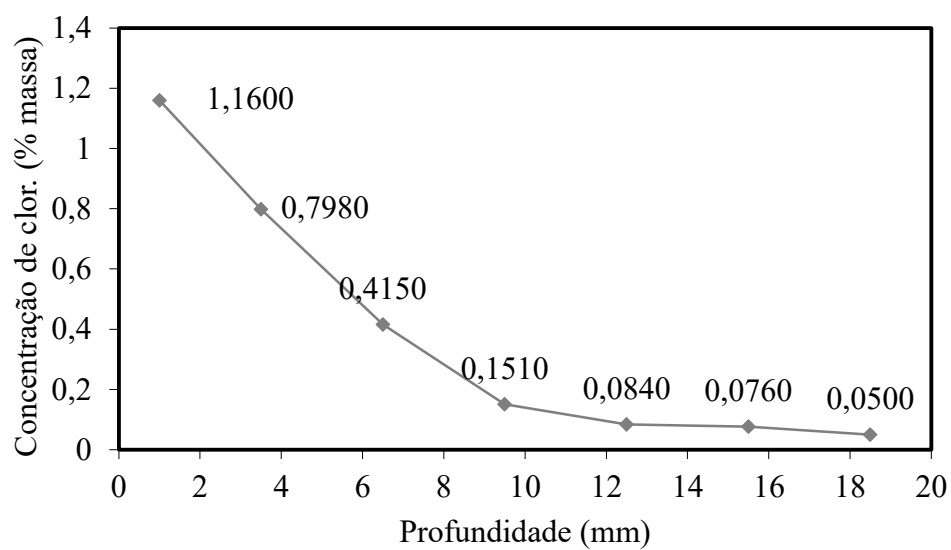


Figura A. 3 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço SA 10.

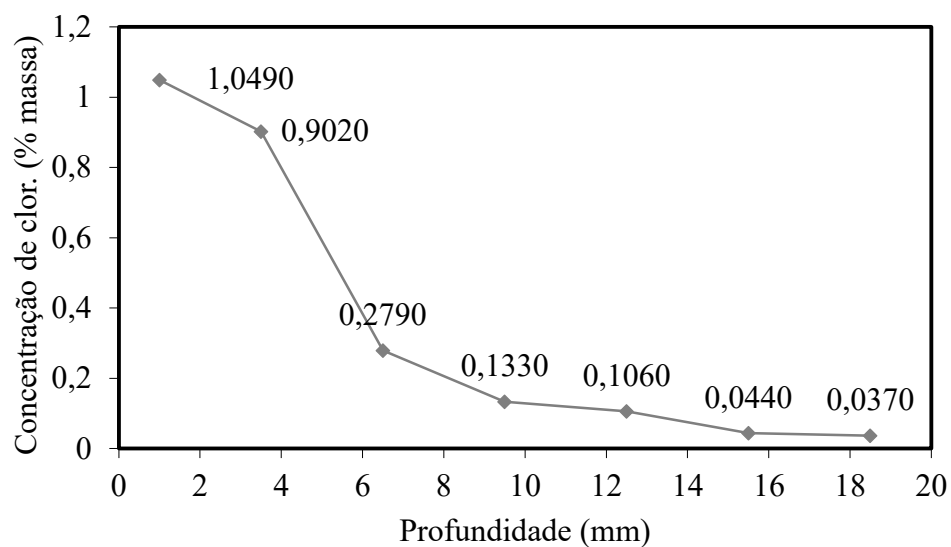


Figura A. 4 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço SA 20.

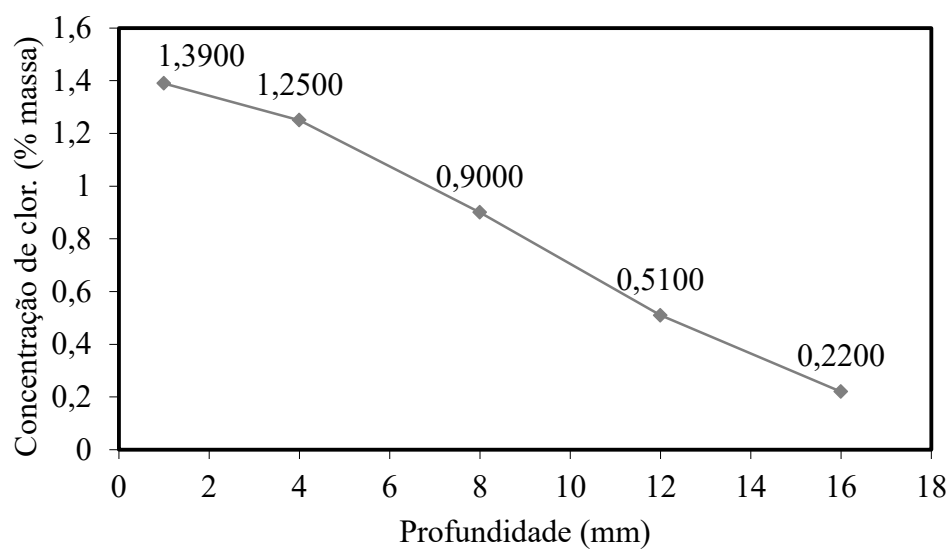


Figura A. 5 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço REF 55.

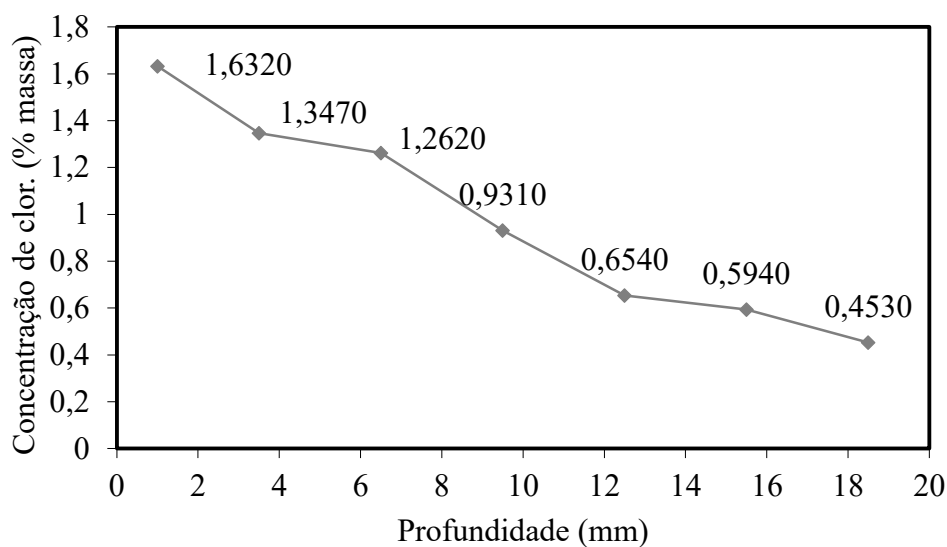


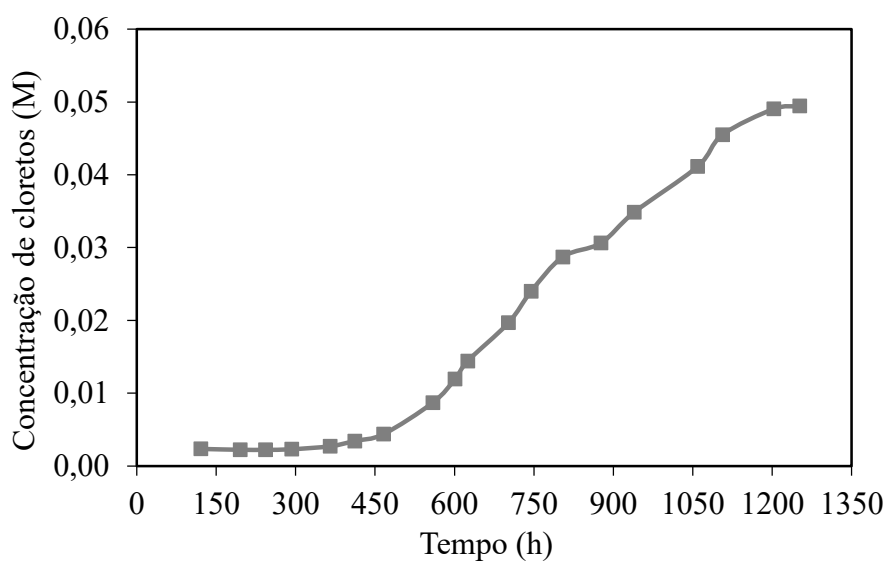
Figura A. 6 - Perfil de cloretos para ensaio ASTM C1556, Traço REF 65.

Tabela A. 3 – Dados obtidos na realização do ensaio da NT Build 492 (1999).

Concreto	U (Voltagem aplicada, V)	Temperaturas (°C)			Xd (profundidades de penetração (mm))					Duração teste (h)
		M. Inicial	M. Final	Média	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média	
REF 45	50	23,30	23,90	23,60	11,25	7,36	13,33	10,43	10,59	24
SA 5	60	19,50	24,50	22,00	15,32	13,99	16,63	-	15,31	48
SA 10	60	19,50	21,80	20,65	8,97	8,28	7,42	-	8,22	48
SA 20	60	22,50	24,20	23,35	4,20	4,83	1,20	3,93	3,54	96
REF 55	40	21,80	24,00	22,90	15,03	13,06	-	-	14,05	24
REF 65	40	21,50	24,40	22,95	19,09	17,24	15,13	18,48	17,49	24

Tabela A. 4 – Concentração de cloretos *versus* tempo.

REF 45		SA 5		SA 10		REF 55		REF 65	
Tempo (h)	Conc. Clor. (M)	Tempo (h)	Conc. Clor. (M)	Tempo (h)	Conc. Clor. (M)	Tempo (h)	Conc. Clor. (M)	Tempo (h)	Conc. Clor. (M)
121	0,0024	73	0,0013	73	0,0006	167	0,0021	167	0,0022
195	0,0022	143	0,0016	143	0,0007	242	0,0022	242	0,0031
243	0,0022	192	0,0021	192	0,0008	289	0,0023	289	0,0048
293	0,0023	244	0,0029	244	0,0010	339	0,0029	339	0,0090
365	0,0027	340	0,0030	340	0,0014	411	0,0049	411	0,0189
412	0,0034	409	0,0069	409	0,0018	458	0,0077	458	0,0285
466	0,0044	503	0,0102	503	0,0030	512	0,0110	512	0,0391
559	0,0087	576	0,0124	576	0,0043	606	0,0256	606	0,0593
601	0,0119	652	0,0151	652	0,0063	647	0,0299	647	0,0627
625	0,0144	817	0,0224	817	0,0125	671	0,0351	671	0,0682
702	0,0197	866	0,0263	866	0,0149	748	0,0447	748	0,0704
745	0,0240	988	0,0325	988	0,0226	791	0,0484		
804	0,0287	1084	0,0396	1084	0,0278	851	0,0598		
876	0,0306	1156	0,0428	1156	0,0311	923	0,0655		
939	0,0348	1252	0,0478	1252	0,0351	986	0,0691		
1059	0,0411	1319	0,0505	1319	0,0378				
1106	0,0455								
1203	0,0490								
1252	0,0494								

Figura A. 7 – Gráfico concentração de cloretos *versus* tempo, UNE 83987, traço REF 45.

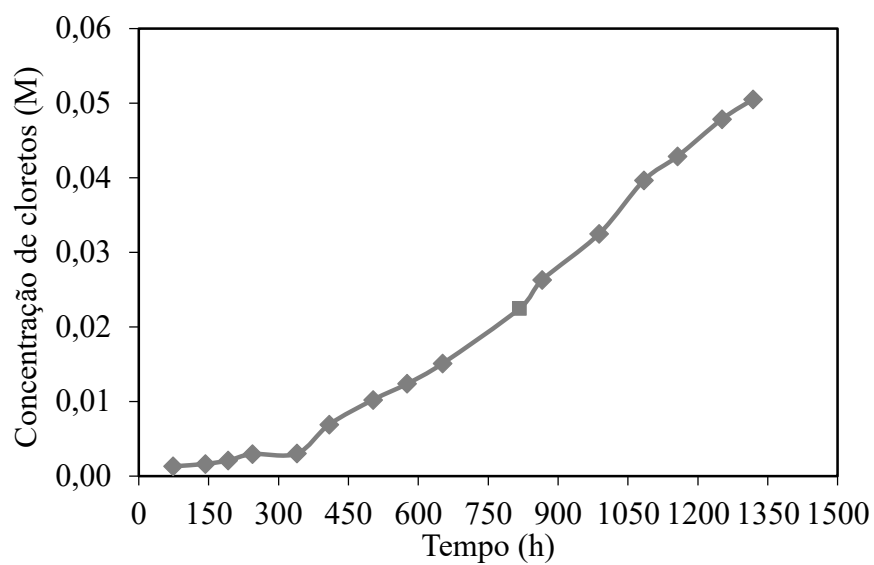


Figura A. 8 - Gráfico concentração de cloretos *versus* tempo, UNE 83987, traço SA 5.

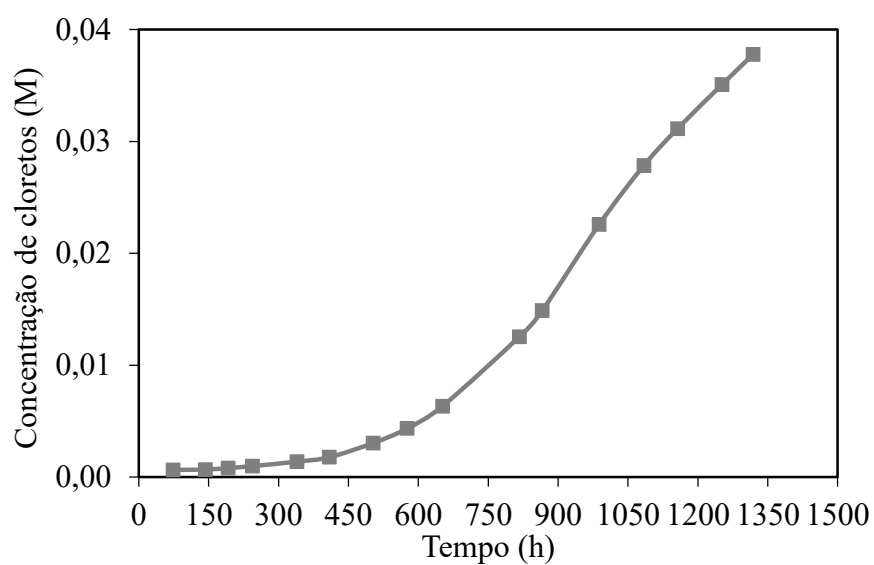


Figura A. 9 - Gráfico concentração de cloretos *versus* tempo, UNE 83987, traço SA 10.

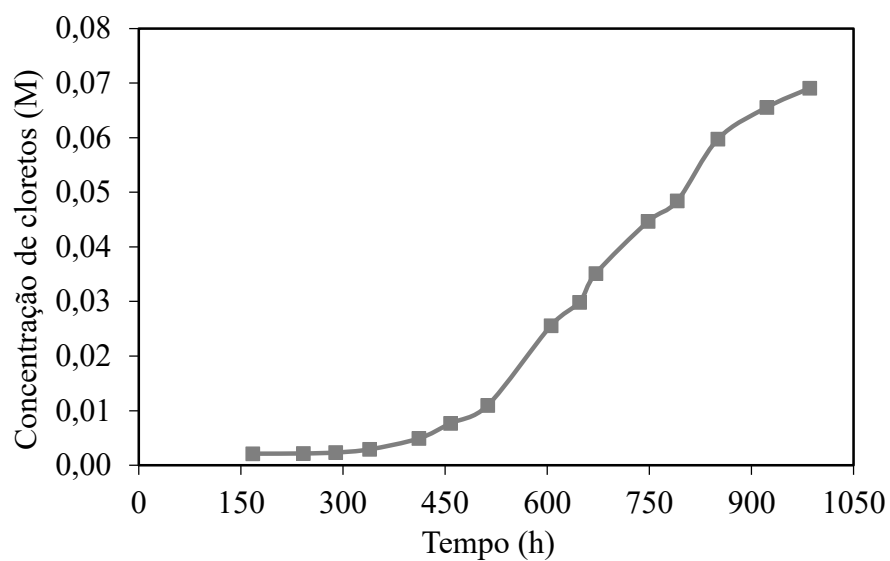


Figura A. 10 - Gráfico concentração de cloretos *versus* tempo, UNE 83987, traço REF 55.

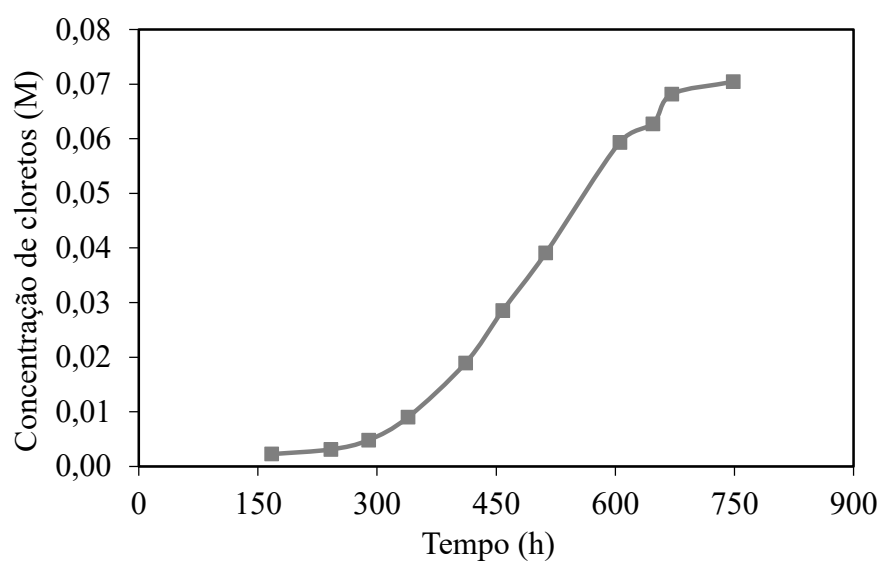


Figura A. 11 - Gráfico concentração de cloretos *versus* tempo, UNE 83987, traço REF 65.

Tabela A. 5 – Dados utilizados para determinação do coeficiente de difusão no estado estacionário.

(Ds)					
Parâmetros	REF 45	SA 5	SA 10	REF 55	REF 65
J_{cl} (fluxo de íons, mol/s.cm ² x 10 ⁻¹⁰)	4,37	3,32	2,88	6,01	9,53
R (constante universal dos gases)	1,9872 cal/mol.K				
T (temperatura de realização do ensaio)	293,15 K				
l (espessura do corpo de prova)	3 cm				
z (valência dos íons)	1				
F (constante de Faraday)	23063 cal/volt				
C_{cl} (concentração de íons cloreto na célula catódica)	0,001 mol/cm ³				
γ (coeficiente de atividade da solução da célula catódica)	0,657				
$\Delta\Phi$ (tensão média que efetivamente atravessa o corpo de prova) - Ds	6 V				

Tabela A. 6 – Dados utilizados para determinar o Fluxo de ions (J_{cl}) para coeficiente de difusão no estado estacionário (Ds).

Parâmetros	REF 45	SA 5	SA 10	REF 55	REF 65
V (volume da célula catódica contendo cloretos)	1500 cm ³				
A (área da seção do corpo de prova exposta)	78,54 cm ²				
dc/dt (inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos versus tempo, Mol/s x 10 ⁻¹¹)	2,29	1,74	1,51	3,15	4,99

Tabela A. 7 – Dados utilizados para determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário (Dns).

Parâmetros	REF 45	SA 5	SA 10	REF 55	REF 65
l (espessura do corpo de prova)	3 cm				
τ (<i>time lag</i> , s)	1674000	1746000	2106000	1476000	1134000
z (valência dos íons)	1				
e (carga elétron)	$1,6 \times 10^{-19}$ C				
$\Delta\Phi$ (tensão média que efetivamente atravessa o corpo de prova) - Dns	12 V				
K (constante de Boltzmann)	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K				
T (temperatura de realização do ensaio)	294,15 K				